

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Cleber Eduardo Fernandes Leal

**ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS DE CONCRETO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE ARGAMASSAS,
GRAUTES E PRISMAS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS**

São Carlos
2023

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Cleber Eduardo Fernandes Leal

**ALVENARIA ESTRUTURAL COM BLOCOS DE CONCRETO:
PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS DE ARGAMASSAS,
GRAUTES E PRISMAS SUBMETIDOS A ALTAS TEMPERATURAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Guilherme Aris Parsekian

Coorientador: Armando Lopes Moreno Jr.

São Carlos
2023

FOLHA DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado do candidato Cleber Eduardo Fernandes Leal, realizada em 06/10/2023.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Profa. Dra. Gisleiva Cristina dos Santos Ferreira (UNICAMP)

Prof. Dr. Alex Sander Clemente de Souza (UFSCar)

Prof. Dr. Gihad Mohamad (UFSM)

Prof. Dr. Mauro de Vasconcellos Real (UFRGS)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

À minha família, minha maior riqueza.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por ter me fortalecido diante de cada desafio e por permitir a conclusão desta importante etapa de minha formação.

Agradeço aos meus pais Eduardo e Sônia por todo o amor, incentivo, cuidado e fortalecimento diante das adversidades. Que Deus me conceda a capacidade de retribuir uma pequena parcela de todo o esforço e privações que tiveram em prol de minha educação. Amo vocês!

À minha noiva, Lais Tofaneli por dividir comigo a vida, por ser meio apoio e sempre incentivar a minha evolução. Amo você!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian por todos os ensinamentos e apoio prestado durante minha pesquisa. Serei sempre grato pela oportunidade que me deu de conhecer pessoalmente profissionais e educadores de excelência no meio técnico. Também lhe agradeço pelo estabelecimento das parcerias com empresas que engrandeceram nosso estudo.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Júnior por toda a ajuda, paciência e contribuições nas discussões e decisões acerca de nosso estudo.

À empresa Glasser Pisos e Pré-Moldados Ltda e seus representantes Luciano e Eduardo Lima pela doação dos blocos de concreto e fornecimento de informações específicas de seu processo produtivo, de grande valia ao desenvolvimento de minha tese.

À Votorantim Cimentos e seu representante Vicente Bueno Verdiani pela doação de cimento, cal, argamassas de assentamento industrializadas de 5 e 10 MPa, essenciais ao meu programa experimental.

À empresa Argafácil de Descalvado-SP e seu representante Matheus de Lima de Carvalho pelo fornecimento da argamassa industrializada 20 MPa, fundamental em meu trabalho.

À construtora FA Oliva e seu representante Vicente Souza pelo auxílio financeiro ao meu programa experimental.

À empresa Baya Engenharia e seus representantes Fábio e Adrielle pelo serviço de montagem dos prismas de minha pesquisa.

À coordenação do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFSCar (PPGECiv) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e fomento à minha pesquisa.

À professora Fernanda Giannotti pela disponibilização do Laboratório de Materiais e Componentes da UFSCar (LMC/UFSCar).

Ao técnico José Roberto (LMC/UFSCar) pela amizade valiosa e por todos os ensinamentos. Aprendi com você a executar um ensaio com todo o rigor, seriedade e comprometimento que demanda uma pesquisa experimental. Jamais esquecerei de nossas conversas e brincadeiras que tornavam os momentos de dificuldade muito mais fáceis.

Ao técnico Ricardo Canato do Laboratório de Sistemas Estruturais da UFSCar (LSE/UFSCar) também por me ensinar noções valiosas de instrumentação e funcionamento de equipamentos dentro de um laboratório.

Aos amigos que fiz em São Carlos: André Maebara, Brighel Noronha, Gustavo Sipp. Em especial ao Jadson Barbosa, Fagner Kochem e Wallison Medeiros. Sou muito grato pela ajuda de vocês em meu doutorado, pela hospitalidade em suas casas e pelos bons momentos que compartilhamos. Que venham muitos mais!

À coordenação do Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e o Laboratório de Estruturas (LES) da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (FEC/UNICAMP).

Aos técnicos dos laboratórios de Materiais e de Estruturas da FEC/UNICAMP. Em especial ao Luciano Passos, José Luís, André, Hélio, Ademir, Edimir, Fábio, Marcelo e Jaqueline. Muito obrigado pela maneira como me acolheram em Campinas. Minha maior lembrança será de nossas conversas durante os cafés e a forma como estiveram sempre prontos para pensar juntos comigo e me ajudar solucionar os desafios à medida que surgiam.

À Profa. Dra. Gisleiva Ferreira e todos os seus alunos bolsistas Henrique, Marcele, Fernanda, Bruna, Pedro, Daniele, Ramón, Isabella e Larissa pelo grande auxílio durante a preparação e execução de meus ensaios. Agradeço também à Marcela Sollero e, especialmente, ao Tiago Padilha, Wesley, Everton, André e Marinara. Sem o suporte diário e a companhia de todos vocês eu não teria chegado até aqui.

*“O insucesso é apenas uma oportunidade para
recomeçar com mais inteligência.”*

(Henry Ford)

RESUMO

LEAL, Cleber E. F. **Alvenaria estrutural com blocos de concreto: propriedades mecânicas residuais de argamassas, grautes e prismas submetidos a altas temperaturas**. 2023. 382 f. Tese de doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2023.

O estudo da alvenaria estrutural sob altas temperaturas ainda é incipiente no âmbito nacional. Mesmo internacionalmente, pouco se sabe sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos componentes da alvenaria quando superaquecidos. Na ausência de norma brasileira específica, diretrizes estrangeiras são adotadas pelo meio técnico para verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio. Contudo, sua aplicabilidade é questionável, visto que os materiais brasileiros possuem características diferentes no que diz respeito à geometria e composição, além das práticas construtivas associadas. Não bastasse estas diferenças, a maioria dos procedimentos de cálculo/verificação internacionais são fundamentados em testes de paredes em escala real que, devido à falta de laboratórios convenientemente equipados, ainda não são viáveis em nosso país. Com isso, uma abordagem mais factível seria a correlação entre resultados de ensaios, sob elevadas temperaturas, de modelos menores (blocos, prismas, pequenas paredes) e modelos maiores (paredes em tamanho natural), semelhante ao que é feito para temperatura ambiente. Nesse sentido, esta pesquisa objetivou determinar o comportamento mecânico residual de argamassas de assentamento, grautes e prismas com dois blocos de concreto. Não existe procedimento nacional, ou mesmo internacional, para avaliações desta natureza em prismas de alvenaria estrutural. O método empregado correspondeu à uma adaptação do proposto por Medeiros, Parsekian e Moreno Jr. (2022) para uso das curvas RILEM TC 200-HTC:2007 em blocos estruturais de concreto. Foram produzidos argamassas com cal (convencionais), sem cal (industrializadas) e de três classes de resistência (5, 10 e 20 MPa); grautes com 15, 25 e 35 MPa; prismas com dois blocos vazados de concreto, não revestidos, variando resistência de bloco (6, 12, e 24 MPa), composição e resistência da argamassa de assentamento. Todos os materiais foram submetidos à baixas taxas de aquecimento (4°C/min para argamassas e 1°C/min para demais) até atingirem 200, 400, 600 e 800°C; mantidos por uma hora nas respectivas temperaturas; e resfriados nas mesmas taxas até temperaturas próximas à ambiente. Após o resfriamento, os valores residuais de resistência à compressão e módulo de deformação secante foram obtidos via ensaios destrutivos. Dos resultados, notou-se que a cal interferiu significativamente na degradação das argamassas, sobretudo após os 400°C. A reidratação do aglomerante gerou expansão, fissuração e maiores reduções nas misturas convencionais. Mesmo com pequenas quantidades de cal, os grautes exibiram comportamento compatível com curvas normativas residuais para concretos convencionais (ACI/TMS 216-1:2014, EN 1992-1-2: Eurocode2: 2004) e extraídas da literatura. O confinamento da junta de argamassa gerou o adiamento na degradação das propriedades mecânicas dos prismas. A fissuração observada nos exemplares de argamassa não ocorreu nas juntas dos prismas, independentemente do tipo de argamassa e temperatura de exposição. Os resultados de prisma foram semelhantes aos de blocos testados por Medeiros (2022). Em todos os materiais testados, o módulo secante decresceu precocemente em comparação à resistência de compressão. Após 800°C, o valor da propriedade tornou-se desprezível. Como contribuição, curvas normalizadas de degradação das propriedades mecânicas foram propostas para cada material investigado.

Palavras-chave: Alvenaria estrutural. Altas temperaturas. Propriedades mecânicas. Resistência residual. Análise experimental.

ABSTRACT

LEAL, Cleber E. F. **Structural masonry with concrete units: residual mechanical properties of mortars, grouts and prisms submitted to high temperatures**. 2023. 382 p. Doctoral thesis (Doctorate in Civil Engineering) – Federal University of São Carlos. São Carlos, 2023.

The study of structural masonry under high temperatures is still initial in Brazil. Even internationally, little is known about the thermal and mechanical properties of masonry components when overheated. In the absence of a specific Brazilian standard, foreign guidelines are adopted by the technical community to check structural masonry in fire situations. However, its applicability is questionable, given that Brazilian materials have different characteristics of geometry and composition, in addition to the associated construction practices. Despite these differences, most international design/verification procedures are based on full-scale wall tests which, due to the lack of conveniently equipped laboratories, are not yet viable in our country. Therefore, a more feasible approach would be the correlation between test results, under high temperatures, of smaller models (blocks, prisms, small walls) and larger models (full-size walls), like what is done at room temperature. For that matter, this research aimed to determine the residual mechanical behavior of laying mortars, grouts, and prisms with two concrete blocks. There is no national, or even international, procedure for assessments of this nature in structural masonry prisms. The method used corresponded to an adaptation of that proposed by Medeiros, Parsekian and Moreno Jr. (2022) for the use of RILEM TC 200-HTC:2007 curves in structural concrete blocks. Were produced mortars with lime (conventional), lime-free (industrialized) and from three resistance classes (5, 10 and 20 MPa); grouts with 15, 25 and 35 MPa; prisms with two hollow and uncoated concrete blocks, varying block strength (6, 12, and 24 MPa), composition and strength of the laying mortar. All materials were subjected to low heating rates (4°C/min for mortars and 1°C/min for others) until they reached 200, 400, 600 and 800°C; kept for one hour at the respective temperatures; and cooled at the same rates to temperatures close to ambient. After cooling, the residual values of compressive strength and secant deformation modulus were obtained via destructive tests. The results showed that lime significantly interfered with the degradation of the mortars, especially after 400°C. The rehydration of the binder led to expansion, cracking, and greater reductions in the ordinary mixtures. Even with small amounts of lime, the grouts exhibited behavior consistent with residual normative curves for ordinary concretes (ACI/TMS 216-1:2014, EN 1992-1-2: Eurocode2: 2004) and those extracted from the literature. The confinement of the mortar joint led to a delay in the degradation of the prisms' mechanical properties. The cracking observed in the mortar specimens did not occur in the prism joints, regardless of the type of mortar and exposure temperature. The prism results were consistent with those of the blocks tested by Medeiros (2022). For all the materials tested, the drying modulus decreased early compared to the compressive strength. After 800°C, the property value became negligible. As a contribution, normalized mechanical property degradation curves were proposed for each material investigated.

Keywords: Structural masonry. High temperatures. Mechanical properties. Residual strength. Testing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Tetraedro do fogo.....	37
Figura 2.2 – Fases de um incêndio real.	41
Figura 2.3 – Representação do modelo de duas zonas.	44
Figura 2.4 – Pasta de cimento após diferentes temperaturas: a) 30°C; b) 500°C; 1000°C.	54
Figura 2.5 – Microestrutura da argamassa: a) superfície do cristal de Ca(OH) ₂ em 105°C; b) após 500°C.	55
Figura 2.6 – Argamassa de referência à base de cal: a) após 400°C; b) após 600°C; após 800°C.	57
Figura 2.7 – Lançamento manual do graute na alvenaria.....	66
Figura 2.8 – Aplicações do graute na alvenaria estrutural: a) encontro entre paredes; b) cinta de amarração; c) verga sob janela; d) pilastra incorporada.....	67
Figura 2.9 – Avaliação do grauteamento em prismas cerâmicos: a) tipologia dos prismas estudados; b) argamassamento total.....	70
Figura 2.10 – Tipos de blocos para investigação da aderência bloco-graute.	73
Figura 2.11 – Fissuração após submissão do graute às temperaturas de: a) 300 °C; b) 400 °C; c) 600 °C.....	75
Figura 2.12 – Alterações na microestrutura do concreto devido às altas temperaturas.....	76
Figura 2.13 – Ampliação das fissuras no concreto durante reidratação da cal.....	77
Figura 2.14 – Análise da microestrutura via MEV para concretos submetidos a altas temperaturas: a) acículas de etringita; b) fraturas no agregado de quartzo; c) portlandita.....	78
Figura 2.15 – Agregados utilizados por Sollero (2021): a) granito; b) basalto; c) calcário.	82
Figura 2.16 – Taxa de aquecimento do forno utilizado.	89
Figura 2.17 – Microestrutura do bloco de concreto com aumento de 15 vezes.	93
Figura 2.18 – Fabricação de blocos vazados de concreto pelo processo de vibrocompressão.	95
Figura 2.19 – Agregados utilizados por Leal <i>et al.</i> (2022b): a) basalto; b) gnaisse; c) calcário.	96
Figura 2.20 – Geometrias analisadas para as unidades.	99
Figura 2.21 – Tipologias analisadas para os prismas.	100
Figura 2.22 – Resistências médias à compressão dos componentes e na área bruta de cada geometria de prisma.	100

Figura 2.23 – Tensões nos modelos de prisma: a) prisma de dois blocos com restrição nas extremidades; b) prisma de dois blocos sem atrito.	101
Figura 2.24 – Efeito da altura dos prismas na tensão máxima de compressão.....	101
Figura 2.25 – Efeito de confinamento dos pratos.	102
Figura 2.26 – Formas de tratamento de superfície avaliadas.	103
Figura 2.27 – Perda de aderência no topo das juntas.....	105
Figura 2.28 – Estado de tensões na alvenaria estrutural.....	107
Figura 2.29 – Ruptura em prismas com dois blocos de concreto: a) argamassamento parcial; b) argamassamento total.	108
Figura 2.30 – Formas de ruptura admitidas para os prismas em ensaios de compressão.....	108
Figura 2.31 – Relação entre resistência à compressão residual em temperatura ambiente para cada temperatura de ensaio dos blocos.	109
Figura 2.32 – Relação entre módulo de elasticidade residual em temperatura ambiente para cada temperatura de ensaio dos blocos.....	110
Figura 2.33 – Agregados utilizados por Medeiros <i>et al.</i> (2023): a) gnaisse; b) basalto; c) calcário.	111
Figura 2.34 – Meio bloco de concreto testado por Daware <i>et al.</i> (2023).....	112
Figura 2.35 – Relações entre resultados de resistência à compressão com altas temperaturas e temperatura ambiente (referência), em corpos de prova aquecidos e duas semanas após o resfriamento.	113
Figura 2.36 – Condição dos blocos de concreto após o aquecimento: a) blocos de 4 MPa; b) blocos 10 MPa.....	114
Figura 2.37 – Geometria dos blocos de concreto testados.	115
Figura 2.38 – Curvatura em direção ao fogo.	117
Figura 2.39 – Vinculação da parede: a) uma extremidade apoiada; b) apoio nas duas extremidades.....	127
Figura 2.40 – Isotermas na seção transversal de uma parede de compartimentação em alvenaria.	131
Figura 2.41 – Diferença entre geometrias: a) bloco vazado de concreto do Reino Unido; b) bloco de concreto do brasileiro; c) bloco cerâmico europeu; d) bloco cerâmico brasileiro.	134
Figura 2.42 – Edifício para estudo de caso: a) planta baixa; b) corte esquemático.....	136
Figura 3.1 – Etapas do programa experimental.....	142
Figura 3.2 – Aglomerantes dentro de sacos plásticos e sobre paletes de madeira.	144

Figura 3.3 – Caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:	146
Figura 3.4 – Curvas granulométricas das areias de britagem utilizadas na produção dos blocos.	146
Figura 3.5 – Curva granulométrica do pedrisco utilizado na produção dos blocos.....	147
Figura 3.6 – Caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:	149
Figura 3.7 – Ensaio de caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:.....	150
Figura 3.8 – Caracterização dos agregados utilizados na produção dos grautes e argamassas de assentamento: a) disposição sobre placas de fibrocimento; b) proteção com lona plástica; c) preparo para transporte até São Carlos-SP.	152
Figura 3.9 – Curva granulométrica da areia média.	152
Figura 3.10 – Curva granulométrica do pedrisco dos grautes.	153
Figura 3.11 – Ensaio de caracterização dos agregados para grautes e argamassas de assentamento:.....	154
Figura 3.12 – Areia média: a) no estado saturado superfície seca; b) após secagem em estufa.	157
Figura 3.13 – Teste de aplicação de argamassa durante os ensaios de consistência no LMC da UFSCar.....	157
Figura 3.14 – Moldagem e ensaios no estado fresco de argamassas e grautes para teste de agregados:.....	159
Figura 3.15 – Escolha de uma nova areia: a) primeira areia na pilha; b) aspecto quando manuseada; c) segunda areia na pilha; d) aspecto quando manuseada; e) areia escolhida; f) areia escolhida manuseada.	162
Figura 3.16 – Peneiramento da areia branca: a) peneira utilizada; b) medição de abertura; c) inserção na peneira; d) areia peneirada à esquerda e material retido à direita. .	162
Figura 3.17 – Curvas granulométricas da areia branca com e sem peneiramento.....	163
Figura 3.18 – Ensaio de caracterização da areia branca utilizadas na produção das argamassas e grautes: a) quarteamento areia branca peneirada; b) granulometria areia branca sem peneiramento; c) densidade areia branca peneirada; d) massa unitária areia branca peneirada; e) material passante na peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) para areia branca sem peneiramento; f) teor de argila em torrões e materiais friáveis para areia branca sem peneiramento.....	165

Figura 3.19 – Ensaio no estado fresco e endurecido para testes de argamassas com a areia branca:	170
Figura 3.20 – Ensaio no estado fresco e endurecido para testes de grautes com a areia branca:	171
Figura 3.21 – Vibroprensa utilizada na produção dos blocos: a) máquina visão frontal; b) misturadores; c) preenchimento do carrinho; d) saída dos blocos moldados....	173
Figura 3.22 – Entrega, no LES da UNICAMP, dos blocos utilizados na pesquisa: a) descarregamento; b) blocos acomodados e protegidos com lona; c) amostra separada para transporte até a UFSCar; d) blocos acomodados no LSE da UFSCar.	175
Figura 3.23 – Análise dimensional dos blocos: a) largura em bloco 6 MPa; altura em bloco 12 MPa; comprimento em bloco 24 MPa	177
Figura 3.24 – Análise dimensional dos blocos: a) espessura parede longitudinal A; b) espessura parede longitudinal B; c) espessura parede transversal borda A; d) espessura parede transversal central; e) comprimento do furo; f) largura do furo; g) marcação; h) raio de mísulas.....	178
Figura 3.25 – Ensaio de absorção de água e determinação de área líquida: a) secagem em estufa a $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$; b) blocos imersos para saturação; c) pesagem bloco submerso; d) pesagem bloco saturado.	180
Figura 3.26 – Capeamento do bloco com placas de forro de fibra mineral.....	181
Figura 3.27 – Ensaio de resistência à compressão nos blocos de concreto: a) centralização do bloco na placa de ensaio; b) bloco centralizado; c) início de ensaio; d) final do ensaio.....	182
Figura 3.28 – Argamassas de assentamento industrializadas: a) 5 MPa; b) 10 MPa; c) 20 MPa.	184
Figura 3.29 – Procedimento de mistura das argamassas utilizadas nesta pesquisa.	185
Figura 3.30 – Procedimento de mistura dos grautes utilizados nesta pesquisa.	186
Figura 3.31 – Mistura dos grautes: a) pesagem do cimento Portland CII F32; b) materiais pesados; c) inserção da areia branca sem peneiramento durante a mistura.	186
Figura 3.32 – Ensaio de argamassas e grautes no estado fresco: a) índice de consistência AC5; densidade de massa AC10; c) retenção de água AI10; d) abatimento em tronco de cone G25; e) medida abatimento G25; f) medição da temperatura e umidade relativa.....	187

Figura 3.33 – Moldagem e cura de argamassas e grautes: a) adensamento em molde cúbico de argamassa; b) mesa automatizada para adensamento de argamassas; c) preenchimento de molde prismático com argamassa; d) adensamento corpos de prova cilíndricos de graute; e) corpos de prova de argamassa vedados com plástico filme; f) retirada de excesso de desmoldante; g) corpos de prova de graute vedados com plástico filme; h) cura das argamassas sobre bancada; i) cura submersa dos grautes.	190
Figura 3.34 – Retificação das superfícies de aplicação de carga: a) em argamassas; b) em grautes.	192
Figura 3.35 – Execução dos ensaios de caracterização de argamassas no estado endurecido: a) compressão cilindro; b) módulo de deformação; c) tração por compressão diametral; d) tração na flexão e compressão das metades resultantes; e) compressão cubo aresta 40 mm; f) absorção de água, vazios e massa específica.	194
Figura 3.36 – Execução dos ensaios de caracterização de grautes no estado endurecido: a) conferência dimensional; b) resistência à compressão; c) módulo de deformação; d) tração por compressão diametral; e) absorção de água, vazios e massa específica.	195
Figura 3.37 – Moldagens corpos de prova cilíndricos 1:3 para ensaios de altas temperaturas: a) corpos de prova de argamassas durante cura; b) adensamento de grautes em mesa vibratória; c) moldes de graute vedados com plástico filme; d) cura dos corpos de prova de graute dentro do laboratório.	198
Figura 3.38 – Procedimento de mistura das argamassas de assentamento dos prismas.	200
Figura 3.39 – Assentamento dos prismas com blocos de concreto: a) mistura das argamassas; b) determinação da consistência; c) conferência espessura de junta; d) conferência de prumo; e) pano úmido sobre argamassa; f) prismas moldados.	201
Figura 3.40 – Forno mufla empregado nas queimas de argamassas e grautes: a) visão frontal do forno; b) controlador digital; c) interior do forno em temperatura ambiente; d) resistências aquecidas.	203
Figura 3.41 – Forno horizontal usado na queima dos prismas: a) especificações do forno; b) metade deslizante e interior do forno; c) painel com controladores digitais das três zonas; d) software para gerenciamento do processo.	204
Figura 3.42 – Dispositivo para transporte dos prismas: a) inserção dos prismas; b) travamento.	205

Figura 3.43 – Regimes de aquecimento: a) para argamassas; b) para grautes e prismas.	206
Figura 3.44 – Queima das argamassas: a) posicionamento dos termopares e corpos de prova; b) corpos de prova antes da queima; c) perda da identificação visual com a queima; d) pesagem após resfriamento; e) aquisição.....	207
Figura 3.45 – Queima dos grautes e prismas: a) corpos de prova de graute no forno mufla; b) pesagem graute pós queima; c) prismas inseridos no forno; c) termopares nos furos dos blocos; e) aquisição.....	208
Figura 3.46 – Determinação das propriedades residuais em argamassas: a) retificação na UNICAMP antes das queimas; b) acabamento fino com lixa; c) conferência da ortogonalidade; d) secagem ao sol; e) temperatura segura ao tato em segurança; f) resistência à compressão; g) módulo de deformação; h) espécime após a ruptura.	211
Figura 3.47 – Determinação das propriedades residuais em grautes: a) pesagem pós queima; b) resistência à compressão; c) módulo de deformação; d) espécime rompido. ...	213
Figura 3.48 – Determinação das propriedades residuais em prismas: a) prisma após queima de 600°C; b) pesagem pós queima; c) resistência à compressão; d) registro da força em toneladas pela prensa; e) módulo de deformação; f) prisma rompido.	214
Figura 4.1 – Propriedades residuais das argamassas de assentamento convencionais: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	238
Figura 4.2 – Relações residuais para argamassas de assentamento convencionais: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	239
Figura 4.3 – Fissuração das argamassas convencionais após 600°C: a) AC5; b) AC10; c) AC20.	239
Figura 4.4 – Fissuração das argamassas convencionais após 800°C: a) AC10; b) AC20.....	240
Figura 4.5 – Argamassas AC5 e AC10 aquecidas a 600°C: a) corpos de prova de AC5 íntegros após trinta minutos de manutenção da temperatura de interesse; b) início da fissuração nos corpos de prova de AC10.	240
Figura 4.6 – Propriedades residuais das argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	242
Figura 4.7 – Relações residuais das argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	242
Figura 4.8 – Ausência de fissuração durante resfriamento das argamassas industrializadas submetidas a 600°C: a) AI10; b) AI20.....	243

Figura 4.9 – Resultado do teste de normalidade para valores de resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.	244
Figura 4.10 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.	245
Figura 4.11 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.....	245
Figura 4.12 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação secante das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.	247
Figura 4.13 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa na resistência das argamassas em temperatura ambiente: a) ANOVA AC5 – AI5; b) Tukey AC5 – AI5; c) ANOVA AC10 – AI10; d) Tukey AC10 – AI10; e) ANOVA AC20 – AI20; f) Tukey AC20 – AI20.....	247
Figura 4.14 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa no módulo de deformação secante das argamassas em temperatura ambiente: a) ANOVA AC5 – AI5; b) Tukey AC5 – AI5; c) ANOVA AC10 – AI10; d) Tukey AC10 – AI10; e) ANOVA AC20 – AI20; f) Tukey AC20 – AI20.....	248
Figura 4.15 – Propriedades residuais dos grautes: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	250
Figura 4.16 – Relações residuais para os grautes: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.	250
Figura 4.17 – Resultado do teste de normalidade para valores de resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.....	251
Figura 4.18 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.....	252
Figura 4.19 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.	252
Figura 4.20 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.	253
Figura 4.21 – Comparação entre relações residuais de resistência à compressão dos grautes desta pesquisa e curvas normativas.....	254
Figura 4.22 – Comparação entre as relações residuais de resistência à compressão dos grautes desta pesquisa e resultados de outros pesquisadores.....	254

Figura 4.23 – Comparação entre relações residuais para módulo de deformação secante dos grautes desta pesquisa e resultados de outros pesquisadores.	255
Figura 4.24 – Propriedades residuais dos prismas com argamassas convencionais de assentamento: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante; c) relações residuais para resistência; d) relações residuais para o módulo de deformação.	257
Figura 4.25 – Propriedades residuais dos prismas com argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante; c) relações residuais para resistência; d) relações residuais para o módulo de deformação.	258
Figura 4.26 – Comparação entre relações residuais para resistência à compressão de corpos de prova de argamassas e de prismas assentados com tais argamassas: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.	259
Figura 4.27 – Comparação entre relações residuais para módulo de deformação secante de corpos de prova de argamassas e de prismas assentados com tais argamassas: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.	260
Figura 4.28 – Degradação da argamassa moldada em cilindros e disposta na junta dos prismas após 600°C: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.	261
Figura 4.29 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão dos prismas: a) B6AC5; b) B12AC10; c) B24AC20; d) B6AI5; e) B12AI10; f) B24AI20.	263
Figura 4.30 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura e resistência à compressão dos prismas: a) B6 AC5; b) B12 AC10; c) B24 AC20; d) B6 AI5; e) B12 AI10; f) B24 AI20.	264
Figura 4.31 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação secante dos prismas: a) B6 AC5; b) B12 AC10; c) B24 AC20; d) B6 AI5; e) B12 AI10; f) B24 AI20.	265
Figura 4.32 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa na resistência dos prismas em temperatura ambiente: a) ANOVA B6AC5 – B6AI5; b) Tukey B6AC5 – B6AI5; c) ANOVA B12AC10 – B12AI10; d) Tukey B12AC10 – AI10; e) ANOVA B24AC20 – B24AI20; f) Tukey B24AC20 – B24AI20.	265
Figura 4.33 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa no módulo de deformação dos prismas em temperatura ambiente: a) ANOVA	

B6AC5 – B6AI5; b) Tukey B6AC5 – B6AI5; c) ANOVA B12AC10 – B12AI10; d) Tukey B12AC10 – AI10; e) ANOVA B24AC20 – B24AI20; f) Tukey B24AC20 – B24AI20.....	266
Figura 4.34 – Comparação entre relações residuais para resistência à compressão de blocos produzidos com concreto silicoso e prismas desta tese assentados com: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.	267
Figura 4.35 – Comparação entre relações residuais para o módulo de deformação secante de blocos produzidos com concreto silicoso e prismas desta tese assentados com: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.	268
Figura 4.36 – Propostas de curvas normativas: a) para resistência à compressão; b) para módulo de deformação secante.	271
Figura 6.1 – Boletim técnico: cimento CP V ARI utilizado na fabricação dos blocos.	294
Figura 6.2 – Boletim técnico: aditivo utilizado na fabricação dos blocos.....	295
Figura 6.3 – Boletim técnico: cimento CP II F32 utilizado nas argamassas e grautes.....	296
Figura 6.4 – Boletim técnico: cal hidratada utilizada nas argamassas e grautes.	297
Figura 7.1 – Blocos 6 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.	298
Figura 7.2 – Blocos 12 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.	299
Figura 7.3 – Blocos 24 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.	300

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 – Condições de resfriamento e recura após queima.	56
Quadro 2.2 – Alterações na composição/microestrutura de argamassas aquecidas segundo diversos autores.	64
Quadro 2.3 – Resistência ao fogo para alvenarias segundo Instrução Técnica N° 08/2019.	122
Quadro 2.4 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (em minutos).	123
Quadro 2.5 – Estudo de caso: características da edificação.	136
Quadro 2.6 – Verificação segundo diferentes normas.	136
Quadro 3.1 – Ensaio de caracterização dos agregados.	145
Quadro 3.2 – Classificação dos blocos vazados de concreto	179
Quadro 3.3 – Espessuras mínimas de paredes para blocos vazados de concreto segundo ABNT NBR 6136:2016.	179
Quadro 3.4 – Caracterização dos grautes e das argamassas no estado fresco.	187
Quadro 3.5 – Caracterização de argamassas e grautes no estado endurecido.	193
Quadro 3.6 – Combinações de prismas moldados.	199
Quadro 4.1 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas convencionais ensaiadas aos 28 dias.	229
Quadro 4.2 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas industrializadas ensaiadas aos 28 dias.	230
Quadro 4.3 – Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias para argamassas convencionais extraídas durante moldagem dos prismas.	231
Quadro 4.4 – Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias para argamassas industrializadas extraídas durante moldagem dos prismas.	232
Quadro 4.5 – Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas convencionais extraídas durante assentamento dos prismas.	233
Quadro 4.6 – Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas industrializadas extraídas durante assentamento dos prismas.	234
Quadro 4.7 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas convencionais ensaiadas na época da queima dos prismas.	235
Quadro 4.8 – Resultados de resistência à tração na flexão na época de queima dos prismas para argamassas convencionais extraídas durante moldagem dos prismas.	236
Quadro 4.9 – Resultados de resistência à tração na flexão na época de queima dos prismas para argamassas industrializadas extraídas durante moldagem dos prismas.	236

Quadro 4.10 – Resistência à compressão na época de queima para argamassas convencionais extraídas durante assentamento dos prismas.	236
Quadro 4.11 – Resistência à compressão na época de queima para argamassas industrializadas extraídas durante assentamento dos prismas.	237
Quadro 8.1 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional.	301
Quadro 8.2 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).	301
Quadro 8.3 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação B).	302
Quadro 8.4 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).	302
Quadro 8.5 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).	303
Quadro 8.6 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional.	303
Quadro 8.7 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).	304
Quadro 8.8 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação B).	304
Quadro 8.9 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).	305
Quadro 8.10 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).	305
Quadro 8.11 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional.	306
Quadro 8.12 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).	306
Quadro 8.13 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional conforme (continuação B).	307
Quadro 8.14 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).	307
Quadro 8.15 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).	308
Quadro 8.16 – Bloco 06 MPa: umidade relativa.	308
Quadro 8.17 – Bloco 06 MPa: absorção de água e área líquida.	308
Quadro 8.18 – Bloco 06 MPa: resistência à compressão.	309
Quadro 8.19 – Bloco 12 MPa: umidade relativa.	309
Quadro 8.20 – Bloco 12 MPa: absorção de água e área líquida.	309
Quadro 8.21 – Bloco 12 MPa: resistência à compressão.	309
Quadro 8.22 – Bloco 24 MPa: umidade relativa.	310
Quadro 8.23 – Bloco 24 MPa: absorção de água e área líquida.	310
Quadro 8.24 – Bloco 24 MPa: resistência à compressão.	310

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Temperatura de incêndio ao longo do tempo segundo a ASTM E 119:2018.....	46
Tabela 2.2 – Taxas de aquecimento em função do diâmetro do cilindro.	47
Tabela 2.3 – Porosidade e permeabilidade das argamassas após altas temperaturas.	59
Tabela 2.4 – Relações entre valores residuais e em temperatura ambiente ($k_{c,\theta}$) para resistência a compressão de concretos normais com agregados silicosos e carbonáticos. ...	85
Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento e envolvimento com plástico filme.	87
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento e submersão em água.	87
Tabela 2.7 – Espessuras equivalentes mínimas da parede -Tea (em cm) para atender determinados valores de TRF (em min).	124
Tabela 2.8 – Fator multiplicador da espessura de revestimentos aplicados no lado não exposto ao fogo.	125
Tabela 2.9 – Tempo atribuído aos revestimentos aplicados na face exposta ao fogo.	125
Tabela 2.10 – Índices máximos de esbeltez para o critério de adequação estrutural.	127
Tabela 2.11 – Cobrimentos mínimos para alvenaria armada exposta ao incêndio.	127
Tabela 2.12 – Espessuras mínimas de parede para o critério de isolamento térmica.	128
Tabela 2.13 – Espessuras mínimas: parede REI com blocos de concreto.	130
Tabela 3.1 – Propriedades do Cimento CP V ARI utilizado na fabricação dos blocos.	143
Tabela 3.2 – Propriedades de interesse do aditivo utilizado na fabricação dos blocos.	143
Tabela 3.3 – Massas unitárias da cal e do cimento utilizados nos grautes e argamassas convencionais.	144
Tabela 3.4 – Demais resultados de caracterização das areias de britagem utilizadas nos blocos.	147
Tabela 3.5 – Demais resultados de caracterização do pedrisco utilizado na produção dos blocos.	148
Tabela 3.6 – Demais resultados de caracterização para areia média e pedrisco dos blocos. .	153
Tabela 3.7 – Traços unitários considerados no teste inicial de agregados em argamassas. ...	158
Tabela 3.8 – Traços unitários considerados no teste inicial de agregados em grautes.	158
Tabela 3.9 – Resultados de ensaios no estado fresco para argamassas e grautes de teste.	158
Tabela 3.10 – Resultados médios de ensaios no estado endurecido: argamassas de teste.	160
Tabela 3.11 – Resultados médios de ensaios no estado endurecido: grautes de teste.	161

Tabela 3.12 – Demais resultados de caracterização da areia branca para grautes e arg. de assentamento.	163
Tabela 3.13 – Traços unitários considerados nos testes de argamassas com a areia branca peneirada.	168
Tabela 3.14 – Traços unitários considerados nos testes de grautes com areia branca sem peneiramento.	168
Tabela 3.15 – Resistências à compressão obtidas nos testes de argamassas com a areia branca peneirada.	169
Tabela 3.16 – Resistências à compressão obtidas nos testes de grautes com a areia branca sem peneiramento.	169
Tabela 3.17 – Resultados médios de ensaios no estado fresco para argamassas e grautes testados com a areia branca.	170
Tabela 3.18 – Traços unitários definitivos para argamassas de assentamento convencionais desta pesquisa.	172
Tabela 3.19 – Traços unitários definitivos para grautes desta pesquisa.	172
Tabela 3.20 – Traços em massa (kg) para os blocos de concreto utilizados nesta pesquisa. .	174
Tabela 3.21 – Ensaios de caracterização dos blocos de concreto.	176
Tabela 4.1 – Caracterização dos blocos de concreto: resultados médios da análise dimensional.	216
Tabela 4.2 – Caracterização dos blocos de concreto: valores médios de propriedades físicas e mecânicas.	217
Tabela 4.3 – Resultados da caracterização no estado fresco para as argamassas convencionais.	218
Tabela 4.4 – Resultados da caracterização no estado fresco para as argamassas industrializadas.	218
Tabela 4.5 – Resultados da caracterização no estado fresco para os grautes.	219
Tabela 4.6 – Resultados de caracterização no estado endurecido para as argamassas convencionais.	221
Tabela 4.7 – Resultados de caracterização no estado endurecido para as argamassas industrializadas.	222
Tabela 4.8 – Resultados de caracterização no estado endurecido para os grautes.	223
Tabela 4.9 – Propriedades físicas no estado endurecido para as argamassas convencionais.	225
Tabela 4.10 – Propriedades físicas no estado endurecido para as argamassas industrializadas.	226

Tabela 4.11 – Propriedades físicas no estado endurecido para os grautes.	227
Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas residuais das argamassas de assentamento convencionais.	238
Tabela 4.13 – Propriedades mecânicas residuais das argamassas de assentamento e industrializadas.	241
Tabela 4.14 – Propriedades mecânicas residuais dos grautes.	249
Tabela 4.15 – Propriedades mecânicas residuais dos prismas.	256
Tabela 4.16 – Relações residuais normativas para argamassas de assentamento convencionais e industrializadas.	269
Tabela 4.17 – Relações residuais normativas para grautes convencionais.	270
Tabela 4.18 – Relações residuais normativas para prismas moldados com blocos de 6 a 24 MPa, argamassas de assentamento convencionais e industrializadas de 5 a 20 MPa.	270
Tabela 9.1 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 5.	311
Tabela 9.2 – Resultados residuais AC 5 após 200°C.	312
Tabela 9.3 – Resultados residuais AC 5 após 400°C.	313
Tabela 9.4 – Resultados residuais AC 5 após 600°C.	314
Tabela 9.5 – Resultados residuais AC 5 após repetição 600°C.	314
Tabela 9.6 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 10.	315
Tabela 9.7 – Resultados residuais AC 10 após repetição 200°C.	316
Tabela 9.8 – Resultados residuais AC 10 após repetição 400°C.	317
Tabela 9.9 – Resultados residuais AC 10 após 600°C.	318
Tabela 9.10 – Resultados residuais AC 10 após 800°C.	319
Tabela 9.11 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 20.	320
Tabela 9.12 – Resultados residuais AC 20 após 200°C.	321
Tabela 9.13 – Resultados residuais AC 20 após 400°C.	322
Tabela 9.14 – Resultados residuais AC 20 após 600°C.	323
Tabela 9.15 – Resultados residuais AC 20 após 800°C.	324
Tabela 9.16 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 5.	325
Tabela 9.17 – Resultados residuais AI 5 após 200°C.	326
Tabela 9.18 – Resultados residuais AI 5 após 400°C.	326
Tabela 9.19 – Resultados residuais AI 5 após 600°C.	327
Tabela 9.20 – Resultados residuais AI 5 após 800°C.	328
Tabela 9.21 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 10.	329
Tabela 9.22 – Resultados residuais AI 10 após 200°C.	330

Tabela 9.23 – Resultados residuais AI 10 após 400°C.....	331
Tabela 9.24 – Resultados residuais AI 10 após 600°C.....	332
Tabela 9.25 – Resultados residuais AI 10 após 800°C.....	333
Tabela 9.26 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 20.....	334
Tabela 9.27 – Resultados residuais AI 20 após 200°C.....	335
Tabela 9.28 – Resultados residuais AI 20 após 400°C.....	336
Tabela 9.29 – Resultados residuais AI 20 após 600°C.....	337
Tabela 9.30 – Resultados residuais AI 20 após 800°C.....	338
Tabela 9.31 – Resultados de referência para propriedades residuais G 15.....	339
Tabela 9.32 – Resultados residuais G 15 após 200°C.....	340
Tabela 9.33 – Resultados residuais G 15 após 400°C.....	341
Tabela 9.34 – Resultados residuais G 15 após 600°C.....	342
Tabela 9.35 – Resultados residuais G 15 após 800°C.....	343
Tabela 9.36 – Resultados de referência para propriedades residuais G 25.....	344
Tabela 9.37 – Resultados residuais G 25 após 200°C.....	345
Tabela 9.38 – Resultados residuais G 25 após 400°C.....	346
Tabela 9.39 – Resultados residuais G 25 após 600°C.....	347
Tabela 9.40 – Resultados residuais G 25 após 800°C.....	348
Tabela 9.41 – Resultados de referência para propriedades residuais G 35.....	349
Tabela 9.42 – Resultados residuais G 35 após 200°C.....	350
Tabela 9.43 – Resultados residuais G 35 após 400°C.....	351
Tabela 9.44 – Resultados residuais G 35 após 600°C.....	352
Tabela 9.45 – Resultados residuais G 35 após 800°C.....	353
Tabela 9.46 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B6 AC5.....	354
Tabela 9.47 – Resultados prismas B6 AC5 após 200°C.....	355
Tabela 9.48 – Resultados prismas B6 AC5 após 400°C.....	356
Tabela 9.49 – Resultados prismas B6 AC5 após 600°C.....	357
Tabela 9.50 – Resultados prismas B6 AC5 após 800°C.....	358
Tabela 9.51 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B6 AI5.....	359
Tabela 9.52 – Resultados prismas B6 AI5 após 200°C.....	360
Tabela 9.53 – Resultados prismas B6 AI5 após 400°C.....	361
Tabela 9.54 – Resultados prismas B6 AI5 após 600°C.....	362
Tabela 9.55 – Resultados prismas B6 AI5 após 800°C.....	363

Tabela 9.56 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B12 AC10.	364
Tabela 9.57 – Resultados prismas B12 AC10 após 200°C.	365
Tabela 9.58 – Resultados prismas B12 AC10 após 400°C.	366
Tabela 9.59 – Resultados prismas B12 AC10 após 600°C.	367
Tabela 9.60 – Resultados prismas B12 AC10 após 800°C.	368
Tabela 9.61 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B12 AI10.	369
Tabela 9.62 – Resultados prismas B12 AI10 após 200°C.	369
Tabela 9.63 – Resultados prismas B12 AI10 após 400°C.	370
Tabela 9.64 – Resultados prismas B12 AI10 após 600°C.	371
Tabela 9.65 – Resultados prismas B12 AI10 após 800°C.	372
Tabela 9.66 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B24 AC20.	373
Tabela 9.67 – Resultados prismas B24 AC20 após 200°C.	374
Tabela 9.68 – Resultados prismas B24 AC20 após 400°C.	375
Tabela 9.69 – Resultados prismas B24 AC20 após 600°C.	376
Tabela 9.70 – Resultados prismas B24 AC20 após 800°C.	377
Tabela 9.71 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B24 AI20.	378
Tabela 9.72 – Resultados prismas B24 AI20 após 200°C.	379
Tabela 9.73 – Resultados prismas B24 AI20 após 400°C.	380
Tabela 9.74 – Resultados prismas B24 AI20 após 600°C.	381
Tabela 9.75 – Resultados prismas B24 AI20 após 800°C.	382

SUMÁRIO

FOLHA DE APROVAÇÃO	3
AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE QUADROS	19
LISTA DE TABELAS	21
SUMÁRIO	26
1. INTRODUÇÃO	29
1.1 OBJETIVOS DA TESE	32
1.1.1 Geral.....	32
1.1.2 Específicos.....	32
1.2 JUSTIFICATIVA	33
1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	34
2. ALVENARIA E COMPORTAMENTO SOB ALTAS TEMPERATURAS	35
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	35
2.1.1 Condução.....	35
2.1.2 Convecção	36
2.1.3 Radiação.....	36
2.2 DIFERENÇA ENTRE FOGO E INCÊNDIO	36
2.3 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO	37
2.4 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - TRF	39
2.5 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - TRRF	39
2.6 COMPORTAMENTO DO INCÊNDIO REAL	40
2.7 CURVAS NATURAIS DE INCÊNDIO	42
2.8 CURVAS NOMINAIS DE INCÊNDIO	45
2.8.1 Curva 834-1 (1999).....	45
2.8.2 Curva ASTM E119 (2018)	46
2.8.3 Curva “H” (EN 1991-1-2, 2002)	46
2.9 RECOMENDAÇÕES RILEM TC 200-HTC – PARTES 1 E 2 (2007)	47
2.10 ARGAMASSAS	48
2.10.1 Propriedades relevantes para argamassas de assentamento	48
2.10.2 Composição das argamassas e influência no comportamento da alvenaria.....	49
2.10.3 Argamassas submetidas a altas temperaturas	53
2.10.4 Síntese sobre argamassas	63
2.11 GRAUTES	66
2.11.1 Propriedades relevantes para o graute.....	67
2.11.2 Influência do grauteamento no comportamento da alvenaria	69
2.11.3 Grautes para alvenaria após altas temperaturas.....	74
2.11.4 Comportamento dos concretos após altas temperaturas	75
2.11.5 Síntese sobre grautes	90
2.12 BLOCOS E PRISMAS	92
2.12.1 Composição e processo produtivo dos blocos	92
2.12.2 Influência das unidades no comportamento da alvenaria	97
2.12.3 Outros fatores influentes no comportamento da alvenaria	102
2.12.4 Deformabilidade e modo de ruptura	104

2.12.5 Blocos e prismas sob altas temperaturas.....	108
2.12.6 Síntese sobre blocos e prismas.....	117
2.13 PROJETO DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	120
2.14 NORMAS BRASILEIRAS	121
2.15 ACI/TMS 216.1-14 (CÓDIGO NORTE-AMERICANO)	123
2.16 AS 3700:2018 (NORMA AUSTRALIANA)	126
2.16.1 Adequação estrutural.....	126
2.16.2 Isolação térmica.....	128
2.16.3 Integridade.....	128
2.17 EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005 (CÓDIGO EUROPEU)	129
2.18 APLICABILIDADE DA NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL AO CENÁRIO CONSTRUTIVO BRASILEIRO	133
2.19 DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA NORMA BRASILEIRA	138
2.20 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO À NORMALIZAÇÃO	139
3. PROGRAMA EXPERIMENTAL	141
3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS, AGLOMERANTES E TESTES DE TRAÇO	143
3.1.1 Aglomerantes.....	143
3.1.2 Água de amassamento.....	145
3.1.3 Agregados.....	145
3.1.4 Testes de traço e substituição da areia média.....	156
3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DE ALVENARIA ESTRUTURAL 172	
3.2.1 Fabricação dos blocos de concreto.....	172
3.2.2 Caracterização dos blocos de concreto.....	176
3.2.3 Produção das argamassas de assentamento.....	183
3.2.4 Produção dos grautes.....	185
3.2.5 Argamassas e grautes: ensaios no estado fresco e moldagens para testes no estado endurecido.....	187
3.2.6 Argamassas e grautes: caracterização no estado endurecido.....	192
3.2.7 Argamassas e grautes: moldagens para aquecimento e determinação de propriedades mecânicas residuais.....	197
3.3 ETAPA 3 - MONTAGEM DOS PRISMAS	199
3.4 ETAPA 4 - SUBMISSÃO DAS ARGAMASSAS, GRAUTES E PRISMAS ÀS ALTAS TEMPERATURAS	202
3.5 ETAPA 5 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS: VALORES RESIDUAIS E DE REFERÊNCIA	210
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	216
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DE ALVENARIA ESTRUTURAL	216
4.1.1 Caracterização dos blocos de concreto.....	216
4.1.2 Argamassas e grautes: resultados da caracterização no estado fresco.....	218
4.1.3 Argamassas e grautes: resultados da caracterização no estado endurecido.....	220
4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONTROLE: MONTAGEM DOS PRISMAS	228
4.2.1 Argamassas de assentamento: controle de consistência durante o uso.....	228
4.2.2 Argamassas de assentamento: controle tecnológico de propriedades mecânicas aos 28 dias 231	

4.2.3	Argamassas de assentamento: controle de propriedades mecânicas na idade de aquecimento dos prismas.....	235
4.3	RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS	237
4.3.1	Argamassas	237
4.3.2	Grautes	249
4.3.3	Prismas	255
4.3.4	Proposta de curvas residuais normalizadas	269
5.	<i>CONSIDERAÇÕES FINAIS</i>	272
5.1	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	277
	<i>REFERÊNCIAS</i>	278
6.	<i>ANEXO A – BOLETINS TÉCNICOS</i>	294
7.	<i>ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS PELA FÁBRICA DOS BLOCOS</i>	298
8.	<i>APÊNDICE A – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO</i>	301
	BLOCOS DE CONCRETO: ANÁLISE DIMENSIONAL	301
	BLOCOS DE CONCRETO: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS	308
9.	<i>APÊNDICE B – PROPRIEDADES RESIDUAIS</i>	311
	ARGAMASSAS CONVENCIONAIS	311
	Argamassa convencional 5 MPa – AC 5.....	311
	Argamassa convencional 10 MPa – AC 10.....	315
	Argamassa convencional 20 MPa – AC 20.....	320
	ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS	325
	Argamassa industrializada 5 MPa – AI 5	325
	Argamassa industrializada 10 MPa – AI10	329
	Argamassa industrializada 20 MPa – AI20	334
	GRAUTES	339
	Graute 15 MPa – G 15	339
	Graute 25 MPa – G 25	344
	Graute 35 MPa – G 35	349
	PRISMAS	354
	Prisma B6 AC5	354
	Prisma B6 AI5	359
	Prisma B12 AC10	364
	Prisma B12 AI10	368
	Prisma B24 AC20	372
	Prisma B24 AI20	377

1. INTRODUÇÃO

Edificações multifamiliares em alvenaria estrutural começaram a ser construídas no Brasil durante a década de 1960. Nesse período, poucos engenheiros possuíam expertise para dimensionamento do sistema construtivo. As verificações eram frequentemente realizadas sob consulta de profissionais estrangeiros e balizadas em normativas internacionais, sobretudo norte-americanas. Como consequência, os projetos desenvolvidos apresentavam altas taxas de armadura e de grauteamento das paredes (Parsekian; Medeiros; Sipp, 2018).

Segundo Parsekian, Medeiros e Sipp (2018), as primeiras diretrizes brasileiras para dimensionamento da alvenaria estrutural foram publicadas no final da década de 1980. Desde então, foram revisadas e aprimoradas, incorporando conceitos adquiridos com a experiência das construções nacionais. Em 2020, o meio técnico contou com a publicação da primeira norma unificada para construções em alvenaria com unidades cerâmicas e com unidades de concreto contemplando, em três partes, projeto - parte 1 (ABNT NBR 16868-1:2020), execução e controle de obras - parte 2 (ABNT NBR 16868-2:2020), e métodos de ensaio - parte 3 (ABNT NBR 16868-3:2020).

Nas últimas décadas, o conhecimento técnico relacionado à alvenaria evoluiu consideravelmente após sucessivas discussões sobre as propriedades mecânicas dos componentes, sobre projetos, detalhes construtivos, qualidade no controle e na experimentação. Atualmente, o sistema é largamente empregado em construções brasileiras multifamiliares com intensificação na construção de edifícios altos (acima de 12 pavimentos) (Schankoski; Prudêncio Jr.; Pilar, 2015). Prédios de 8, 15 e até 24 pavimentos são executados em alvenaria, assim como muros de contenção, galpões, piscinas e reservatórios (Parsekian; Medeiros; Sipp, 2018).

De acordo com Hendry, Sinha e Davies (2004), a principal vantagem do sistema construtivo alvenaria estrutural corresponde à capacidade de um mesmo elemento (parede) exercer mais de uma função: estrutural, divisão de ambientes, isolamento térmico e acústico, proteção ao fogo e contra intempéries. Parsekian, Fonseca e Pereira (2016) afirmam que, quando comparada ao concreto armado por exemplo, a alvenaria estrutural pode apresentar vantagens expressivas, com reduções de até 20% nos custos de construção. Tal economia não é endereçada unicamente ao valor dos materiais empregados, mas sobretudo ao conceito de racionalização incorporado. Construções em alvenaria estrutural contam com coordenação

modular e dimensões padronizadas das unidades, reduzindo a necessidade de cortes, improvisações e geração de resíduo; além de integração da estrutura aos sistemas de instalações prediais; uso de elementos pré-moldados como escadas e lajes; controle de qualidade dos componentes e da execução; que juntos tornam o sistema construtivo um dos preferidos em empreendimentos brasileiros de pequeno e médio porte.

Quando uma edificação é acometida por incêndio, o objetivo fundamental é preservar as vidas de seus ocupantes, sejam estes usuários ou bombeiros atuando no combate ao fogo (Silva, 2016; Wendler, 2018). Em seguida, busca-se minimizar os danos ao patrimônio, às construções adjacentes e ao meio ambiente. Desse modo, durante o incêndio, o conjunto da edificação deve manter, por determinado intervalo de tempo, condições satisfatórias de estabilidade estrutural, estanqueidade e isolamento térmica. Segundo Leite, Moreno Júnior e Torres (2016), quando uma mesma parede desempenha mais de uma função, como suportar cargas verticais e promover a divisão entre áreas, essa quase sempre necessita atender aos três primeiros critérios simultaneamente.

No Brasil, construções em concreto armado, madeira, estruturas metálicas e mistas de aço-concreto são verificadas à ação do fogo conforme as normas ABNT NBR 15200:2012, ABNT NBR 7190-1:2022 e ABNT NBR 14323:2013, respectivamente. Até o presente momento, as prescrições nacionais para dimensionamento da alvenaria estrutural se limitam a análises dos esforços em temperatura ambiente. Todavia, prevê-se a elaboração de uma parte 4 na ABNT NBR 16868:2020, destinada a abranger as verificações do projeto estrutural para alvenaria em situação de incêndio e atender à demanda existente no cenário nacional.

Na ausência de norma técnica específica, o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo recomenda em sua Instrução Técnica N° 08/2019 que edificações em alvenaria estrutural sejam verificadas ao incêndio segundo a última versão do Eurocode ou documento similar, desde que reconhecido internacionalmente. Contudo, a aplicação direta de normas estrangeiras aos projetos nacionais é questionável, pois tanto a geometria dos componentes quanto características físicas, químicas e mecânicas dos materiais empregados em território nacional variam em relação aos materiais de outros países.

Além das diferenças mencionadas, destaca-se que a maioria dos procedimentos internacionais para verificação de construções em alvenaria estrutural sob altas temperaturas tem como fundamento resultados de ensaios em paredes de tamanho real, que são onerosos e incompatíveis com a infraestrutura existente na grande maioria dos laboratórios nacionais. Dessa forma, semelhante ao que já é feito para situação de temperatura ambiente, a testagem de elementos reduzidos (ex.: blocos, prismas, pequenas paredes) e o estabelecimento de

correlações com resultados obtidos em paredes de tamanho natural, ambos sob altas temperaturas, configuram uma estratégia viável e com grande potencial de representatividade. Uma vez conhecido, o comportamento mecânico dos elementos sob aquecimento assim como os valores e variações de propriedades físicas relevantes para elevação de temperatura (ex.: condutividade térmica, calor específico) poderão servir de parâmetros para alimentação de modelos matemáticos e simulações computacionais, permitindo a investigação exaustiva de fatores de interesse e a extrapolação das análises a situações de maior complexidade.

Entre os poucos estudos que tratam de elementos e componentes da alvenaria estrutural sob altas temperaturas, observa-se grande variação dos métodos e condições de ensaio. Taxas de aquecimento de 1°C/min (Bamonte; Gambarova; Sciarretta, 2021) até 20°C/min (Bingöl; Gül, 2009) são empregadas. Em alguns trabalhos os corpos de prova são aquecidos sob carga (Yoon *et al.*, 2015), em outros, na ausência total de carregamento (Bittencourt, 2019). As temperaturas máximas exploradas nos estudos e os intervalos entre temperaturas de interesse também variam (ex.: temperaturas de 100°C até 1200°C, com incrementos de 100°C ou temperaturas de 200 a 800°C, crescendo de 200 em 200°C). Para avaliação de argamassas, não há um consenso acerca da geometria dos corpos de prova. Tanto corpos de prova cilíndricos quanto prismáticos são objetos de estudo. O ineditismo desta pesquisa incide sobre o fato de que não há, até o presente momento, procedimento nacional, ou mesmo internacional, para avaliações em prismas de alvenaria estrutural submetidos a altas temperaturas.

Dando continuidade à pesquisa de Medeiros (2022), que avaliou experimentalmente o comportamento pós-altas temperaturas de blocos de concreto para alvenaria estrutural, este estudo estende as análises experimentais às argamassas de assentamento, grautes e prismas de dois blocos, visando compreender melhor como o desempenho mecânico desses elementos e componentes são alterados pelo aquecimento. O método empregado aqui corresponderá, especificamente, a uma adaptação para prismas de duas unidades do que foi proposto por Medeiros, Parsekian e Moreno Jr. (2022) para blocos estruturais de concreto.

1.1 OBJETIVOS DA TESE

1.1.1 GERAL

Determinar o comportamento mecânico de argamassas de assentamento, grautes e prismas de duas unidades para alvenaria estrutural com blocos de concreto, após exposição a altas temperaturas.

1.1.2 ESPECÍFICOS

- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante para argamassas de assentamento com cal (convencionais) e sem cal (industrializadas);
- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante em grautes convencionais para preenchimento em alvenaria estrutural;
- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante em prismas ocos e não revestidos, com dois blocos de concreto;
- ✓ Estabelecer, para as argamassas, grautes e prismas, curvas que relacionam os valores das propriedades mecânicas (módulo de deformação secante e resistência à compressão) residuais com seus valores obtidos em temperatura ambiente;
- ✓ Verificar qual a influência dos fatores temperatura e tipo de argamassa nas propriedades residuais das argamassas, grautes e prismas testados;
- ✓ Propor curvas residuais normalizadas para argamassas, grautes e prismas.

1.2 JUSTIFICATIVA

Estudar o comportamento dos prismas (e de seus componentes: grautes, unidades, argamassas de assentamento) é importante para a alvenaria estrutural pois esses elementos são tomados como referência por normas do Brasil e do mundo quando se deseja estimar a resistência de paredes, promover a aceitação da estrutura, nortear o controle e uso dos materiais nos canteiros de obra. Os prismas estão para a alvenaria assim como o corpo de prova cilíndrico está para o concreto armado. Se comparados aos ensaios de paredes em tamanho natural, os testes em prismas demandam por menor tempo, custo e aparelhamento necessário.

No que se refere às altas temperaturas, o estudo da alvenaria estrutural ainda é incipiente no âmbito nacional. Pouco se sabe sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos componentes da alvenaria quando superaquecidos. Mesmo internacionalmente, em comparação ao concreto armado, às construções metálicas ou construções em madeira, a quantidade de análises experimentais envolvendo alvenaria estrutural sob temperaturas elevadas ainda é escassa, sobretudo de estudos em elementos de tamanho real. Na literatura técnica e internacional, as pesquisas desenvolvidas também apontam para uma grande variabilidade de resultados, relacionada, principalmente, à forte influência do procedimento de ensaio e à complexidade que envolve a montagem, manuseio e instrumentação de elementos compostos como os prismas.

Quando não se conhece o suficiente sobre como se comportam, sob altas temperaturas, os materiais de uso corrente no Brasil, a aplicação pura e simples de normas estrangeiras na verificação ao incêndio das construções brasileiras em alvenaria estrutural pode não produzir métodos seguros. Os componentes da alvenaria disponíveis no País contam com características únicas no que diz respeito à geometria, composição e prática construtiva empregada. Conseqüentemente, espera-se para temperaturas elevadas uma resposta diferente em relação aos materiais produzidos em outros países, o que evidencia a necessidade em se avaliar física, química e mecanicamente os materiais brasileiros.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Esta tese encontra-se subdividida em cinco capítulos. O Capítulo 1 corresponde a uma introdução, apresentando a contextualização geral da pesquisa, quais os seus objetivos e quais pontos justificam a sua realização.

O Capítulo 2 apresenta a revisão da literatura sobre o comportamento da alvenaria estrutural submetida a altas temperaturas. Começa retomando os principais conceitos relacionados a fogo, incêndio e mecanismos de transferência de calor. Em seguida, aborda estudos e resultados obtidos por outros pesquisadores para propriedades físicas, químicas e mecânicas de argamassas de assentamento, concretos e elementos em alvenaria testados após o aquecimento. Ao final, exibe um panorama atual sobre a normalização nacional e internacional relacionada à alvenaria estrutural sob situação de incêndio junto à uma discussão sobre sua aplicabilidade às construções brasileiras e contribuições do presente trabalho ao desenvolvimento da normalização nacional.

O Capítulo 3 é dedicado ao programa experimental da pesquisa. Contempla a metodologia, incluindo a apresentação dos materiais utilizados, o detalhamento dos métodos seguidos e procedimentos adotados para o preparo, execução e análise dos testes desempenhados.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados obtidos durante o programa de ensaios desta pesquisa e as discussões cabíveis, tomadas com base nas análises realizadas e em comparação com os resultados da literatura.

O Capítulo 5 traz as considerações finais do trabalho, exaltando seus principais achados e contribuições, assim como sugestões para sua continuidade em estudos futuros. Logo após, são elencadas as referências utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

Ao final do texto, anexos e apêndices com as seguintes informações complementares ao Programa Experimental deste estudo são apresentados: boletins técnicos de materiais utilizados, resultados de resistência à compressão realizados na fábrica dos blocos de concreto, resultados individuais para caracterização de materiais e componentes, resultados individuais para determinação das propriedades residuais.

2. ALVENARIA E COMPORTAMENTO SOB ALTAS TEMPERATURAS

Apoiado na consulta de publicações nacionais e internacionais, este capítulo começa retomando conceitos relacionados aos mecanismos de transferência de calor, à ocorrência do fogo, à dinâmica do incêndio, ao estabelecimento e padronização de curvas de aquecimento. Em seguida, traz informações acerca do comportamento da alvenaria estrutural sob altas temperaturas, incluindo os efeitos de degradação em seus materiais e componentes. Por fim, são apresentadas as principais diretrizes utilizadas nos cenários nacional e internacional para verificação da alvenaria estrutural sob situação de incêndio; discute-se a aplicabilidade das normas e códigos internacionais às construções brasileiras, e como esta pesquisa pode contribuir com o desenvolvimento da normalização nacional.

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Existem três mecanismos básicos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. Embora a ocorrência dos três processos seja esperada em todo incêndio, um ou outro pode se tornar predominante em determinado estágio de desenvolvimento do fogo ou posição dentro do compartimento incendiado (Drysdale, 2011).

2.1.1 CONDUÇÃO

A condução é o mecanismo de transferência de calor que ocorre em, e através de, materiais sólidos. Nos fluidos, embora aconteça, a condução normalmente é mascarada pelo movimento convectivo. Trata-se de um fator importante para ignição e espalhamento das chamas nos sólidos combustíveis, assim como na verificação de resistência ao fogo em elementos estruturais e elementos de compartimentação (Drysdale, 2011).

Nos materiais bons condutores de calor o mecanismo acontece por meio de interações entre elétrons livres. Por esse motivo, materiais que conduzem bem a eletricidade (ex. metais), quase sempre, conduzem bem o calor. Nos materiais maus condutores de calor, o mecanismo ocorre pela propagação de vibração mecânica entre as moléculas (Buchanan; Abu, 2017).

De acordo com Drysdale (2011), o fluxo de calor por condução em uma direção pode ser expresso pela Equação 2.1.

$$\dot{q}_x'' = \frac{\left(\frac{dq_x}{dt}\right)}{A} = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{Equação 2.1}$$

Onde:

A = área da seção perpendicular ao fluxo de calor (m²);

t = tempo (em minutos);

k = condutividade térmica (W/ m·K);

T = temperatura (°C)

2.1.2 CONVECÇÃO

Convecção é o mecanismo de transferência de calor que se dá pelo movimento de um meio fluido (gás ou líquido). Durante um incêndio, a convecção atua na propagação das chamas, e no transporte de fumaça e gases quentes em direção ao teto ou ao exterior do compartimento. O aquecimento ou resfriamento de superfícies sólidas pela troca de calor por convecção com os fluidos circundantes depende, sobretudo, da velocidade do fluido durante o contato (Buchanan; Abu, 2017).

2.1.3 RADIAÇÃO

Diferentemente da condução e da convecção, a radiação acontece por meio da propagação de ondas eletromagnéticas e independe do contato entre as superfícies e da existência de fluidos ou sólidos como meios de transmissão (Drysdale, 2011). As ondas eletromagnéticas são capazes de percorrer o vácuo e atravessar materiais translúcidos. Em incêndios, a radiação é a principal responsável pela troca de calor entre as chamas e superfícies combustíveis, entre a fumaça aquecida e objetos na edificação, e até entre a própria edificação inflamada e a edificação vizinha (Buchanan; Abu, 2017).

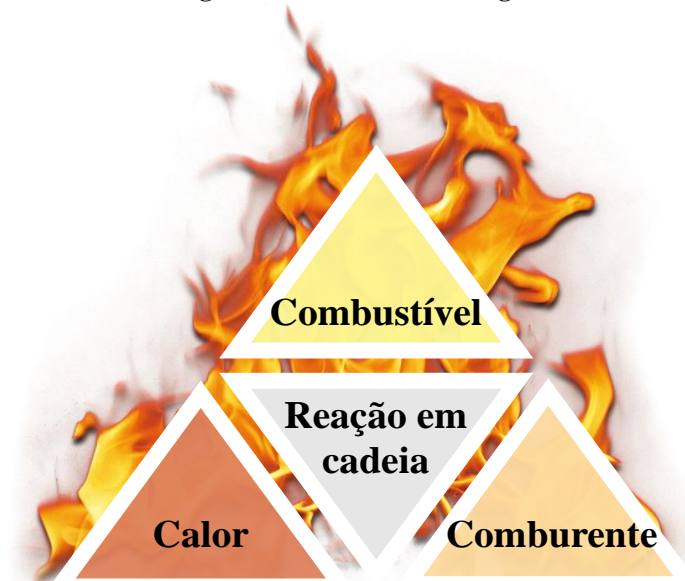
2.2 DIFERENÇA ENTRE FOGO E INCÊNDIO

De acordo com a ABNT NBR 13860:1997, combustão é a reação exotérmica entre um material capaz de queimar (o combustível) e uma substância que sustente sua queima (o comburente), sendo geralmente acompanhada de chamas e/ou brasa e/ou emissão de fumaça. Isto posto, a mesma norma define fogo como o processo de combustão caracterizado pela emissão de calor e luz. Enquanto isso, o termo incêndio é atribuído ao fogo fora de controle, ou seja, uma inflamação generalizada. Outra definição de incêndio é apresentada pela ISO 8421-1:1987 como sendo a combustão com disseminação descontrolada no tempo e no espaço.

Segundo Seito *et al.* (2008), inicialmente assumia-se que existência do fogo era dependente de três elementos: calor, combustível e comburente. Este era o “triângulo do fogo”.

Na década de 1970, descobriu-se o agente extintor Halon 1301 (bromotrifluormetano). Um gás que, embora tenha sido substituído posteriormente, foi largamente comercializado na época por ser capaz de interromper a reação química em cadeia entre combustível e comburente, sem reduzir a concentração de oxigênio dos ambientes (não asfixiante). Após a descoberta do Halon, a reação em cadeia passou a ser considerada como o quarto elemento essencial à existência do fogo, e o triângulo tornou-se “tetraedro do fogo” (Figura 2.1).

Figura 2.1 – Tetraedro do fogo.



Fonte: Autor (2021)

2.3 CRITÉRIOS DE RESISTÊNCIA AO FOGO

De acordo com a ABNT NBR 16945: 2021, elemento construtivo é toda parte que compõe a edificação (ex.: paredes, divisórias, tetos, vigas ou pilares). A resistência ao fogo de um elemento construtivo corresponde à sua capacidade em permanecer desempenhando, durante determinado período sob ação do fogo, as funções para as quais foi projetado (ABNT NBR 14432, 2001). Revisadas recentemente, as normas ABNT NBR 5628: 2022 e ABNT NBR 10636-1: 2022 fornecem diretrizes para realização do ensaio de resistência ao fogo em elementos construtivos estruturais e não estruturais, respectivamente. Elementos em alvenaria estrutural são, portanto, testados segundo a primeira norma.

A resistência ao fogo do elemento construtivo é determinada experimentalmente pela submissão a uma curva padrão de aquecimento (incêndio padrão) e avaliada segundo critérios de desempenho. Para a alvenaria estrutural aplicam-se, sobretudo, os seguintes critérios:

- **CAPACIDADE PORTANTE (R):** antes denominado apenas “resistência” traduz a capacidade do elemento responsável pela estabilidade da edificação suportar, durante

determinado período de exposição ao fogo, os esforços solicitantes sem entrar em colapso. Para elementos carregados axialmente, como pilares e paredes, avaliam-se a taxa de deformação axial e a deformação axial real (ABNT NBR 16945: 2021).

- **INTEGRIDADE (E):** também conhecido como “estanqueidade”. Representa a capacidade do elemento construtivo em suportar a exposição ao fogo em um dos lados, durante determinado período, sem que a ocorrência de trincas, aberturas que excedam determinadas dimensões ou falha no travamento (no caso de elementos móveis como portas e vedadores) permitam a passagem de chamas e gases quentes para o outro lado. Segundo a ABNT NBR 16945: 2021, a avaliação do critério E está ligada a ocorrência de três eventos: a) fissuras ou aberturas acima de um certo limite; b) ignição de um chumaço seco de algodão posicionado por até 30 segundos no lado oposto ao solicitado pelo fogo e c) chamas persistentes no lado não exposto.

Considera-se parede com função de compartimentação aquela que durante o incêndio é destinada a separar duas áreas adjacentes e atender, simultaneamente, aos critérios E e I ou W (ex.: paredes que delimitam apartamentos em um mesmo andar, paredes de corredores utilizados para desocupação e paredes que envolvem escadas). Em elementos de compartimentação, a resistência ao fogo quanto à integridade é determinada por qualquer um dos três eventos. Uma vez atingido o critério R, considera-se imediata falha da integridade (E).

- **ISOLAÇÃO TÉRMICA (I):** também conhecido por “isolamento térmico”. Traduz a capacidade do elemento construtivo de compartimentação em suportar um determinado período de exposição ao fogo em um dos lados, sem que a temperatura seja suficientemente alta no lado oposto a ponto de desencadear a combustão de materiais em contato com a face protegida ou colocar em risco pessoas que estejam próximas. Conforme a ABNT NBR 16945: 2021, quando não se trata de portas ou elementos vedadores, a falha pelo critério I é decretada quando o incremento de temperatura na face não exposta superar 140°C em média ou 180°C e em qualquer ponto de medição individual. A falha nos critérios R ou E acarreta imediatamente a falha do critério I, com o mesmo período de resistência ao fogo.
- **RADIAÇÃO TÉRMICA (W):** Define a capacidade de um elemento de compartimentação suportar, certo período de exposição ao fogo em um dos lados, sem que o calor radiado pela face oposta supere 15 kW/m² (ABNT NBR 16945: 2021).

- **AÇÃO MECÂNICA (M):** Capacidade do elemento construtivo suportar eventuais impactos atribuídos a falhas estruturais provocadas pelo incêndio em partes da edificação que estejam próximas. Para sua avaliação, o elemento é submetido à um impacto de energia pré-definida na face não exposta ao incêndio, imediatamente após a determinação de quaisquer dos critérios mencionados anteriormente (R, E, I ou W) (ABNT NBR 16945: 2021).

Critérios adicionais e específicos também podem ser avaliados. Para cada critério, determina-se um valor de Tempo de Resistência ao Fogo (TRF). Em paredes de alvenaria nota-se que, na grande maioria das situações, o critério de Isolamento Térmico tende a ser o primeiro a ser alcançado e aponta, conseqüentemente, o menor valor de TRF (Leal *et al.*, 2022a).

2.4 TEMPO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - TRF

Representa a capacidade limite do material, componente ou elemento. Corresponde ao tempo máximo que um elemento de construção é capaz de atender aos critérios de resistência ao fogo e desempenhar suas funções. Para o critério R, por exemplo, determina-se o **TRF** quando os esforços resistentes calculados com as devidas reduções/ponderações para o material exposto ao fogo se igualam aos esforços solicitantes de cálculo obtidos na combinação de ações excepcionais (Costa, 2008).

Buchanan e Abu (2017) pontuam ainda que a resistência ao fogo dos elementos construtivos pode ser considerada como uma forma de proteção passiva, por estar incorporada à edificação e sempre pronta para solicitação em caso de incêndio. De modo complementar, existe a proteção ativa que remete a sistemas/mecanismos de combate ao fogo os quais necessitam ser acionados (manual ou automaticamente) após detecção do incêndio, por exemplo, extintores, hidrantes e chuveiros automáticos (sprinklers).

2.5 TEMPO REQUERIDO DE RESISTÊNCIA AO FOGO - TRRF

Trata-se do tempo mínimo (em minutos) preconizado pela ABNT NBR 14432:2001 durante o qual elementos construtivos sujeitos ao incêndio padrão devem manter-se resistentes ao fogo. O TRRF não depende diretamente do material utilizado, mas está relacionado a características gerais da edificação como: condições de uso e ocupação, altura e profundidade de subsolo. De acordo com Buchanan e Abu (2017), o TRRF, chamado pelos autores de “tempo de incêndio de projeto”, varia conforme a importância da edificação, os requerimentos do

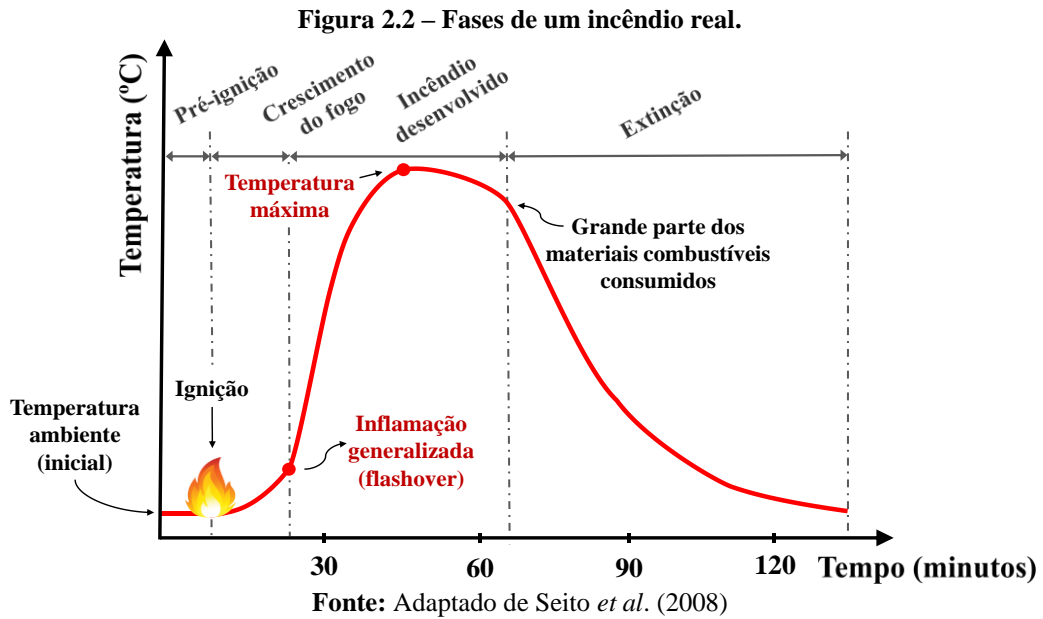
proprietário, e as possíveis consequências na propagação do incêndio, incluindo o seu colapso. Berto e Oliveira (2018) definem o TRRF como um parâmetro de projeto estabelecido empiricamente em função da provável severidade do incêndio, da dificuldade de combate, risco às equipes de salvamento e à ocorrência de ruína. Visa garantir que, durante eventual incêndio, a desocupação da edificação e a execução das operações de combate ao fogo sejam desempenhadas com segurança; além de buscar a minimização de danos às edificações adjacentes e à infraestrutura pública. Conforme exemplificado pelos autores, a ruína de uma edificação térrea trará consequências significativamente menores que de altos edifícios.

2.6 COMPORTAMENTO DO INCÊNDIO REAL

O comportamento real de um incêndio varia em função de várias características relacionadas do ambiente onde ocorre e dos materiais presentes. Por essa razão, sua reprodução se torna bastante difícil. Segundo Costa (2008), o desenvolvimento de um incêndio verdadeiro depende, basicamente, dos seguintes fatores:

- **CARGA DE INCÊNDIO:** tipo, densidade, distribuição e comportamento do material combustível disponível no compartimento;
- **DIMENSÕES DO COMPARTIMENTO:** forma e volume do ambiente;
- **VENTILAÇÃO:** relacionada à existência de aberturas, tais como portas, janelas e passagem de dutos;
- **PROPRIEDADES TÉRMICAS DA COMPARTIMENTAÇÃO:** resposta térmica dos diferentes materiais (alvenaria em blocos cerâmicos ou de concreto, painéis de gesso acartonado, entre outros) que constituem os elementos construtivos de compartimentação.

Seito *et al.* (2008) dividem a evolução do incêndio real em quatro estágios: pré-ignição, crescimento do fogo, estágio do incêndio desenvolvido e extinção (Figura 2.2).



- I. **PRÉ-IGNIÇÃO:** incêndio incipiente, de crescimento lento, com duração entre cinco e vinte minutos até a ignição. Quando presente, o sistema de detecção deve operar nesta fase.
- II. **CRESCIMENTO DO FOGO:** fase caracterizada pelo aumento das chamas e aquecimento do ambiente. Por volta dos 600°C a decomposição térmica dos combustíveis sólidos (pirólise) produz gases e vapores que se unem ao oxigênio gerando uma mistura inflamável. Existindo líquidos combustíveis, estes contribuirão com seus vapores. Na presença de faísca, chama ou uma centelha, grandes labaredas são formadas e o ambiente se inflama de maneira generalizada, o que também é conhecido como *flashover*. Qualquer medida de combate a incêndio (uso de chuveiros automáticos por exemplo) tomada antes do *flashover* ainda possui grande probabilidade de êxito. Drysdale (2011) afirma, porém, que a sobrevivência de qualquer ocupante que não tenha se evadido do compartimento incendiado antes do *flashover* é pouco provável e, portanto, esse momento de rápida disseminação do fogo é determinante na maioria dos desastres envolvendo incêndios compartimentados.
- III. **INCÊNDIO DESENVOLVIDO:** Nessa fase que se inicia com o *flashover* a temperatura do ambiente chega a ultrapassar os 1100°C. Todos os materiais combustíveis sofrerão inflamação. De acordo com Drysdale (2011), a taxa de liberação de calor atinge o seu valor máximo nesse estágio, ameaçando compartimentos e até edificações vizinhas. Além do claro risco aos ocupantes, é

durante esse período que os danos estruturais tendem a ocorrer, podendo culminar no colapso parcial ou total da edificação.

IV. **EXTINÇÃO DO INCÊNDIO:** nessa fase o incêndio diminui em intensidade à medida que os materiais combustíveis vão se exaurindo.

Nessa fase, as chamas irão cessar eventualmente, restando uma massa de brasa incandescente que irá continuar a queimar lentamente por um certo tempo, mantendo alta a temperatura local (Drysdale, 2011).

2.7 CURVAS NATURAIS DE INCÊNDIO

Modelos de incêndio natural ou, tão somente, curvas naturais, são expressões da variação de temperatura dos gases ao longo do tempo, baseadas em ensaios que simulam incêndios reais em cenários com condições definidas. Segundo a Instrução Técnica N° 03/2019 (IT-03) do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, as curvas naturais variam em função de características do compartimento incendiado como geometria, ventilação, propriedades térmicas dos elementos de vedação e carga de incêndio específica. Por considerarem parâmetros que influenciam no crescimento e desenvolvimento do incêndio, as curvas naturais são os modelos que mais se assemelham ao comportamento observado no incêndio real de edificações (Schleich, 2005).

Existem modelos simplificados e modelos avançados para o incêndio natural. Exemplos de modelos simplificados são as curvas paramétricas de temperatura-tempo contidas no Anexo A do Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002). Estas são aplicáveis à avaliação de elementos estruturais dentro de compartimentos com até 500 m² de área de piso, altura máxima de 4 m, sem aberturas medidas no topo e com carga de incêndio predominantemente composta por material celulósico. Da mesma forma, as ações térmicas em elementos estruturais externos aos compartimentos incendiados e expostos às chamas que atravessam suas aberturas devem ser estimadas pelo modelo apresentado no Anexo B do referido código. Nos modelos simplificados do Eurocode 1, a distribuição de temperatura em função do tempo é considerada uniforme para os incêndios compartimentados (onde todo o compartimento é tomado) e não uniforme nos incêndios localizados (onde a exposição é pontual e o *flashover* não chega a ser atingido).

Os modelos de incêndio natural avançados são construídos com base nas propriedades dos gases quentes e na implementação de conceitos de transferência de calor e massa; possuem maior complexidade e normalmente incluem simulações numéricas ou processos iterativos de

cálculo. Segundo Costa (2008), tais modelos são capazes de simular o desenvolvimento do incêndio real por completo, compreendendo desde o princípio de uma inflamação localizada até a inflamação total, incluindo as fases de *pré-flashover*, *pós-flashover* e resfriamento. Entre as curvas naturais avançadas, destacam-se os modelos de uma zona, os modelos de duas zonas e os Modelos Computacionais de Dinâmica dos Fluidos (CFD).

Sobre os modelos de uma zona, o Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002) pontua:

- São voltados às condições de *pós-flashover*, ou seja, se aplicam apenas a incêndios completamente desenvolvidos;
- Assumem valores uniformes para temperatura, densidade, energia interna e pressão dos gases no compartimento;
- A temperatura é calculada com base em equações diferenciais ordinárias de conservação de massa e energia. Essas consideram o balanço de massa entre os gases internos, externos (advindos das aberturas) e os produtos da pirólise (decomposição química dos materiais combustíveis causada pela ação térmica). O equilíbrio térmico envolve o calor gerado pelo próprio incêndio, os gases internos, os gases advindos das aberturas e os elementos de compartimentação.

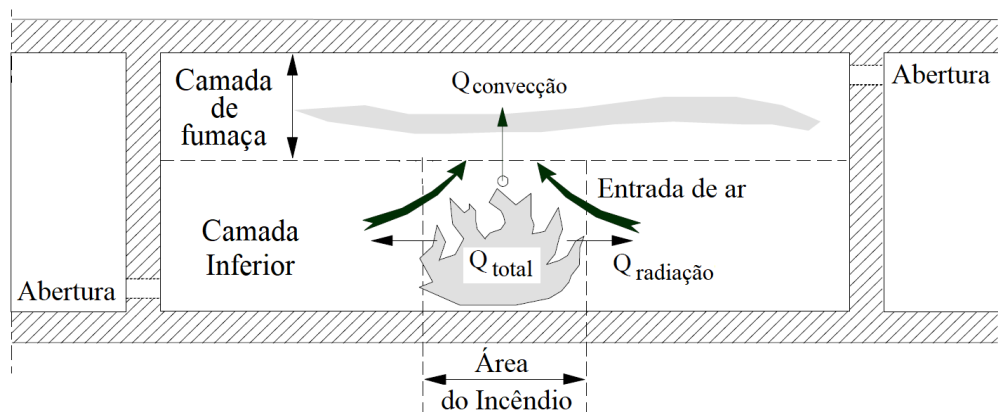
Sobre os modelos de duas zonas (Figura 2.3):

- São empregados para retratar o incêndio *pré-flashover*, ou seja, quando a inflamação ainda é localizada (Drysdale, 2011);
- O compartimento é dividido em duas faixas horizontais (zonas): uma superior (de maior temperatura) onde ocorre a pirólise e o acúmulo da fumaça; e uma faixa inferior (de menor temperatura) onde se encontram o fogo e a fuligem. Considera-se também a existência de uma interface entre ambas as faixas. Dentro de cada região a temperatura é tida constante (Costa, 2008);
- O cálculo da temperatura também é feito com base em equações diferenciais ordinárias de conservação de massa e energia. Contudo, trocas de calor, massa e substâncias químicas entre as faixas são agora consideradas, além das trocas com os gases externos e elementos de compartimentação (EN 1991-1-2:2002);
- Os modelos de duas zonas são válidos enquanto a zona superior permanece suficientemente alta e a temperatura na zona inferior não atinge os 500 °C, a

partir daí, considera-se que o *flashover* já tenha ocorrido e o incêndio já não pode ser tratado como localizado dentro do compartimento (Schleich, 2005);

- Além de retratar a evolução de temperatura dos gases, os modelos de duas zonas são utilizados para mensurar a propagação de fumaça nos edifícios, estimar os níveis de segurança à vida em função da altura da fumaça, concentrações de gases tóxicos e fluxo de calor por radiação (Schleich, 2005).

Figura 2.3 – Representação do modelo de duas zonas.



Fonte: Adaptado de Schleich (2005)

Sobre os modelos de campo – Computational Fluid Dynamics (CFD):

- Tratam os gases e a fumaça envolvidos no incêndio como fluidos que são, sendo considerados como uma das técnicas mais avançadas de modelagem entre as disponíveis (Costa, 2008);
- São baseados na Teoria da Dinâmica dos Fluidos e aplicáveis a todo o desenvolvimento de um incêndio, desde seu início;
- Segundo o Eurocode 1 (EN 1991-1-2:2002), a evolução temperatura nos modelos CFD é completamente dependente das dimensões de tempo e espaço e o seu uso requer o estabelecimento das seguintes hipóteses:
 - Conservação da massa do fluido;
 - Taxa de variação do momento igual à soma das forças em cada partícula do fluido (2ª Lei de Newton);
 - A taxa de variação de energia corresponde à soma da taxa de incremento de calor e do trabalho realizado em cada partícula do fluido (1ª Lei da Termodinâmica).

- Discretizam o compartimento em pequenas unidades de volume e, por meio da solução numérica de equações diferenciais parciais são capazes de fornecer, para cada ponto do volume incendiado, valores de temperatura, velocidade dos gases e concentração de compostos químicos (COX, 1995 *apud* CIB W014, 2001).
- Por conta da maior complexidade e riqueza de informações, requerem auxílio computacional e aplicação via uso de softwares matemáticos.

2.8 CURVAS NOMINAIS DE INCÊNDIO

Correspondem a formas padronizadas e genéricas de elevação da temperatura. Expressam, para diferentes situações, o aquecimento dos gases apenas em função do tempo transcorrido, sem contemplar a fase de resfriamento e sem levar em conta o cenário do incêndio. Parâmetros que influenciam o desenvolvimento do fogo como dimensões do compartimento, ventilação ou propriedade dos materiais não são considerados pelas curvas nominais.

Por facilidade, procedimentos de ensaios e de projeto de estruturas consideradas sob situação de incêndio são realizados com base em curvas nominais padronizadas, onde a progressão de temperatura é fornecida (ao longo do tempo) por equações simples ou valores tabelados (Costa, 2008). As curvas nominais também encontram aplicação na classificação ou verificação de resistência ao fogo dos elementos construtivos (EN 1991-1-2:2002).

2.8.1 CURVA 834-1 (1999)

Conhecida como curva de incêndio padrão ou somente incêndio padrão, é a mais utilizada e representa incêndios envolvendo materiais celulósicos (madeira, papel, tecido, palha, entre outros). A temperatura ao longo do tempo é calculada com base na Equação 2.2.

$$\theta_g - \theta_{g0} = 345 \cdot \log(8 \cdot t + 1) \quad \text{Equação 2.2}$$

Onde:

θ_g = temperatura dos gases quentes no compartimento incendiado (°C);

θ_{g0} = temperatura inicial no compartimento (20°C);

t = tempo (em minutos).

Cabe destacar que os métodos prescritivos de dimensionamento propostos para estruturas em concreto armado (ABNT NBR 15200:2012), estruturas metálicas ou mistas de aço e concreto (ABNT NBR 14323:2013) bem como as normas voltadas à determinação da

resistência ao fogo em elementos construtivos (ABNT NBR 5628:2022 e ANBT NBR 10636-1:2022) consideram aquecimento segundo a curva de incêndio padrão.

2.8.2 CURVA ASTM E119 (2018)

Outra curva bastante utilizada nos países da América do Norte para simular incêndios genéricos corresponde à ASTM E119:2018. Nesta curva, os incrementos de temperatura são semelhantes aos da ISO 834 (Tabela 2.1).

Tabela 2.1- Temperatura de incêndio ao longo do tempo segundo a ASTM E 119:2018.

Tempo (em minutos)	Temperatura (°C)
0	20
5	538
10	704
15	760
20	795
25	821
30	843
35	862
40	878
45	892
50	905
55	916
60	927

Fonte: ASTM E119 (2018)

2.8.3 CURVA “H” (EN 1991-1-2, 2002)

A letra H corresponde a uma abreviação do termo “*Hydrocarbon curve*”. Essa curva, dada pela Equação 2.3 (Item 3.2.3 da referida norma) representa a progressão de temperaturas em incêndios de materiais constituídos por hidrocarbonetos, tal como os combustíveis fósseis.

$$\theta_g = 1080 \cdot (1 - 0,325e^{-0,167t} - 0,675e^{-2,5t}) + 20 \quad \text{Equação 2.3}$$

Sendo:

θ_g = temperatura no compartimento incendiado (°C);

t = tempo (em minutos).

Obras em geral são verificadas segundo a curva de incêndio padrão (ISO 834-1:1999) enquanto a curva de hidrocarbonetos é empregada em casos particulares, onde a elevação da temperatura é extremamente rápida (Robert; Colina; Debicki, 2014). De acordo com Costa (2008), a curva “H” foi criada para projetos de segurança contra incêndio de indústrias petroquímicas e offshore, e posteriormente teve sua aplicação estendida a projetos de túneis ou

vias de transporte que contem com a circulação de veículos movidos a combustíveis inflamáveis.

2.9 RECOMENDAÇÕES RILEM TC 200-HTC – PARTES 1 E 2 (2007)

Quando o teste ou análise não pretende simular a situação de incêndio, mas sim avaliar detalhadamente o comportamento do material e medir suas propriedades durante ou após o aquecimento, adotam-se taxas reduzidas de elevação da temperatura, tal como proposto pela RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*).

A RILEM TC 200-HTC Part 2, voltada à determinação das propriedades mecânicas em corpos de prova cilíndricos de concreto submetidos ao aquecimento, preconiza que a diferença entre as temperaturas tomadas em três pontos ao longo da altura do corpo de prova não deve exceder 1°C quando este encontra-se em 20°C; 5°C quando aquecido a 100°C; e 20°C na temperatura de 750°C. Para que isso seja satisfeito, taxas entre 0,5°C/min e 4°C/min são estabelecidas (Tabela 2.2) na configuração de um ciclo que compreende: aquecimento na taxa definida, manutenção da temperatura desejada (até seu alcance no centro dos corpos de prova) e resfriamento na mesma taxa, caso ocorra a determinação de propriedades residuais.

O regime de aquecimento proposto tem por objetivo garantir uma distribuição uniforme da temperatura em todo o corpo de prova, ou seja, assegurar que as amostras tenham condições de alcançar (e manter pelo período desejado) a mesma temperatura em toda a sua extensão.

Tabela 2.2 - Taxas de aquecimento em função do diâmetro do cilindro.

Diâmetro máximo do cilindro (mm)	Taxa de aquecimento/resfriamento (°C/min)	Intervalo entre medições de temperatura (min)
150	0,5	16
100	1,0	8
80	2,0	4
60	4,0	2

Fonte: RILEM TC 200-HTC Part 2 (2007)

2.10 ARGAMASSAS

As juntas de argamassa desempenham funções importantes nas construções em alvenaria: unem as unidades dando origem a elementos monolíticos; contribuem com a resistência aos esforços laterais; garantem a transferências de esforços entre as fiadas, distribuindo uniformemente as cargas atuantes na parede pela área resistente das unidades; compensam irregularidades dimensionais; acomodam pequenas movimentações na estrutura, deformações térmicas e de retração por secagem; selam os espaços entre as unidades tornando a parede estanque e protegida contra ataques químicos e intempéries (Carasek, 2017; Cemex, 2022). Nesse sentido, conhecer o comportamento das argamassas é importante para o seu melhor aproveitamento e durabilidade. Negligenciar suas propriedades, pode resultar em manifestações patológicas da edificação por conta do uso indevido do material (Schankoski; Prudêncio Jr.; Pilar, 2015).

2.10.1 PROPRIEDADES RELEVANTES PARA ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

A aderência entre a argamassa e as unidades é determinante para garantir resistência à tração e resistência inicial de cisalhamento à alvenaria. Esforços laterais, como ação do vento em edifícios, empuxo de água em reservatórios, empuxo de solo em arrimos são, em grande parte, resistidos pela aderência na interface bloco-argamassa (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014). A aderência também garante a estanqueidade das juntas, impedindo a penetração de água das chuvas (Carasek, 2017).

A trabalhabilidade representa a facilidade da argamassa no estado fresco em ser misturada, transportada, aplicada, consolidada e acabada, mantendo-se em condição homogênea (Carasek, 2017). De acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), índices de consistência da argamassa na faixa de 230 mm estão relacionados a uma boa trabalhabilidade, embora esta seja uma propriedade qualitativa cuja avaliação dependerá da experiência e da sensibilidade do pedreiro. Segundo Carasek (2017), a consistência e plasticidade adequadas da argamassa garantem as condições de execução da parede e devem ser ajustadas à forma de aplicação. Se estiver muito fluida, por exemplo, a colocação do bloco sobre a junta de assentamento poderá esmagá-la, tornando inadequada a espessura da junta e dificultando alinhamento e prumo da parede. Por outro lado, argamassas aplicadas com bisnaga demandam maior plasticidade que aquelas aplicadas com palheta ou colher de pedreiro.

A retenção de água representa a capacidade da argamassa em evitar a perda de água pela absorção das unidades, prevenir seu endurecimento precoce pela perda de água e manter na mistura água suficiente para hidratação das partículas de cimento (Parsekian; Hamid; Drysdale,

2014). É uma propriedade relevante para as argamassas de assentamento que perdem água pela evaporação e por sucção dos componentes da alvenaria. Se perde água rapidamente, a argamassa resseca, perdendo aderência e dificultando o adequado ajuste das unidades na próxima fiada (Carasek, 2017).

Resistência mecânica, resistência às alterações ambientais e durabilidade são requisitos principais da argamassa de assentamento no estado endurecido. A resistência da argamassa deve ser compatível à resistência dos blocos e estar entre 0,7 e 1,5 vezes a resistência da unidade na área bruta (f_{bk}). Quando as solicitações verticais são predominantes, aproxima-se do limite inferior (ex.: edifícios de múltiplos pavimentos) e quando as cargas laterais são predominantes, aproxima-se do limite superior (arrimos, reservatórios, paredes de galpões) (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014).

2.10.2 COMPOSIÇÃO DAS ARGAMASSAS E INFLUÊNCIA NO COMPORTAMENTO DA ALVENARIA

Para composição da argamassa, é preciso conciliar dois fatores contraditórios: resistência e capacidade de absorver deformações. Quanto maior o teor de cimento na mistura, maior a resistência da argamassa, contudo, menor sua trabalhabilidade e capacidade de acomodar deformações. A argamassa muito rica em cimento tende à fissuração. Para a cal, vale o contrário: quanto mais cal na mistura, melhor a trabalhabilidade e acomodação de deformações, porém, diminui-se a resistência mecânica (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014). Reduções na resistência à compressão, resistência à flexão e no módulo de deformação de argamassas ao elevar o teor de cal foram verificadas no trabalho de Ramesh, Azenha e Lourenço (2019).

Além das argamassas ditas mistas (cimento, cal e areia), existem as argamassas industrializadas. Estas podem ser disponibilizadas a granel, em silos estacionários instalados na obra ou vendidas ensacadas. Diferente das argamassas convencionais, as industrializadas são comercializadas como misturas prontas e pré-dosadas, requerendo apenas adição de água nas devidas proporções e mistura antes da aplicação. Em sua maioria, o aglomerante aéreo (cal hidratada) não está presente e a plasticidade da mistura é fornecida pelo uso de aditivos tensoativos, incorporadores de ar e retentores de água. Segundo Kaci, Chaouche e Andréani (2011), argamassas industrializadas, em geral, podem conter diferentes aditivos orgânicos e/ou minerais em sua composição, a fim de atender requisitos relacionados a propriedades no estado fresco (trabalhabilidade, facilidade de bombeamento), no estado endurecido (tendência à fissuração) e comportamento a longo prazo (estanqueidade, propriedades mecânicas,

durabilidade). Pela praticidade e maior controle de qualidade durante a produção, as argamassas industrializadas têm sido preferidas em grande parte das obras de alvenaria estrutural. Segundo Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015), as construtoras têm ampliado o uso das argamassas industrializadas quando pretendem aumentar a produtividade e diminuir a responsabilidade sobre a dosagem das argamassas em obra.

Existem ainda os compostos poliméricos não cimentícios para assentamento em alvenarias de vedação. Segundo a ABNT NBR 16590-1:2017, são misturas industrializadas e homogêneas que levam agregados miúdos, carga mineral, água e blenda de resinas poliméricas. Seu uso visa fornecer agilidade e maior padronização do processo construtivo, aliado à redução na geração de resíduos. Os compostos poliméricos também propiciam redução significativa na espessura das juntas de assentamento. Contudo, seu uso em paredes estruturais ainda está sendo estudado. Por ora, recomenda-se que sejam aplicados apenas na construção de elementos de vedação/fechamento.

Casali *et al.* (2012) avaliaram a influência da argamassa no comportamento à compressão de prismas com três blocos de concreto empregando blocos de 15 MPa (área bruta) e quatro tipos de argamassa: duas industrializadas (ensacadas com aditivo) e duas convencionais (cimento, cal e areia, produzidas *in loco*). Os pesquisadores concluíram que aumentos na resistência das argamassas não refletiram em aumentos significativos na resistência à compressão dos prismas. Maiores teores de ar incorporado foram observados nas argamassas ensacadas, devido aos aditivos. Segundo os autores, a presença de aditivos gerou maiores deformações após o início de ruptura da argamassa (em 50% da carga última dos prismas). Também observaram o decréscimo na relação f_{prisma}/f_{bloco} quando os prismas são produzidos com argamassa ensacada.

No estudo de Schankoski, Prudêncio Júnior e Pilar (2015) investigou-se a influência da composição da argamassa e suas propriedades no estado fresco sobre o comportamento à compressão e aderência de prismas com blocos de concreto para edifícios altos de alvenaria estrutural (140 × 190 × 390 mm com 16 MPa na área bruta). Foram analisadas sete argamassas distintas: duas industrializadas para assentamento estrutural (5 e 10 MPa); uma industrializada de 5 MPa para múltiplo uso (reboco/assentamento); uma mista com 80% da industrializada de 10 MPa e 20% de argamassa colante (para placas cerâmicas); uma convencional (cimento: cal: areia) com mistura rica em cimento; uma convencional com mistura pobre; e uma convencional com adições de 0,2% de éter de celulose e 0,08% de desincorporador de ar. A maior retenção de água foi da argamassa contendo éter de celulose. O maior teor de ar incorporado foi verificado na argamassa de múltiplo uso, indicando a presença de aditivo incorporador de ar. A

adição de argamassa colante elevou o teor de ar incorporado na argamassa mista e o aditivo desincorporador não apresentou o efeito desejado. Prismas de três e quatro blocos (junta à prumo) foram moldados para resistência à compressão e à tração na flexão, respectivamente. Dos resultados, as maiores eficiências (f_{prisma}/f_{bloco}) e os maiores valores de módulo de elasticidade foram obtidos com a argamassa convencional rica em cimento. Entre as industrializadas, a maior resistência de prisma foi obtida com a argamassa mista. Todos os prismas moldados com argamassas industrializadas apresentaram, precocemente, grandes deformações (em 70% da tensão de ruptura) e falharam pelo esmagamento das juntas de argamassa. Na flexão dos prismas, a maior aderência foi exibida pela argamassa mista e a menor pela argamassa industrializada de múltiplo uso.

Em seu trabalho, Mohamad *et al.* (2017) evidenciam a grande influência que a relação entre as resistências das juntas de argamassa e das unidades exerce na ruptura dos prismas. Os pesquisadores avaliaram experimentalmente o comportamento à compressão em prismas ocultos formados por três blocos de concreto (juntas a prumo), mantendo constante a resistência dos blocos (23,1 MPa na área líquida) e variando a resistência das argamassas (4,4; 7,2; e 19,8 MPa). Os resultados indicaram que as argamassas mais fortes (19,8 MPa) produziram prismas de comportamento consideravelmente mais frágil que os demais (E_{prisma}/E_{bloco} entre 0,91 e 1,0), curva tensão-deformação próxima de linear e semelhante à de um material homogêneo, com argamassa e bloco se deformando de maneira equivalente. Usando argamassa de 7,2 MPa, as juntas e as unidades se comportaram como dois materiais distintos, sendo a curva tensão-deformação controlada pelo comportamento não-linear e pelo mecanismo de poro-colapso da argamassa. A relação E_{prisma}/E_{bloco} se iniciou em 0,9 e decresceu rapidamente até 0,32 com aumento do carregamento. Ao contrário do esperado, os prismas com a argamassa mais fraca (4,4 MPa) apresentaram comportamento homogêneo até 40% da tensão de ruptura. Após isso, a relação E_{prisma}/E_{bloco} baixou até 0,55. Os autores atribuem tal resultado à possibilidade de a argamassa ter sofrido poro-colapso logo no início do carregamento, fornecendo aos prismas características semelhantes à de um material homogêneo. Com a elevação da tensão, a argamassa passou a agir sob confinamento e seu comportamento não-linear tornou-se predominante.

A forma como a argamassa de assentamento é aplicada sobre as unidades (parcialmente: um cordão sobre cada parede longitudinal do bloco; ou totalmente: sobre todas as paredes do bloco) exerce notória interferência no comportamento à compressão dos prismas. Hamid e Chukwunye (1986) exploraram numericamente o tipo de assentamento e sua influência no comportamento de prismas com blocos de concreto. Os autores constataram maiores tensões

laterais nas unidades de prismas com argamassamento parcial e fissuras propagadas verticalmente, fazendo com que a ruptura fosse atingida com menores carregamentos.

Mata, Rovere e Prudêncio Júnior (2008) avaliaram numérica e experimentalmente a forma de assentamento da argamassa e seus efeitos no comportamento de prismas ocios com três blocos de concreto. Notaram que a carga de ruptura foi cerca de 20% menor para os prismas com argamassamento parcial, juntamente com maiores deformações e início precoce da fissuração. Na análise numérica, os autores confirmaram os resultados obtidos observando o desenvolvimento de maiores tensões laterais nas paredes transversais internas dos prismas assentados com argamassamento parcial. Maiores valores de resistência à compressão também foram constatados por Izquierdo, Corrêa e Soto (2012) em prismas ocios de dois blocos de concreto com argamassamento total, em comparação com o argamassamento parcial.

Lima, Nascimento Lima e Assis (2012) estudaram a influência da resistência e da espessura da argamassa de assentamento na resistência à compressão de prismas com dois blocos cerâmicos. Foram ensaiados blocos de dimensões $140 \times 190 \times 290$ mm, três resistências para argamassas (3,1; 7,9 e 12,7 MPa) e três espessuras de junta (10, 15 e 20 mm). Os autores concluíram que, mantendo a espessura da junta constante, aumentos na resistência da argamassa geraram aumentos na resistência dos prismas. Quando mantida a resistência da argamassa, aumentos na espessura das juntas reduziram a resistência dos prismas. Alvarenga *et al.* (2017) também abordaram a influência da resistência da argamassa no comportamento de prismas de dois blocos cerâmicos. As unidades utilizadas tinham resistência à compressão média de 4,9 MPa na área bruta e as duas argamassas testadas contavam com resistências iguais à 94,7% e 50,4% da resistência das unidades na área líquida. Nos resultados, observou-se que o aumento na resistência e no módulo de elasticidade da argamassa praticamente não alteraram a resistência dos prismas, mas sim seu mecanismo de ruptura. Os prismas produzidos com argamassas mais fortes apresentaram ruptura frágil, explosiva e repentina. Nos prismas com a argamassa fraca a ruptura não foi abrupta, mas sim precedida por fissuras verticais nas paredes dos blocos.

Zhou (2014) comparou prismas de tijolos cerâmicos com e sem a presença das juntas de assentamento (horizontais) em argamassa. O autor concluiu que os prismas com juntas secas apresentaram resistências à compressão 15% menores, enquanto o módulo de elasticidade foi reduzido em 62,26%.

Caldeira *et al.* (2020), avaliaram a influência da espessura de juntas e resistência de argamassas no comportamento à compressão de 120 prismas de dois blocos de concreto. Foram utilizados blocos de $140 \times 190 \times 390$ mm (9 e 27 MPa na área bruta), seis argamassas (5,6;

10,2; 11,1; 15,6; 17,7 e 18,3 MPa), incluindo convencionais e industrializadas foram aplicadas em juntas de espessuras 5, 10, 15 e $20 \pm 2,5$ mm. Os autores concluíram que aumentos na espessura das juntas tornam-se significativos somente nos prismas produzidos com blocos de alta resistência (27 MPa). Nessas situações, o aumento das juntas reduziu o confinamento das argamassas na região e, conseqüentemente, a resistência à compressão dos prismas. Prismas com blocos de 9 MPa não apresentaram alterações significativas com aumento das juntas. Com argamassas mais resistentes, a falha dos prismas passou a ser pelo seccionamento e/ou fragmentação dos blocos e o impacto da espessura de junta na resistência e deformabilidade dos prismas não foi significativo. O tipo (convencional ou industrializada) e espessura de junta para argamassas de resistências equivalentes não influenciou o comportamento dos prismas.

2.10.3 ARGAMASSAS SUBMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS

Segundo Abdulhussei, Abbas e Frayyeh (2018), incêndios representam um dos riscos mais severos às estruturas das edificações. Nessas situações, a argamassa cimentícia em serviço é inevitavelmente exposta às altas temperaturas e o resultado de suas propriedades após o aquecimento exerce grande influência em sua durabilidade e dos demais materiais.

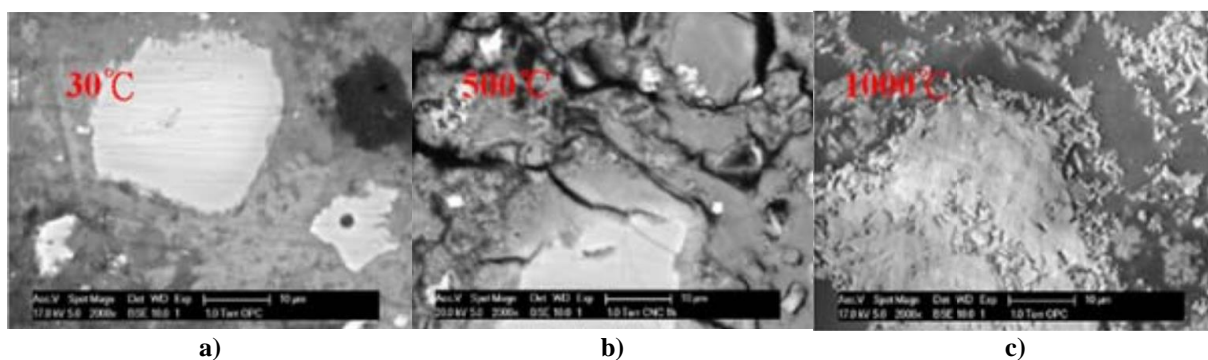
O superaquecimento resulta em alterações físicas, químicas e na microestrutura das argamassas. Em temperaturas mais altas ($>450^{\circ}\text{C}$) a desidratação de compostos do cimento (CH e C-S-H) transforma a estrutura dos poros e modifica consideravelmente propriedades físicas e mecânicas de argamassas no estado endurecido (Alani; Hassan; Jaber, 2020). Segundo Pham e Prince (2014), as alterações de escala mesoscópica (2 nm-100 nm) como as que ocorrem no hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (também chamado cal hidratada ou portlandita) e de escala microscópica (menor que 2 nm) como no silicato de cálcio hidratado C-S-H alteram propriedades das argamassas na escala macro. O estudo de tais alterações é o que possibilita compreender os mecanismos de degradação desses materiais. De acordo com Mehta e Monteiro (2014), uma pasta de cimento Portland bem hidratada conta com 50 a 60% de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), 20 a 25% de hidróxido de cálcio - $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e 15 a 20% de sulfoaluminatos de cálcio. O efeito das altas temperaturas na pasta de cimento dependerá do seu grau de hidratação e condição de umidade. Com a elevação da temperatura, os diversos tipos de água são rapidamente perdidos. Em torno dos 300°C , a água interlamelar do C-S-H e parte da água combinada do C-S-H e dos sulfoaluminatos é perdida. A cerca de 500°C , tem-se uma nova desidratação, associada à decomposição do hidróxido de cálcio.

Cülfik e Özturan (2002) ensaiaram argamassas de alta resistência com e sem adição de grafite (5% sobre a massa de cimento) submetidas a 300, 600 e 900°C . Os resultados

evidenciaram a influência da taxa de aquecimento nos valores residuais das propriedades mecânicas. Corpos de prova aquecidos a 8°C/min, por exemplo, apresentaram resistência à compressão de 10 a 15% maiores que aqueles aquecidos a 2°C/min. O tempo de permanência na temperatura máxima (1h ou 10h) também foi avaliado. O maior tempo de permanência (10h) resultou em menores valores para resistência à compressão, independente da taxa de aquecimento. Constatou-se ainda que a resistência à flexão decresceu em maior intensidade que a resistência à compressão, enquanto o módulo de deformação das argamassas caiu linearmente com o aumento da temperatura.

Zhang e Ye (2011) analisaram pastas de cimento Portland (CEM I 42,5N) com relações $a/c=0,5$ submetidas por 24 horas a temperaturas de 105 a 1000°C. Alterações químicas e microestruturais foram avaliadas por microscopia de varredura (MEV), intrusão de mercúrio e termogravimetria. Não foram constatadas alterações significativas até os 400°C (Figura 2.4a). O C-S-H manteve sua morfologia de gel. Entre 500 e 800°C alterações de volume do C-S-H e do hidróxido de cálcio (CH) geraram fissuras na matriz (Figura 2.4b). Os poros antes isolados foram conectados. Em torno dos 1000°C os poros se expandiram consideravelmente e os hidratos (C-S-H e CH) foram completamente convertidos na fase cristalina (Figura 2.4c). Da termogravimetria notou-se uma perda rápida de massa no início do aquecimento seguida de uma estabilização até os 450°C, quando uma nova perda rápida marcou a desidratação do CH.

Figura 2.4 – Pasta de cimento após diferentes temperaturas: a) 30°C; b) 500°C; 1000°C.

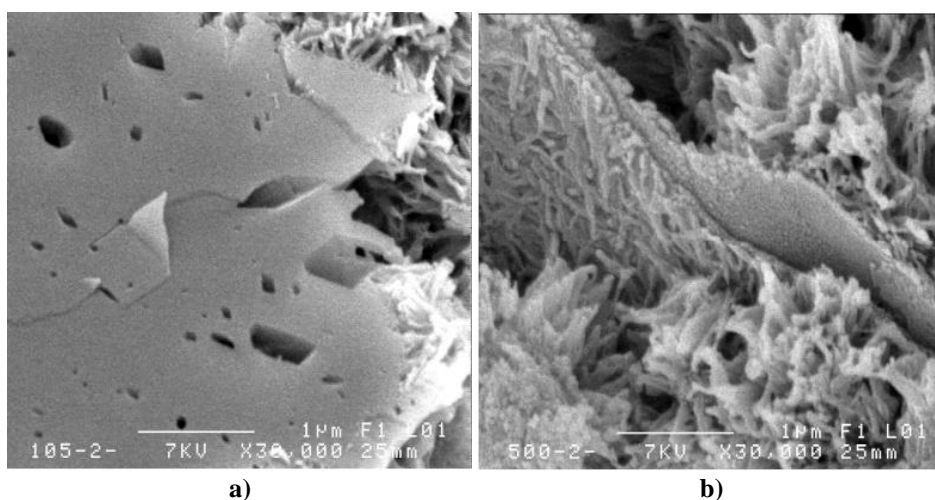


Fonte: Zhang e Ye (2011)

Pham e Prince (2014) estudaram a microestrutura de argamassas cimentícias aquecidas entre 105 e 500°C. Moldaram corpos de prova prismáticos (70 × 70 × 280 mm) e cilíndricos (Ø40 mm e h=60 mm) com misturas de relações $a/c=0,5$ e areia/cimento=3. O desmolde foi após 24h, seguido de cura em câmara úmida (20°C e 100% de umidade relativa). Alguns corpos de prova foram secos a 105°C até a constância de massa, outros foram aquecidos em 1°C/min e submetidos por 6 horas às temperaturas de 200, 300, 400 e 500°C. O resfriamento se deu dentro do forno, até a temperatura ambiente. Após o resfriamento, determinou-se a distribuição

de poros por adsorção de nitrogênio em pós extraídos das amostras. Dos resultados, observou-se que entre 105°C (Figura 2.5a) e 400°C houve redução no volume de microporos, em função da perda de hidroxilas do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), aproximando suas camadas e retraindo sua estrutura. Entre 400 e 500°C (Figura 2.5b), além da decomposição, o C-S-H sofreu uma transformação de fase, recristalizando e tomando forma de partículas compactas. A cal hidratada – Ca(OH)_2 perdeu hidroxilas e o óxido de cálcio resultante passou pelo processo de carbonatação natural ($\text{CaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3$). As alterações entre os 400 e 500°C aumentaram o volume dos mesoporos (raio > 2 nm) da argamassa.

Figura 2.5 – Microestrutura da argamassa: a) superfície do cristal de Ca(OH)_2 em 105°C; b) após 500°C.



Fonte: Pham e Prince (2014)

Tantawy (2017) investigou a microestrutura de pastas de cimento (relação $a/c=0,27$), moldadas em corpos de prova cúbicos (vol. 2 cm³), curados por 28 dias com submersão em água, secos durante 24h a 105°C e então submetidos à taxa de aquecimento de 10°C/min até 300, 450, 600 e 750°C (manutenção da temperatura por 2h). Nos resultados não foram observadas alterações significativas até os 300°C. Uma pequena redução na resistência à compressão das argamassas ocorreu até os 450°C, devido à desidratação do C-S-H, da etringita e dos aluminatos de cálcio hidratados. A temperatura de 450°C foi considerada crítica por conta da desidratação expressiva da portlandita e da redução em mais da metade da quantidade de C-S-H. A partir dos 450°C, a decomposição da portlandita passou a ser menor, e a transformação do C-S-H em C_2S e C_3S continuou até se completar em torno dos 750°C. As mudanças a partir dos 450°C foram acompanhadas de um aumento na porosidade total das argamassas, perda severa de resistência à compressão e propagação de fissuras.

O estudo de Karahan (2011) abordou a influência de diferentes regimes de resfriamento e do processo de cura ao ar livre no comportamento de argamassas submetidas a altas

temperaturas. Corpos de prova cúbicos (aresta 40 mm) foram moldados com relações $a/c=0,5$ e areia/cimento=3. Após desmolde em 24h e cura a $21\pm 1^\circ\text{C}$ por 28 dias, os corpos de prova foram secos durante 24h em forno a 105°C . Em seguida, foram submetidos ao aquecimento de $12^\circ\text{C}/\text{min}$ até 400, 600, 800 e 1000°C , com manutenção de 1h na temperatura de interesse. Concluída a queima, as amostras foram resfriadas de 3 modos: em temperatura ambiente dentro do laboratório (por 1h), em água (por 1h) e dentro do próprio forno (por 24h, à taxa de $1^\circ\text{C}/\text{min}$). Após o resfriamento, os corpos de prova foram novamente expostos ao ar livre, para recura durante 7 dias. Ensaios de resistência à compressão foram realizados antes e após a recura. Dos resultados, notou-se que a exposição às temperaturas de 400 a 1000°C reduziu drasticamente a resistência das argamassas em relação ao ensaio em temperatura ambiente. Como esperado, a maior redução ocorreu com a queima a 1000°C , independentemente do regime de resfriamento. Quando não realizada a recura, o resfriamento gradual no ambiente de laboratório e dentro do próprio forno não apresentaram diferença para a resistência à compressão medida após todas as temperaturas de queima. O resfriamento com água causou redução significativa da resistência à compressão em comparação aos demais regimes. O processo de recura por 7 dias causou, respectivamente, reduções de 19 a 76% na resistência à compressão dos corpos de prova resfriados lentamente ao ar livre e dentro do forno. Para os corpos de prova resfriados com água, a recura ao ar livre gerou aumentos na resistência à compressão (ganhos de 39,100 e 130% em relação às resistências após queimas de 400,600 e 800, respectivamente).

Henry, Suzuki e Kato (2011) investigaram argamassas de cimento e areia normais (relação $a/c=0,5$; areia/cimento=2,3 em massa; 0,2% incorporador de ar sobre massa de cimento) e de alta resistência (relação $a/c=0,3$; areia/cimento=1,8 em massa; 0,4% incorporador de ar sobre massa de cimento). Os materiais foram submetidos a 550°C com manutenção da temperatura por 2h. Em seguida, três combinações de resfriamento e recura foram testadas (Quadro 2.1).

Quadro 2.1 – Condições de resfriamento e recura após queima.

COMBINAÇÃO	Período de resfriamento – 1 hora	Recura após queima – 28 dias
AR	Ao ar livre	Ao ar livre
ÁGUA	Submersão em água	Submersão em água
ÁR-ÁGUA	Ao ar livre	Submersão em água

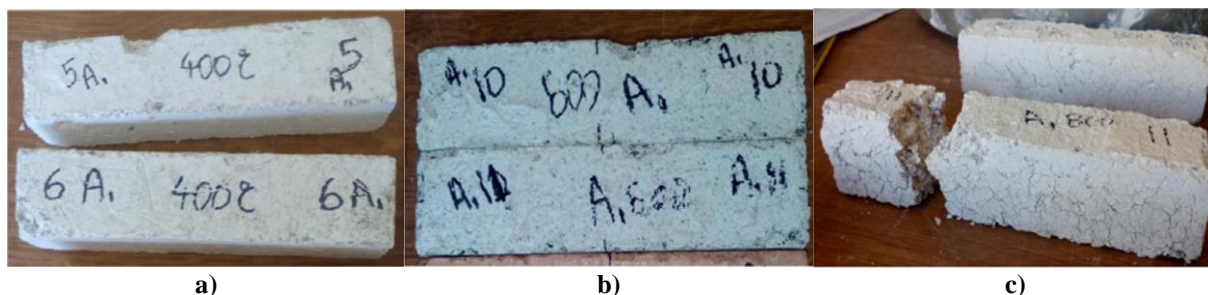
Fonte: Henry, Suzuki e Kato (2011)

Propriedades físicas e mecânicas foram obtidas 1h após o resfriamento e após os 28 dias de recura. A resistência à compressão das argamassas submersas em água apresentou recuperação parcial após os 28 dias. Contudo, a maior resistência residual foi obtida em regime de cura misto (AR-ÁGUA). O resfriamento e recura ao ar livre representou a pior situação, com

formação de fissuras associadas à retração térmica. Os corpos de prova não apresentaram recuperação da resistência à compressão, além de fornecerem os piores valores para propriedades, relacionados à durabilidade (permeabilidade ao ar e resistência à carbonatação). As argamassas de resistência normal degradaram-se mais que as de alta resistência, em função da intensa fissuração.

No trabalho de Pachta, Triantafyllaki e Stefanidou (2018) foram produzidas argamassas à base de cal hidratada, areia silicosa (0-4 mm), pedrisco silicoso (4-8 mm) e 1% de aditivo superplastificante em relação à massa de aglomerante. Além do traço de referência, outros traços foram obtidos com adição de pozolanas naturais, argila, pó de tijolo e cimento branco (CEM II/A-LL 42,5). Corpos de prova prismáticos (4 × 4 × 16 mm) foram moldados e, aos 28 dias, submetidos ao aquecimento de 5°C/min até 200, 400, 600, 800 e 1000°C. A temperatura máxima foi mantida por 2h e o resfriamento ocorreu a 2°C/min. Após 24h, propriedades físicas e mecânicas foram testadas. Até os 400°C apenas a argamassa de referência (somente cal) apresentou microfissuração e deslocamento (Figura 2.6a). Com 600°C apresentou intensa degradação e esfoliação das arestas (Figura 2.6b). Após 800°C observou-se fissuração severa para além da superfície (Figura 2.6c). Todas as argamassas apresentaram a maior perda de massa com 200°C, por conta da evaporação da água livre, até os 800°C as perdas de massa foram aumentando gradualmente, e decaíram aos 1000°C. Com exceção da argamassa de referência, a porosidade das demais aumentou até os 400°C e decresceu com exposição a 600 e a 800°C. A argamassa de referência apresentou reduções progressivas na porosidade desde os 200°C.

Figura 2.6 – Argamassa de referência à base de cal: a) após 400°C; b) após 600°C; após 800°C.



Fonte: Pachta, Triantafyllaki e Stefanidou (2018)

A resistência à flexão aumentou com 200°C para a maioria das argamassas e decresceu até os 800°C. Com 1000°C os resultados foram irrisórios. A resistência à compressão de todos os traços aumentou consideravelmente até os 600°C e diminuiu a partir dos 800°C.

Abdulhussei, Abbas e Frayyeh (2018) investigaram argamassas cimentícias (cimento: areia 1:3, em massa), com e sem superplastificante, com e sem substituição da areia por tijolos

cerâmicos triturados. Após cura imersa por 28 dias, os corpos de prova foram aquecidos até 100, 200, 400 e 700°C, com manutenção por 2h na temperatura de interesse e resfriamentos com água (30 min) e ao ar livre. Em seguida, ensaios de compressão em cubos aresta 50 mm (ASTM C 190-02) e flexão em corpos de prova prismáticos 40 × 40 × 160 mm (ASTM C348-02) foram realizados. Como resultados, observou-se queda de 65,3% da resistência à compressão do traço de referência (sem resíduo ou plastificante) após aquecimento de 700°C e resfriamento com água. Com 100% de resíduo e resfriamento ao ar, a propriedade caiu apenas 12,3%. Para a resistência à flexão, o traço de referência apresentou 64,7% de queda após 700°C e resfriamento com água. Com 100% de resíduo e resfriamento ao ar, a propriedade caiu 9%. O resfriamento com água fez as propriedades decrescerem mais que o resfriamento ao ar. O uso do superplastificante aumentou as resistências em temperatura ambiente e a substituição da areia pelo resíduo de tijolos (material refratário) freou a queda das propriedades durante o aquecimento. Todos os traços aquecidos até 200°C e resfriados ao ar livre apresentaram ganho das propriedades. Para os resfriados com água, isso aconteceu até os 100°C.

Xiong *et al.* (2020) estudaram argamassas cimentícias (cimento: areia 1:2) moldadas com relações a/c 0,45; 0,55 e 0,65. Os corpos de prova foram curados com umidade de 95% por 28 dias. Antes dos ensaios, secagem por 7 dias em ambiente ventilado. A queima ocorreu na taxa de 10°C/min até 200, 300 e 400°C, com manutenção por 2h na temperatura de interesse e resfriamento dentro do forno. Em seguida, realizou-se ensaios de resistência à compressão com medição do módulo de deformação secante em cubos com 3 tamanhos de aresta 70,7; 100 e 150 mm e tração por compressão diametral em corpos de prova cilíndricos de 5 geometrias: Ø50×25, Ø50×30, Ø50×35, Ø50×40 e Ø50×50 mm. Observou-se que até os 400°C a resistência à compressão e o módulo secante diminuíram para todas as geometrias de cubo. Esse decréscimo foi maior nos cubos de menor aresta (70,7 mm). A deformação correspondente à tensão máxima cresceu gradualmente à medida que a aresta do cubo aumentou. Para uma mesma temperatura, conclui-se que a resistência à tração por compressão diametral diminuiu com o aumento na espessura dos corpos de prova cilíndricos. Esse comportamento foi observado de forma mais intensa em temperatura ambiente, seguida dos 200°C e depois 400°C.

Xue *et al.* (2021) determinaram a porosidade (por intrusão de mercúrio) e permeabilidade (via radiografia de nêutrons) em argamassas de cimento (42,5), areia (diâmetro máximo=5 mm) e relação a/c=0,6 após submissão a 200, 400, 600 e 800°C por 2h. Antes do aquecimento, todos os corpos de prova foram secos em estufa a 105°C, durante 12h. Os resultados revelaram que as altas temperaturas causaram aumentos significativos das propriedades físicas, sobretudo após os 400°C (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Porosidade e permeabilidade das argamassas após altas temperaturas.

Temperatura (°C)	Porosidade	Aumento em relação a 105°C (%)	Permeabilidade k ($1 \times 10^6 \mu\text{m}^2$)	Aumento em relação a 105°C (%)
105	0,166	-	1,102	-
200	0,183	10,24	1,245	12,98
400	0,214	28,91	1,406	27,59
600	0,287	72,89	38,984	3437,57
800	0,313	88,55	502,324	45482,94

Fonte: Xue *et al.* (2021)

Pereira *et al.* (2020) avaliaram argamassas cimentícias contendo materiais isolantes: argila expandida, cortiça expandida e aerogel de sílica. Também foram testados aditivo incorporador de ar (surfactante aniônico) e agente reológico (hidroxietil metil celulose). As misturas foram produzidas com relações a/c de 0,55 a 1,00 e relação água/agregados 1:4. A cura ocorreu por 7 dias em sacos de polietileno e 21 dias em câmara climática ($20 \pm 2^\circ\text{C}$, umidade $65 \pm 5\%$). O aquecimento foi de $2,5^\circ\text{C}/\text{min}$ até 100, 150, 200 e 250°C , com manutenção por 1h na temperatura de interesse e resfriamento de $1,5^\circ\text{C}/\text{min}$ até a temperatura ambiente. Após o aquecimento realizou-se ensaios não destrutivos em corpos de prova prismáticos de $40 \times 40 \times 160$ mm: determinação da massa específica aparente, do módulo elástico dinâmico por pulso ultrassônico e resistência à compressão estimada indiretamente ($f_c = 0,0364 \times E_d^{0.5832}$; $R^2=0,9992$). A condutividade térmica foi obtida em corpos de prova cilíndricos $\varnothing 60$ mm e 20 mm de espessura.

Dos resultados, observou-se variações em torno de 10% na massa específica de todas as misturas, com exceção do traço com aerogel, que apresentou redução de 25% após 250°C . Argamassas sem materiais isolantes não apresentaram alteração da massa específica até os 100°C ; houve redução da propriedade entre 100 - 150°C e aumento acima dos 150°C . As argamassas com aerogel e com adições foram as que apresentaram as maiores alterações na velocidade de pulso ultrassônico. Após 250°C , a argamassa com aerogel exibiu 25% de redução contra 34% da argamassa com adições (incorporador de ar e agente reológico). O módulo elástico dinâmico reduziu 37% após 250°C , na argamassa com aerogel. Reduções de 17 a 29% e de 5 a 20% foram observadas nos módulos das argamassas com argila expandida e de referência (sem materiais isolantes ou adições), respectivamente. Na argamassa com adições, observaram-se reduções de 29 a 55%. O módulo da argamassa com cortiça expandida aumentou, devido ao endurecimento das paredes celulares do material quando aquecido.

Entre 150 e 200°C houve aumento na resistência à compressão das argamassas com argila expandida e de referência, e estabilização da propriedade nas argamassas com cortiça

expandida e adições. Após 250°C, todos os traços sofreram redução da condutividade térmica. A maior redução da condutividade foi na argamassa de referência. A menor redução foi no traço com aerogel que, junto com o traço contendo cortiça, manteve a propriedade de isolamento térmica da argamassa mesmo após o aquecimento.

Zemri e Bouiadjra (2020) ensaiaram pastas e argamassas preparadas contendo cimento Portland com e sem adição de escória de alto forno após aquecimentos de 1°C/min até 160, 300, 400 e 650°C. Todos os traços contaram com areia com DMC=4 mm, relações água/cimento e areia/cimento iguais à 0,5 e 1,775, respectivamente. Uma cura de 90 dias e manutenção em câmara com umidade (55%) temperatura (25°C) controladas precederam o aquecimento. Corpos de prova cilíndricos (diâmetro 40 mm, altura 80 mm) foram moldados para testar porosidade, massa específica no estado seco, resistência à compressão e módulo de deformação. Aos 90 dias, a porosidade observada nas argamassas com cimento de escória foi menor, em função das reações pozolânicas da adição. Todas as misturas perderam massa com o aumento da temperatura. Pasta e argamassa sem escória apresentaram perdas totais de massa iguais a 86,26 e 41,10%, respectivamente. Com escória no cimento, pasta e argamassa perderam 94,53 e 41,48%, respectivamente. Após todas as temperaturas, a permeabilidade das argamassas sem escória foi maior. Pastas e argamassas com cimento de escória apresentaram maiores resistências residuais à compressão de uma forma geral. Após 160°C as argamassas com e sem escória tiveram aumentos na resistência de 14,17 e 6,97%, respectivamente. Com 400 e 650 °C as resistências das argamassas sem escória corresponderam a 71 e 23% do valor obtido em 60°C. Com cimento de escória esses valores foram de 79 (400°C) e 36% (650°C). Diferente da resistência à compressão, o módulo de deformação de todas as argamassas decresceu com o aumento da temperatura e, com exceção dos 650°C, as argamassas com cimento de escória apresentaram menores valores para a propriedade. Com o aquecimento, reduções na inclinação das curvas de tensão-deformação foram acompanhadas de aumento nas deformações plásticas.

Bamonte, Gambarova e Sciarretta (2021) testaram três argamassas cimentícias: 5 MPa (cimento:cal:areia - 1:1:5,54), 10 MPa (cimento:cal:areia - 1:0,036:4,75) e 15 MPa (cimento:cal:areia - 1:0,03:4,06) com traços em massa. Traço de 5 MPa com 0,1% de fibras de polipropileno, em relação ao volume da mistura. O agregado miúdo silicoso foi adicionado na condição saturado superfície seca. Corpos de prova cilíndricos: cura por 28 dias em moldes plásticos, temperatura 20 a 25°C e umidade relativa entre 60 e 70%. Corpos de prova prismáticos: cura por 28 dias a 20° e umidade relativa 95%. Queima à taxa de 1°C/min até 200, 400 e 600°C, com manutenção da temperatura por 120 min. e resfriamento em 0,25°C min até 200°C, seguido de resfriamento natural com portas do forno abertas. Após o aquecimento

ensaiou-se: resistência à compressão (cilindro $\varnothing 80 \times 160$ mm); flexão em corpos de prova prismáticos $40 \times 40 \times 160$ mm, com determinação da resistência à compressão nas metades resultantes. Perda de massa e difusividade térmica (cilindros $\varnothing 100 \times 20$ mm) também foram analisadas. Sobre a difusividade térmica: os três traços apresentaram boas condições de isolamento, mesmo após os 900°C . O valor da propriedade foi significativamente menor que de concretos convencionais. A perda de massa obtida também superou o que se observa em concretos convencionais, por conta do maior teor de água. Resistência à compressão: até os 300°C , as argamassas mais resistentes (10 e 15 MPa) apresentaram menor queda na propriedade. A partir dessa temperatura, os comportamentos dos três traços tornaram-se semelhantes ao de concretos convencionais. Ensaio em cubos e em cilindros apresentaram comportamentos diferentes. O efeito favorável de confinamento nos corpos de prova cúbicos aumentou com o aquecimento. Resistência à tração na flexão: todas as argamassas apresentaram decréscimos lineares da propriedade e próximos do fornecido por concretos convencionais. Módulo de deformação secante: até os 400°C a argamassa de 15 MPa se mostrou mais sensível que as demais ao aquecimento. Após os 400°C , o comportamento das argamassas de 10 e 15 MPa tornaram-se semelhantes.

No trabalho de Gao, Wang e Yang (2021), investigou-se uma argamassa cimentícia (água:cimento:areia 1:2:5). O desmolde ocorreu após 24h, seguido de cura por 28 dias em temperatura $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade de $95 \pm 5\%$. A queima ocorreu até 200, 400 e 600°C , com carregamento aplicado. Para temperaturas maiores que 400°C , o aquecimento ocorreu em duas etapas: 20 min até os 400°C e depois aumento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$ até a temperatura de interesse, com manutenção por 30 min e resfriamento com forno desligado e porta aberta. As cargas de ensaio corresponderam a 0, 20; 40 e 60% da carga de ruptura em temperatura ambiente, aplicada antes e mantida durante o aquecimento. Corpos de prova cúbicos de aresta 40 mm aquecidos aos 28 dias de idade. Após 24h de resfriamento, ensaio de resistência à compressão residual e escaneamento por raios-x para medir porosidade. A porosidade das argamassas aumentou com exposição às altas temperaturas. A pré-carga durante o aquecimento reduziu a porosidade dos corpos de prova, mas não significativamente. Corpos de prova aquecidos sob carga apresentaram menor fissuração com redução da resistência à compressão somente após os 400°C , enquanto os aquecidos sem carga apresentaram contínua diminuição da resistência à compressão residual.

Pachta, Tsardaka e Stefanidou (2021) estudaram argamassas cimentícias (1:2 - cimento: areia, em massa), com relações $a/c=0,43$ e $0,44$. Sete traços foram moldados com adição de retardadores de chama: trióxido de alumínio- $\text{Al}(\text{OH})_3$, hidróxido de magnésio- $\text{Mg}(\text{OH})_2$ e

nano-argila (montmorilonita), nas proporções de 1 a 5% em relação à massa de cimento. Cura por 28 dias, conforme BS EN 196-1:1995. Aquecimento na taxa de 5°C/min até 200, 400, 600, 800 e 1000°C; com manutenção por 2h; resfriamento de 2°C/min até temperatura ambiente. Passadas 24h após o aquecimento, testou-se: análise dimensional, medição da massa, porosidade, absorção de água por capilaridade (EN 1015-18:2002), massa específica aparente (RILEM CPC 11.3), módulo de elasticidade dinâmico (BS 1881-203:1986), resistências à compressão e à flexão (BS EN 196-1:1995). Todos em corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm). Dos resultados em temperatura ambiente: Al(OH)₃ reduziu a água nas misturas; adição isolada de Mg(OH)₂ e de Al(OH)₃ + Mg(OH)₂ em 2,5% da massa de cimento mantiveram a relação a/c; nano-argila elevou a relação água/cimento e reduziu consistência; porosidade e absorção de água aumentaram de 2 a 30% com adições, sendo o maior aumento com Al(OH)₃ + Mg(OH)₂; massa específica decresceu em todos os traços com adição. Após o aquecimento, valores de módulo caíram 20% com 200°C, de 40 a 60% com 400°C e acima de 90% com 600°C. Resistência à flexão aumentou para todas as misturas até os 200°C. A partir dos 600°C, o módulo de elasticidade com adições caiu menos que a referência. Para a resistência à flexão isso ocorreu entre 600 e 800°C. Resistência à compressão foi mais preservada pelo Al(OH)₃ entre 200 e 400°C, pela nano-argila entre 600 e 800°C e pela combinação de Al(OH)₃ e Mg(OH)₂ entre 800 e 1000°C.

No estudo de Zahedi e Dehestani (2022) foram testadas argamassas cimentícias com pó de calcário e aditivo superplastificante (1:2 - cimento: areia, em massa), com relações a/c=0,4; 0,45 e 0,5 e teores de pó de calcário iguais a 10,20 e 30% em relação à massa de cimento. Foram adicionadas microfibras de aço e de polipropileno. O desmolde ocorreu após 24h e a cura por 28 dias em solução saturada de água e cal com 23 ± 2°C. Queima na taxa de 2°C/min até 200, 400 e 600°C, manutenção por 6h na temperatura desejada, resfriamento lento e ao ar livre até temperatura ambiente. Após o aquecimento, testou-se: resistência à compressão (cubo aresta 50 mm) e flexão em corpos de prova prismáticos 40 × 40 × 160 mm. A substituição de parte do cimento pelo pó de calcário diminuiu as resistências à compressão e à flexão das argamassas. O uso de fibras de aço e de polipropileno reduziu a resistência à compressão das argamassas e aumentou sua resistência à flexão. Foram observados ganhos nas resistências à compressão e à flexão em todos os traços aquecidos até os 200°C. Para aquecimentos entre 400 e 600°C, as duas propriedades decresceram nas amostras. Para as amostras sem fibras, a maior resistência à compressão foi obtida com relação a/c=0,4 e 30% de pó de calcário. A maior resistência à flexão foi obtida com relação a/c e 10% de pó de calcário.

Fernandes Neto *et al.* (2022) investigaram o comportamento de argamassas cimentícias para assentamento de alvenaria. Três traços em volume foram produzidos: 1:3:1 (cimento:areia:a/c); 1:0,5:4,5:1,13 (cimento: cal hidratada CHIII: areia: a/c) e 1:1:6:1,27 (cimento: cal hidratada CHIII: areia: a/c). O desmolde foi feito após 24h e a cura por 27 dias em câmara climática de umidade $\geq 98\%$ e temperatura $20 \pm 5^\circ\text{C}$. O aquecimento ocorreu por 120 min. pela curva ISO 834:1999, com resfriamento por ventilação mecânica durante 4h, e resfriamento dentro do forno desligado durante 20h. Passados 1,3 e 7 dias do aquecimento, ensaiou-se: resistência à compressão e módulo de deformação (corpos de prova cilíndricos $\varnothing 50 \times 100$ mm). Os traços 1:1:6 e 1:0,5:4,5 apresentaram redução gradual da resistência à compressão entre 1 (45,4%) e 7 dias (81,2%) após o aquecimento. Para o traço 1:3, sem cal, a propriedade apresentou pequena variação no mesmo período (12,3%). A reidratação da cal causou deterioração progressiva nas argamassas aquecidas, sendo mais afetadas quanto maior o teor do aglomerante. O módulo de deformação foi mais sensível às altas temperaturas que a resistência à compressão, devido ao aparecimento de poros e fissuras durante e após o aquecimento. A deformabilidade das argamassas aquecidas aumentou consideravelmente com maiores intervalos após a queima. Os diagramas de tensão-deformação das argamassas aquecidas apresentaram não-linearidades no início do trecho pré-pico por conta da acomodação dos vazios e microfissuras durante e após a queima.

Além dos estudos apresentados, inúmeros trabalhos têm abordado o desempenho de argamassas com adições, aditivos e materiais alternativos sob altas temperaturas (Horszczaruk *et al.*, 2017; Saha, Sarker, Golovanevsky, 2019; Benli, Karatas, Toprak, 2020; Devi, Saini, Aggarwal, 2021; Khan *et al.*, 2021; Nalon *et al.*, 2021; Adewoyin, Adesina, Das, 2022).

2.10.4 SÍNTESE SOBRE ARGAMASSAS

A microestrutura das argamassas muda substancialmente com a exposição às altas temperaturas. Em diferentes estágios do aquecimento, tanto a água livre (acima dos 100°C) contida nos compostos cimentícios quanto aquela quimicamente ligada (acima dos 250°C) são perdidas. A evaporação da água é acompanhada de retração e microfissuração. A distribuição e conectividade dos poros capilares também sofre alteração. Mesmo que eventuais aumentos tenham sido registrados nos aquecimentos de até 300°C (seja pela hidratação tardia de grãos anidros de cimento ou pela aproximação de moléculas e consequente fortalecimento das ligações químicas de Van der Waals), a maioria dos trabalhos apresentados indica que temperaturas acima dos 400°C geram as maiores interferências nas propriedades físicas

(porosidade, absorção, perda de massa) e reduções nas propriedades mecânicas das argamassas (resistência à tração, compressão e módulos de deformação).

O principal fator associado às grandes reduções a partir dos 400°C é a decomposição dos hidratos de cimento (hidróxido de cálcio-CH e silicato de cálcio hidratado-CSH). Após os 800°C, a degradação das argamassas é quase total e suas propriedades de interesse atingem valores irrisórios.

O processo de resfriamento também merece atenção. O modo (com água ou ao ar livre) e a velocidade com que ocorre resultam em diferentes valores residuais para as propriedades dos compostos cimentícios. O resfriamento rápido por submersão em água, por exemplo, resulta na fissuração por retração térmica e decréscimo adicional de resistência, contudo, o contato prolongado da argamassa degradada com umidade pode refletir em pequenos aumentos das propriedades pela reidratação dos compostos. Entre os compostos que reidratam, destaca-se a Cal (CaO), formada anteriormente, durante a decomposição do CH. Em contato com a umidade o CH é recomposto, porém, esta mudança é acompanhada por aumento significativo do volume e uma fissuração intensa e característica que, a olho nu, permite a identificação do fenômeno.

Argamassas simples (cimento e areia) e argamassas mistas de cal e cimento não tem sido o foco dos trabalhos atuais. A tendência nos trabalhos mais recentes é abordar, sob altas temperaturas, compostos de alto desempenho, com incorporação de fibras, aditivos e adições (ex.: fibras de aço e de polipropileno, retardadores de chama, incorporadores de ar, agentes reológicos, escória de alto forno, argila expandida, cortiça expandida, aerogel de sílica). Os resultados obtidos ilustram que as adições podem representar estratégias efetivas no retardamento ou atenuação da degradação nos compostos cimentícios superaquecidos.

O Quadro 2.2 sumariza as principais transformações que ocorrem nas argamassas submetidas ao aquecimento e as temperaturas correspondentes, segundo diferentes autores.

Quadro 2.2 – Alterações na composição/microestrutura de argamassas aquecidas segundo diversos autores.

Autor	Temperatura (°C)	Alteração
Pimienta <i>et al.</i> (2017)	20 – 80°C	Expansão da água capilar e início da evaporação
Ingham (2009)	70 – 80°C	Decomposição da Etringita
Castellone <i>et al.</i> (2004); Pimienta <i>et al.</i> (2017)	80 – 90°C	
Baradan <i>et al.</i> (2002); Alonso <i>et al.</i> (2005); Wendler (2018)	100 – 150°C	Evaporação da água capilar e início da desidratação do gel de C-S-H.
Baradan <i>et al.</i> (2002)	150 – 250°C	Retração e microfissuração da matriz acompanhadas de redução na resistência à tração
	250 – 300°C	Evaporação da água quimicamente combinada com os compostos férricos e aluminatos. Início da redução na resistência à compressão.

Baradan <i>et al.</i> (2002); Fernandes <i>et al.</i> (2017)	400°C	Decomposição da Portlandita (hidróxido de cálcio) em óxido de cálcio. Redução de 33% do volume da pasta.
Alonso e Fernandez (2004)	400 – 475°C	
Castellone <i>et al.</i> (2004)	530 – 560°C	
Baradan <i>et al.</i> (2002); Alonso e Fernandez (2004); Pimienta <i>et al.</i> (2017)	400 – 600°C	Decomposição completa do C-S-H em nesossilicatos. Considerável redução da resistência.
Alonso e Fernandez (2004); Szoke (2006)	750 – 800°C	
Castellone <i>et al.</i> (2004); Szoke (2006); Neville (2016)	Resfriamento	Incorporação de vapor de água presente na atmosfera, reconstituição da Portlandita pela reidratação do óxido de cálcio (CaO). Este processo resulta em um aumento de cerca de 14% do volume da pasta.

Nota-se que entre os diversos trabalhos experimentais desenvolvidos não há um consenso sobre em quais exatos momentos/temperaturas ocorrem as principais transformações físico-químicas nas argamassas aquecidas. Isso ocorre pois os resultados experimentais variam em função da composição dos materiais estudados, do teor de umidade no momento do aquecimento, das condições de cura e qualidade da hidratação (refletindo na distribuição e conectividade dos poros) do material no estado endurecido.

Quanto aos métodos de ensaio, são inúmeras as diferenças encontradas. A começar pela geometria dos corpos de prova: ora a compressão é realizada em corpos de prova cilíndricos, ora em cubos, ou ainda nas metades de corpos de prova prismáticos rompidos na flexão. Além da geometria, diferentes taxas de aquecimento são observadas nos trabalhos experimentais. Como não há uma norma específica para ensaios de propriedades residuais em argamassas superaquecidas, alguns estudos contam com adaptações de normas para concreto, como é o caso da RILEM TC 200 HTC que recomenda taxas de 0,5 a 4°C/min em função do tamanho dos corpos de prova. Outros, empregam taxas de 2,5; 3; 5 10 e até 12°C/min. Embora existam trabalhos nos quais a curva de incêndio padrão (ISO 834) é reproduzida no aquecimento das amostras, taxas menores são priorizadas, a fim de evitar lascamentos explosivos no aquecimento e garantir que o mesmo ocorra uniformemente em toda a extensão dos corpos de prova. A manutenção na temperatura de interesse também varia entre os trabalhos (1h, 2h e até 24h de submissão). A ausência de padronização nos procedimentos de ensaio representa um desafio à comparação de resultados advindos de diferentes estudos. Os mecanismos de degradação sob altas temperaturas e as reações químicas a que estão associados são complexos por si só e dependentes de inúmeros fatores, conforme discutido anteriormente. Os resultados obtidos estão atrelados às condições particulares de cada programa experimental.

Além dos testes para propriedades físicas e mecânicas, ensaios complementares como microscopia de varredura (MEV), determinação da porosidade por intrusão de mercúrio,

difração de raio X (DRX) exercem um importante papel na identificação e compreensão das alterações microestruturais que ocorrem nos compósitos cimentícios superaquecidos.

2.11 GRAUTES

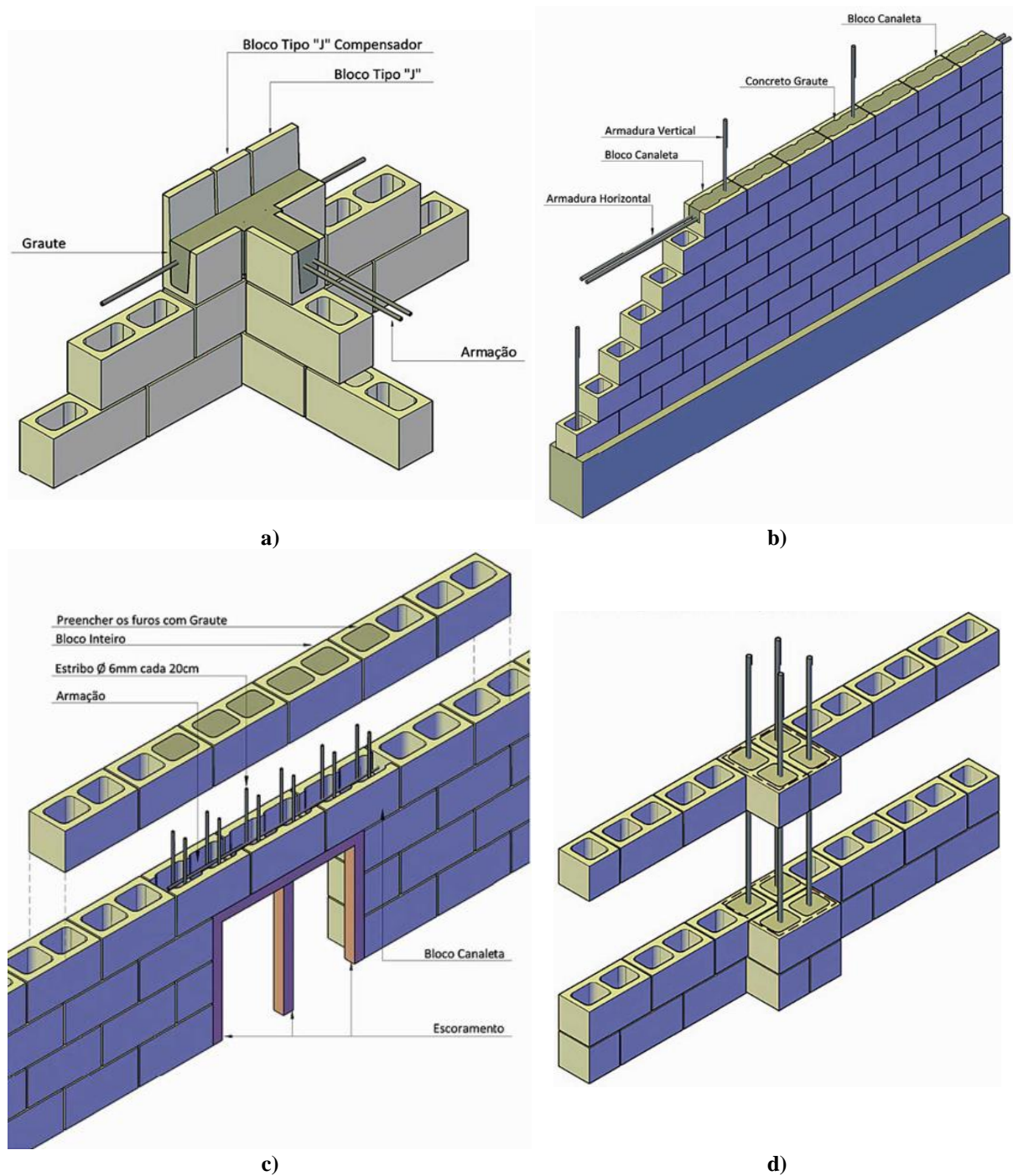
O graute utilizado na alvenaria estrutural é um concreto com características específicas a sua finalidade, com destaque para o uso de agregados menores (pedrisco) e um alto abatimento (slump). Sua função mais comum é o preenchimento, por lançamento (Figura 2.7) ou bombeamento dos vazados verticais ou horizontais da alvenaria, aumentando sua resistência e garantindo aderência da armadura embecida (Pasekian; Hamid; Drysdale, 2014). Além de reforçar a alvenaria à compressão ampliando a área de seção transversal, o graute envolve as armaduras em regiões solicitadas à tração e participa de disposições construtivas como encontro entre paredes (Figura 2.8a), cintas de amarração (Figura 2.8b) e de respaldo, vergas (Figura 2.8c), colunas incorporadas (Figura 2.8d), arrimos.

Figura 2.7 – Lançamento manual do graute na alvenaria.



Fonte: Tauil e Nese (2010)

Figura 2.8 – Aplicações do graute na alvenaria estrutural: a) encontro entre paredes; b) cinta de amarração; c) verga sob janela; d) pilastra incorporada.



Fonte: Tauil e Nese (2010)

2.11.1 PROPRIEDADES RELEVANTES PARA O GRAUTE

De acordo com Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), as principais diferenças em relação ao concreto convencional consistem na elevada relação água/cimento e, como consequência, o alto *slump*. Uma boa dosagem é necessária para fornecer maior fluidez sem que haja segregação da mistura. O graute deve ser fluido o suficiente para garantir o total preenchimento dos vazios

nos blocos assentados que geralmente são pequenos e contêm saliências internas de argamassa. Além disso, mais água disponível na mistura é crucial pois uma parcela é rapidamente absorvida após contato com o concreto poroso da unidade. De acordo com Mohamad (2020), após perder grande parte do excesso de água para as unidades, a relação a/c dos grautes tende a cair para valores entre 0,5 e 0,6.

Cabe salientar que a absorção do bloco não representa um fator desfavorável, mas sim uma variável importante a ser controlada. A boa aderência entre o graute e a unidade depende da absorção da pasta de cimento pelos poros do componente. Dessa forma, o abatimento do graute deve ser ajustado em função do bloco utilizado e das características ambientais (umidade relativa, temperatura) no momento da aplicação. Um *slump* de 200 mm, por exemplo, é adequado a blocos com absorção moderada e espaços maiores a serem preenchidos. Para blocos de alta absorção e furos menores, recomenda-se abatimentos de 250 mm ou mais (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014).

Para melhorar a fluidez, plasticidade e facilitar o adensamento do graute, a ABNT NBR 16868-2:2020 permite a adição de até 10% de cal em relação ao volume de cimento. Segundo a mesma norma, o graute deve ter características no estado fresco que assegurem o completo preenchimento dos furos sem apresentar retração que resulte no seu descolamento da parede dos blocos. Seus agregados devem ter dimensão inferior a 1/4 da menor dimensão dos furos a serem preenchidos. Deve ser transportado sem que haja segregação (sem uso de depósitos intermediários) e ser utilizado dentro de 2h 30min, contadas a partir da adição de água.

Mohamad (2020) destaca que, atualmente, o grauteamento tem sido realizado em duas etapas: o primeiro preenchimento com a parede executada até meia altura e o segundo com toda a parede erguida. Tal estratégia permite a adoção de abatimentos menores (em torno de 70 mm), todavia seu valor final deverá ser ajustado em função da absorção inicial das unidades e da dimensão dos alvéolos.

Entre as propriedades de maior relevância para os grautes no estado endurecido está a resistência à compressão. Segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), a resistência do graute exerce influência no comprimento de ancoragem das armaduras e na resistência à compressão da parede. Por isso, recomenda-se que a propriedade não seja inferior a 15 MPa que corresponde ao mínimo obrigatório para garantia de aderência nos trechos armados. Da mesma forma, utilizar grautes de resistência muito superiores às dos blocos não traz benefícios ao comportamento da alvenaria. O graute deve apresentar resistência à compressão equivalente à resistência da unidade na área líquida. Para blocos vazados de concreto, isso está entre 2 e 2,5 o valor de f_{bk} .

Os ensaios de resistência à compressão dos grautes geralmente são em corpos de prova cilíndricos moldados em formas não absorventes. Na prática, os resultados fornecidos pelos cilindros tendem a ser menores que o real, uma vez que dentro do bloco parte da água é absorvida, reduzindo a relação água/cimento (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014).

2.11.2 INFLUÊNCIA DO GRAUTEAMENTO NO COMPORTAMENTO DA ALVENARIA

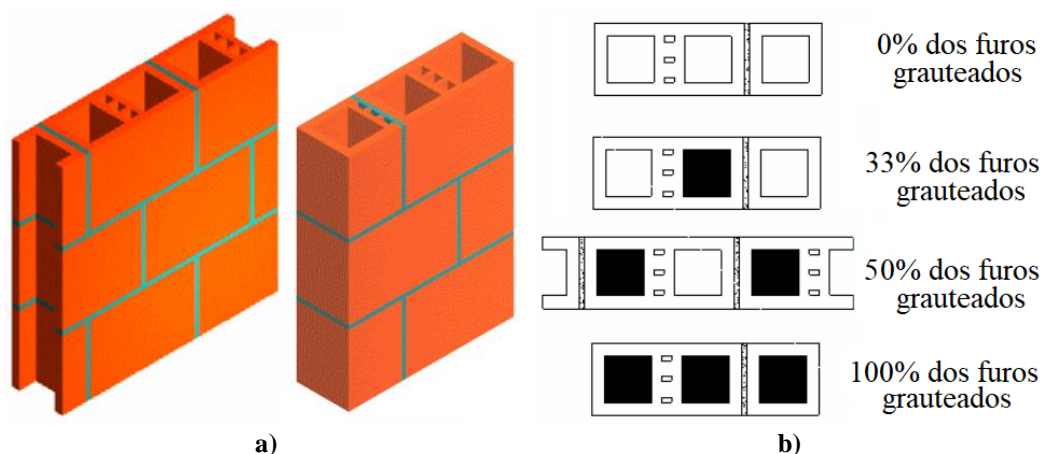
Diversos estudos têm sido realizados ao longo dos anos para analisar o efeito do graute sobre o comportamento à compressão da alvenaria estrutural (Hamid, Drysdale, 1979; Atkinson, Kingsley, 1985; Khalil, Shrive, Ameny, 1987; Shrive, Jessop, 1987; Ramamurthy, 1995; Dhanasekar, Shrive, 2002). Em relação à influência do graute na resistência à compressão do conjunto, existem resultados divergentes na literatura. Em algumas pesquisas observa-se que o grauteamento tende a elevar consideravelmente a resistência da alvenaria. Outros trabalhos, porém, relatam uma distribuição não uniforme de tensões de compressão sobre as juntas longitudinais de argamassa e um agravamento das tensões de tração laterais nos blocos, resultando em um adiantamento da ruptura. A maioria dos trabalhos expõe duas situações principais: a primeira de que a eficiência do grauteamento se torna maior à medida que os valores de resistência e deformabilidade do material se tornam compatíveis com os apresentados pelas unidades. Khalaf, Hendry e Fairbairn (1994), por exemplo, ensaiaram prismas de 3 blocos de concreto e concluíram que as maiores resistências de prisma e maior compatibilidade entre coeficientes de Poisson de prismas e grautes foram obtidas com o uso de grautes com resistências à compressão medidas em cubos (190 mm de aresta) de 45 a 50% maiores do que a resistência dos blocos na área líquida. Os autores também destacam o importante papel das juntas de assentamento que, confinadas, tendem a restringir as deformações laterais nos prismas grauteados. A segunda situação corresponde ao fato de que aumentos na resistência dos grautes não refletem em aumentos nas resistências dos prismas na mesma proporção e, por isso, a simples sobreposição de propriedades mecânicas para os dois componentes (grautes e unidades) não traduz a situação real. Em outras palavras, isso significa que, na prática, a resistência efetiva de um prisma grauteado não é obtida somando-se, simplesmente, os resultados dos produtos *resistência do graute* × *área de aplicação de carga do graute* e *resistência da unidade* × *área líquida da unidade* (Mohamed, 2019).

Mohamed (2019) apresenta alguns fatores que reduzem a contribuição do graute no comportamento dos prismas preenchidos, com destaque: incompatibilidade de deformações longitudinais e transversais entre graute e unidade; geometria, perda de água e processo de cura dos corpos de prova utilizados para controlar a resistência do graute; tensões laterais de tração

induzidas pela retração do graute antes da aplicação do carregamento; falhas no preenchimento e adensamento do graute dentro dos vazios da unidade. Segundo Ramalho e Corrêa (2003), para que o comportamento monolítico da associação bloco, graute e eventual armadura seja considerado, é necessário que o graute envolva completamente as armaduras, aderindo-se tanto a ela quanto ao bloco na formação de um conjunto único.

Cavalheiro e Arantes (2004), estudaram a influência do grauteamento na resistência à compressão de prismas com três blocos cerâmicos e juntas amarradas. Quatro níveis parciais de preenchimento dos furos com graute foram adotados (Figura 2.9). Variou-se também a resistência da argamassa (6,5 e 18,8 MPa) e do graute (8,93; 15,36 e 26,66 MPa). Em relação aos prismas ocos, os prismas cheios forneceram resistências à compressão significativamente maiores. Os autores relatam que, quando produzidos com argamassa e graute de menores resistências, os prismas com 33, 55 e 100% dos furos grauteados apresentaram aumentos de 9,8%, 9,4% e 57,55% em relação aos prismas ocos, respectivamente. Para argamassa e graute de maiores resistências, os aumentos foram de 16,6%, 31,3% e 99,1% quando 33%, 50% e 100% dos furos dos prismas foram preenchidos com graute, respectivamente. Quanto à resistência do graute, essa pouco interferiu na resistência à compressão dos prismas, independentemente da argamassa utilizada. A propriedade aumentou, em média, 16% entre os prismas totalmente preenchidos com o graute mais fraco (8,93 MPa) e totalmente preenchidos com o graute mais resistente (26,66 MPa). Para as demais variações na resistência do graute, os aumentos não ultrapassaram 6%.

Figura 2.9 – Avaliação do grauteamento em prismas cerâmicos: a) tipologia dos prismas estudados; b) argamassamento total.



Fonte: Cavalheiro e Arantes (2004)

Camacho *et al.* (2015) avaliaram a influência do graute no comportamento à compressão de prismas com três blocos de concreto e assentados com juntas a prumo. Para as análises, variou-se a resistência à compressão dos blocos (8,5 e 15 MPa na área bruta) e dos grautes (17

e 30 MPa). Como resultados, verificou-se aumentos expressivos na resistência à compressão dos prismas cheios em relação aos prismas ociosos.

No entanto, aumentos na resistência dos grautes forneceram variações mínimas nas resistências dos prismas. Quando grauteados, os prismas formados por blocos mais resistentes apresentaram maiores aumentos de resistência em comparação com os prismas ociosos. Os autores atribuem esse resultado à maior espessura da parede dos blocos de 15 MPa, tornando-os mais resistentes à expansão lateral interna dos grautes. Embora as tensões de ruptura tenham sido semelhantes para ambos os grautes, os prismas preenchidos com graute de 30 MPa forneceram menores deformações até a ruptura. Os pesquisadores concluíram que os aumentos na resistência à compressão proporcionados pelo grauteamento não foram proporcionais aos aumentos nas áreas de seção dos prismas.

Heydariha, Das e Banting (2017) estudaram a influência da resistência do graute (22,5 e 67 MPa) na resistência à flexão de vigas de alvenaria armadas (armadura transversal e longitudinal) com blocos de concreto ($190 \times 190 \times 390$ mm) assentados com juntas amarradas e juntas a prumo. Os resultados indicaram que o padrão de assentamento não interferiu significativamente na carga suportada pelos elementos. Para vigas com juntas amarradas, o graute mais resistente (67 MPa) forneceu resistência à flexão das vigas 34% maior que o de 22,5 MPa. Para as vigas com junta à prumo, esse aumento foi de 29%. Considerando que o aumento na resistência do graute foi igual a 197%, conclui-se que elevar sua resistência não refletiu em aumentos proporcionais na capacidade das vigas. As vigas preenchidas com graute mais resistente e assentadas com juntas a prumo exibiram maior ductilidade que as demais configurações.

Em seu estudo experimental, Martins *et al.* (2018) concluíram que independentemente da resistência de bloco de concreto, aumentos na resistência do graute deram origem a prismas mais rígidos. Os pesquisadores também observaram que quando a resistência do graute utilizado é próxima à resistência do prisma na área líquida, os prismas tendem a apresentar resistências médias equivalentes ou até maiores que a dos grautes utilizados.

Fonseca *et al.* (2019) abordaram a influência do grauteamento na resistência à compressão de prismas formados com blocos de concreto de alta resistência. Foram ensaiados prismas de dois blocos, variando a resistência das unidades (41, 59 e 75 MPa na área líquida, aos 28 dias), resistência das argamassas (15, 22 e 32 MPa), resistência (35, 41, 47 MPa) e teor de aditivo redutor de retração (0, 1 e 2%) para os grautes. Nos resultados, observou-se que os prismas cheios apresentaram resistências substancialmente maiores que dos prismas ociosos, independentemente da presença do aditivo para retração. A resistência da argamassa não

interferiu significativamente na resistência dos prismas. Os pesquisadores concluíram que o grauteamento pode ou não tornar os prismas mais eficientes (maiores valores para a relação f_{prisma}/f_{bloco}) dependendo da combinação dos materiais utilizados. Os blocos de resistências muito altas, por exemplo, deram origem a prismas menos eficientes que os demais. Prismas grauteados sem aditivo, com blocos de 41 e 59 MPa, apresentaram eficiência 10% menor que os prismas ociosos. Para os blocos de 75 MPa essa redução foi de 20%. O uso do aditivo redutor de retração não propiciou aumentos efetivos na resistência à compressão dos prismas cheios. Apenas os grautes com o maior teor de aditivo (2%) deram origem a prismas mais eficientes que os prismas ociosos.

Izquierdo, Corrêa e Soto (2017) investigaram via testes de arrancamento (*pull-out*) e empurramento (*push-out*) a capacidade de aderência na interface bloco/graute em prismas com cinco blocos de concreto ($140 \times 190 \times 390$) mm e prismas com quatro blocos cerâmicos ($140 \times 190 \times 390$) mm, todos assentados com juntas a prumo. Foram considerados dois traços de graute (14 e 30 MPa), duas resistências para blocos de concreto (10,21 e 26,02 MPa) e uma para blocos cerâmicos (10,89 MPa), três resistências para argamassa (4,45; 4,96 e 5,85 MPa). Para testar a resistência ao arrancamento pelo teste “*pull-out*” alguns furos foram preenchidos com graute com imersão de barras de aço de diâmetros 12,5 e 16 mm. Os resultados evidenciaram aderência satisfatória entre os blocos de concreto e os grautes testados, a ponto de levarem as barras de aço embebidas ao escoamento e impedirem o deslizamento relativo entre os materiais. O mesmo não ocorreu com os blocos cerâmicos, que apresentaram deslizamento dos grautes antes que as barras escoassem. Segundo os pesquisadores, esse resultado está de acordo com a menor rugosidade verificada no interior dos blocos cerâmicos. Para ambos os tipos de bloco, grautes com maiores resistências e menores relações A/C apresentaram as melhores aderências.

Sipp (2019) também avaliou a aderência entre o graute e diferentes blocos cerâmicos por meio da realização de ensaios *pull-out* e *push-out* em prismas de dois blocos. Foram considerados cinco tipos de blocos cerâmicos (Figura 2.10), sendo três de paredes maciças e dois de paredes vazadas. Todos com dimensões ($140 \times 190 \times 290$) mm, variando a resistência à compressão, a presença e a disposição de ranhuras ou frisos nas aberturas internas.

Figura 2.10 – Tipos de blocos para investigação da aderência bloco-graute.

Fonte: Sipp (2019)

Utilizou-se também dois tipos de argamassa (8 e 14 MPa), dois tipos de graute (15 e 30 MPa) e barras de aço de diâmetro 16 mm empregadas no ensaio de arrancamento (*pull-out*). Dos resultados, o autor observou que, independentemente do tipo de parede (maciça ou vazada), os maiores valores de tensão de aderência pelo ensaio de *push-out* foram obtidos com blocos contendo uma maior quantidade de frisos no interior dos vazados e, conseqüentemente, maior área de contato. Notou-se também que os blocos com maior área de contato apresentaram redução no número de fissuras ou descolamentos na região de interface graute-bloco. À medida que a resistência do graute aumentou (de 15 para 30 MPa) a tensão de aderência bloco-graute diminuiu. Segundo o autor, esse comportamento foi resultado de uma retração 30% maior no graute de 30 MPa em comparação ao graute de menor resistência. No ensaio de arrancamento, os maiores valores das cargas resistidas também foram obtidos com uso do graute de 15 MPa.

AbdelRahman e Galal (2020) estudaram a influência da pré-molhagem dos vazios e da incorporação de aditivos expansores contra retração no comportamento à compressão de prismas grauteados com dois blocos de concreto ($190 \times 190 \times 390$ mm). Os prismas foram montados com blocos de 37,4 MPa (área líquida), argamassa de 21,42 MPa e quatro traços de graute (dois com e dois sem aditivo redutor de retração). Uma parcela dos prismas foi ensaiada seca e outra foi submersa por 2h em água antes do grauteamento. Como resultados, os pesquisadores observaram que o grauteamento aumentou a resistência à compressão de todos os prismas testados (de até 38% sem aditivo e de até 78% com aditivo expansor), com maiores aumentos para os prismas submetidos à pré-molhagem. Ao aumentar a resistência dos grautes sem aditivos anti-retração de 32 para 62 MPa, a resistência média à compressão dos prismas sem pré-molhagem aumentou em 28,21%. (de 27,47 para 35,22 MPa). Em relação ao prisma oco, os grautes de 32 e 62 MPa forneceram resistências 8 e 38% superiores, respectivamente. Variações na resistência do graute não refletiram em aumentos significativos na resistência dos

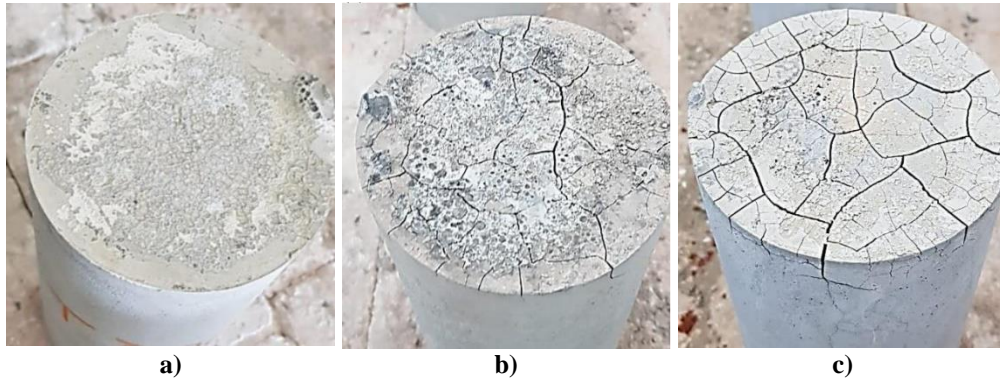
prismas pré-molhados e grauteados com aditivo. Para prismas secos e preenchidos com graute sem aditivo, o aumento de 32 para 62 MPa na resistência do graute elevou a resistência de prisma 28,21%. (de 27,47 para 35,22 MPa). Esse acréscimo desproporcional para os prismas secos é relacionado pelos autores à retração do graute e ao confinamento pelos pratos em função da altura do prisma (dois blocos). O efeito isolado do aditivo melhorou a resistência à compressão dos prismas em 16% para os prismas secos e em 9% para os prismas pré-molhados. A pré-molhagem aumentou significativamente a resistência à compressão dos prismas e resultou em um comportamento homogêneo do prisma, sem fissuras na interface graute-prisma e agindo como elemento monolítico até o momento da ruptura.

2.11.3 GRAUTES PARA ALVENARIA APÓS ALTAS TEMPERATURAS

São escassos os trabalhos que tratam especificamente do comportamento dos grautes de preenchimento para alvenaria estrutural submetidos a altas temperaturas. Sobretudo de misturas produzidas em obra, com a presença do agregado graúdo (obs.: no mercado nacional, algumas misturas prontas são comercializadas como grautes para alvenaria e não contam com o agregado graúdo), e adição de cal, conforme permitido pela ABNT NBR 16868-2:2020.

Entre os estudos existentes, cita-se o de Bittencourt (2019). O estudo contou com ensaios de propriedades mecânicas residuais em grautes industrializados (sem agregado graúdo) submetidos a temperaturas de 300, 600 e 900°C. Corpos de prova cilíndricos de Ø100 × 200 mm foram moldados e aquecidos em forno mufla à taxa de 3°C/min, com manutenção de 30 minutos nas temperaturas de interesse; contudo, a distribuição da temperatura ao longo dos corpos de prova ou em seu entorno não foi monitorada. Após o resfriamento, foram obtidos resistência à compressão (conforme ABNT NBR 5739:2018) e módulo de deformação (conforme ABNT NBR 8522:2017). Como resultados, observou-se ocorrência de fissuração a partir dos 300°C, com aumento de intensidade até os 900°C (Figura 2.11). Cerca de 90% da resistência à compressão e 70% do módulo de deformação dos grautes foram preservados até os 300°C. Após 600°C, mais que metade da resistência inicial foi perdida, enquanto a perda do módulo de deformação superou os 70%. Após 900°C, as propriedades mecânicas apresentaram reduções de aproximadamente 90%. A presença de cal não foi informada pelo trabalho, porém não é comum que as misturas prontas contem com o aglomerante aéreo, mas sim aditivos.

Figura 2.11 – Fissuração após submissão do graute às temperaturas de: a) 300 °C; b) 400 °C; c) 600 °C.



Fonte: Bittencourt (2019)

A contribuição desta tese incide justamente sobre a falta de resultados disponíveis para os grautes convencionais utilizados nas construções brasileiras de alvenaria estrutural. As misturas aqui estudadas foram produzidas *in loco*, com uso de pedrisco (agregado graúdo), altas fluidez e relações *a/c*, e cal em sua composição.

Como visto anteriormente, a presença da cal e seus processos de decomposição/reidratação exercem significativa influência no comportamento dos compostos cimentícios submetidos a altas temperaturas, sobretudo no que tange à fissuração. Para os resultados do presente estudo, espera-se que a presença da cal nos grautes intensifique a formação de fissuras em relação aos concretos comuns, mesmo que adicionada em pequenas quantidades. A quantidade de água disponível em misturas, que devem ser fluidas o suficiente sem possuir aditivos, e a tendência de elevação da poropressão durante a evaporação, podem representar riscos significativos à ocorrência de deslocamentos. Para evitar ou minimizar a ocorrência desse fenômeno, empregam-se idades avançadas de cura e baixas taxas de aquecimento.

Em função da escassez de trabalhos sobre grautes para alvenaria estrutural, a seguir os aspectos voltados à degradação físico-química, influência dos agregados e variação nas propriedades mecânicas serão abordados com base em estudos sobre concretos de diversas aplicações.

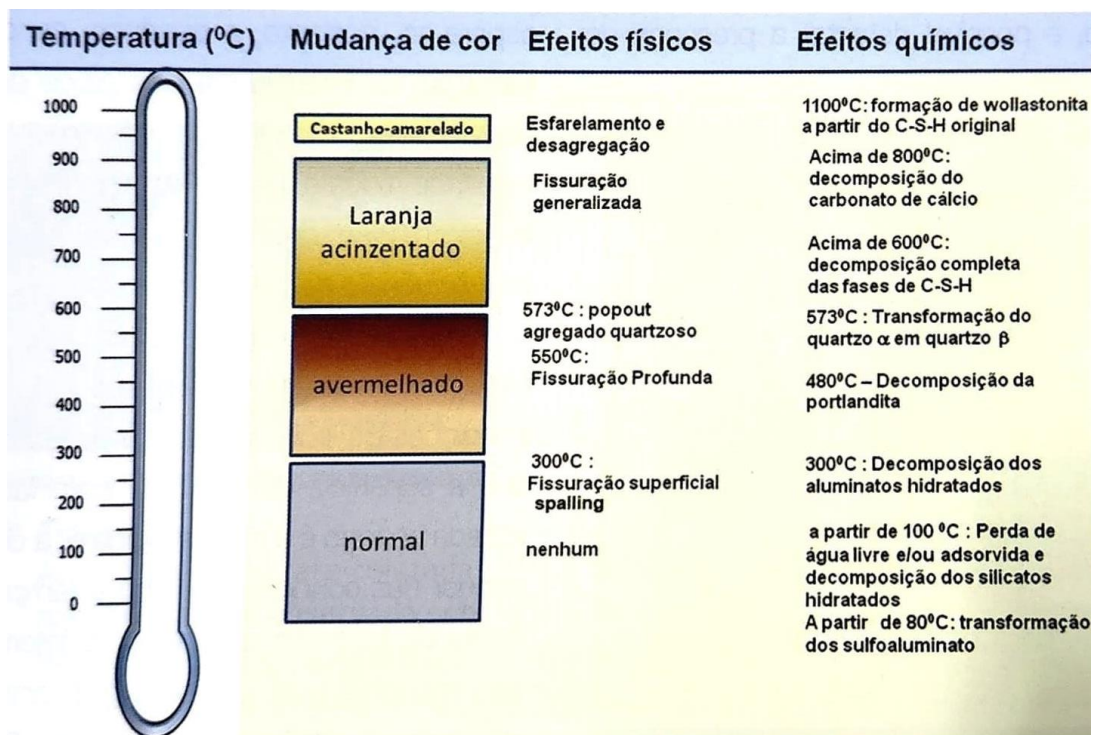
2.11.4 COMPORTAMENTO DOS CONCRETOS APÓS ALTAS TEMPERATURAS

O fato de o concreto ser considerado um material incombustível, de não contribuir com aumentos da carga de incêndio, com a liberação de fumaça ou propagação de chamas não significa que elementos construtivos em concreto sejam resistentes ao fogo ou imunes à degradação causada pelo aquecimento (Berto; Oliveira, 2018). A natureza não combustível, atóxica e a baixa condutividade do concreto tornam-no vantajoso em relação à maioria dos

materiais da construção civil. Porém, se exposto por longo tempo a altas temperaturas, pode sofrer transformações físicas e químicas irreversíveis, refletindo na deterioração de propriedades como resistência à compressão, módulo de deformação, bem como fissuração e perda de aderência entre os agregados e a matriz (Battagin; Silveira, 2018). No concreto, tanto a pasta de cimento e os agregados se decompõem frente ao calor (Mehta, Monteiro, 2014; Robert, Colina, Debicki, 2014).

As principais alterações do concreto quando aquecido foram sintetizadas por Battagin e Silveira (2018) e constam na Figura 2.12.

Figura 2.12 – Alterações na microestrutura do concreto devido às altas temperaturas.



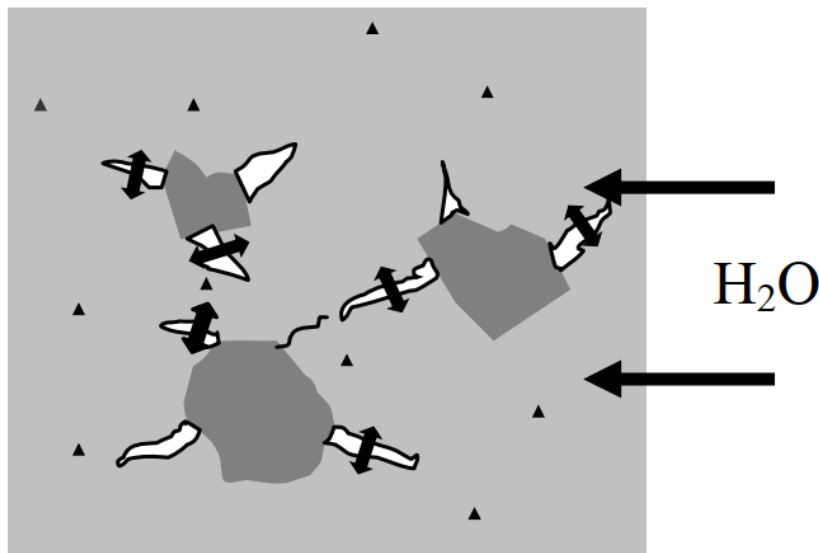
Fonte: Battagin e Silveira (2018)

De acordo com Robert, Colina e Debicki (2014), a ação do fogo no concreto se manifesta, principalmente, de duas formas: redução das propriedades mecânicas e destacamento (lascamento) do material. A perda das resistências à tração e à compressão podem ser verificadas antes ou após o resfriamento (resistência residual), variando em função da temperatura de exposição, da taxa de aquecimento e composição do concreto. O lascamento, por sua vez, está relacionado à estrutura porosa do material e seu grau de saturação. Durante o aquecimento, a umidade inicial, permeabilidade, distribuição dos poros e taxa de aquecimento contribuem com o aumento da poropressão e surgimento de pressões internas de tração no concreto (Lin; Lin; Couche, 1996). Além disso, a baixa condutividade do concreto gera gradientes de temperatura entre a superfície diretamente exposta ao fogo e o interior do

elemento estrutural, colaborando com a ocorrência do lascamento explosivo, fenômeno também conhecido como *spalling* (Lima, Kirchhof, Silva Filho, 2007; Battagin, Silveira, 2018). De modo geral, quanto menor a permeabilidade do concreto e maior a velocidade de elevação de sua temperatura, maior o risco de lascamento (Neville, 2016). Segundo Gil *et al.* (2018), existem basicamente dois mecanismos que desencadeiam o deslocamento do concreto: termomecânico e termo-hidráulico. O mecanismo termomecânico está relacionado ao surgimento de tensões indiretas de tração resultantes do gradiente térmico existente entre superfície aquecida e núcleo ainda frio do concreto. O mecanismo termo-hidráulico remete ao aumento da poropressão causado pela evaporação da água no concreto.

Após o resfriamento, certas fases cimentícias podem se reidratar, dando origem a géis e componentes cristalinos. A cal livre, por exemplo, é reidratada perante expansão e aparecimento de fissuras (Lima; Kirchhof; Silva Filho, 2007). Hertz (2007) destaca que nos primeiros dias após a queima, a cal absorve a umidade disponível no ambiente e, ao hidratar-se, exibe comportamento semelhante ao de um “macaco hidráulico”, expandindo as fissuras já existentes (Figura 2.13). Durante o processo de resfriamento, a resistência à compressão do concreto decresce cerca de 20% e seu menor valor é atingido uma semana após a queima.

Figura 2.13 – Ampliação das fissuras no concreto durante reidratação da cal.



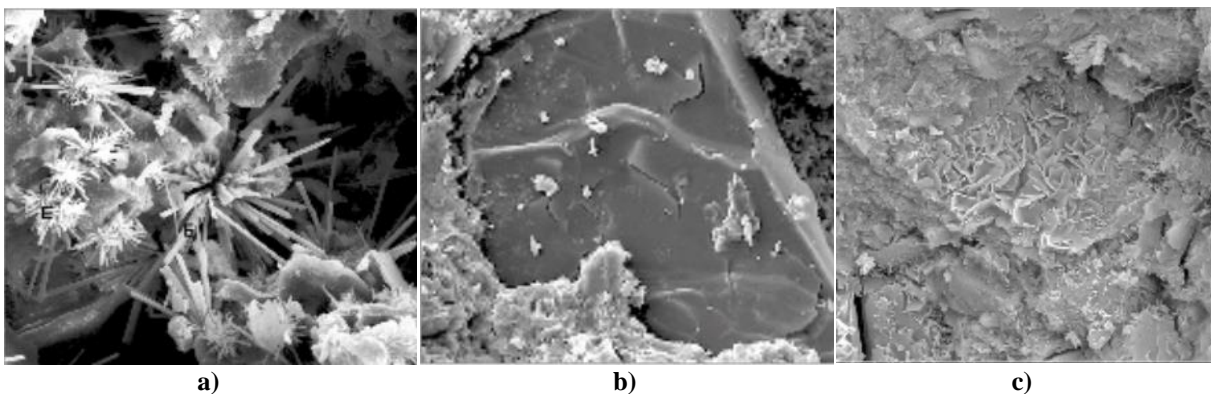
Fonte: Hertz (2007)

Além da incorporação de umidade do meio circundante e reidratação expansiva da cal, as tensões induzidas pelo gradiente térmico durante o período de resfriamento também são responsáveis por severa fissuração no concreto, de tal forma que a separação em larga escala entre agregados e pasta de cimento pode ser observada (Lin; Lin; Couche, 1996).

De acordo com Li *et al.* (2020), propriedades mecânicas e estrutura dos poros em concretos submetidos a altas temperaturas podem ser parcialmente recompostas pelo processo de recura após a queima. Trata-se da reidratação dos hidratos degradados durante o aquecimento. Os produtos de reidratação podem atuar preenchendo as fissuras formadas na matriz cimentícia. No entanto, a microestrutura recomposta não possui a mesma densidade e compacidade da original. Desse modo, os valores das propriedades mecânicas e a durabilidade do compósito dificilmente retornam à condição inicial. O provimento de umidade é a chave para o mecanismo de reidratação como sendo um processo controlado de ingresso da água. Por este motivo, a recura feita na presença de água tende a surtir melhores efeitos que outros métodos (ex.: ao ar livre, parte em água e parte ao ar livre).

Segundo Battagin e Silveira (2018), quando se trata de exposição a altas temperaturas, avaliar a microestrutura do concreto assume grande importância. Mesmo que não haja danos visíveis, o concreto pode ter sido consideravelmente afetado. Ao analisar a Figura 2.14a, por exemplo, que é resultado de uma Microscopia de Varredura (MEV) em face de concreto exposta ao fogo, a presença de cristais aciculares de etringita levou os autores a concluir que a amostra não superou os 100 °C, uma vez que entre 80 e 100 °C ocorre a transformação da etringita cristalizada em amorfa. De maneira semelhante, na Figura 2.14b a existência de cristais fraturados de quartzo e fraturas em suas interfaces cristalinas evidenciaram a transformação alotrópica que ocorre por volta dos 570°C nos agregados (quartzo α se torna quartzo β com 0,8% de aumento no volume), sugerindo o alcance da referida temperatura. Por fim, a presença de portlandita em um concreto após incêndio (Figura 2.14c) indica que a temperatura na região retratada não atingiu os 480 °C. Segundo os autores, a desidroxilação da portlandita ocorre entre 480 e 550 °C.

Figura 2.14 – Análise da microestrutura via MEV para concretos submetidos a altas temperaturas: a) acículas de etringita; b) fraturas no agregado de quartzo; c) portlandita.



Fonte: Battagin e Silveira (2018)

2.11.4.1 Influência dos agregados

Durante a hidratação do concreto, a reação dos compostos anidros do cimento (silicatos e ferroaluminatos cálcicos) com água origina os silicatos cálcicos hidratados (C-S-H), aluminatos de cálcio hidratados, hidróxido de cálcio e sulfoaluminatos de cálcio, com consequente endurecimento da pasta (Battagin; Silveira, 2018). Por contarem com a pasta de cimento em sua composição, os concretos sob altas temperaturas sofrem as mesmas alterações observadas na pasta (Itens 2.10.3 e 2.10.4). Acrescentam-se a essas alterações, os efeitos físicos e químicos relacionados à presença dos agregados graúdos. Segundo Hager (2013), por ocuparem entre 70 e 80% do volume dos concretos os influenciam significativamente o seu comportamento térmico.

Segundo Fernandes *et al.* (2017), a degradação sob altas temperaturas do concreto é governada por três fatores principais: alterações físico-químicas da pasta de cimento, nos agregados e a incompatibilidade nas propriedades térmicas de ambos. Hager (2013) aponta que, sob aquecimento, a tendência é de aumento no volume dos agregados e contração da pasta de cimento que o circunda. O resultado dessa incompatibilidade de deformações entre agregados e matriz resulta na fissuração do compósito. Próximo aos 570°C, inicia-se a fissuração nos agregados quartzosos (granito, arenito e gnaiss), devido ao fenômeno da transformação alotrópica do quartzo α em quartzo β a qual gera um aumento de volume de 0,8% interferindo significativamente nas propriedades físicas do agregado (Lima, Kirchhof, Silva Filho, 2007; Battagin, Silveira, 2018). Essa mudança de fase nos agregados quartzosos pode desagregar o concreto, razão pela qual concretos resistentes ao fogo não contam com agregados de quartzo em sua composição (Neville, 2016).

As rochas carbonáticas também apresentam expansão acima dos 700°C, em função das reações de descarbonatação. Contudo possuem baixos coeficientes de dilatação térmica e reações endotérmicas de desagregação (Lima; Kirchhof; Silva Filho, 2007). A perda completa do CO₂ no agregado calcário ocorre somente por volta dos 1000°C. (Battagin; Silveira, 2018). Os principais minerais do granito (quartzo, feldspato e mica) perdem a coesão entre 800 e 1000°C, com forte retração e fissuração generalizada do agregado.

O coeficiente de dilatação térmica do agregado influi no comportamento do concreto onde é empregado de tal modo que, quanto maior o coeficiente do agregado, maior será o do concreto. Contudo, a expansibilidade do concreto também dependerá dos teores de agregado e demais componentes da mistura. Diferenças entre os coeficientes de expansão do agregado e da pasta de cimento tornam-se prejudiciais quando a temperatura do concreto varia além do

intervalo de 4 a 60 °C (Neville, 2016). Os agregados silicosos correspondem ao grupo que apresenta maior expansão e os maiores danos aos concretos quando expostos a altas temperaturas. Concretos normais produzidos com agregados silicosos perdem resistência mais rapidamente que concretos produzidos com agregados de calcário, dadas as mesmas condições de ensaio (Hertz, 2007; Robert, Colina, Debicki, 2014).

Arioz (2007) avaliou concretos produzidos com agregados silicosos (seixo rolado) e carbonáticos (calcário) após submissão a temperaturas de 200 a 1200°C, com taxa de aquecimento de 20°C/min. Dos resultados, nenhum efeito do aquecimento foi visível nos concretos até os 400°C. A fissuração teve início aos 600°C, progredindo gradativamente até os 800°C e aumentando significativamente aos 1000°C. A redução de massa das amostras foi gradual até os 800°C e acentuada na referida temperatura. Para redução de massa, variações na relação a/c e no tipo de agregado não alteraram significativamente os resultados. A resistência à compressão residual também não foi afetada, variando-se as relações a/c de 0,4 a 0,6 independentemente do agregado utilizado. Contudo a mudança no agregado influenciou de modo significativo a resistência pós queima dos concretos. Após 600°C, por exemplo, os valores relativos de resistência residuais corresponderam a 90% e 50% da resistência inicial para os concretos com calcário e seixo rolado, respectivamente. Os autores atribuem essa maior degradação à composição do agregado predominantemente silicoso (seixo rolado).

Nos trabalhos de Xing *et al.* (2011, 2013) análises físico-químicas e microestruturais foram realizadas, separadamente, em três tipos de agregados: predominantemente carbonático (puro calcário), silicoso-carbonático (70% flint e 24% calcário) e predominantemente silicoso (91% quartzito). Analisou-se também concretos normais (a/c=0,6) e de alta resistência (a/c=0,3) produzidos com esses agregados. Os agregados foram aquecidos à taxa de 1°C/min, até 150, 300, 450, 600 e 750°C e manutenção por 1h nas temperaturas de interesse. Nos resultados de Microscopia de Varredura (MEV) foram observados danos significativos no agregado de flint a partir dos 450°C (macrofissuras paralelas ou perpendiculares à superfície do agregado, microfissuras em forma de mosaico, lascamento e fragmentação) enquanto o agregado de quartzito teve a degradação iniciada até 600°C (fissuras em forma de mosaico não foram observadas neste caso). Os autores atribuem a formação de fissuras em forma de mosaico à retração química provocada durante a perda da água adsorvida e à expansão térmica do quartzo contido no agregado de flint, o qual sofre a mudança de fase (α para β) a 573°C. Ensaio de termogravimetria evidenciaram a estabilidade do agregado quartzito durante o aquecimento, com perda de massa duas vezes menor que a observada no agregado de flint. O agregado de calcário apresentou degradação somente aos 700°C e apenas em sua superfície. Sua degradação

foi maior 3 dias após o resfriamento, em função da reidratação da cal. Corpos de prova cilíndricos de $\varnothing 160 \times 320$ mm foram moldados e submetidos a 300, 600 e 750°C à taxa de 1°C/min e mantidos por 1h nas referidas temperaturas para testar resistência à compressão dos concretos. A resistência dos concretos com agregado silicoso-carbonático sofreu severas reduções entre 300 e 600°C, mostrando-se 3 e 5 vezes menor que a obtida nos concretos com agregados predominantemente silicosos e carbonáticos, respectivamente.

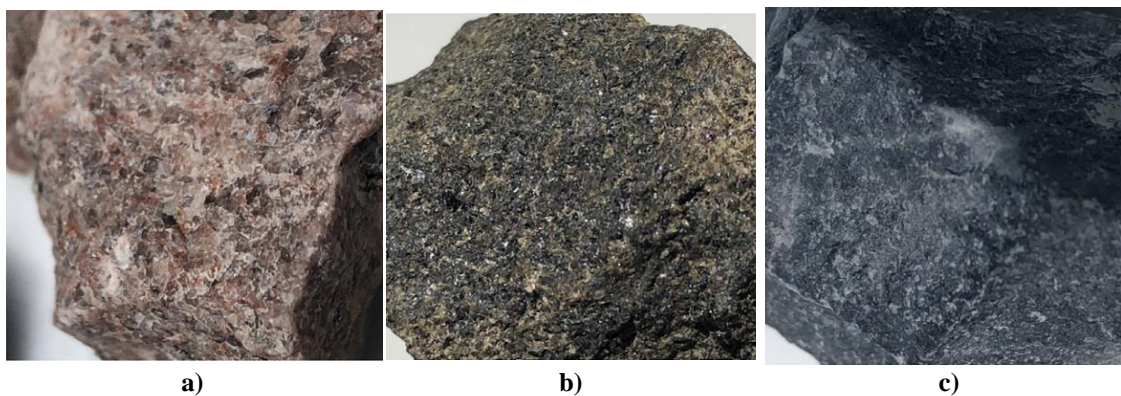
Yoon *et al.* (2015) estudaram a influência do agregado graúdo em concretos produzidos com granito e agregados leves artificiais de argila expandida. Variou-se a presença ou não de carregamento (0, 20 e 40% da ruptura ambiente) e as temperaturas de avaliação (20, 100, 200, 300, 400, 500, 600 e 700°C, à taxa de 1°C/min). Para cada temperatura de interesse, foram avaliados: curvas de tensão-deformação, resistência à compressão e expansividade térmica. Os concretos produzidos com agregado leve (argila expandida) apresentaram os maiores valores de resistência residual (80% contra 27% para os agregados normais, após 700°C), enquanto os concretos produzidos com granito exibiram fissuração intensa na interface entre os agregados e a pasta de cimento, sobretudo acima dos 300°C. A aplicação de carga durante o aquecimento (20 e 40% da ruptura ambiente) resultou em maiores resistências residuais que nos concretos não carregados, indicando a ausência do carregamento como a pior situação. Com carga de 20%, ambos os concretos apresentaram menores tensões associadas à expansão térmica, em função da restrição causada pelo carregamento. Com 40% de carga, as tensões aumentaram abruptamente, sobretudo acima dos 500°C, quando as tensões oriundas do carregamento superaram as proporcionadas pela expansão dos agregados. Além da decomposição dos hidratos do cimento, os autores atribuem as quedas na resistência à compressão aos diferentes coeficientes de expansão térmica entre agregados e matriz e consequente fissuração.

Sobre a influência do carregamento durante o aquecimento, cabe destaque a um fenômeno importante e benéfico ao comportamento mecânico dos concretos. Trata-se da deformação térmica induzida por carregamento ou também conhecida como fluência transiente. Ocorre, sobretudo, acima dos 450°C e em magnitude que supera as deformações elásticas do concreto. Proporciona ao material, considerável relaxação e redistribuição de tensões atreladas às deformações térmicas (Khoury, 2000). Quando o aquecimento ocorre com aplicação de carga, degradações e reduções das propriedades mecânicas causadas pela ocorrência da microfissuração são atenuadas. Um concreto aquecido com aplicação de 25 a 30% de sua carga última, por exemplo, pode apresentar resistência à compressão até 25% superior àquele aquecido sem carregamento. Dessa forma, a favor da segurança, opta-se por resultados obtidos em corpos de prova aquecidos na ausência de carga (Hertz, 2007).

Kara (2021) testou separadamente corpos de prova de calcário e concretos (30,11 MPa, com 350 kg de cimento/m³ e uso de aditivo plastificante) produzidos com calcário britado. Ambos foram submetidos a 200, 400, 550 e 700°C durante 3h e resfriados de dois modos: ao ar livre e com aspersão de água. Dos resultados, constatou-se que a rocha de calcário sofreu degradação apenas após os 700°C quando a perda de massa foi de 0,37 e 0,47% para resfriada ao ar livre e com água, respectivamente. A resistência à compressão da rocha (43,81 MPa em temperatura ambiente) foi reduzida em 54,53 e 52,75% com aquecimento de 700°C seguido de resfriamentos ao ar livre e com água, respectivamente. Ao contrário do observado na rocha, para o concreto produzido com o calcário britado o resfriamento com água afetou menos as amostras que o resfriamento ao ar livre. Não houve diferença significativa entre a resistência à compressão dos concretos aquecidos a 200 e 400°C, estando ambas em torno de 60% da resistência ambiente. Após 550 e 700°C a resistência à compressão dos corpos de prova resfriados ao ar livre foi menor que dos resfriados com água. Ocorrência de fissuras e spalling foram presenciados nos concretos após 550 e 700°C, respectivamente.

Sollero (2021) investigou o comportamento mecânico de concretos normais e de alta resistência produzidos com agregados de granito, basalto e calcário (Figura 2.15) após submissão a temperaturas de 100 a 900°C.

Figura 2.15 – Agregados utilizados por Sollero (2021): a) granito; b) basalto; c) calcário.



Fonte: Sollero (2021)

O aquecimento ocorreu em 1 °C/min, com manutenção de 1 h nas temperaturas de interesse, tendo ou não pré-aquecimento durante 24h em 100°C para redução da umidade. Os traços dos concretos normais e de alta resistência foram 1:3:3 (cimento:agregado graúdo:agregado miúdo) e 1:1,5:1,5 (cimento:agregado graúdo:agregado miúdo), respectivamente. Nos concretos de alta resistência adicionou-se sílica ativa, sílica amorfa e superplastificante à base de policarboxilatos. Após o resfriamento, as amostras foram envoltas em filme plástico até o momento da testagem. Em seguida, foram testadas resistência à

compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo de deformação. Nos resultados, observou-se que o pré-aquecimento não afetou de modo significativo as propriedades residuais, mostrando-se como uma estratégia para diminuir o tempo de latência entre a moldagem e testagem proposto pela RILEM TC-200 HTC. Os agregados predominantemente silicosos (granito e basalto) forneceram maiores relações residuais para as propriedades mecânicas ($k_{ct,\theta}$) que o concreto produzido com calcário. Contudo, apresentaram fissuração considerável para aquecimentos acima dos 573 °C, por conta da transformação de fase de quartzo α para β e consequente expansão. A resistência à tração dos concretos não decresceu significativamente até os 200°C. Entre 300 e 400°C grande dispersão foi obtida entre os com diferentes agregados ($k_{ct,\theta}$ de 0,39 para 0,91). O módulo de deformação dos concretos de alta resistência decresceu mais rápido que a resistência à compressão acima dos 200 °C.

2.11.4.2 Alterações nas propriedades físicas e mecânicas

A condutividade e difusividade térmicas são propriedades físicas de destaque para concretos aquecidos pois influem no desenvolvimento dos gradientes de temperatura, deformações térmicas e isolamento térmica do material em serviço. A condutividade é a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. Representa a capacidade do concreto em conduzir calor e depende da cristalinidade do agregado utilizado (cristalinidade aumenta a condutividade), do grau de saturação do concreto (quanto menos água maior a condutividade) e de sua composição. Concretos normais produzidos com basalto, granito e calcário possuem valores de condutividade em torno de 2,0; 2,6 e 3,2 J/m²·s°C/m, respectivamente. A difusividade corresponde à velocidade da temperatura no interior de uma massa. Para o concreto, representa a facilidade com que o material tolera variações de temperatura. Também depende do teor inicial de água na mistura, do grau de hidratação do cimento e da exposição à secagem. A difusividade do concreto comum varia entre 0,002 e 0,006 m²/h (Neville, 2016).

Outras duas propriedades físicas do concreto correspondem ao calor específico e ao coeficiente de dilatação térmica. O calor específico representa a quantidade de energia necessária para aquecer uma unidade de massa do material em 1°C. É pouco influenciado pela origem mineralógica do agregado, contudo aumenta com a elevação da temperatura e da massa específica do concreto. Valores comuns para o calor específico de concretos normais estão entre 840 e 1.170 J/kg. O concreto possui coeficiente de dilatação positivo, ou seja, expande com o aumento da temperatura. A propriedade depende da expansibilidade do agregado, do teor de agregado na mistura e do estado higroscópico no momento do aquecimento. O coeficiente de

dilatação do concreto diminui com a idade e concretos com maiores coeficientes tendem a ser menos resistentes a variações de temperatura (Neville, 2016).

Li *et al.* (2021) estudaram o efeito de diferentes taxas de aquecimento (5, 10 e 15°C/min) na taxa de expansão linear e no coeficiente de expansão térmica de concretos convencionais produzidos com agregados de calcário; aquecidos em 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800°C, até que cada temperatura de interesse fosse detectada no interior de corpos de prova cúbicos (aresta 100 mm). Constatou-se que, entre 100 e 800°C a taxa de expansão linear cresceu com o aumento da temperatura, atingindo o valor máximo de 1,336%. O coeficiente de expansão térmica dos corpos de prova decresceu com as taxas de aquecimento de 5 e 10°C/min e cresceu com 15°C/min. Entre 200 e 600°C a propriedade aumentou com a elevação da temperatura, reduzindo entre 600 e 700°C e aumentando novamente em 800°C. Entre 100 e 400°C, a taxa de aquecimento pouco influenciou na deformação do concreto. Entre 550 e 800°C, quanto maior a taxa de aquecimento, maior o valor da taxa de expansão linear e coeficiente de expansão térmica. Ambas as propriedades aumentaram após a constância na temperatura de interesse.

As alterações sofridas pelo concreto sob altas temperaturas também geram reduções nas propriedades mecânicas do material, afetando seu comportamento estrutural e durabilidade Sollero (2021). A deterioração nas propriedades mecânicas do concreto submetido a altas temperaturas é atribuída a três principais fatores relativos aos materiais: alterações físico-químicas na pasta de cimento; alterações físico-químicas dos agregados; e incompatibilidade térmica entre o agregado e a pasta de cimento. Temperatura máxima atingida, taxa de aquecimento, carregamento aplicado e facilidade à perda da umidade também são condições intervenientes (Khoury, 2000; CEB FIP Bulletin 38:2007).

De acordo com o CEB FIP Bulletin 38:2007, em concretos aquecidos sem carregamento, aumentos na temperatura significam reduções na inclinação do trecho elástico no diagrama tensão-deformação (diminuição do módulo de elasticidade), redução na tensão máxima (diminuição da resistência à compressão) e redução na inclinação do trecho descendente (menor fragilidade e maior ductilidade do material). Ao contrário, a deformação correspondente à tensão última aumenta com a elevação da temperatura.

Segundo Brites, Carvalho e Helene (2020), conservadoramente, diversos estudos envolvendo concreto sob altas temperaturas apontam que a porção mais exposta do material perde cerca de 25% de sua resistência após os 300°C e cerca de 75% quando a temperatura de 600°C é atingida em seu interior.

De acordo com EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2004 e ABNT NBR 15200:2012, a resistência à compressão de concretos normais (massa específica entre 2000 e 2800 kg/m³) e produzidos com agregados predominantemente silicosos e carbonáticos decresce com submissão a altas temperaturas nas proporções apresentadas pela Tabela 2.4. De acordo com Souza e Moreno Júnior (2010a), as relações residuais propostas pela ABNT NBR 15200 devem ser interpretadas com cuidado pois, embora não esteja claro no texto da normativa, são advindas de corpos de prova ensaiados aquecidos e sob carregamento.

Tabela 2.4 – Relações entre valores residuais e em temperatura ambiente ($k_{c,\theta}$) para resistência a compressão de concretos normais com agregados silicosos e carbonáticos.

Temperatura do concreto (°C)	$k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{ck}$	
	Agregados silicosos	Agregados carbonáticos
20	1,00	1,00
100	1,00	1,00
200	0,95	0,97
300	0,85	0,91
400	0,75	0,85
500	0,60	0,74
600	0,45	0,60
700	0,30	0,43
800	0,15	0,27
900	0,08	0,15
1000	0,04	0,06
1100	0,01	0,02
1200	0,00	0,00

Fonte: EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2004 e ABNT NBR 15200:2012

Quanto à resistência à tração dos concretos submetidos a altas temperaturas, o EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2004 propõe as relações residuais estabelecidas pela Equação 2.4 e Equação 2.5, independentemente da origem mineralógica do agregado graúdo.

$$k_{c,t}(\theta) = 1 \text{ quando } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 100^{\circ}\text{C} \quad \text{Equação 2.4}$$

$$k_{c,t}(\theta) = 1,0 - 1,0 \frac{(\theta - 100)}{500} \text{ quando } 100^{\circ}\text{C} < \theta \leq 600^{\circ}\text{C} \quad \text{Equação 2.5}$$

Segundo Hertz (2007), parâmetros como relação água/cimento, idade do concreto (com exceção do concreto fresco) e presença de superplastificantes não exercem influência significativa na perda de resistência à compressão do concreto superaquecido. Pontua-se ainda que o aditivo superplastificante pode adicionar pequenas partículas ao concreto, aumentando sua densidade e o risco de *spalling*. Outros aditivos quando aquecidos podem liberar amônia e comprometer, por exemplo, a respiração dos membros de uma brigada de incêndio que venha a adentrar a edificação em chamas.

O módulo de deformação do concreto praticamente não varia entre 21 e 96 °C. Acima de 121°C começa a decair. Quando a água passa a ser expulsa (entre 50 e 800 °C) há uma redução progressiva da propriedade, em função da relaxação da aderência (Neville, 2016). O módulo de deformação do concreto é frequentemente relacionado à sua resistência à compressão. Concretos mais resistentes tendem a fornecer maiores módulos de deformação em temperatura ambiente, contudo sob altas temperaturas as relações residuais para o módulo de deformação do material são consideravelmente menores que para resistência à compressão (CEB FIP Bulletin 38:2007).

Bintgöl e Gül (2009) testaram concretos normais (20 e 35 MPa), submetidos a temperaturas de 50 a 700°C. Os aquecimentos ocorreram com taxas entre 12 e 20°C/min, com manutenção de 3h nas temperaturas de interesse. Duas formas de resfriamento foram comparadas: ao ar livre e com água. Após o resfriamento, foram medidas resistência à compressão e perda de massa em corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 100 \times 200$ mm). Dos resultados, observou-se que até os 400°C a massa de ambos os concretos (C20 e C35) reduziu em 4%. Em 400°C essa queda passou para 6%. A maior perda de massa foi registrada após 600 e 700°C, e correspondeu a 9,7% para ambos os concretos. Um aumento na resistência do concreto de 20 MPa foi registrado entre 50 e 100°C enquanto a resistência do concreto de 35 MPa desceu levemente. Até os 400°C, corpos de prova resfriados ao ar livre em água mantiveram 80 e 70% da resistência inicial, respectivamente. A partir dos 400°C, os corpos de prova resfriados em água apresentaram maiores reduções. Nenhuma ocorrência de *spalling* foi observada, contudo um modesto esfacelamento dos concretos foi observado a partir dos 500°C. As maiores perdas de resistência ocorreram após aquecimentos de 700°C e resfriamento em água.

Souza e Moreno Júnior (2010b) investigaram o comportamento mecânico residual de concretos convencionais (1:3:3 – cimento:areia:brita, relação $a/c=0.6$) submetidos a 300, 600 e 900°C. Os aquecimentos ocorreram na taxa de 15°C/min, com manutenção por 2h nas temperaturas de interesse. O resfriamento ocorreu de duas formas: rápido em água corrente e lentamente ao ar livre (em torno de 1°C/min). Antes da realização de ensaios de resistência à compressão, à tração e módulo de deformação, parte dos corpos de prova resfriados lentamente foi envolta em filme plástico e outra imersa em água. As propriedades mecânicas foram tomadas aos 7, 28, 56 e 112 dias de idade das amostras. A Tabela 2.5 e Tabela 2.6 permitem comparar os resultados obtidos pelos autores para concretos resfriados lentamente quando envolvidos em plástico filme e imersos em água.

Tabela 2.5 – Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento e envolvimento com plástico filme.

Propriedade	Idade de ensaio	Valores residuais		
		300°C	600°C	900°C
Resistência à compressão	7	82%	51%	9%
	28	82%	60%	10%
	56	77%	63%	10%
	112	81%	51%	11%
Resistência à tração	7	71%	51%	6%
	28	67%	57%	8%
	56	69%	64%	8%
	112	69%	61%	9%
Módulo de deformação	7	54%	28%	3%
	28	50%	20%	3%
	56	45%	14%	3%
	112	53%	13%	3%

Fonte: Souza e Moreno Júnior (2010b)

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas residuais após resfriamento lento e submersão em água.

Propriedade	Idade de ensaio	Valores residuais		
		300°C	600°C	900°C
Resistência à compressão	7	74%	55%	38%
	28	84%	72%	40%
	56	94%	85%	38%
	112	93%	85%	46%
Resistência à tração	7	74%	51%	31%
	28	81%	75%	37%
	56	98%	92%	46%
	112	98%	94%	50%
Módulo de deformação	7	60%	65%	3%
	28	69%	56%	4%
	56	88%	81%	7%
	112	90%	82%	7%

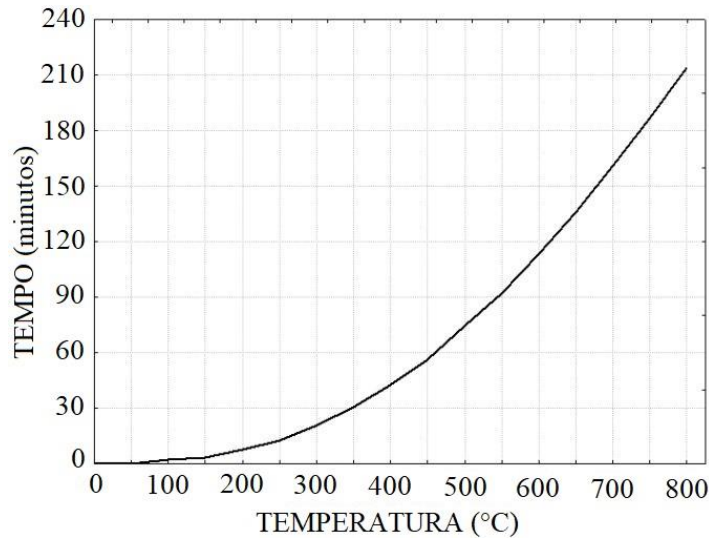
Fonte: Souza e Moreno Júnior (2010b)

Nos resultados observou-se um decréscimo acentuado da resistência à compressão aos 600°C, chegando a valores ínfimos após 900°C. A imersão em água mostrou-se capaz de recuperar parcialmente a resistência dos concretos, de tal modo que quanto menor a temperatura atingida, maior o potencial de recuperação. A resistência à tração sofreu decréscimos mais acentuados que a resistência à compressão. Segundo os autores, isso se deve à maior sensibilidade da propriedade mecânica à microfissuração dos concretos. Destaca-se, porém, que a recuperação pós queima com reidratação em água gerou maiores aumentos para resistência à tração que à compressão. O módulo de deformação foi reduzido a cerca de 20% de seu valor

inicial após 600°C. Contudo, recuperações superiores a 80% do valor original foram observadas após 112 dias, para temperaturas de aquecimento menores que 600°C.

Kirchhof *et al.* (2020) estudaram o efeito da saturação (75, 90 e 100%) em corpos de prova cilíndricos de concretos normal (43,2 MPa) e de alta resistência (77,8 e 85,8 MPa, contendo sílica ativa e superplastificante) submetidos às temperaturas de 200, 400 e 600°C e mantidos por 2h nas referidas temperaturas. Após 24h de resfriamento, foram determinadas resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral. Dos resultados, observou-se a diminuição gradativa da resistência à compressão do concreto normal com aumento da temperatura. As relações residuais ($k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{c,23}$) obtidas para corpos de prova saturados (100%) de concreto normal foram iguais a 0,90; 0,68 e 0,48 para aquecimentos até 200, 400 e 600°C, respectivamente. A resistência à tração do concreto normal também diminuiu gradualmente com aumentos na temperatura. As relações residuais ($k_{c,\theta} = f_{c,\theta}/f_{c,23}$) encontradas para corpos de prova saturados (100%) foram iguais a 0,80; 0,55 e 0,42, respectivamente. A resistência à tração sofreu maior influência das altas temperaturas que a resistência à compressão. Os autores atribuem tal fato à incompatibilidade térmica entre componentes do concreto e consequente fissuração. Nenhuma ocorrência de *spalling* foi observada no concreto normal (43,2 MPa), mesmo quando saturado. Segundo os autores, a conectividade existente entre os poros do compósito permitiu a saída do vapor de água, atenuando a elevação da poropressão.

Dias *et al.* (2020) testaram a resistência à compressão e módulo de deformação residuais em corpos de prova cilíndricos (100 × 200 mm) de concretos de 20, 30, 40 e 50 MPa moldados com agregado graúdo granilítico, aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, secos em estufa por 24h a 105±5°C, e submetidos a aquecimento na taxa ilustrada pela Figura 2.16, em forno elétrico, até 200, 400, 600 e 800°C. Fatores como variação no f_{ck} do concreto, teor de fibras de polipropileno, tempo de exposição à curva de aquecimento, tipo de resfriamento (natural ao ar livre e brusco em água) foram avaliados via Análise de Variância (ANOVA) e Teste de Tukey.

Figura 2.16 – Taxa de aquecimento do forno utilizado.

Fonte: Dias *et al.* (2020)

Dos resultados, observou-se que o módulo de deformação do concreto não foi alterado de forma significativa até os 200°C. A partir dos 400°C iniciou-se uma redução considerável da propriedade, chegando à redução de 92% para temperatura de 800°C. O tipo de resfriamento não influenciou significativamente as propriedades mecânicas. O tempo de exposição de 60 min causou as maiores perdas na resistência. Quanto ao f_{ck} dos concretos, até os 400°C, com exceção do concreto C50, não houve diferença significativa entre as médias das resistências residuais. Acima dos 400°C, elevada fissuração superficial foi observada. Segundo os autores, tal comportamento é atribuído à perda de água livre e quimicamente ligada ao gel e tensões internas oriundas da expansão dos agregados. Os concretos perderam em média 6% de massa durante o aquecimento, tendo a maior perda ocorrido no concreto C50. A adição de fibras de polipropileno evitou a ocorrência de spalling até os 600°C, mas não afetou significativamente a resistência residual dos concretos.

Fan *et al.* (2022) estudaram a influência do carregamento aplicado (0, 10, 30, 50 e 70% da carga de ruptura) durante o aquecimento (entre 400 e 900°C, à taxa de 5°C/min) nas propriedades residuais de concretos normais (43,28 MPa aos 28 dias de idade, com uso de superplastificante e relação $a/c=0,5$). Observaram aumentos na resistência à compressão e módulo de deformação das amostras com o aumento do carregamento aplicado (até 30% da resistência de ruptura) durante a queima, sobretudo entre as temperaturas de 460 e 580°C. De forma contrária, o pico de deformação diminuiu com o aumento da carga. Segundo os autores, isso se deve, em parte, à restrição na fissuração que o carregamento proporciona.

Concretos de alta resistência e ultra alta resistência têm sido objeto de estudo de diversos trabalhos, entre estes citam-se Chan, Peng e Anson (1999); Sullivan (2001); Alonso *et al.*

(2005); Bamonte e Gambarova (2014); Abid *et al.* (2017); Drzymala *et al.* (2017), Pimienta *et al.* (2017); Yoon *et al.* (2017); Wu *et al.* (2019), Kirchof *et al.* (2020). Nos concretos de alta e ultra alta resistência há uma preocupação maior com o lascamento explosivo, por conta da estrutura compacta e maior dificuldade na expulsão do vapor de água durante o aquecimento (Britez; Carvalho; Helene, 2020). Medidas como a adição de fibras de polipropileno, que entre 150 e 475°C se fundem e são completamente consumidas criando caminhos interligados para migração dos gases ao exterior (Castro; Tiba; Pandolfelli, 2011) e baixas taxas de aquecimento apresentam resultados significativos na minimização da ocorrência de *spalling*.

2.11.5 SÍNTESE SOBRE GRAUTES

A principal diferença entre o graute para alvenaria estrutural e os concretos convencionais é sua alta fluidez, tornando-o capaz de preencher satisfatoriamente os vazios dos blocos. Além da facilidade para o adensamento, controle da retração e boa aderência ao substrato são características desejáveis para o graute.

As maiores contribuições do grauteamento no comportamento da alvenaria são a ancoragem de armaduras embebidas nos pontos solicitados à tração, a solidarização nos encontros entre componentes/elementos e o acréscimo de resistência à compressão pela ampliação da seção transversal. Das pesquisas desenvolvidas sobre o tema, duas constatações merecem destaque: 1) os acréscimos na resistência de elementos grauteados são maiores quando os valores de resistência e deformabilidade do material de preenchimento são equivalentes aos apresentados pelos blocos; 2) aumentar simplesmente a resistência dos grautes não resulta em aumentos de resistências dos prismas preenchidos com a mesma proporção. O comportamento real do elemento grauteado sob compressão não corresponde à simples sobreposição de resistências fornecidas pela área de seção do bloco e de preenchimento pelo graute.

Quanto ao processo executivo do grauteamento, a pré-molhagem dos vazios a serem preenchidos pode aumentar significativamente a resistência à compressão dos prismas, fomentando a aderência na interface entre os materiais e assegurando um comportamento homogêneo do grauteado.

São escassos os trabalhos que tratam especificamente dos grautes de preenchimento para alvenaria estrutural submetidos a altas temperaturas. Sobretudo daqueles produzidos em obra, com a presença do agregado graúdo (algumas misturas industrializadas são vendidas para a mesma função sem o agregado graúdo) ou cal em na composição. Por este motivo, o

comportamento do graute sob altas temperaturas foi apresentado com base em estudos de concretos convencionais.

Além de todas as transformações experienciadas pela pasta de cimento (Item 2.10.3) como perda da água absorvida e quimicamente ligada, decomposição da portlandita e dos géis de C-S-H, reidratação e expansão durante o resfriamento, sob altas temperaturas, os concretos são afetados pela presença do agregado graúdo. A origem mineralógica do agregado e, mais especificamente, suas propriedades térmicas estão diretamente relacionadas à incompatibilidade de deformações com a pasta de cimento, ocorrência da microfissuração e redução das propriedades mecânicas. Por volta dos 573°C, destaca-se a mudança expansiva de fase nos agregados quartzosos. Trata-se de um dos motivos pelos quais concretos produzidos com agregados silicosos apresentam maior degradação após submissão a altas temperaturas.

O *spalling* também representa uma preocupação para o concreto aquecido e é marcado pela ocorrência de dois mecanismos, podendo ou não atuarem de forma simultânea: mecanismo termomecânico, associado às tensões de tração resultantes do gradiente térmico e termo-hidráulico, devido ao aumento da poropressão com evaporação da água no concreto. Nos concretos de alta e ultra alta resistência, a tendência ao lascamento explosivo é ainda maior, em função da menor porosidade e maior resistência à expulsão do vapor de água. Estratégias como inserção de fibras de polipropileno às misturas têm se mostrado eficientes nesse sentido.

Embora existam prescrições normativas já publicadas para ensaio de concretos envolvendo altas temperaturas, como a RILEM TC 200 HTC:2007, que predomina entre os trabalhos, o tipo de aquecimento adotado e tempo de permanência variam entre pesquisas. Alguns estudos, por exemplo, seguem a curva ISO 834:2009 (Akca, Özyurt, 2018; Mindeguia *et al.*, 2012) com taxas de cerca de 20°C/min. As taxas de resfriamento também variam (2, 3, 5°C/min). Além das taxas de aquecimento e de resfriamento, uma gama de outros fatores influencia o comportamento do concreto sob altas temperaturas: umidade do espécime, relação a/c empregada na mistura, tipo de agregado, tempo de exposição às altas temperaturas. A aplicação de carregamento durante o aquecimento do concreto também interfere nos valores residuais de suas propriedades. O efeito é benéfico, atenuando a microfissuração e retardando a degradação do compósito. O concreto aquecido sob carga conta ainda com o mecanismo da fluência transiente, que permite a redistribuição de tensões associadas às deformações térmicas. Concretos aquecidos sem aplicação de carga e resfriados lentamente ao ar livre tendem a fornecer os menores valores para propriedades residuais. Após o resfriamento, a recura com submersão em água pode recuperar grande parte da resistência perdida, sobretudo a longo

prazo. Contudo, a microestrutura recomposta dificilmente atinge a mesma compacidade anterior ao aquecimento.

Ao interpretar resultados de autores distintos todos os fatores intervenientes devem ser levados em consideração pois sua variação pode resultar em diferenças expressivas. Essa variação de parâmetros requer cuidado no estabelecimento de comparações e na generalização de comportamentos. Cada constatação deve ser realizada com base nas particularidades de cada situação reproduzida pelo estudo.

2.12 BLOCOS E PRISMAS

2.12.1 COMPOSIÇÃO E PROCESSO PRODUTIVO DOS BLOCOS

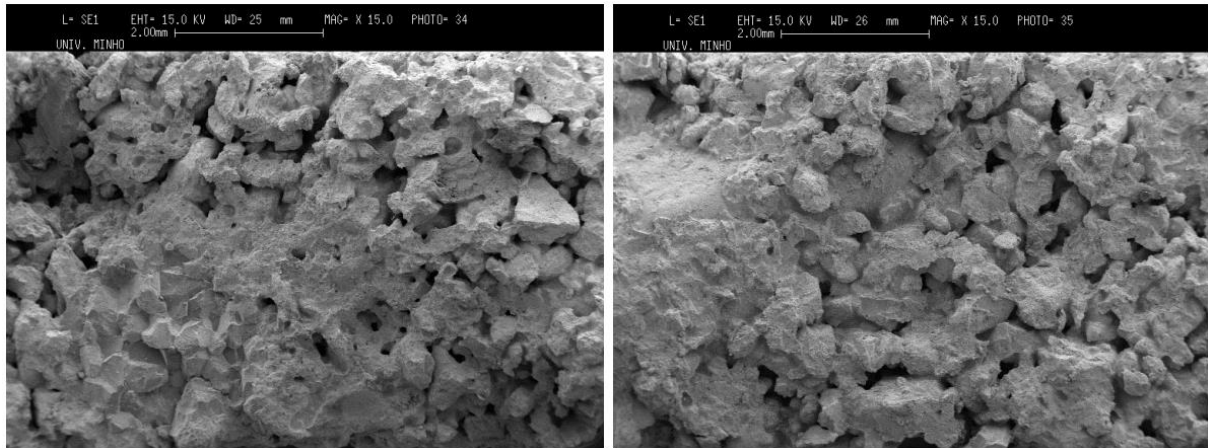
Grande parte das unidades disponíveis no mercado nacional e internacional é fabricada com concreto do tipo seco, também conhecido como “*zero-slump*” ou popularmente chamado “concreto-farofa”. Para acelerar a produção que ocorre em escala industrial, esses artefatos de concreto necessitam ser brevemente removidos das fôrmas. Por isso, o emprego de misturas secas e de vibração durante o adensamento são estratégias adotadas na obtenção dos blocos de concreto para alvenaria, bem como dos tubos de concreto e das peças de concreto para pavimentação (Najimi; Sobhani; Pourkhorshidi, 2012). Misturas compactadas a rolo para pavimentação e misturas utilizadas na fabricação de telhas e pisos drenantes também integram a gama de aplicações do concreto seco (ACI 211.3R – 02). Sua dosagem e propriedades físicas são consideravelmente distintas dos concretos convencionais.

Sobre as diferenças entre o concreto seco e os concretos plásticos convencionais Fernandes (2016) afirma que, além de teores maiores para o agregado graúdo, os concretos convencionais contam com uma grande quantidade de pasta de cimento disponível, a qual supre com facilidade as necessidades de trabalhabilidade, preenchimento de vazios da mistura e acabamento das peças produzidas. Como exemplo, o autor aponta que, enquanto uma mistura de proporções 1:12:8 (cimento: areia ou pó de pedra: pedrisco) de concreto seco para bloco de vedação conta com 19,1% de pasta em seu volume, um traço de concreto convencional 1:2:3 (cimento: areia: brita) apresenta cerca de 30,4% do volume total em pasta.

Embora as misturas de concreto seco sejam dosadas para atingir a maior compacidade possível, a maioria dos artefatos fabricados com o material são caracterizados pela presença de vazios de dimensões irregulares, formados ainda durante a fase de moldagem (Marchand *et al.*, 1998). A Figura 2.17, obtida por Mohamad *et al.* (2011) em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) para blocos de concreto vibro-compactados à seco de resistência média à

compressão 23,1 MPa (área líquida) confirma a pouca quantidade de pasta envolvendo as partículas, além de identificar a existência de vazios internos nas misturas.

Figura 2.17 – Microestrutura do bloco de concreto com aumento de 15 vezes.



Fonte: Mohamad *et al.* (2011)

Diferentemente do concreto plástico convencional, cuja resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento empregada na mistura, o concreto seco tem sua resistência determinada pelo grau de compactação/adensamento provido pelo equipamento utilizado na produção dos artefatos (Fernandes, 2016).

A compactação também reduz a quantidade de ar na mistura, otimizando o processo de hidratação, dando origem a um material mais denso e, conseqüentemente, de melhor performance. O estudo conduzido por Sulistyana *et al.* (2014) investigou a influência que a compactação durante a moldagem exerce na resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos ($\varnothing 100 \times 200$) mm de concreto seco. Uma avaliação preliminar foi realizada variando a tensão de compactação de 0 a 50 MPa (com incrementos de 10 MPa) a fim de encontrar a tensão que forneceria a maior compacidade possível dos concretos. Como resultado, obtiveram 40 MPa como a tensão ótima, ou seja, tensões maiores não forneceram aumentos na resistência dos corpos de prova. Em seguida, tensões de 0 a 40 MPa (incrementos de 5 MPa) foram novamente utilizadas na produção de novos corpos de prova. Ao final, o trabalho confirmou a existência de uma relação direta entre a tensão de compactação aplicada na moldagem e a resistência à compressão dos corpos de prova em concreto seco. Quanto maior a pressão aplicada, maior foi a resistência obtida. Constatou-se também que as propriedades das misturas influenciaram a trabalhabilidade do concreto, de tal forma que misturas com maior coesão demandaram por maiores tensões de compressão até que aumentos significativos na resistência fossem observados.

Segundo Fernandes (2016), pelo menos dois tipos de porosidade podem ocorrer no concreto seco: a macroporosidade, atribuída aos vazios do concreto, seja pela falta de adensamento ou granulometria irregular (volume de finos insuficiente); e a microporosidade da pasta, quando mais água do que o necessário é adicionado para hidratação do cimento. Esse último caso é mais nocivo ao desempenho do concreto plástico convencional.

De acordo com Xiuli, Jin e Guowei (2013), os poros e vazios no concreto podem exercer grande influência em seu módulo elástico, resistência e outras propriedades. Por meio de modelos físicos que tomam o concreto seco como sendo isotrópico, homogêneo e elástico, os pesquisadores analisaram a influência da porosidade em algumas propriedades mecânicas do material. Após a implementação dos modelos, os resultados de suas formulações foram comparados à resultados experimentais, advindos da literatura. Das comparações, notou-se que para valores do coeficiente de Poisson maiores que 0,2 há uma redução do mesmo coeficiente nos concretos à medida que a porosidade aumenta. Para concretos com coeficiente de Poisson menores que 0,2 ocorreu o contrário, e para concretos com Poisson de 0,2 a porosidade não interferiu na relação entre deformações longitudinais e transversais. Em relação às resistências, ambas foram reduzidas com o aumento da porosidade, sendo que a resistência à tração diminuiu mais rapidamente que a resistência a cisalhamento. Com cerca de 10% de porosidade, o valor da resistência à tração foi reduzido em 20%, o que, segundo os autores, não deve ser negligenciado.

A coesão ou “liga” da mistura corresponde à capacidade do concreto em manter os artefatos produzidos íntegros após a moldagem ou desforma. Tal propriedade também fornece às unidades arestas bem definidas, além de resistência aos impactos do transporte (Fernandes, 2016). Segundo o autor, a coesão do concreto seco é alcançada por meio da combinação entre uma distribuição granulométrica adequada dos agregados (sobretudo, da presença equilibrada de finos), umidade ótima da mistura, consumo de cimento e um processo eficaz de mistura e adensamento.

De acordo com Fernandes (2016), o teor de umidade do concreto seco é um dos principais responsáveis pela facilidade de moldagem durante a produção das unidades, e por sua qualidade final. Propriedades das peças como densidade, porosidade, absorção de água e resistência são diretamente influenciadas pela quantidade de água na mistura. O autor firma ainda que, enquanto no concreto plástico a resistência decresce ao passo que se eleva a relação água/cimento, no concreto seco, até certo ponto, a resistência aumenta quando mais água é adicionada à mistura. Esse comportamento é justificado pela maior facilidade de compactação

em uma mistura mais úmida, resultando na melhor acomodação das partículas e, por consequência, menor quantidade de vazios no interior do concreto.

Segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), atualmente os blocos vazados de concreto são produzidos em massa e em fábricas altamente automatizadas. Na produção, o concreto de *slump* zero é levado a uma vibroprensa onde é simultaneamente compactado e vibrado dentro de moldes metálicos que definem a forma do bloco.

Na rápida produção moderna, é necessário que o molde seja retirado logo após o concreto ser consolidado. Portanto, a mistura consolidada deve ter resistência e rigidez suficientes logo após a compactação para permitir o desmolde das peças e o transporte sem deformar, fragmentar ou fissurar. A hidratação em fábricas modernas ocorre geralmente pelo processo de cura a vapor. Dependendo da distribuição granulométrica dos agregados e das resistências requeridas, varia-se a quantidade de finos, a densidade do agregado graúdo e a quantidade de cimento. Dessa forma, é possível encontrar blocos com uma estrutura porosa e aberta, enquanto outros apresentam uma superfície lisa e compacta (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014). A Figura 2.18 exibe a mesma vibroprensa utilizada na fabricação dos blocos estudados.

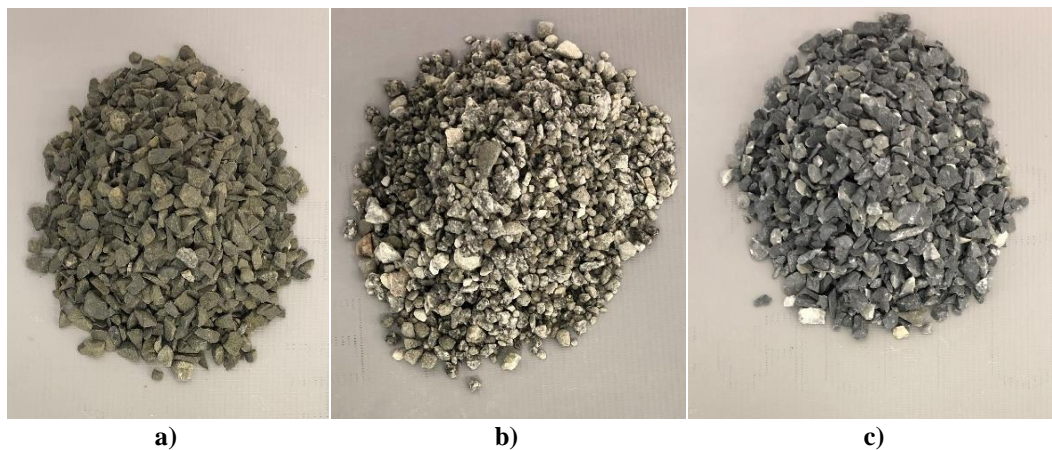
Figura 2.18 – Fabricação de blocos vazados de concreto pelo processo de vibrocompressão.



Fonte: Medeiros (2022)

Leal *et al.* (2022b) estudaram numérica e experimentalmente o comportamento mecânico (módulo de deformação - E , resistência à tração indireta - f_t e resistência à compressão - f_b) de blocos vibroprensados, de três classes distintas de resistência (6, 12 e 24 MPa), produzidos com concreto seco e agregados graúdos e miúdos de três origens mineralógicas: basalto, gnaiss e calcário (Figura 2.19).

Figura 2.19 – Agregados utilizados por Leal *et al.* (2022b): a) basalto; b) gnaiss; c) calcário.



Fonte: Leal *et al.* (2022b)

Os resultados obtidos confirmaram as informações extraídas da literatura de que a dosagem e propriedades físicas de elementos produzidos em concreto seco se diferem dos concretos convencionais, sendo notadamente influenciadas pela distribuição granulométrica dos agregados e eficiência de compactação na moldagem das máquinas vibroprensas. Para as classes menos resistentes de bloco (6 e 12 MPa), o uso de agregados de gnaiss (mais finos) proporcionou valores de módulo e resistência significativamente maiores que os demais minerais. A resistência à tração das unidades não foi significativamente afetada pelo tipo de agregado. Grande presença de vazios foi observada nos blocos de 6 e 12 MPa quando o gnaiss foi substituído pelo basalto sem nenhum ajuste da curva granulométrica ou verificação de empacotamento. Essa maior porosidade foi refletida nos menores valores das propriedades mecânicas (E , f_b e f_t). Concluiu-se que, para blocos menos resistentes, a distribuição granulométrica dos agregados e a compacidade/adensamento das misturas influenciaram mais as propriedades mecânicas que a própria rigidez dos agregados utilizados (basalto mais rígido que gnaiss). À medida que as misturas de concreto seco se tornaram mais densas e resistentes, com visível redução dos vazios, a influência do tipo de agregado nas propriedades mecânicas (E , f_b e f_t) tornou-se insignificante. Ao analisar os blocos mais resistentes (24 MPa), notou-se que a mistura contendo o agregado de basalto deu origem a unidades ligeiramente mais resistentes e mais rígidas que aquelas produzidas com os demais agregados. Embora não

considerado estatisticamente significativo, esse aumento assemelhou-se ao que geralmente se observa nos concretos plásticos convencionais para os quais agregados mais rígidos tendem a fornecer concretos também mais rígidos. Os valores das propriedades mecânicas acompanharam o aumento na classe de resistência, para os três tipos de agregado.

2.12.2 INFLUÊNCIA DAS UNIDADES NO COMPORTAMENTO DA ALVENARIA

As unidades de alvenaria correspondem aos blocos ou tijolos, componentes que unidos por uma junta de argamassa dão origem aos elementos de alvenaria estrutural. Podem ser feitos de cerâmica vermelha, solo-cimento, concreto, sílico-calcário (areia e cal), pedra e vidro, sendo os mais utilizados de cerâmica e concreto (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014).

Andolfato, Camacho e Ramalho (2007) investigaram o efeito que a quantidade de cimento e a compactação do concreto empregado na produção dos blocos exerce no comportamento de prismas produzidos com três unidades e juntas a prumo. Os blocos foram produzidos em prensa pneumática e cinco diferentes traços. Argamassa de 4,9 MPa (medida em corpos de prova cilíndricos) foi empregada na produção de todos os prismas. Em seguida, resistência à compressão e módulo de elasticidade secante à 40% da tensão última foram obtidos para os prismas e para as unidades. Para os blocos, aumentos de até 24% na relação “água/materiais secos” e maiores teores de cimento (preenchimento com material fino) refletiram em aumentos no peso específico. O módulo de elasticidade aumentou com aumentos no teor de cimento e os valores de resistência à compressão refletiram em aumentos da compactação. Para os prismas, os pesquisadores concluíram que a relação de eficiência entre resistências (f_{prisma}/f_{bloco}) diminuiu aumentando as resistências das unidades, enquanto o módulo das unidades não afetou a resistência dos prismas. Nos prismas, o aumento no teor de cimento esteve mais relacionado ao módulo de elasticidade do que à resistência à compressão dos blocos. Essa última se mostrou mais dependente da compactação das misturas.

Fortes *et al.* (2015) avaliaram a relação entre resistência à compressão das unidades e resistência à compressão de prismas de dois blocos, produzidos com blocos de concreto de oito resistências distintas (21,6; 27; 37,8; 38,9; 41,1; 55,4; 69 e 74,7 MPa – média na área líquida), cinco traços de argamassa (4, 6, 10, 12 e 22 MPa), ocos e cheios (grautes de 15, 20, 25 e 30 MPa). Com base nos resultados obtidos, os pesquisadores concluíram que as resistências dos prismas e das unidades se relacionam de maneira distinta quando os prismas são ocos (Equação 2.6) e quando são preenchidos com graute (Equação 2.7).

$$f'_{m,avrg} = 18,46 \ln(f_b) - 37,71$$

Equação 2.6

$$f'_{m,avrg} * = 12,18 \ln(f_b) - 20,16 \quad \text{Equação 2.7}$$

Sendo:

$f'_{m,avrg}$ = resistência média à compressão dos prismas ocios;

$f'_{m,avrg}*$ = resistência média à compressão dos prismas cheios;

f_b = resistência característica à compressão das unidades.

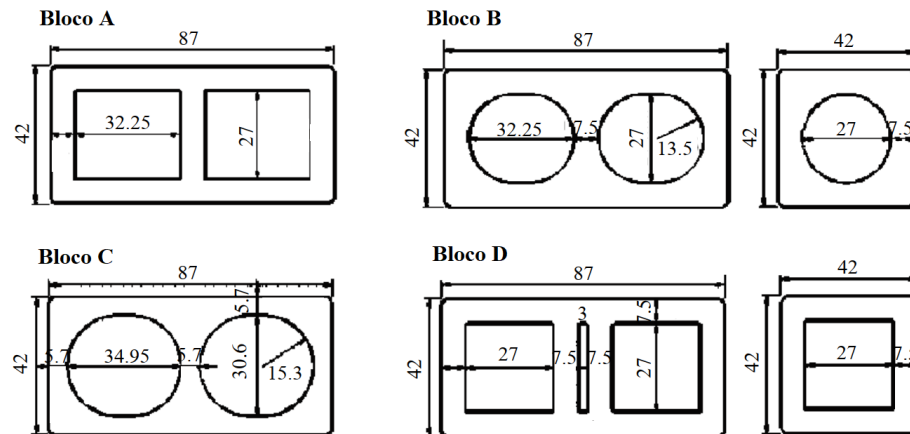
Para os prismas ocios, a relação f_{prisma}/f_{bloco} variou de 1,0 (quando produzidos com blocos de resistências até cerca de 20 MPa) a 0,5 (quando produzidos com blocos acima de 50 MPa). A relação f_{prisma}/f_{bloco} dos prismas grauteados variou de 0,9 a 0,4 quando os prismas foram produzidos com blocos de menores e de maiores resistências, respectivamente. Os autores tomaram a relação f_{prisma}/f_{bloco} como parâmetro de eficiência dos prismas e constataram que, no geral, os prismas grauteados se apresentaram menos eficientes que os prismas ocios. Em todos os prismas, a eficiência diminuiu à medida que a resistência à compressão das unidades foi aumentada.

Martins *et al.* (2018) estudaram a influência da resistência das unidades e do grauteamento na resistência à compressão e rigidez de prismas de blocos de concreto. Foram consideradas três classes de resistência para os blocos (4,5; 8 e 12 MPa na área bruta), três traços de graute (15, 20 e 25 MPa) e três traços para argamassa (5,8; 10,4 e 15,5 MPa). Dos resultados, observou-se que o módulo de elasticidade e a resistência à compressão aumentaram com o aumento na resistência das unidades, tanto nos prismas ocios quanto nos prismas cheios.

Entre outros fatores, Hamid e Chukwunenye (1986) analisaram numericamente a influência do tamanho das unidades e da relação altura/largura no comportamento de prismas de concreto. Os autores observaram que o tamanho dos blocos não afetou significativamente a resistência dos prismas. A relação altura/largura dos prismas, por sua vez, apontou dois estados de tensões diferentes para os prismas com dois e com três blocos. Enquanto no prisma de três blocos a tração lateral era observada no bloco do meio, no prisma com duas unidades a porção central era submetida a compressão, por conta da restrição/atrito causado pelos pratos da prensa.

Mohamad *et al.* (2016) avaliaram numericamente a influência da geometria de blocos cerâmicos no comportamento à compressão de prismas de três unidades. Quatro geometrias foram reproduzidas (Figura 2.20), simulando prismas com juntas a prumo e amarradas.

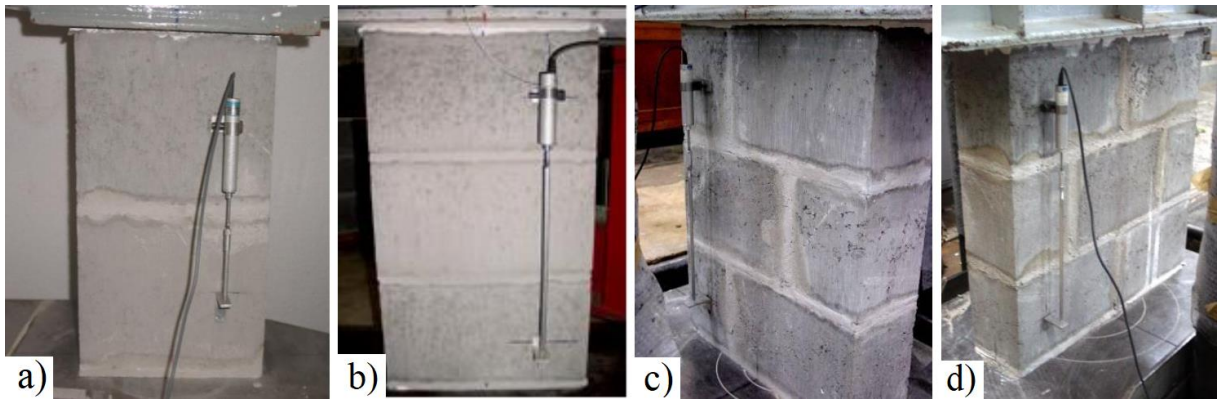
Figura 2.20 – Geometrias analisadas para as unidades.



Fonte: Mohamad *et al.* (2016)

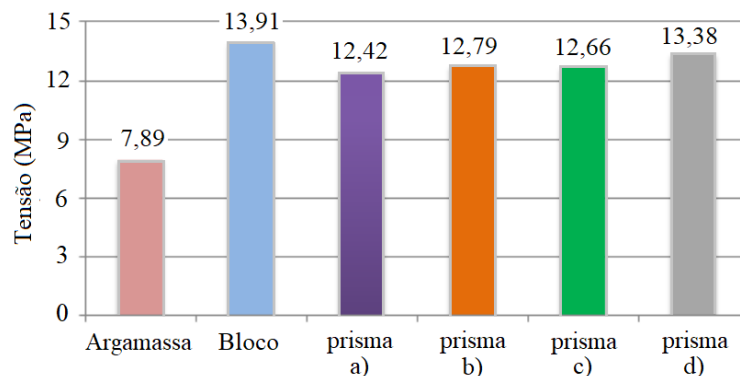
Para a simulação numérica, contou-se com o auxílio do software CASTEM 2000. As unidades foram discretizadas com elementos sólidos de oito nós, e elementos tetraédricos de seis nós nas regiões que circundam os furos circulares. Comportamentos isotrópico e elástico-linear foram admitidos tanto para os blocos quanto para as juntas de argamassa. Nos resultados os autores observaram que a diferença entre os módulos de deformação adotados para as juntas (6 GPa) e para os blocos (28 GPa) deram origem à um estado biaxial de tensões de tração-compressão nas unidades e o estado triaxial de tensões de compressão atuante nas juntas de argamassa. Entre as geometrias analisadas, a D apresentou uma distribuição mais uniforme de tensões na região central da unidade, com menores picos de concentração de tensões. Segundo os autores, esse resultado se deve, provavelmente, à presença da parede transversal dupla no tipo D, sendo a melhor opção entre os testados. Os blocos com geometrias B e C, por sua vez, apresentaram as menores tensões de tração sob as paredes longitudinais, o que atesta a eficiência dos furos circulares na redução das tensões nas regiões de intersecção entre as paredes transversais e as paredes longitudinais.

Silva e Camacho (2011) investigaram a influência que a geometria dos prismas exerce em seu comportamento à compressão. Empregou-se blocos de concreto inteiros ($140 \times 190 \times 290$) mm e meio-blocos ($140 \times 190 \times 140$) mm, sendo (largura \times altura \times comprimento). Para isolar o efeito da geometria, apenas um traço de argamassa (1:0,75:4,5 – cimento: cal: areia) e uma resistência para bloco (média 13,91 MPa na área bruta) foram considerados. Os ensaios foram realizados com as seguintes tipologias para os prismas: juntas a prumo com dois (Figura 2.21a) e três blocos de concreto (Figura 2.21b), juntas amarradas com três blocos de altura e comprimentos de um (Figura 2.21c) e de dois blocos (Figura 2.21d).

Figura 2.21 – Tipologias analisadas para os prismas.

Fonte: Adaptado de Silva e Camacho (2011)

Os resultados obtidos pelos autores nos ensaios de compressão para os componentes e para os prismas em cada geometria são ilustrados no gráfico da Figura 2.22.

Figura 2.22 – Resistências médias à compressão dos componentes e na área bruta de cada geometria de prisma.

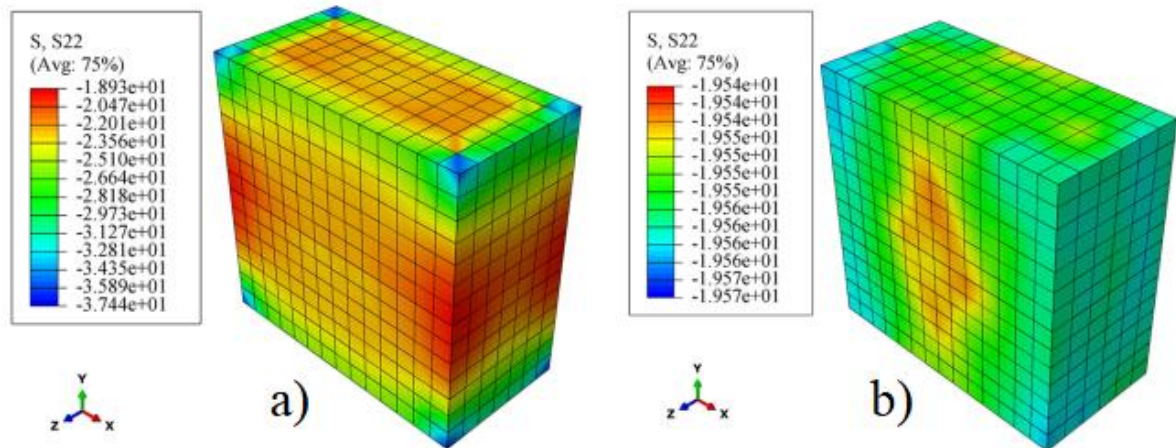
Fonte: Adaptado de Silva e Camacho (2011)

Por meio da análise estatística dos resultados, os autores constataram que alterações na geometria e forma de assentamento dos prismas não influenciaram significativamente suas tensões de ruptura. A forma de ruptura, com predomínio de fissuras verticais nas laterais dos prismas, também foi semelhante em todos os casos. Desse modo, os pesquisadores concluíram que o uso de prismas de dois blocos e assentados com juntas à primo se configuram como a opção mais viável, em função da maior facilidade de montagem e ensaio.

No estudo realizado por Abasi *et al.* (2020), explorou-se, via simulação numérica baseada no Método dos Elementos Finitos, a interferência da geometria dos prismas com blocos de concreto em sua resposta à compressão. Para análise paramétrica da distribuição de tensões nos prismas foram consideradas diferentes relações altura/largura (de 1 a 5) e comprimento/largura (de 1 a 4) para blocos inteiros e meio blocos. Para investigar o efeito de confinamento dos pratos no ensaio, prismas com dois e cinco blocos de concreto (juntas a primo) foram simulados com restrição de deslocamento e sem restrição atrito nas extremidades.

Nos resultados, ficou claro o aumento das tensões nos prismas com deslocamento restrito, além de tensões distribuídas de maneira mais uniforme (Figura 2.23).

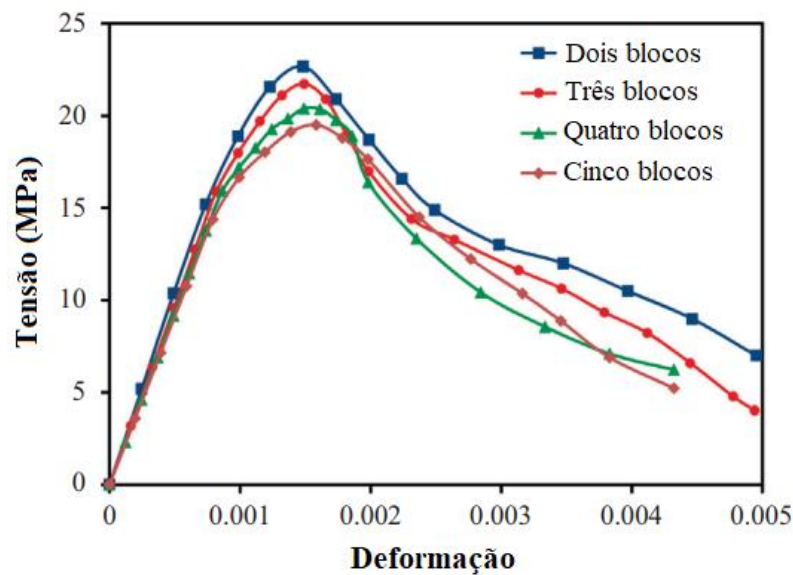
Figura 2.23 – Tensões nos modelos de prisma: a) prisma de dois blocos com restrição nas extremidades; b) prisma de dois blocos sem atrito.



Fonte: Abasi *et al.* (2020)

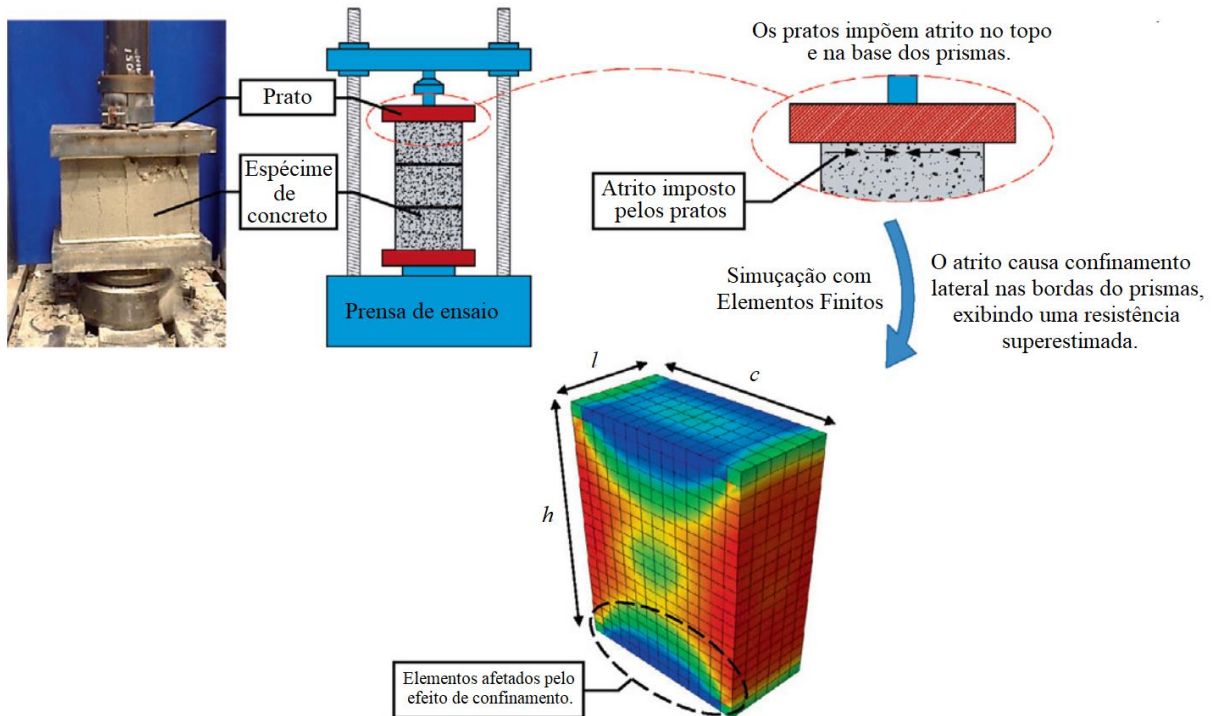
Quando comparados entre si, os prismas com duas unidades apresentaram variações de tensão na região central e no centro das arestas verticais muito maiores que os prismas com cinco blocos de altura. Os autores também constataram que, quando mantida a mesma condição de contato nas extremidades dos prismas, à medida que a altura dos prismas aumentou sua tensão última foi reduzida (Figura 2.24). Comportamento atribuído pelos mesmos ao efeito de confinamento lateral causado pelos pratos (Figura 2.25).

Figura 2.24 – Efeito da altura dos prismas na tensão máxima de compressão.



Fonte: Adaptado de Abasi *et al.* (2020)

Figura 2.25 – Efeito de confinamento dos pratos.

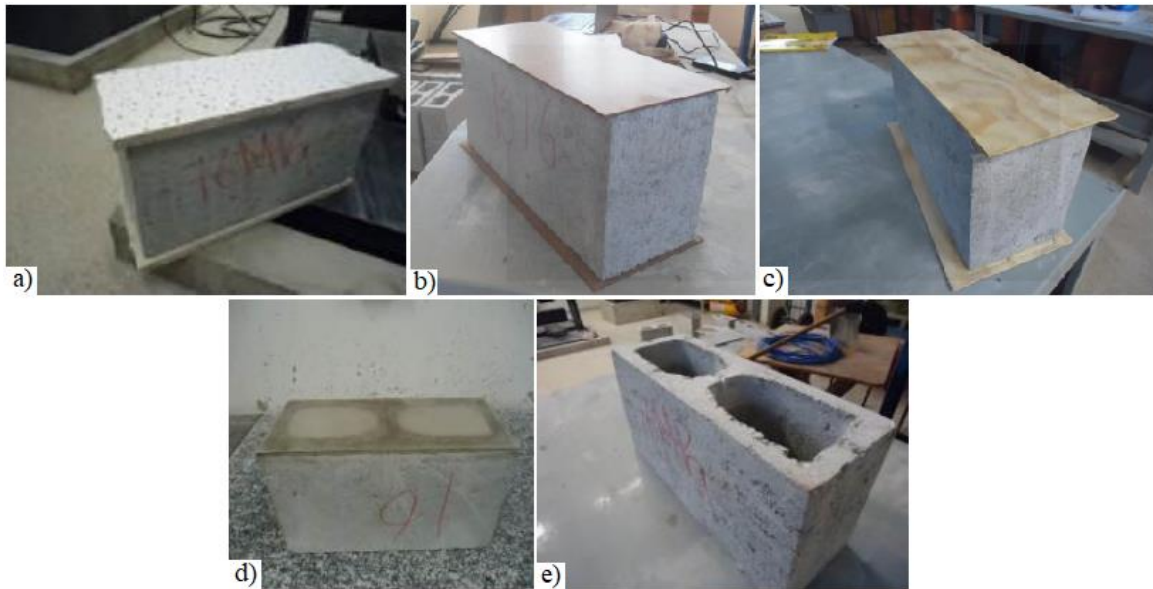


Fonte: Adaptado de Abasi *et al.* (2020)

Para avaliar a influência do comprimento dos blocos, os pesquisadores compararam meio-blocos e blocos inteiros e concluíram que o atrito e, conseqüentemente, o efeito de confinamento dos pratos aumenta quanto maior a relação comprimento/largura dos blocos. A maior resistência obtida para os blocos inteiros (com maior área confinada) evidenciou tal comportamento.

2.12.3 OUTROS FATORES INFLUENTES NO COMPORTAMENTO DA ALVENARIA

Fortes (2012) estudou a possibilidade de substituição do capeamento convencional com pasta de cimento e da retificação (Figura 2.26d) pelo emprego de materiais secos como forro-pacote (Figura 2.26a), chapa dura (Figura 2.26b) e madeira compensada (Figura 2.26c). Para tanto, blocos de concreto e prismas de dois blocos (ocos e cheios) foram submetidos a ensaios de resistência à compressão. Para os prismas capeamentos com pasta de cimento e chapa-dura obteve-se também o módulo de elasticidade. Quatro traços de graute (resistências características de 12,52; 17,56; 24,45 e 35,92 MPa), três tipos de argamassa (resistências médias de 6,56; 8,11 e 14,34 MPa) e blocos de três resistências nominais à compressão (4, 8 e 16 MPa) foram utilizados.

Figura 2.26 – Formas de tratamento de superfície avaliadas.

Fonte: Fortes (2012)

Para os ensaios de blocos, o pesquisador concluiu que, excluindo a chapa de madeira compensada (diferenças maiores que 10% em relação à pasta de cimento), todas as demais formas de capeamento e a retificação forneceram valores equivalentes de resistência à compressão. Os prismas ocos e retificados apresentaram os menores resultados de resistência à compressão, discrepantes em relação aos demais. Para os outros capeamentos secos, notou-se uma pequena redução em relação à regularização com pasta de cimento com uso dos blocos de menor resistência. De acordo com o autor, quando produzidos com blocos mais resistentes, o capeamento dos prismas se deforma totalmente acomodando as variações dos blocos, o que aparentemente não ocorreu com os blocos de 4 MPa. Para os prismas cheios, o autor não recomenda capeamento do tipo seco, por conta da grande variabilidade observada em todos os resultados. Provavelmente por conta da irregularidade na superfície causada pelo grauteamento. Para o módulo de elasticidade, observou-se grande diferença entre os valores apresentados pelos prismas capeados com pasta de cimento e com chapa-dura. De acordo com o autor, tal resultado pode ser atribuído à diferença de rigidez e acomodação dos capeamentos.

Hamid e Chukwunye (1986) também investigaram numericamente a influência no comportamento de prismas com blocos de concreto causada pela rigidez dos pratos da prensa, responsáveis pela aplicação de carregamento durante o ensaio. Os autores observaram que pratos de menores espessuras, e conseqüentemente mais flexíveis, também induziram à ocorrência de maiores tensões laterais de tração no topo dos blocos, levando à falha prematura dos prismas. Com os pratos de maior espessura esse efeito foi mitigado.

Hendry, Sinha e Davies (2004) afirmam que a qualidade da mão de obra exerce grande influência no comportamento da alvenaria, de tal forma que uma superposição de efeitos na execução pode reduzir a capacidade de um elemento à metade. Segundo os autores, somente as falhas no preenchimento das juntas com argamassa podem resultar em reduções de até 33% na resistência à compressão da alvenaria. As falhas no preenchimento de juntas verticais pouco afetam a resistência à compressão, mas reduzem a resistência à flexão do conjunto. Confirmando o que foi apresentado em outros trabalhos, os autores apontam que juntas executadas com espessuras excessivas reduzem a resistência da alvenaria ao elevar as tensões laterais de tração sobre as unidades. Como exemplo, os autores apontam que juntas de 16 a 19 mm podem fornecer resistências à compressão até 30% menores do que juntas de 10 mm.

2.12.4 DEFORMABILIDADE E MODO DE RUPTURA

Segundo Parsekian, Hamid e Drysdale (2014), um elemento em alvenaria é composto pela associação de alguns ou todos os componentes do sistema: unidade, argamassa, graute e armaduras. O prisma, por sua vez, corresponde ao elemento obtido pela superposição de blocos ou tijolos, unidos por junta de argamassa. Conforme a ABNT NBR 16868-1:2020, os termos “prisma cheio” e “prisma oco” definem blocos vazados ou perfurados preenchidos e não preenchidos com graute, respectivamente. Mohamad *et al.* (2012) afirmam que quando se trata da alvenaria, o desempenho mecânico do conjunto é influenciado não só pela qualidade de cada componente, mas pelas interações físicas e químicas entre os materiais.

De acordo com Mohamad, Lourenço e Roman (2007), fatores relevantes afetam a medição do módulo de elasticidade na alvenaria, entre estes: dispersão dos resultados experimentais, o tipo (maciças ou vazadas) e resistência das unidades, resistência da argamassa, estado de tensões estabelecido durante o carregamento, parâmetros de ensaio e as técnicas construtivas empregadas. Partindo de resultados experimentais, os pesquisadores analisaram o comportamento mecânico de prismas com três blocos de concreto sob compressão, assentados com quatro misturas (cimento:cal:areia) distintas de argamassa: duas fracas em aglomerantes (1:1:6 e 1:2:9), uma intermediária (1:0,5:4,5) e uma forte (1:0,25:3). Blocos de 18,2 e 27 MPa de resistência na área líquida foram adotados. Por meio do processo de linearização das relações de tensão-deformação, os autores obtiveram a função hiperbólica apresentada pela Equação 2.8 para expressar o módulo de elasticidade tangente (E_0) dos 42 prismas testados em função de sua resistência à compressão na área líquida (f_c).

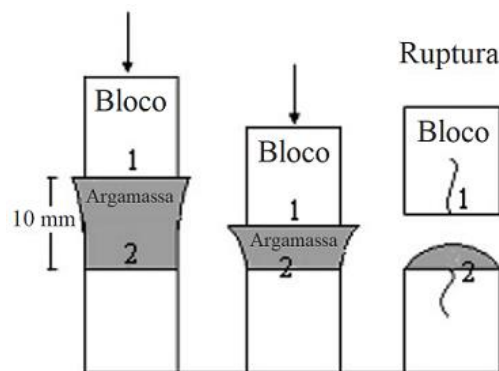
$$E_0 = 1818 \cdot f_c^{1,6853} \quad \text{Equação 2.8}$$

Comparando prismas produzidos com resistências equivalentes para as argamassas (19,9 MPa) e para os blocos (18,2 MPa) e prismas produzidos com argamassas fracas (5,41 MPa) em relação aos blocos (27 MPa), os pesquisadores constataram que embora as deformações axiais tenham sido diferentes para os dois casos (0,137% no primeiro e 0,27% no segundo), as deformações laterais obtidas foram bem próximas (0,059% e 0,063%).

Quanto à forma de ruptura dos prismas, os autores constataram a clara influência da resistência da argamassa. Para a argamassa mais fraca a fissuração dos prismas foi mais dispersa e com ocorrência de deslocamento próximo à região das juntas. Comportamento que, segundo os autores, foi causado pelo esmagamento da argamassa, seguido do aumento das tensões laterais de tração nas paredes dos blocos.

Outro ponto observado foi que após a ruptura dos prismas a perda total de aderência entre bloco e argamassa ocorria apenas na parte superior das juntas, fazendo com que a argamassa permanecesse aderida ao topo do bloco inferior (Figura 2.27). Segundo os autores, esse comportamento é atribuído à exsudação da água contida na argamassa, que ao se acumular na superfície da junta, torna a região mais porosa e menos aderente.

Figura 2.27 – Perda de aderência no topo das juntas.



Fonte: Mohamad, Lourenço e Roman (2007)

Com base em resultados experimentais de argamassas, blocos de concreto de baixa resistência (3,44 a 4,04 MPa) e prismas de três blocos, Álvarez-Pérez *et al.* (2020) realizaram 243 simulações numéricas de prismas e obtiveram modelos matemáticos multifatoriais. Como resultados, os pesquisadores obtiveram a Equação 2.9 e Equação 2.10 para expressar, respectivamente, o módulo de elasticidade (E_m) e a resistência à compressão (f'_m) dos prismas em função da resistência à compressão dos blocos (f'_{cp}), resistência à tração da argamassa (f'_{tm}), resistência à tração dos blocos (f'_{tp}) e espessura das juntas de argamassa (h). Os valores das resistências devem ser fornecidos em MPa enquanto a espessura das juntas é dada em milímetros.

$$|E_m| = 121,325f'_{cp}{}^2 - 788,887f'_{cp} + 2,27042f'_{tm}f'_{cp} + 2190,82 \quad \text{Equação 2.9}$$

$$|f'_m| = \begin{cases} 4,29767f'_{cp} - 0,471467f'_{cp}{}^2 + 0,218868f'_{tp} - 0,00902076f'_{tp}h \\ +0,000294597h^2 - 0,00495695h - 6,8462 \end{cases} \quad \text{Equação 2.10}$$

Segundo os autores, os resultados obtidos também evidenciaram a resistência à tração dos blocos, resistência à compressão e a espessura das juntas como os parâmetros de maior influência na resistência à compressão dos prismas, enquanto o módulo de elasticidade foi mais influenciado pela resistência à tração das argamassas e à compressão dos blocos.

De acordo com Sandoval e Arnau (2017), a experimentação de materiais aplicando controle de deslocamentos propicia como principal vantagem a possibilidade de registrar também os valores de tensão-deformação de pós-pico, ou seja, após atingir a tensão máxima, o que permite pormenorizar o comportamento plástico dos materiais bem como determinar a energia de fratura envolvida. Nesse sentido, muitos estudos baseados em análises experimentais e numéricas têm obtido como resultados modelos analíticos capazes de estimar com qualidade satisfatória a curva tensão-deformação observada em prismas submetidos à compressão (Dougkas *et al.*, 2019; Yang, Lee, Hwang, 2019; Ouyang *et al.*, 2019; Ahmed, Al-Zuhairi, 2019; Cerqueira *et al.*, 2020). Outros autores avaliaram a deformabilidade de componentes isolados como é o caso da argamassa (Lakshani; Jayathilaka; Thamboo, 2020) e das unidades (Linse *et al.*, 2014). Outros trabalhos propuseram ainda equações para estimar a resistência dos prismas em função das propriedades de cada componente (Sarhat, Sherwood, 2014; Zahra, Dhanasekar, 2016; Zhou, Wang, Zhu, 2016; Thaickavil, Thomas, 2018; Nalon *et al.*, 2020).

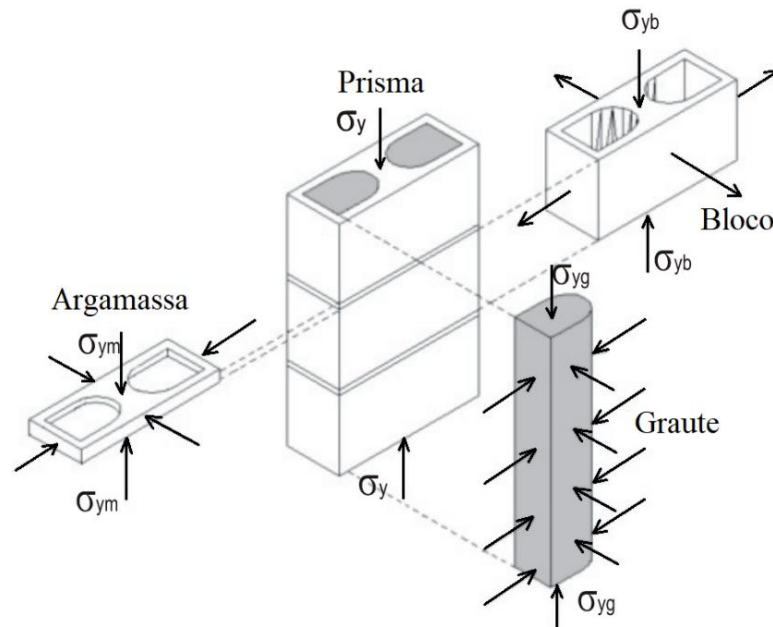
De acordo com Hendry, Sinha e Davies (2004), o conjunto da alvenaria sob compressão falha ou pelo desenvolvimento de tensões de tração com fissuração paralela ao eixo de carregamento ou por uma ruptura de cisalhamento ao longo de linhas de fragilidade dos materiais. A ocorrência de uma ou outra forma de ruptura dependerá se a argamassa é mais ou menos fraca que as unidades. Os autores também afirmam que a resistência obtida para a alvenaria geralmente é compreendida pelo intervalo entre a raiz cúbica ou quádrupla da resistência da argamassa (menor) medida em corpos de prova cúbicos e a raiz quadrada da resistência nominal das unidades (maior) dada na área líquida.

No geral, as propriedades de resistência à compressão e módulo de elasticidade da argamassa tendem a ser menores que das unidades. Nessa situação, se a argamassa pudesse se deformar livremente, as deformações laterais nas juntas superariam as deformações das unidades, o que se torna mais evidente à medida que a tensão externa aplicada se aproxima da resistência última da argamassa. Porém, em função da aderência e do atrito com as unidades a

argamassa é confinada, sendo submetida a um estado triaxial de tensões de compressão. Esse efeito de confinamento é que propicia à argamassa suportar tensões solicitantes que superem sua resistência à compressão simples. Quanto às unidades, essas são acometidas por compressão axial e tração lateral (Hilsdorf, 1967).

Mohamad, Lourenço e Roman (2011) afirmam que existe uma ideia compartilhada na literatura de que a falha na alvenaria com blocos de concreto ocorre pelo estado biaxial de tensões de tração-compressão e que a não-linearidade observada nos diagramas de tensão-deformação advém de grandes aumentos das deformações laterais associados à microfissuração do material. Segundo os pesquisadores, a distribuição de tensões na alvenaria ocorre tal como observado na Figura 2.28.

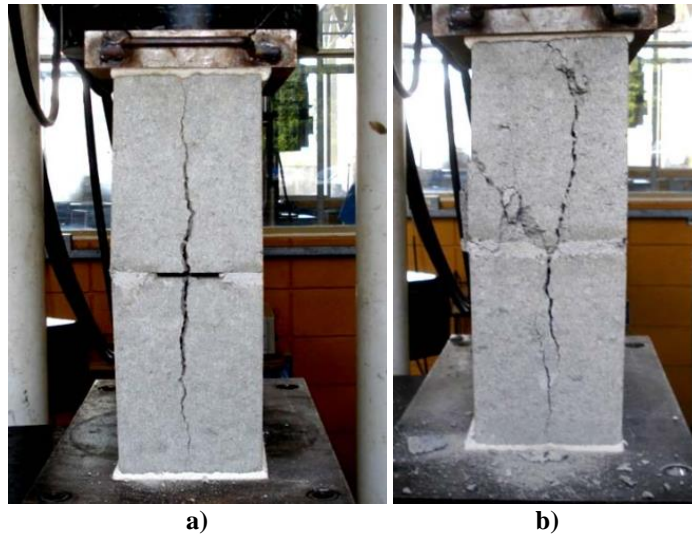
Figura 2.28 – Estado de tensões na alvenaria estrutural.



Fonte: Adaptado de Mohamad, Lourenço e Roman (2011)

Alguns estudos apontaram diferenças na ruptura de prismas com blocos de concreto quando assentados com argamassamento parcial e com argamassamento total. Em ambos os casos a falha é caracterizada pela presença de fissuras verticais ao longo das paredes transversais (Figura 2.29). Porém, as fissuras tendem a ser maiores no prisma com argamassamento parcial (Mata, Rovere, Prudêncio Júnior, 2008; Izquierdo, Corrêa, Soto, 2012).

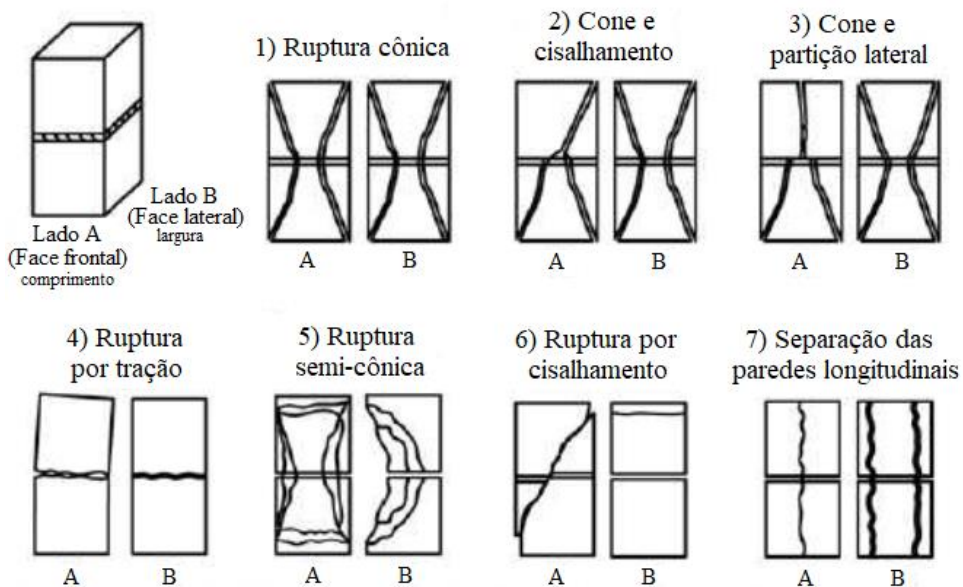
Figura 2.29 – Ruptura em prismas com dois blocos de concreto: a) argamassamento parcial; b) argamassamento total.



Fonte: Izquierdo, Corrêa e Soto (2012)

Conforme as prescrições da norma C1314-14 (ASTM, 2014), após ensaiados à compressão, os prismas devem ter o seu modo de falha registrado e descrito, informando qual dos sete padrões de ruptura apresentados pela Figura 2.30 foi observado.

Figura 2.30 – Formas de ruptura admitidas para os prismas em ensaios de compressão.



Fonte: Adaptado de C1314-14 (ASTM, 2014)

2.12.5 BLOCOS E PRISMAS SOB ALTAS TEMPERATURAS

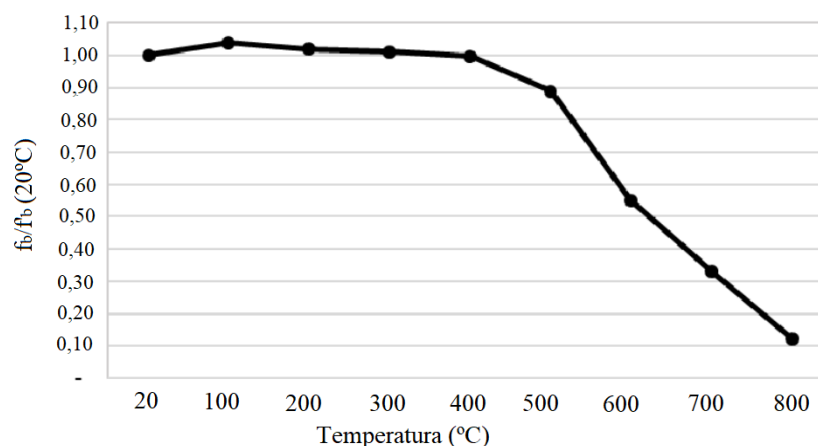
Os elementos em alvenaria estrutural são compostos pelas unidades (ex.: blocos cerâmicos, blocos de concreto), argamassas de assentamento, eventuais armaduras e graute de preenchimento. A resistência ao fogo da alvenaria depende do comportamento sob elevadas

temperaturas de cada um desses componentes, isoladamente e em conjunto (Leite; Moreno Júnior; Torres, 2016). Sob altas temperaturas, gradientes de temperatura geram dilatações distintas ao longo dos elementos. Ao mesmo passo, transformações químicas e da microestrutura ocorrem, resultando na degradação de cada componente e, conseqüentemente, no comportamento da alvenaria como uma composição/associação desses materiais.

2.12.5.1 Blocos de concreto submetidos a altas temperaturas

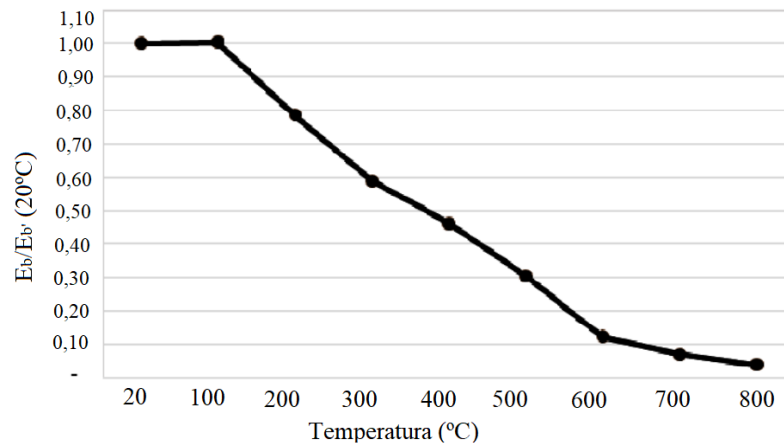
A literatura é escassa no que se refere ao comportamento frente a altas temperaturas em blocos de concreto para alvenaria estrutural, produzidos com concreto seco e conformados pelo processo de vibrocompressão. Entre os poucos estudos envolvendo unidades com tais características, destaca-se o desenvolvido por Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020). Os autores investigaram o comportamento mecânico após altas temperaturas de blocos de concreto vibroprensados e produzidos com agregado graúdo de gnaiss. Durante a caracterização, o agregado graúdo foi submetido aos ensaios de Difractometria de Raios X (DRX), onde foi constatada a predominância do Silício (Si – 25,294%), do Ferro (Fe – 4,897%) e do Alumínio (Al – 4,592%) em sua composição. No ensaio de termogravimetria, com o agregado aquecido à taxa de 1°C/min até cerca de 1000°C menos de 2% de perda de massa foi observado. Os ensaios com os blocos propriamente ditos foram realizados com taxa de aquecimento de 1°C/min até as temperaturas de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800°C. Após atingidas as temperaturas, essas foram mantidas por 60 minutos, resfriadas até temperatura ambiente e tiveram resistência à compressão e módulo de elasticidade mensurados. Os resultados para a resistência à compressão e módulo de elasticidade residuais das unidades testadas são apresentados pela Figura 2.31 e Figura 2.32, respectivamente.

Figura 2.31 – Relação entre resistência à compressão residual em temperatura ambiente para cada temperatura de ensaio dos blocos.



Fonte: Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020)

Figura 2.32 – Relação entre módulo de elasticidade residual em temperatura ambiente para cada temperatura de ensaio dos blocos.



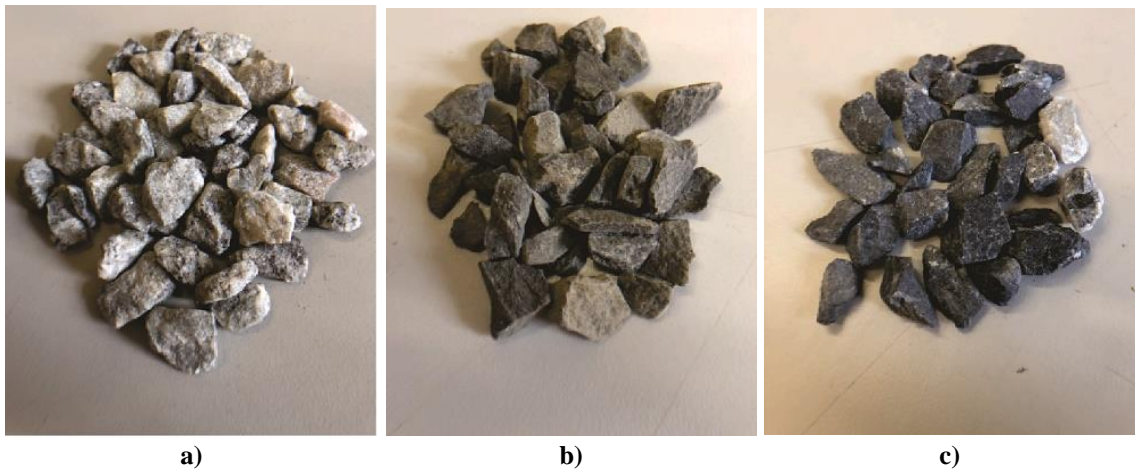
Fonte: Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020)

Os autores relatam um leve aumento da resistência nas primeiras temperaturas, seguido de uma manutenção da propriedade até cerca dos 400 °C, e queda significativa a partir de então. Segundo os pesquisadores, o aumento da resistência até os 300°C é um possível resultado do alívio de tensões pela secagem associado à hidratação de grãos anidros de cimento, ao aumento das forças de Van der Waals (interação química) e à redução dos poros capilares. Aos 400 °C, a queda acentuada na propriedade é explicada pela perda de água cristalina e do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

Para os valores residuais do módulo de elasticidade (Figura 20), os autores observaram que a redução da propriedade foi mais severa que a redução na resistência. Após os 100°C o módulo decresceu de modo quase que linear, até atingir cerca de 50% do valor de referência aos 400°C. Os autores concluem que as reduções observadas, sobretudo após os 400C, são consequência do efeito combinado da redução de umidade, microfissuração, decomposição química e tensões induzidas pela dilatação térmica.

Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2023) também compararam o comportamento mecânico de blocos vibroprensados produzidos com agregados de gnaiss e com agregados de outras duas origens mineralógicas: basalto e calcário, conforme Figura 2.33), de diferentes classes de resistência (6, 12 e 24 MPa na área bruta) e submetidos às mesmas temperaturas de 100 a 800°C. O aquecimento (em forno elétrico) e o resfriamento dos corpos de prova aconteceram na taxa de 1°C/min, com manutenção de 1h na temperatura de interesse. Em seguida, foram obtidas as propriedades residuais de resistência à compressão e módulo de deformação.

Figura 2.33 – Agregados utilizados por Medeiros *et al.* (2023): a) gnaiss; b) basalto; c) calcário.



Fonte: Medeiros *et al.* (2023)

Dos resultados, observou-se que todos os blocos produzidos com calcário apresentaram acréscimos de resistência até os 100°C, sendo esse acréscimo maior para as menores classes de resistência. Os blocos com calcário também apresentaram maiores valores residuais de resistência até os 500°C. Contudo, com 600°C a queda de resistência foi abrupta e intensa, atingindo níveis negligenciáveis após os 700°C. Segundo os autores, esse comportamento observado aos 600°C é atribuído ao afeito da transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Para uma mesma classe de resistência de bloco, concluiu-se que a variação na temperatura influenciou significativamente a propriedade de resistência à compressão, independentemente do tipo de agregado.

Os blocos produzidos com gnaiss também apresentaram acréscimos de resistência até os 100°C, porém menores que os de calcário. Até os 400°C a queda na resistência foi mínima, tornou-se mais evidente após os 500°C, e após 800°C ainda conservaram mais da propriedade que os agregados de calcário. Os blocos produzidos com basalto não apresentaram aumentos significativos de resistência após 100°C. A redução da propriedade teve início já com 200°C, após os 500°C apresentou maior na curva decrescente de temperatura, semelhante aos blocos de gnaiss. Após 800°C, os blocos com basalto também forneceram resistências residuais maiores que os de calcário. Para uma mesma temperatura, alterações na resistência do bloco não surtiram variações significativas nas propriedades dos blocos. O mesmo ocorreu fixando-se o tipo de agregado, a alteração na classe do bloco não alterou significativamente as propriedades mecânicas residuais.

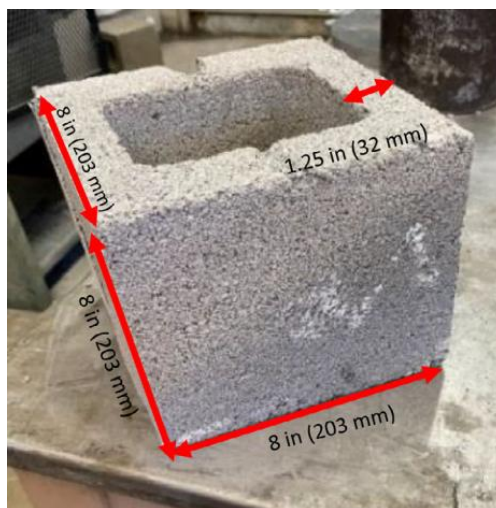
Quando comparados aos concretos convencionais, os autores concluíram que os blocos produzidos com concreto seco tendem a manter suas propriedades residuais por mais tempo. Segundo os pesquisadores, o bom empacotamento dos agregados, a baixa quantidade de água

na mistura, baixo consumo de cimento e a compactação fornecida ao concreto seco durante o processo de vibroprensagem contribuem para a configuração de uma zona de transição na interface agregado-matriz mais densa e menos suscetível à microfissuração, grande responsável pela degradação das propriedades mecânicas.

Quanto ao módulo de deformação dos blocos, este foi consideravelmente afetado pela submissão a altas temperaturas e com maior intensidade que a resistência à compressão, independentemente do tipo de agregado. Segundo os autores, esse comportamento que também é observado em concretos plásticos convencionais, é atribuído à ocorrência da microfissuração e consequente enfraquecimento da zona de transição na interface entre agregados e matriz cimentícia dos blocos.

Daware *et al.* (2023) avaliaram a resistência residual de blocos vazados de concreto para alvenaria estrutural produzidos predominantemente por agregados leves, após submissão a 200, 400, 600 e 800°C (em forno elétrico do tipo mufla). Para tal, foram consideradas metades de blocos inteiros (Figura 2.34). Os aquecimentos aconteceram em 200°C/h (aprox. 3,33 °C/min), mantendo-se por 3h nas temperaturas de interesse. O resfriamento ocorreu com forno desligado e fechado até os 100°C. Após isso, o forno foi aberto até alcançar a temperatura ambiente.

Figura 2.34 – Meio bloco de concreto testado por Daware *et al.* (2023).

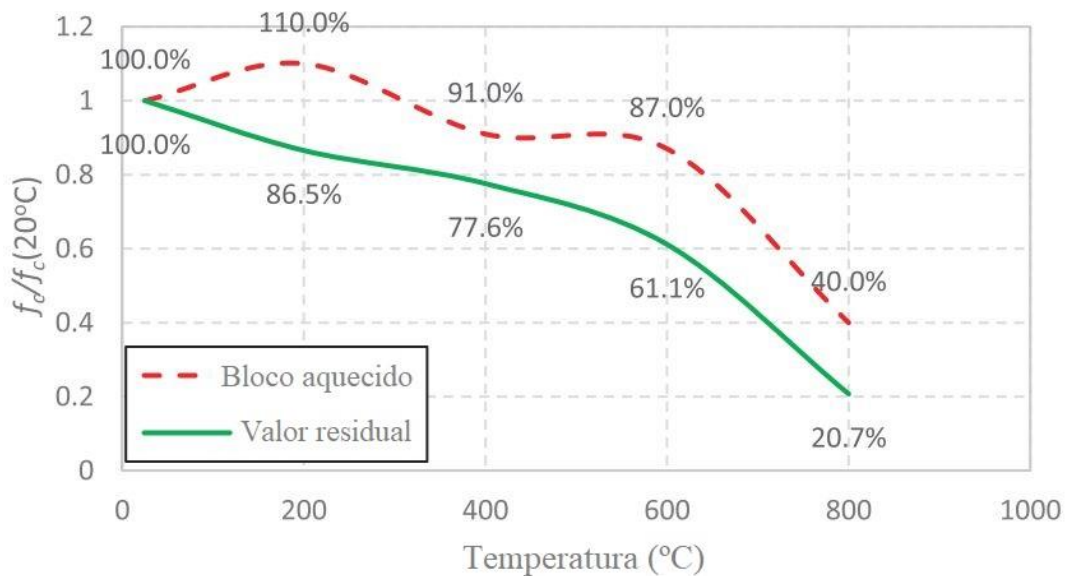


Fonte: Daware *et al.* (2023)

Durante duas semanas após o resfriamento os corpos de prova foram mantidos em condições de laboratório, até serem testados à compressão. Concluídos os ensaios residuais, novas amostras tiveram a resistência à compressão medida ainda quando aquecidas, imediatamente ao final do período de manutenção nas temperaturas de 200, 400, 600 e 800°C. Como complemento, foram extraídos fragmentos do interior dos blocos para ensaios de termogravimetria, realizados sob taxa de 10°C/min e elevação de temperatura até 1000°C. Nos

resultados, a degradação dos blocos com o aumento da temperatura foi evidente tanto para as propriedades mecânicas residuais quanto obtidas nos corpos de prova ainda aquecidos (Figura 2.35). O tipo de ruptura predominante na obtenção da resistência à compressão residual foi por cisalhamento dos blocos, com formação de fissuras diagonais (Figura 2.30).

Figura 2.35 – Relações entre resultados de resistência à compressão com altas temperaturas e temperatura ambiente (referência), em corpos de prova aquecidos e duas semanas após o resfriamento.



Fonte: Adaptado de Daware *et al.* (2023)

Diferentemente dos resultados residuais, um acréscimo de 10% da resistência à compressão foi exibido pelos blocos testados imediatamente após o aquecimento de 200°C. Segundo os autores, tal comportamento está ligado à presença do agregado leve. A absorção de umidade, reidratação dos compostos e provável fissuração nos blocos testados após duas semanas foi responsável pela ausência de acréscimos nos resultados dos testes residuais. Além disso, os pesquisadores apontam a possível existência de uma compatibilidade nos coeficientes de dilatação de pasta e agregados e incompatibilidade nos coeficientes de retração dessas fases, originando descontinuidades no material durante o período de resfriamento e reduzindo em maior intensidade as propriedades residuais.

A análise de termogravimetria apontou perdas de massa 1,44; 1,98 e 3,18% para as temperaturas de 200, 400 e 600°C, respectivamente. Entre 600 e 800°C esse valor aumentou consideravelmente, chegando a 19,54% em função do processo de descarbonatação da calcita (CaCO_3). Assim como observado por Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020, 2023) e Daware *et al.* (2023) concluíram que os blocos para alvenaria testados apresentaram menores degradações quando comparados aos concretos plásticos convencionais.

No trabalho de Fagundes Leal *et al.* (2021) blocos de concreto para alvenaria estrutural (140 × 190 × 390 mm) de classes de resistência 4 e 10 MPa (na área bruta) produzidos com concreto seco vibroprensado foram submetidos a um aquecimento de 70 min em forno a gás, conforme curva de incêndio padrão estabelecida na ISO 834-1:1999. Após resfriarem por cerca de 20 horas dentro do próprio forno, os corpos de prova tiveram suas resistências testadas.

Durante o aquecimento, constatou-se que a temperatura de 500°C foi alcançada ao longo de toda a espessura das paredes longitudinais dos blocos. Aos 70 min de aquecimento, as temperaturas atingidas em profundidades de 5 e 20 mm nas paredes longitudinais (da face externa para o centro dos blocos) foram iguais a 875 e 800°C, respectivamente. Outros dois aspectos foram observados ainda durante a elevação da temperatura: 1) nos blocos a transferência de calor ocorreu preferencialmente através de seus vazios ao invés dos trechos sólidos; 2) uma permanência na temperatura de 100°C foi notada. Segundo os autores, esta última se deve à presença de água no interior do concreto, cuja evaporação absorve grande quantidade de energia, retardando o aquecimento do compósito. Para a taxa de aquecimento empregada, a variação na classe de resistência do bloco (produzido com mesmo agregado) não afetou significativamente a evolução da temperatura.

Segundo os autores, os resultados indicaram diferentes níveis de degradação em função da resistência dos blocos. Quando comparados aos blocos de 10 MPa, os blocos menos resistentes (4 MPa) apresentaram menor fissuração associada à expansão térmica (Figura 2.36), contudo exibiram notável degradação com tendência ao esfarelamento quando manuseados. Nenhuma das amostras aquecidas sofreu *spalling*.

Figura 2.36 – Condição dos blocos de concreto após o aquecimento: a) blocos de 4 MPa; b) blocos 10 MPa.



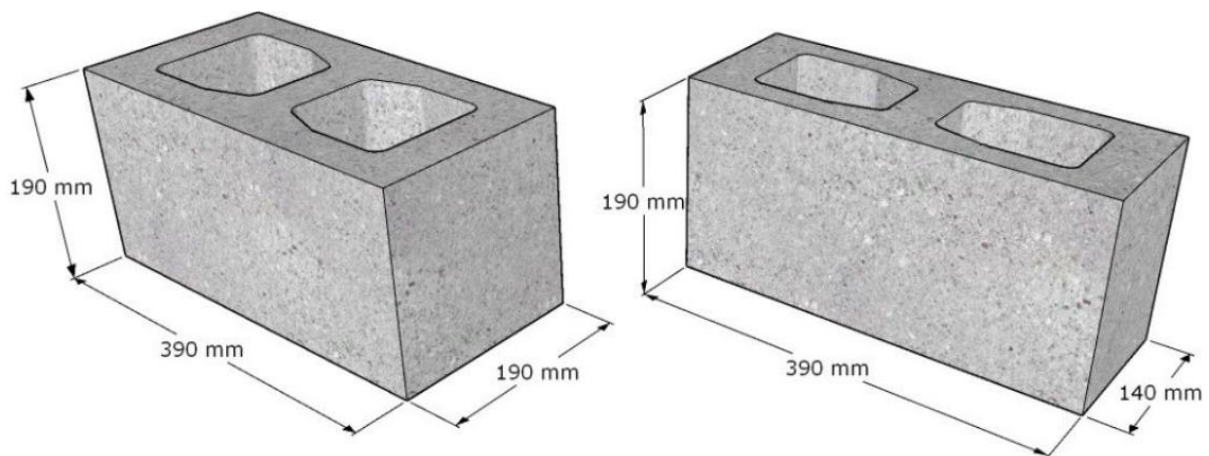
Fonte: Fagundes Leal *et al.* (2021)

O comportamento mecânico dos blocos foi consideravelmente afetado pelo aquecimento. Os resultados de resistência à compressão foram reduzidos em 73 e 80% em relação àqueles obtidos em temperatura ambiente para unidades de 4 e de 10 MPa,

respectivamente. Segundo os autores, esse comportamento está associado à maior fissuração observada nos blocos de 10 MPa.

Amaral *et al.* (2023) estudaram a influência da classe de resistência e da geometria dos blocos de concreto em suas propriedades mecânicas residuais (resistência à compressão e módulo de deformação). Foram testadas unidades produzidas com concreto seco vibropressado e agregados silicosos, de baixa, média e alta resistência (14, 22 e 41 MPa na área líquida) e duas larguras (140 e 190 mm), conforme Figura 2.37.

Figura 2.37 – Geometria dos blocos de concreto testados.



Fonte: Amaral *et al.* (2023)

Os blocos foram aquecidos com taxa de 1°C/min até 100, 300, 500, 700 e 900°C, mantendo por 60 minutos as temperaturas de interesse. Dos resultados, observou-se que até os 300°C nenhuma redução significativa ocorreu nas propriedades residuais dos blocos. Após os 500°C grandes reduções foram observadas em todos os corpos de prova testados. Para aquecimentos entre 300 e 700°C, os blocos de menor resistência (14 MPa na área líquida) foram os que apresentaram as menores reduções na resistência à compressão. Após os 900°C, os blocos de baixa e média resistência (14 e 22 MPa, área líquida) degradaram-se totalmente, com notável fissuração e nenhuma resistência residual. Enquanto isso, os blocos de 41 MPa (alta resistência) mantiveram cerca de 16% de sua resistência à compressão em temperatura ambiente. Assim como observado na literatura, a degradação com o aquecimento foi maior para o módulo de deformação dos blocos que na resistência à compressão. Após os 500°C, por exemplo, os blocos de baixa resistência (14 MPa) testados pelos autores mantiveram, respectivamente, 89 e 27% dos valores de resistência à compressão e módulo de deformação obtidos em temperatura ambiente. Os resultados residuais do módulo de deformação não foram influenciados pela variação na classe de resistência dos blocos, mas mostraram-se dependentes da largura das unidades.

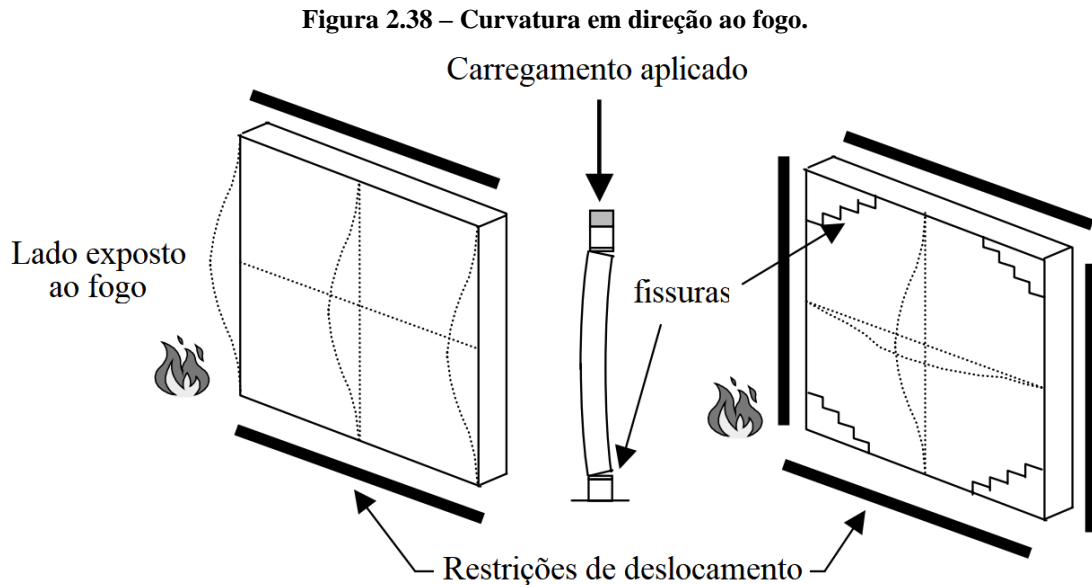
2.12.5.2 *Prismas, pequenas paredes e paredes submetidas a altas temperaturas*

Dentre os poucos trabalhos que contemplam a avaliação experimental de prismas com blocos de concreto submetidos a altas temperaturas, cita-se o de Fagundes Leal *et al.* (2021). Os autores investigaram a resistência residual em prismas moldados com blocos de 4 MPa, juntas argamassadas de 1 cm e submetidos a 70 min de aquecimento segundo curva de incêndio padrão (ISO 834-1:1999). Após o resfriamento, os prismas apresentaram valores de resistência à compressão equivalentes a 14% dos obtidos em temperatura ambiente (valores de referência).

No trabalho de Fagundes Leal *et al.* (2021), pequenas paredes (2 blocos de largura \times 5 fiadas) também foram construídas com blocos de concreto de 4 e 10 MPa e submetidas a aquecimentos de 70 min pela curva ISO 834-1:1999. Quando comparadas aos blocos testados isoladamente, as pequenas paredes apresentaram fissuração em posições semelhantes (nas faces laterais e ao longo da altura dos elementos), porém de intensidade significativamente menor. Segundo os autores, o peso próprio dos blocos superiores e o efeito de confinamento proporcionado pelas juntas e blocos adjacentes foram responsáveis por atenuar as fissuras induzidas pela dilatação térmica. Quanto às propriedades mecânicas, as reduções no módulo de deformação das pequenas paredes superaram em grande medida as de sua resistência à compressão. Independentemente da classe de resistência do bloco, os valores de módulo obtidos após o aquecimento corresponderam a cerca de 1% dos obtidos em temperatura ambiente (9,5 e 13,69 GPa para blocos de 4 e 10 MPa, respectivamente). Os valores de resistência à compressão das pequenas paredes decresceram na mesma proporção que dos prismas de dois blocos (queda de 86% em relação aos resultados anteriores ao aquecimento), apontando o uso de prismas como estratégia econômica e viável às investigações experimentais.

De acordo com Andreini e Sassu (2011), no geral, a alvenaria estrutural submetida à incêndio mantém sua capacidade de suporte e de absorver deformações por uma larga faixa de temperatura. Os autores pontuam que os componentes da alvenaria se degradam gradativamente e destacam que as juntas de argamassa exercem importante contribuição para a configuração da resistência ao fogo em paredes.

Na maioria dos casos de incêndio, as paredes em alvenaria têm apenas uma das faces exposta ao fogo. Tal situação reflete no surgimento de um gradiente térmico entre as faces. Cada face se dilata em uma determinada proporção e, na ausência de restrições, as deformações diferenciais induzem a um arqueamento/curvatura (Figura 2.38) em direção à fonte de calor (Nadjai *et al.*, 2003; Najdai, O'garra, Ali, 2003).



Segundo Najdai *et al.* (2003), o colapso estrutural da parede depende de suas condições de vinculação, de sua geometria e magnitude de carregamento, sendo alcançado pelo efeito combinado das deformações térmicas e da degradação dos materiais sob altas temperaturas. Logicamente, propriedades físicas (sobretudo as térmicas) e mecânicas dos materiais que compõem os blocos e da própria argamassa também são determinantes na falha do elemento estrutural em alvenaria.

2.12.6 SÍNTESE SOBRE BLOCOS E PRISMAS

Os blocos de concreto utilizados em larga escala na alvenaria estrutural são produzidos com misturas do tipo *zero-slump*, cujas características são significativamente diferentes dos concretos convencionais e cujas propriedades estão diretamente relacionadas à eficiência da vibrocompressão durante sua produção. Tais misturas são marcadas pela quantidade reduzida de pasta de cimento e porosidade elevada, associada à presença de vazios com dimensões predominantemente irregulares. A coesão é uma propriedade relevante para a conformação e desmoldagem de artefatos com concreto seco e depende da composição e distribuição granulométrica dos agregados (desejável a presença de finos), do teor de umidade da mistura, do consumo de cimento e eficácia do processo de adensamento.

O papel dos blocos no comportamento da alvenaria é evidente. São os maiores responsáveis pela resistência à compressão dos elementos (prismas, pequenas paredes, paredes). Alguns comportamentos são observados nos resultados de estudos desenvolvidos. A relação entre as resistências de prisma e do bloco de concreto (f_{pk}/f_{bk}), também conhecida como

eficiência do prisma, é reduzida à medida que a resistência do bloco aumenta (Andolfato; Camacho; Ramalho, 2007). A eficiência do prisma também é reduzida quando este é preenchido com graute (Fortes; Parsekian; Fonseca, 2015). O aumento na resistência das unidades reflete em aumentos nos valores de resistência e módulo de deformação de prismas, tanto ocós quanto grauteados (Martins *et al.*, 2018). Quanto maior a altura do prisma, menor o efeito de confinamento fornecido pelo atrito com os pratos da prensa, maior a tensão lateral de tração no centro do prisma e menor sua tensão de ruptura (Hamid, Chukwunenye, 1986; Abasi, Hassanli, Vincent, Manalo, 2020). Geometria dos blocos, tipo de capeamento, rigidez dos pratos da prensa e a própria mão de obra também exercem influência no comportamento mecânico dos prismas com blocos de concreto (Fortes, 2012; Hamid, Chukwunenye, 1986; Hendry, Sinha, Davies, 2004).

A deformabilidade e ruptura dos prismas são influenciadas pela geometria e resistência das unidades, resistência da argamassa e estado de tensões que se configura durante o carregamento. Especificamente, a resistência à tração dos blocos, espessura e resistência das juntas exercem a maior interferência na resistência dos prismas. Para o módulo de deformação, a resistência das unidades e resistência à tração da argamassa de assentamento foram relatados como os maiores intervenientes (Álvarez-Pérez *et al.*, 2020). O emprego de argamassas consideravelmente mais fracas que as unidades resulta na ruptura do prisma pelo esmagamento das juntas (Mohamad; Lourenço; Roman, 2007). O fato de a argamassa de assentamento ser mais ou menos resistente que a unidade define se o elemento em alvenaria, quando comprimido, falhará por cisalhamento ou devido às tensões de tração, com fissuração paralela ao eixo de carregamento (Hendry; Sinha; Davies, 2004). A forma de assentamento, com argamassamento parcial (argamassa sobre paredes longitudinais do bloco) ou total (argamassa sobre todas as paredes) também influencia na ruptura de prismas com blocos de concreto, com maior fissuração para o argamassamento parcial (Mata; Rovere; Prudêncio Júnior, 2008, Izquierdo; Corrêa; Soto, 2012).

Outro comportamento relevante da junta em argamassa corresponde ao estado triaxial de tensões que se configura durante o carregamento e que é causado pelo atrito com as unidades e sua restrição lateral. Tal situação gera um efeito de confinamento que permite à argamassa das juntas suportar tensões superiores à sua resistência à compressão (Hilsdorf, 1967). A não-linearidade dos diagramas de tensão-deformação dos elementos em alvenaria está associada à microfissuração dos componentes e consequentes aumentos das deformações laterais (Mohamad; Lourenço; Roman, 2011).

No que tange às altas temperaturas, a maioria dos trabalhos aborda a influência do superaquecimento de concretos plásticos convencionais, incluindo concretos leves e concretos e alta resistência. No entanto, concretos secos e concretos convencionais devem ser tratados como materiais distintos. As características particulares das misturas de *zero-slump* podem influenciar consideravelmente suas propriedades mecânicas diante do superaquecimento. Acredita-se, por exemplo, que os blocos produzidos com concreto seco, por conta da maior porosidade e menor quantidade de água na mistura, exibem menores ocorrências de *spalling*. Sua elevada porosidade e paredes relativamente finas (pequenas distâncias a serem percorridas) fornecem menor dificuldade à expulsão da água permeada durante a evaporação.

Em um elemento de alvenaria aquecido, cada componente da alvenaria sofre transformações químicas e alterações de sua microestrutura. Soma-se a isso a forma como as propriedades físicas dos materiais alteram seu comportamento sob aquecimento. Gradientes de temperatura se formam resultando em retrações/dilatações de diferentes proporções e indução de tensões. São poucos os trabalhos que abordam blocos produzidos com concreto seco para alvenaria estrutural. Dos estudos disponíveis, dois comportamentos são evidentes: a redução significativa das propriedades mecânicas após os 400°C e maior degradação do módulo de deformação quando comparado à resistência à compressão. Assim como nas argamassas e nos concretos convencionais, pequenos aumentos podem ser observados em componentes da alvenaria estrutural ensaiados após submissão a altas temperaturas. A explicação é a mesma: hidratação de grãos anidros de cimento e aumento das forças de Van der Waals (interação química) com a redução dos poros capilares e aproximação entre as moléculas (Medeiros; Parsekian, Moreno Júnior, 2020). A origem mineralógica do agregado utilizado também exerce influência no comportamento dos componentes da alvenaria após o aquecimento. Blocos produzidos com calcário, por exemplo, retém melhor suas propriedades até os 400°C e apresentam queda abrupta após os 600°C, em função da transformação do carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Blocos produzidos com gnaiss e basalto apresentam degradação a partir dos 300°C e decréscimo gradativo das propriedades até os 800°C, por exemplo. De modo geral, os blocos produzidos com concreto seco mantêm suas propriedades mecânicas por maiores temperaturas que os concretos convencionais, em função da qualidade da zona de transição entre agregado e matriz que é fornecida pela quantidade reduzida de água e cimento na mistura, e eficácia da moldagem por vibrocompressão (Medeiros; Parsekian, Moreno Júnior, 2023). O emprego de agregados leves na obtenção dos blocos também é uma alternativa que contribui com a manutenção de suas propriedades mecânicas após altas temperaturas (Daware *et al.*, 2023; Amaral *et al.*, 2023).

Quanto à resistência residual de elementos de alvenaria com blocos de concreto, constatou-se resultados semelhantes de prismas e pequenas paredes, indicando o uso de prismas como a alternativa de maior viabilidade técnica e econômica para o desenvolvimento de análises experimentais. À medida que a altura dos elementos em alvenaria aumenta e tornam-se mais esbeltos, menores são os valores iniciais das propriedades mecânicas. Maiores também são as reduções das propriedades mecânicas em pequenas paredes e paredes diante da exposição às altas temperaturas. Contudo, efeitos positivos do peso próprio e do confinamento fornecido às juntas pelos blocos circundantes podem ser observados como, por exemplo, menores níveis de fissuração em comparação aos observados em blocos testados isoladamente (Fagundes Leal *et al.*, 2021). Em paredes de tamanho natural, o colapso sob altas temperaturas é um efeito combinado das deformações térmicas e deterioração dos materiais e depende das condições de vinculação do elemento, de sua esbeltez e da magnitude do carregamento aplicado (Najdai *et al.*, 2003).

2.13 PROJETO DE ALVENARIA ESTRUTURAL EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

Segundo Medeiros (2022), o processo de normalização representa um importante instrumento para garantia da qualidade e do desempenho dos materiais, componentes e sistemas construtivos, bem como no controle da segurança contra incêndio das edificações.

Os primeiros códigos de segurança contra incêndio e as primeiras brigadas de combate surgiram pela ação de seguradoras de imóveis, cuja preocupação em proteger o patrimônio era maior que a de preservar os próprios ocupantes. Durante muito tempo, a maioria dos projetos de segurança de estruturas em situação de incêndio foram baseados em códigos meramente prescritivos, dando ao projetista pouca ou quase nenhuma oportunidade de tomar decisões distintas, calcadas em uma abordagem de engenharia. Desde então, no desenvolvimento de novos códigos, muitos países têm adotado modelos baseados no desempenho ao fogo e vinculados à legislação que estabelece objetivos e requisitos a serem atendidos pelas edificações (Buchanan; Abu, 2017).

Conforme Buchanan e Abu (2017), as principais diferenças para o dimensionamento sob situação de incêndio em relação ao cálculo sob temperatura ambiente, são:

- i. Carregamentos críticos em situação de incêndio são menores;
- ii. coeficientes menores de segurança são adotados em função da baixa probabilidade de ocorrência do incêndio;

- iii. com o incêndio, forças internas e deformações são induzidas pela expansão térmica diferencial;
- iv. interações com o resto da estrutura surgem quando os elementos tentam se expandir;
- v. a capacidade resistente dos materiais decresce com as altas temperaturas;
- vi. seções transversais dos elementos podem ser reduzidas em função da carbonização (madeira) ou do lascamento explosivo (concreto, cerâmica);
- vii. diferentes mecanismos de falha devem ser considerados.

2.14 NORMAS BRASILEIRAS

O Brasil ainda não dispõe de norma específica para o dimensionamento de edificações em alvenaria estrutural considerando a situação de incêndio. Porém, a previsão de uma parte dedicada ao tema (Parte 4) já consta no prefácio da ABNT NBR 16868-1:2020, que cancelou e substituiu as normas ABNT NBR 15812-1:2010 e ABNT NBR 15961-1:2011, unificando as prescrições de projeto, execução e controle de obras, e métodos de ensaio para alvenaria estrutural com blocos cerâmicos e de concreto.

Até o presente momento, as informações sobre resistência ao fogo de alvenarias brasileiras se concentram em poucos trabalhos acadêmicos, manuais publicados por fabricantes de blocos e instruções técnicas como a N° 08/2019 do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo, que compila resultados obtidos em paredes sem função estrutural (Quadro 2.3). Quando se refere ao dimensionamento sob incêndio de elementos estruturais, a instrução técnica recomenda o emprego do Eurocode vigente ou norma similar, desde que reconhecida internacionalmente.

Quadro 2.3 – Resistência ao fogo para alvenarias segundo Instrução Técnica N° 08/2019.

Paredes ensaiadas (*)		Características das paredes										Resultado dos ensaios					
		Traço em volume da argamassa de assentamento			Espessura média da argamassa de assentamento (cm)	Traço em volume de argamassa de revestimento					Espessura de argamassa de revestimento por face (cm)	Espessura total da parede (cm)	Duração do ensaio (min)	Tempo de atendimento aos critérios de avaliação (horas)			Resistência ao fogo (horas)
						Chapisco		Emboço						Integridade	Estanqueidade	Isolação térmica	
		Cimento	Cal	Areia	Cimento	Areia	Cimento	Cal	Areia								
Parede de tijolos de barro cozido. Dimensões nominais 5cm x 10cm x 20cm; Massa 1,5kg	Meio tijolo sem revestimento	-	1	5	1	-	-	-	-	-	-	10	120	≥ 2	≥ 2	1,5	1,5
	Um tijolo sem revestimento	-	1	5	1	-	-	-	-	-	-	20	395 (**)	≥ 6	≥ 6	≥ 6	≥ 6
	Meio tijolo com revestimento	-	1	5	1	1	3	2	2	9	2,5	15	300	≥ 4	≥ 4	4	4
	Um tijolo com revestimento	-	1	5	1	1	3	2	2	9	2,5	25	300 (**)	≥ 6	≥ 6	≥ 5	> 6
Parede de blocos vazados de concreto (2 furos); Dimensões nominais 14cm x 19cm x 39cm e 19cm x 19cm x 39cm; Massas 13kg e 17kg, respectivamente	Bloco de 14 cm sem revestimento	1	1	8	1	-	-	-	-	-	-	14	100	≥ 1,5	≥ 1,5	1,5	1,5
	Bloco de 19 cm sem revestimento	1	1	8	1	-	-	-	-	-	-	19	120	≥ 2	≥ 2	1,5	1,5
	Bloco de 14 cm com revestimento	1	1	8	1	1	3	2	2	9	1,5	17	150	≥ 2	≥ 2	2	2
	Bloco de 19 cm com revestimento	1	1	8	1	1	3	2	2	9	1,5	22	185	≥ 3	≥ 3	3	3
Paredes de tijolos cerâmicos de 8 furos; Dimensões nominais 10cm x 20cm x 20cm; Massa 2,9kg	Meio tijolo com revestimento	-	1	4	1	1	3	2	2	9	1,5	13	150	≥ 2	≥ 2	2	2
	Um tijolo com revestimento	-	1	4	1	1	3	2	2	9	1,5	23	300 (**)	≥ 4	≥ 4	≥ 4	> 4
Paredes de concreto armado monolítico sem revestimento	Traço do concreto em volume 1 cimento: 2,5 areia média: 3,5 agregado graúdo (granizo pedra nº3): armadura simples posicionada à meia espessura das paredes, possuindo malha de lados 15 cm, de aço CA-50A, diâmetro 1/4 polegada											11,5	150	2	2	1	1,5
												16	210	3	3	3	3

(*) Paredes sem função estrutural ensaiadas totalmente vinculadas dentro da estrutura de concreto armado, com dimensões 2,8m x 2,8m totalmente expostas ao fogo (uma face);

(**) Ensaio encerrado sem ocorrência de falência em nenhum dos 3 critérios de avaliação.

Fonte: Adaptado de Polícia Militar do Estado de São Paulo (2019).

Outra prescrição existente é a ABNT NBR 14432:2001, que estabelece, para edifícios em geral, condições a serem atendidas pelos elementos estruturais e de compartimentação sob situação de incêndio, de forma a evitar o colapso estrutural. Além de classificar as edificações de acordo com sua ocupação e determinar cargas de incêndio específicas, a norma prescreve, segundo tal classificação, valores para o TRRF (Quadro 2.4).

Quadro 2.4 – Tempos requeridos de resistência ao fogo (em minutos).

Grupo	Ocupação/uso	Divisão	Profundidade do subsolo		Altura da edificação				
			Classe S ₂ h _s > 10 m	Classe S ₁ h _s ≤ 10 m	Classe P ₁ h < 6 m	Classe P ₂ 6 m < h ≤ 12 m	Classe P ₃ 12 m < h ≤ 23 m	Classe P ₄ 23 m < h ≤ 30 m	Classe P ₅ h > 30 m
A	Residencial	A-2 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Serviços de hospedagem	B-1 e B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercial varejista	C-1 e C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Serviços profissionais, pessoais e técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educacional e cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locais de reunião de público	F-1, F-2, F-5, F-6 e F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Serviços automotivos	G-1 e G-2 não abertos lateralmente e G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 e G-2 abertos lateralmente	90	60 (30)	20	30	30	30	60
H	Serviços de saúde e institucionais	H-1 a H-5	90	60	20	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 14432:2001

Publicada em 2013, a Norma de Desempenho das Edificações Habitacionais também trata da segurança contra incêndio. A ABNT NBR 15575-4:2013 aponta requisitos a serem atendidos, critérios e métodos de avaliação do desempenho ao fogo para os Sistemas de vedações verticais internas e externas – SVVIE que abrangem paredes de alvenaria estrutural quando estas também desempenharem a função de compartimentação.

2.15 ACI/TMS 216.1-14 (CÓDIGO NORTE-AMERICANO)

O código norte-americano resume a verificação da alvenaria estrutural sob incêndio à determinação analítica de uma espessura equivalente para a parede analisada (T_{ea}) e comparação, por meio de tabelas, com valores mínimos dados em função do tipo de unidade e do tempo desejado de resistência ao fogo (Tabela 2.7).

Tabela 2.7 – Espessuras equivalentes mínimas da parede -Tea (em cm) para atender determinados valores de TRF (em min).

Tipo de bloco e agregado empregado	Valores de TRF (min) e espessuras equivalente mínima						
	T _{ea} (cm) requerida						
	30	45	60	90	120	180	240
Bloco de concreto com agregado silicoso	5,1	6,1	7,1	9,1	10,7	13,5	15,7
Bloco de concreto com agregado calcário	4,8	5,8	6,9	8,6	10,2	12,7	15,0
Tijolo cerâmico maciço	5,5*	6,2*	6,9	8,3*	9,7	12,4	15,2
Bloco cerâmico vazado, sem preenchimento	5,0*	5,5*	5,8	7,2*	8,6	10,9	12,7
Bloco cerâmico vazado, grauteado ou preenchido com materiais específicos	6,3*	7,1*	7,6	9,4*	11,2	14,0	16,8

* valores obtidos por interpolação linear

Fonte: Adaptado de ACI/TMS 216.1 (2014)

A espessura equivalente da parede - T_{ea} é calculada como uma composição da espessura equivalente da unidade - T_e (Equação 2.11) mais a contribuição do eventual revestimento -T_{ef} (Equação 2.12).

$$T_e = \frac{V_n}{LH} \quad \text{Equação 2.11}$$

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad \text{Equação 2.12}$$

Sendo T_e a espessura equivalente da unidade (ex.: bloco de concreto, cerâmico, tijolo maciço); V_n o volume líquido do bloco; L o comprimento do bloco; H a altura do bloco; T_{ea} a espessura equivalente da parede e T_{ef} a espessura equivalente do revestimento.

Para unidades não grauteadas ou parcialmente grauteadas, determina-se a espessura equivalente T_e pela Equação 2.11. Quando forem utilizados tijolos maciços, blocos vazados totalmente grauteados, ou bloco vazados totalmente preenchidos com materiais soltos (pedrapomes, escória e escória expandida, xisto expandido, argila expandida, ardósia expandida, cinza volante expandida, perlita e vermiculita), admite-se que a espessura equivalente da unidade, T_e, seja igualada a sua espessura real.

Cabe destacar que a definição de espessura equivalente apresentada pela ABNT NBR 6136:2016 para blocos vazados de concreto destoa do que é posto pela normalização internacional (ASTM C140/C140M-14, ACI/TMS 216.1) e não deve, portanto, ser considerado para aplicação do método em questão. A definição mais adequada e que consta no texto preliminar do projeto de norma ABNT/CE-002:123.010 - PN 002:123.010-001/43.13 é “espessura equivalente: dimensão equivalente ao volume líquido do bloco ou tijolo pela sua área da face lateral”.

A contribuição do revestimento é considerada de modo diferente pelo código norte-americano quando a camada está ou não diretamente exposta ao fogo. Em paredes revestidas no lado não exposto ao fogo, a espessura equivalente T_{ef} corresponde ao resultado da

multiplicação entre a espessura real da camada de revestimento e um fator de correção, que varia em função do material de acabamento (ex.: gesso ou argamassa de cimento Portland) e do substrato onde é aplicado (ex.: tipo de agregado usado no concreto do bloco, tipo de alvenaria cerâmica), conforme exibe a Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Fator multiplicador da espessura de revestimentos aplicados no lado não exposto ao fogo.

Substrato	Revestimento com argamassa cimentícia	Revestimento de gesso
Alvenaria com blocos de concreto	1,00	1,25
Alvenaria com tijolos maciços	1,00	1,25
Alvenaria com blocos cerâmicos	0,75	1,00

Fonte: Adaptado de ACI/TMS 216.1 (2014)

Nas paredes com revestimento aplicado sobre o lado exposto ao fogo, a contribuição da camada é computada ao final, como um acréscimo direto de tempo ao valor do TRF obtido, por interpolação da Tabela 2.7, para o conjunto da parede analisada. A Tabela 2.9 apresenta acréscimos correspondentes a determinadas composições e espessuras de revestimento.

Tabela 2.9 – Tempo atribuído aos revestimentos aplicados na face exposta ao fogo.

Tipo de revestimento	Tempo (min)
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela metálica	
3/4 pol. (1,9 cm)	20
7/8 pol. (2,22 cm)	25
1 pol. (2,54 cm)	30
Argamassa de gesso e areia sobre ripas de gesso de 3/8 pol. (9,5 mm)	
1/2 pol. (1,27 cm)	35
5/8 pol. (1,59 cm)	40
3/4 pol. (1,9 cm)	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela metálica	
3/4 pol. (1,9 cm)	50
7/8 pol. (2,22 cm)	60
1 pol. (2,54 cm)	80

*Para considerar a contribuição da argamassa de cimento Portland e areia com o uso de tabela que relacione espessuras equivalentes mínimas de alvenaria e o TRF (Tabela 3), permite-se considerar a espessura real da argamassa, não ultrapassando o valor de tempo correspondente a 5/8 pol. (1,59 cm).

Fonte: Adaptado de ACI/TMS 216.1 (2014)

Paredes revestidas em apenas um dos lados ou com diferentes materiais e/ou espessuras de revestimento em cada lado devem ter ambos os lados verificados como expostos ao fogo e analisados separadamente. A contribuição do revestimento (aplicado em qualquer face) é limitada à metade da contribuição atribuída à parede sem acabamento.

2.16 AS 3700:2018 (NORMA AUSTRALIANA)

A norma australiana permite a verificação da alvenaria sob incêndio de três formas: a) análise dos critérios de adequação estrutural (R), integridade (E) e isolamento térmica (I) pela comparação com valores de referência tabelados para espessura e esbeltez da parede analisada; b) pelo ensaio de protótipo com características semelhantes à parede que se quer analisar; c) método conhecido de cálculo, baseado nas propriedades dos materiais sob altas temperaturas e em princípios de engenharia que permitam prever o comportamento do elemento estrutural.

Pelo método tabular, cada critério de resistência ao fogo é verificado separadamente:

2.16.1 ADEQUAÇÃO ESTRUTURAL

Para avaliação deste critério pelo método tabular, determina-se o índice de esbeltez da parede (S_{rf}) em função de suas dimensões e condições de vinculação e compara-se o resultado com os limites máximos fornecidos pela Tabela 2.10. Quando as paredes não possuem apoios em suas extremidades, calcula-se S_{rf} pela Equação 2.13. Se uma (Figura 2.39a) ou ambas as laterais da parede (Figura 2.39b) estiverem apoiadas, o valor de S_{rf} corresponderá ao menor entre os fornecidos pela Equação 2.13, Equação 2.14 ou Equação 2.15. Paredes que possuem aberturas maiores que um quinto de sua altura devem ser subdivididas em dois painéis, considerando livres as extremidades das aberturas.

$$S_{rf} = \frac{a_{vf} \cdot H}{t} \quad \text{Equação 2.13}$$

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \cdot \sqrt{a_{vf} H a_h L} \quad \text{Equação 2.14}$$

$$S_{rf} = \frac{a_h \cdot L}{t} \quad \text{Equação 2.15}$$

Sendo:

S_{rf} = índice de esbeltez da parede sob situação de incêndio;

a_{vf} = igual a 0,75 para paredes com topo travado lateralmente e igual a 2,0 quando há travamento apenas na base;

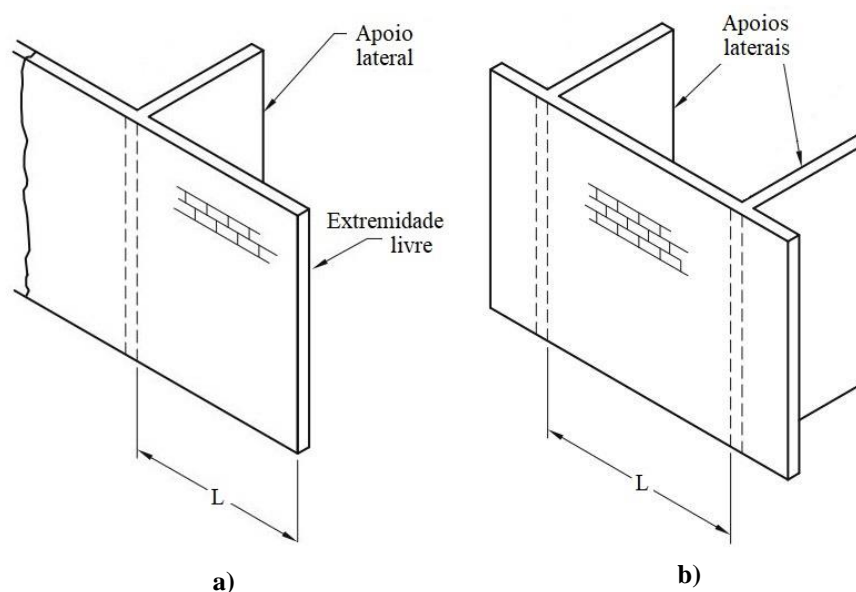
H = altura da parede entre travamentos verticais. Igual à própria altura da parede com topo livre;

t = espessura total da parede (sem considerar revestimentos);

a_h = igual a 1,00 para paredes com travamento ao longo de ambas as extremidades laterais e igual a 2,5 para travamento ao longo de apenas um dos lados;

L = comprimento da parede entre travamentos laterais ou comprimento da parede com travamento em apenas um dos lados. Em paredes com aberturas ou juntas de controle à prumo, o comprimento será igual à distância da borda lateral até a junta ou abertura.

Figura 2.39 – Vinculação da parede: a) uma extremidade apoiada; b) apoio nas duas extremidades.



Fonte: Adaptado de AS 3700:2018

Tabela 2.10 – Índices máximos de esbeltez para o critério de adequação estrutural.

Tipo de unidade	Limites para índice de esbeltez em função do tempo de resistência ao fogo					
	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
Alvenaria não armada						
i. Blocos cerâmicos	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
ii. Blocos sílico-calcários com agregados basálticos						
A. abaixo de 45% da massa total de agregados	20,5	19,0	18,0	17,5	16,5	15,5
B. 45% ou mais da massa total de agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
iii. Blocos de concretos com agregados basálticos						
A. abaixo de 45% da massa total de agregados	19,5	18,0	17,0	16,0	15,5	15,0
B. 45% ou mais da massa total de agregados	25,0	22,5	21,0	20,0	18,0	17,0
Alvenaria armada	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0	36,0

Nota: classificam-se como agregados basálticos o gabro, basalto, dolerito, diorito, traquito e rochas similares que contenham menos de 10% de quartzo.

Fonte: Adaptado de AS 3700:2018

A norma australiana também estabelece valores mínimos para os cobrimentos, caso a alvenaria seja armada. Na Tabela 2.11, apresentam-se os cobrimentos mínimos em função do TRF desejado.

Tabela 2.11 – Cobrimentos mínimos para alvenaria armada exposta ao incêndio.

Tempo de resistência ao fogo	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
	min	min	min	min	min	min
Distância mínima entre a armadura e a face da alvenaria exposta ao fogo (mm)	30	30	30	40	50	60

Fonte: Adaptado de AS 3700:2018

2.16.2 ISOLAÇÃO TÉRMICA

A avaliação do critério de isolamento térmica pelo método tabular consiste na determinação de espessuras equivalentes para a parede e, em seguida, comparação com valores mínimos necessários a atender valores desejados de TRF (Tabela 2.12).

- i. Para blocos totalmente grauteados ou com volume de furos menor que 30%, a espessura equivalente da parede deve ser igual à espessura do bloco;
- ii. Para blocos parcialmente grauteados ou com volume de furos superior a 30%, a espessura equivalente da parede deve ser igual ao volume líquido do bloco, dividido pela área da face vertical exposta ao fogo;
- iii. Para paredes duplas, considera-se como espessura equivalente a soma das espessuras obtidas, separadamente, para cada painel.

Tabela 2.12 – Espessuras mínimas de parede para o critério de isolamento térmica.

Tipo de unidade	Espessura mínima de parede (mm) em função do tempo de resistência ao fogo					
	30 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
Cerâmica	60	90	110	130	160	180
Bloco sílico-calcário	50	70	90	110	135	160
Bloco de concreto com densidade						
A. > 1800 kg/m ³	55	80	100	120	150	180
B. ≤ 1800 kg/m ³	55	75	90	110	135	160

Fonte: Adaptado de AS 3700:2018

A norma da Austrália despreza qualquer contribuição de revestimentos aplicados na face da parede exposta ao fogo. Para revestimentos aplicados na face não exposta, considera-se um acréscimo na espessura total da parede de até 20 mm.

2.16.3 INTEGRIDADE

Na ausência de ensaios, a norma australiana permite considerar que a parede satisfaça o critério de integridade (ou estanqueidade), caso atenda, simultaneamente, aos critérios de adequação estrutural e isolamento térmica.

Como alternativa ao método tabular, a verificação dos critérios de adequação estrutural, integridade e isolamento térmica pode ser realizada por meio de ensaios de paredes sob altas temperaturas. Resultados obtidos em paredes ensaiadas sem carga não devem ser empregados na análise de paredes estruturais. Para todos os critérios, exige-se que os materiais e componentes utilizados na construção das amostras sejam os mesmos das paredes reais a serem verificadas. Unidades cerâmicas devem ser obtidas com a mesma mistura, nas mesmas proporções e em processo produtivo semelhante. Blocos de concreto e sílico-calcários devem

conter agregados de igual distribuição granulométrica, mesma origem mineralógica, aglomerantes do mesmo tipo, nas mesmas proporções e obtidos por processo produtivo similar.

Alguns fabricantes australianos de unidades para alvenaria disponibilizam à comunidade técnica manuais de desempenho que além de sintetizar os requisitos da AS 3700: 2018 compilam resultados de ensaios sob a forma de ábacos e facilitam a verificação dos critérios de resistência ao fogo. Combinando informações como altura, comprimento da parede, condições de vinculação e tempo de resistência ao fogo desejado é possível obter, de forma direta, a espessura de parede necessária à satisfação do critério.

2.17 EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005 (CÓDIGO EUROPEU)

Trata-se de um dos códigos mais completos em termos de dimensionamento de alvenaria estrutural em situação de incêndio. Contempla a avaliação de paredes internas e externas, estruturais e não estruturais, com ou sem função de compartimentação, quando submetidas ao incêndio padrão. As verificações propostas são baseadas nos quatro critérios principais: Capacidade portante (R), Integridade (E), Isolação térmica (I) e Impacto Mecânico (M). Uma parede com função estrutural deve ser dimensionada e construída de modo a atender ao critério R. Se a mesma parede for de compartimentação, esta necessita satisfazer também os critérios E e I. Na possibilidade de ações laterais durante o incêndio, exige-se o critério M.

O Eurocode 6 admite mais de um método de verificação para alvenaria estrutural sob incêndio, com diferentes contextos de análise: de elementos estruturais isolados, de partes da estrutura e análise global. O **Método Tabular**, descrito no Anexo B do código europeu, consiste em um método prescritivo que estabelece, por meio de tabelas, espessuras mínimas de parede - t_F (ou intervalos para espessuras mínimas) necessários a atender períodos pré-estabelecidos de resistência ao fogo ($t_{f,i,d}$). Tais períodos são fornecidos em função dos critérios de resistência da parede (R, E, I e M), da composição (ex.: blocos cerâmicos, em concreto, concreto celular, rochas maciças), resistência à compressão e densidade das unidades (ρ), da presença de revestimento (em gesso ou argamassa) e da relação entre a sollicitação da parede e sua resistência de projeto, em temperatura ambiente $\alpha = N_{Ed} / N_{Rd}$ (Meyer, 2013).

A Tabela 2.13 exemplifica, para paredes estruturais de compartimentação construídas com blocos de concreto, as espessuras mínimas estabelecidas pelo EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005.

Tabela 2.13 – Espessuras mínimas: parede REI com blocos de concreto.

Propriedades dos materiais Res. compressão unidade (área líquida) $6 \leq f_b \leq 35$ (N/mm ²) Agregado normal: densidade da unidade $720 \leq \rho \leq 1650$ (kg/m ³)	Espessura mínima de parede (mm) em função do tempo de resistência ao fogo – Critérios REI						
	30 min	45 min	60 min	90 min	120 min	180 min	240 min
$\alpha \leq 1,0$	90/170 (90/140)	100/170 (90/140)	100/170 (90/140)	100/170 (100/140)	100/190 (100/170)	140/240 (140/190)	150/300 (150/240)
$\alpha \leq 0,6$	90/140 (70/100)	90/140 (90/100)	100/140 (90/100)	100/170 (90/100)	100/170 (100/140)	140/190 (125/170)	150/240 (140/190)

Fonte: Adaptado de EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005

Na Tabela 2.13, os valores separados por barras delimitam os intervalos para espessuras mínimas atribuídos a paredes sem revestimento. Os pares de valores entre parênteses representam os intervalos válidos para paredes revestidas com ao menos 10 mm de argamassa ou gesso em ambas as faces.

A segunda forma de verificação, contida no Anexo C do Eurocode 6, corresponde ao **Método Simplificado de Cálculo**. O método simplificado leva em consideração a resistência residual dos elementos em alvenaria, após submetidos ao incêndio padrão. As solicitações são mantidas iguais às de temperatura ambiente, porém, passam a ser aplicadas sobre seções transversais de elementos com áreas penalizadas (reduzidas) em função das temperaturas atingidas durante o incêndio. Vale ressaltar que, assim como o método tabular, o método simplificado contempla apenas determinadas combinações para blocos e argamassas, com especificação das composições e propriedades físicas/mecânicas. Além disso, o método simplificado foi inicialmente obtido com base em resultados experimentais de unidades pertencentes ao “Grupo 1” que, segundo o EUROCODE 6 - EN 1996-1-1:2005, corresponde àquelas com no máximo 25% de furos em seu volume total. Para estender o método ao uso de unidades que destoam do Grupo 1, o código europeu recomenda a calibração do procedimento mediante a realização de novos ensaios.

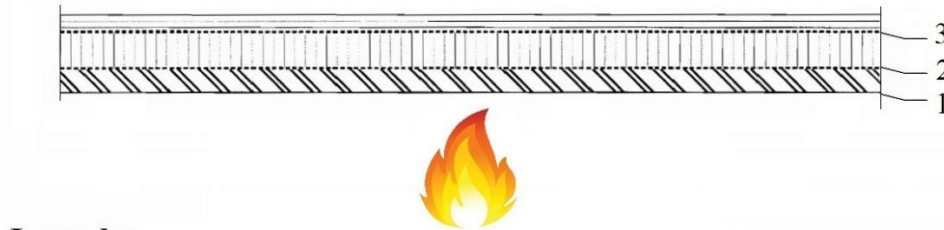
O emprego do método simplificado é dividido nas seguintes etapas:

- 1) Determina-se a distribuição de temperatura na seção transversal do elemento para um tempo definido de exposição ao incêndio padrão e, com base nessa distribuição, delimitam-se quais regiões da seção devem ser desprezadas ou compor a seção residual.

Obs.: Os pontos com temperatura θ_1 , a partir da qual a região deixa de ser considerada intacta, e com temperatura θ_2 , a partir da qual a região se torna estruturalmente ineficiente devem ser demarcados pelas isotermas na seção (Figura 2.40). Para blocos

de concreto produzidos com agregados normais e submetidos a 90 minutos de incêndio padrão, as temperaturas θ_1 e θ_2 são iguais a 100°C e 500°C, respectivamente.

Figura 2.40 – Isotermas na seção transversal de uma parede de compartimentação em alvenaria.



Legenda:

- | | | |
|-------------------------------------|--|---|
| 1 limite da seção original | | área com temperatura > θ_2 (desprezada) |
| 2 isoterma para $\theta = \theta_2$ | | área com temperatura entre θ_1 e θ_2 (seção residual) |
| 3 isoterma para $\theta = \theta_1$ | | área com temperatura até θ_1 (seção residual) |

Fonte: Adaptado de EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005

- 2) Calcula-se a capacidade resistente do elemento ($N_{Rd,fi\theta_2}$), considerando apenas a seção transversal residual (Equação 2.16 e Equação 2.17).

$$N_{Rd,fi\theta_2} = \Phi(f_{d\theta_1}A_{\theta_1} + f_{d\theta_2}A_{\theta_2}) \quad \text{Equação 2.16}$$

$$e\Delta\theta = \frac{1}{8}h_{ef}^2 \frac{\alpha_t(\theta_2 - 20)}{t_{Fr}} \geq \frac{h_{ef}}{20} \quad \text{Equação 2.17}$$

Sendo:

N_{Ed} = esforço normal solicitante de cálculo;

$N_{Rd,fi\theta_2}$ = esforço normal resistente de cálculo, em situação de incêndio;

Φ = fator de minoração da resistência da parede em função da excentricidade adicional.

Calculado conforme o Item 6.1.2.2 do EUROCODE 6 - EN 1996-1-1:2005;

$f_{d\theta_1}$ = resistência à compressão de cálculo do elemento até a temperatura θ_1 ;

$f_{d\theta_2}$ = resistência à compressão de cálculo do elemento entre as temperaturas θ_1 e θ_2 ;

A_{θ_1} = área da seção transversal do elemento com temperatura até θ_1 ;

A_{θ_2} = área da seção transversal do elemento com temperatura entre θ_1 e θ_2 ;

$e_{\Delta\theta}$ = excentricidade adicional do carregamento devido à variação de temperatura na alvenaria;

h_{ef} = altura efetiva do elemento;

α_t = coeficiente de expansão térmica;

t_{Fr} = espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda θ_2 (seção residual);

- 3) Verifica-se, com base no Estado Limite Último (ELU), se o esforço normal solicitante de cálculo do elemento (N_{Ed}) é menor ou igual ao seu esforço normal resistente de cálculo em situação de incêndio ($N_{Rd,fi\theta_2}$), conforme ilustra a Equação 2.18.

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,fi\theta_2} \quad \text{Equação 2.18}$$

O terceiro método, tratado no Anexo D do código europeu, é chamado **Método Avançado de Cálculo** e corresponde à predição do comportamento esperado nos elementos da alvenaria pela aplicação de modelos teóricos fundamentados no comportamento físico dos materiais e componentes. Modelos térmicos apoiados na teoria de transferência de calor são capazes de determinar a distribuição da temperatura nos elementos estruturais, em parte da estrutura ou na estrutura como um todo. Levam em consideração a variação de propriedades térmicas em função da variação de temperatura nos materiais e, quando apropriado, podem contemplar os efeitos do aquecimento não uniforme e a transferência de calor entre elementos construtivos adjacentes. Modelos mecânicos embasados na teoria das estruturas determinam as tensões/deformações induzidas pela elevação da temperatura e diferença entre temperaturas nos elementos. Quando necessário, também contabilizam efeitos atrelados às não linearidades geométricas.

Para o uso dos modelos avançados, o código europeu disponibiliza valores, em diferentes temperaturas, para propriedades de materiais e componentes utilizados na alvenaria estrutural, tais como: densidade, condutividade térmica e calor específico. Em função da quantidade de variáveis envolvidas e da complexidade das simulações, a aplicação do método avançado acaba se tornando inviável sem o auxílio computacional.

Como alternativa ou complemento dos três métodos apresentados, o EUROCODE 6 - EN 1996-1-1:2005 permite que paredes de alvenaria estrutural sejam avaliadas quanto ao comportamento sob situação de incêndio pela realização de testes em laboratório.

O código europeu encontra-se em processo de revisão desde julho de 2018, quando foi composta a comissão responsável. O primeiro projeto de norma foi apresentado em abril de 2019, uma segunda versão em abril de 2020 (Meyer *et al.*, 2020). Entre 01/09/2022 e 22/11/2022, uma consulta pública foi realizada no site da instituição britânica de normalização British Standards Institution (BSI). Segundo o mesmo site, a publicação da nova versão está prevista para 08/04/2024. De acordo com Meyer *et al.* (2020), entre as principais alterações a serem realizadas estão:

- ✓ a exclusão do atual Anexo A (guia para escolha dos tempos de resistência ao fogo) e criação de um novo, contendo tabelas atualizadas do método tabular. Na versão atual, o método tabular é descrito no Anexo B;
- ✓ criação de um novo Anexo B que descreverá procedimentos experimentais para determinação de parâmetros a serem utilizados em modelos avançados de cálculo. O novo Anexo B também trará curvas pré-estabelecidas para tensão-

deformação e propriedades físicas (densidade, condutividade térmica e calor específico) dos materiais da alvenaria sob altas temperaturas, que hoje constam no Anexo D;

- ✓ o atual Anexo C (que apresenta o método simplificado de cálculo) será excluído;
- ✓ redução da quantidade de parâmetros determinados nacionalmente (NDPs) e estabelecimento de valores únicos para espessuras mínimas das paredes cuja aplicação se estenda a todo o continente europeu;
- ✓ inclusão da argamassa de uso geral como opção válida para revestimento de proteção ao fogo (já é contemplada como argamassa de assentamento);
- ✓ paredes duplas poderão ser analisadas pelos valores tabulados (espessuras mínimas) de paredes revestidas.

Em uma abordagem crítica, Meyer *et al.* (2020) deixam claro que uma das principais falhas da versão atual do código europeu corresponde à ausência de um consenso para as espessuras mínimas a serem utilizadas no método tabular. De acordo com os autores, os resultados experimentais que deram origem às tabelas advêm de países distintos (Bélgica, Alemanha e Reino Unido) e esta é a principal causa da existência de intervalos de aceitação para as espessuras mínimas ao invés de valores mínimos únicos. Outro ponto discutido corresponde à validação experimental dos métodos de verificação. Para Meyer *et al.* (2020), entre os métodos para verificação da alvenaria em situação de incêndio, apenas o tabular se mostra confiável, uma vez que o método simplificado e o avançado ainda não foram suficientemente validados por resultados experimentais. Embora existam trabalhos/resultados da literatura que permitem prever o comportamento de elementos em alvenaria quando aquecidos, os autores ressaltam que os procedimentos de cálculo do EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005 não foram calibrados com ensaios de parede em tamanho real.

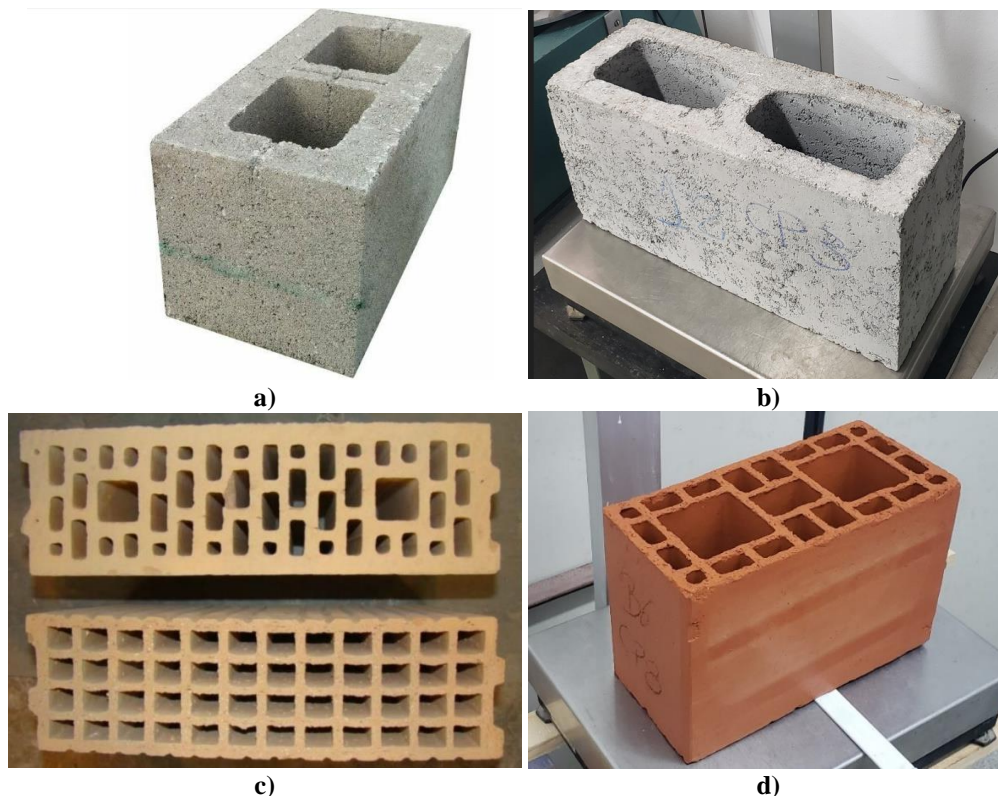
2.18 APLICABILIDADE DA NORMALIZAÇÃO INTERNACIONAL AO CENÁRIO CONSTRUTIVO BRASILEIRO

Mesmo que recomendada por instituições como o Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (Instrução Técnica nº 08/2019) para suprir a inexistência de norma local, a aplicação do código europeu ou demais normas estrangeiras na verificação ao incêndio de construções brasileiras em alvenaria estrutural requer cuidado. A ausência de uma análise prévia, da correta interpretação ou enquadramento dos materiais nacionais dentro das

classificações e procedimentos estabelecidos pelas diferentes normativas internacionais podem resultar em métodos não seguros.

Em primeiro lugar, isso se deve às diferenças existentes entre os materiais e componentes disponíveis no mercado brasileiro e os que são empregados nas construções de outros países. Conforme destacam Leite, Moreno Júnior e Torres (2016), cada país estabelece requisitos para geometria, resistência e espessura a serem respeitados pela indústria de blocos estruturais. Variam-se volume de furos, dimensões nominais, espessuras mínimas para paredes longitudinais/transversais dos blocos e composição dos concretos usados na fabricação das unidades (agregados de diferentes densidades e origens mineralógicas). Na Europa e América do Norte, por exemplo, é comum o uso de agregados leves (*lightweight*) na produção das unidades. No Brasil, predomina-se o uso de agregados de densidade normal: basalto e granito como exemplo de rochas magmáticas; quartzo e gnaiss como rochas metamórficas; calcário e arenito como rochas sedimentares. Porém, a origem mineralógica não é algo divulgado pelos fabricantes (Medeiros, 2022). Variando-se os agregados as propriedades químicas e físicas dos componentes também variam, assim como o comportamento mecânico da alvenaria sob altas temperaturas. Para ilustrar a diferença entre países, a Figura 2.41 exibe geometrias usuais para blocos vazados de concreto e cerâmicos produzidos na Europa e no Brasil.

Figura 2.41 – Diferença entre geometrias: a) bloco vazado de concreto do Reino Unido; b) bloco de concreto do brasileiro; c) bloco cerâmico europeu; d) bloco cerâmico brasileiro.



Fonte: a) Cheshire Garden Products (2022); b) Autor (2021); Meyer (2013); d) Autor (2021)

Para o revestimento das paredes, os materiais empregados e procedimentos construtivos também se diferem entre o Brasil e outros países. Algumas combinações contempladas pelas normas internacionais não são praticadas em território brasileiro. O contrário também é válido. Revestimentos internos de paredes em alvenaria com 1 cm de argamassa ou 0,5 cm de gesso, por exemplo, são muito comuns no Brasil enquanto estão abaixo das menores espessuras mencionadas na norma norte americana ACI/TMS 216.1-14 (Tabela 2.9). Uma alternativa seria a extrapolação dos valores tabelados com base em regressões lineares. No entanto, somente resultados experimentais seriam capazes de confirmar se os valores estimados são ou não coerentes com o comportamento real dos materiais frente ao fogo. Leal *et al.*, (2022a) destacam que os valores de referência contidos na norma norte americana foram obtidos com base em um grande volume de resultados, o que não condiz com a realidade brasileira. Para avaliar se os acréscimos de TRF propostos pelo ACI/TMS 216.1-14 estão ou não em concordância com o comportamento observado nos materiais de acabamento do País também é preciso investigar, previamente, como a aderência entre a camada de revestimento e a alvenaria (substrato) está relacionada à ocorrência do deslocamento durante o aquecimento.

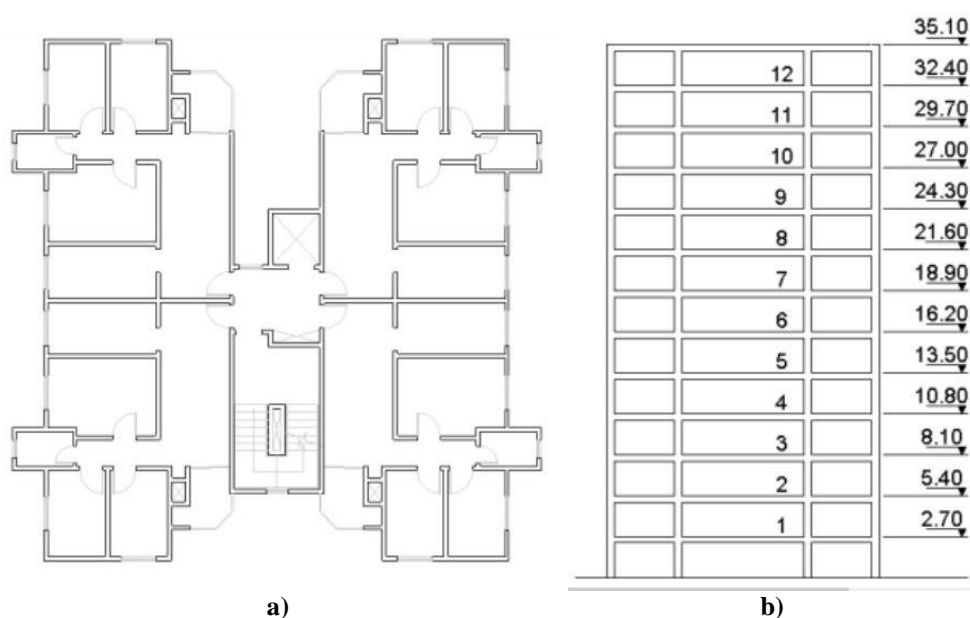
Sobre a verificação do critério de capacidade portante (R) conforme o EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005, cabe a discussão acerca do índice de carregamento das paredes (α). Esse índice representa a relação, em temperatura ambiente, entre esforço normal solicitante de cálculo (N_{Ed}) e esforço normal resistente de cálculo (N_{Rd}). Como exemplificado na Tabela 2.13, a classificação das paredes ocorre em torno do valor $\alpha=0,6$. Ou seja, espessuras mínimas diferentes são requeridas para paredes com α menores ou maiores que 0,6. Na maioria dos ensaios realizados em laboratório brasileiros, observa-se que as paredes carregadas são testadas com aproveitamentos bem menores que 60% de sua capacidade resistente.

Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2019) investigaram a aplicabilidade das normas norte-americana (ACI/TMS 216.1-14, 2014), australiana (AS 3700:2018) e do código europeu (EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005) com um estudo de caso. O TRRF para a edificação foi obtido segundo a ABNT NBR 14432 (2001). Investigou-se um edifício de alvenaria estrutural com características típicas do cenário brasileiro (Quadro 2.5 e pela Figura 2.42).

Quadro 2.5 - Estudo de caso: características da edificação.

Característica	Valor
Número de pavimentos	13
Pé direito (m)	2,70
Nº de apartamentos por andar	4
Altura total (m)	35,10
Sistema Construtivo	Alvenaria estrutural
Tipo de bloco	Bloco de concreto - dimensões (140 × 290 × 190) mm
Revestimento de parede	Argamassa convencional (cimento:cal:areia) aplicada nas paredes internas e externas - Espessura de 1 cm

Fonte: Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2019)

Figura 2.42 – Edifício para estudo de caso: a) planta baixa; b) corte esquemático.

Fonte: Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2019)

Por se tratar de um edifício residencial com mais de 30 metros de altura, estabeleceu-se, com base na ABNT NBR 14432 (2001), o TRRF de 120 min. Os resultados das verificações realizadas pelos autores são sintetizados pelo Quadro 2.6.

Quadro 2.6 – Verificação segundo diferentes normas.

Norma	Determinações para o edifício do estudo de caso
ABNT NBR 14432 (2001)	TRRF = 120 min.
Norte-americana (ACI/TMS 216.1-14)	<p>Paredes de compartimentação (externas e entre apartamentos - uma face exposta): Tea (espessura equivalente) = 83,3 mm Contribuição revestimento face exposta (10 mm de argamassa cimentícia) = 10 minutos TRF= 95 minutos</p> <p>Demais paredes internas (exposição nos dois lados): Tea (espessura equivalente) = 73,3 mm Contribuição revestimento face exposta (10 mm de argamassa cimentícia) = 10 minutos</p>

	<p>TRF= 87 minutos</p> <p>Espessura equivalente (Tea) necessária para TRRF 120 min. = 102 mm</p>
Australiana (AS 3700:2018)	<p>Critério de estabilidade estrutural (R): Limite de esbeltez (Srf) estabelecido para as paredes do edifício = 20 Considerando paredes simplesmente apoiadas no topo e na base: $Srf < 20$ para todas.</p> <p>Critério de isolamento (I): Considerando volume de furos/vazios das unidades superior a 30% . Valores comuns no Brasil estão entre 45 e 55%. Paredes com um e dois lados expostos: espessuras equivalentes de 83,3 mm e 73,33 mm, respectivamente. Espessura equivalente (Tea) necessária para TRRF 120 min. = 120mm</p> <p>Critério de estanqueidade (E): Satisfação condicionada ao atendimento simultâneo dos critérios R e I.</p>
EUROCODE 6 EN 1996-1- 2:2005	<p>Considerando: Todas as paredes do edifício necessitam atender aos critérios R, E e I. Blocos estruturais de concreto com furos verticais e volume de vazios entre 25% e 60%. Resistências de bloco na área líquida entre 6 MPa e 35 MPa. Densidade de bloco entre 1200 kg/m³ e 2400 kg/m³.</p> <p>Espessura das paredes: Espessura de bloco = 140 mm 10 mm de revestimento em ambos os lados das paredes = 20 mm Total = 160 mm.</p> <p>Parede mais solicitada do edifício: Capacidade resistente $NRd, \phi \theta 2 = 213,6 \text{ KN/m}$; $\alpha = 0,68$</p> <p>Tabela N.B.3.2 do Eurocode 6: Intervalo de aceitação para espessura de parede = 90 mm a 170 mm.</p>

Fonte: Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2019)

Conforme observado no Quadro 2.6, a análise realizada com base na norma norte-americana permite concluir que nenhuma das paredes verificadas atendeu ao TRRF estabelecido pela norma brasileira (ABNT NBR 14432, 2001).

No que se refere à norma australiana, o Quadro 2.6 expõe que nenhuma esbeltez calculada superou o limite estabelecido. Portanto, considera-se que o critério de estabilidade estrutural (R) atendido por todas as paredes. O critério de isolamento (I), expresso pela espessura equivalente mínima de 120 mm, não foi atendido pelas paredes do edifício. O critério de estanqueidade (E) só seria contemplado caso os critérios R e I fossem atendidos. Por não atenderem ao critério I, as paredes externas e entre apartamentos não foram consideradas estanques. As demais paredes internas (exposição ao fago em ambos os lados) são dispensadas da verificação dos critérios E e I.

Para a análise pelo Método Tabular do Eurocode 6, o Quadro 2.6 permite concluir que a espessura final das paredes 160 mm atendeu ao intervalo de aceitação entre 90 mm e 170 mm.

2.19 DESAFIOS E ESTRATÉGIAS PARA OBTENÇÃO DA NORMA BRASILEIRA

O desenvolvimento deste estudo teve, entre outras motivações, seguidas participações em reuniões da ABNT/CE-002:123.010 – Comissão de Estudo de Alvenaria Estrutural, onde o tema estrutura em situação de incêndio e sua futura inclusão como Parte 4 da ABNT NBR 16868:2020 vêm sendo discutidos desde 2017. A comissão conta com representantes de diferentes setores da cadeia construtiva: órgãos técnicos, fornecedores de insumos, órgãos reguladores/regulamentadores, empresas implementadoras do sistema e empresas que fornecem ou utilizam mão-de-obra para alvenaria estrutural.

Entre os participantes, compartilha-se a ideia de que os resultados nacionais sobre alvenaria em situação de incêndio ainda são incipientes e que há um longo caminho até que se conheça o suficiente acerca das propriedades físico-químicas e comportamento mecânico dos materiais e componentes da alvenaria estrutural brasileira sob altas temperaturas.

Os ensaios de resistência ao fogo realizados em paredes são onerosos, escassos e solicitados de maneira desconectada por empresas da iniciativa privada. O objetivo dos ensaios acaba sendo validar materiais de um ou outro fornecedor e, desse modo, não preenchem efetivamente as lacunas existentes ou permitem a extração de análises para além das poucas combinações investigadas. É evidente a necessidade de se ampliar os resultados experimentais. Não só aumentar, mas reestruturar junto aos setores envolvidos (fabricantes, instituições de ensino, laboratórios nacionais) as combinações de materiais e condições de contorno a serem testadas, de modo que as situações reproduzidas em laboratório contemplem a realidade das construções brasileiras e forneçam informações que de fato contribuam com o avanço da normalização nacional voltada ao tema.

Outra questão corresponde à infraestrutura disponível para realizar ensaios de parede com carga. São poucos os laboratórios nacionais aptos a executar tais testes e, quando executados com blocos ou argamassas mais resistentes, os carregamentos máximos alcançados não são capazes de levar as paredes à ruptura.

Para criar a norma brasileira que trate da alvenaria estrutural em situação de incêndio, Leite, Moreno Júnior e Torres (2016) sugerem mesclar de forma gradativa o que há de interessante na normalização norte-americana, australiana e europeia. Na visão dos autores, a norma americana trata os critérios de isolamento térmica ou integridade com plenitude, mas não se aprofunda na determinação da resistência mecânica. Portanto, deve servir de referência para realização de ensaios de blocos com diferentes tipos de acabamento e elaboração de tabelas nacionais para avaliação do critério I. Sob essa perspectiva, Leal *et al.* (2022a) desenvolveram

uma proposta para determinação do tempo de resistência ao fogo para alvenaria quanto ao critério de isolamento térmica. O trabalho foi baseado na análise de resultados nacionais de resistência ao fogo em paredes com blocos de concreto e em uma adaptação da americana ACI/TMS 216.1-14 para verificação do critério I pela composição de espessuras equivalentes.

Leite, Moreno Júnior e Torres (2016) afirmam que o código europeu é o mais completo quando comparado às normas americana e australiana, no entanto, limita as situações permitidas para o revestimento das paredes. Segundo os autores, para desenvolvimento da norma brasileira de alvenaria estrutural sob incêndio seria adequado adaptar, em função das propriedades térmicas dos materiais nacionais e mapeamento de isoterma, o método simplificado de cálculo do código europeu voltado à verificação da capacidade portante das paredes (R). Ainda sobre o critério R, Leite, Moreno Júnior e Torres (2016) ressaltam que a norma australiana é a única que considera esbeltez das paredes e apontam o uso de ábacos baseados em resultados experimentais dos fabricantes australianos de blocos como uma estratégia interessante a ser seguida, de uso rápido e intuitivo durante a verificação das paredes.

2.20 CONTRIBUIÇÕES DESTE TRABALHO À NORMALIZAÇÃO

A maior contribuição deste trabalho consiste no fornecimento, ao meio técnico, de informações até então desconhecidas ou pouco exploradas acerca das propriedades mecânicas residuais de componentes e elementos da alvenaria estrutural em blocos de concreto quando submetidos a altas temperaturas.

Mesmo existindo poucos trabalhos disponíveis, nota-se grande variação nos procedimentos empregados para análise de elementos em alvenaria estrutural envolvendo altas temperaturas. Assim, torna-se evidente a necessidade de sua padronização. Sob o ponto de vista normativo, a aplicação em prismas do procedimento proposto por Medeiros, Parsekian e Moreno Jr. (2022) representa uma primeira tentativa em padronizar a condução de ensaios laboratoriais para avaliações envolvendo componentes da alvenaria estrutural sob altas temperaturas, sobretudo, no que se refere às taxas empregadas durante o aquecimento e o tempo de manutenção nas temperaturas de interesse. Destaca-se que não há, até o presente momento, procedimento nacional ou internacional normalizado para tal finalidade. Dessa forma, o que se propõe é uma adaptação feita pelos autores das prescrições encontradas na RILEM TC 200-HTC partes 1 e 2, concebidas para ensaiar cilíndricos de concreto durante e após o aquecimento.

Os cuidados estabelecidos pelas normas RILEM e mantidos por Medeiros, Parsekian e Moreno Jr. (2022), nomeadamente o controle na variação da temperatura ao longo do corpo de

prova, as taxas suficientemente baixas para assegurar a uniformidade do aquecimento e a permanência de 60 min nas temperaturas desejadas compõem um método sólido e capaz de fornecer resultados confiáveis; passíveis de agregar informações pertinentes à elaboração das diretrizes nacionais para verificação de construções em alvenaria sob situação de incêndio. Embora a ABNR 16868-1:2020 já disponha, em seu Anexo F, de valores de referência para especificação de argamassas, blocos, grautes e prismas de alvenaria estrutural, obter os valores de resistência pós altas temperaturas para esses materiais é de grande interesse da comunidade técnica, simbolizando um passo inicial e relevante para a construção da futura parte 4 da ABNT NBR 16868:2020, voltada ao projeto estrutural da alvenaria em situação de incêndio.

De posse dos resultados obtidos na testagem de materiais de uso corrente no Brasil, será possível analisar, de fato, se os códigos e normas internacionais para verificação da alvenaria sob incêndio são adequados ou destoam da realidade brasileira. As curvas residuais aqui obtidas para argamassas, grautes e prismas com dois blocos de concreto também permitirão a devida adaptação de procedimentos normativos internacionais existentes, fomentando a estruturação das diretrizes nacionais para a verificação de construções em alvenaria frente ao incêndio. Como exemplos, citam-se os dois dos métodos contemplados pelo EUROCODE 6 - EN 1996-1-2:2005, passíveis de serem adaptados e alimentados de informações obtidas a partir dos materiais disponíveis no mercado brasileiro: o método simplificado e o método avançado de cálculo. Para o método simplificado, conhecer o grau de degradação associado à temperatura atingida na extensão de cada componente permitirá determinar as regiões da seção a serem descartadas e sua área de seção efetiva. Para o método avançado de cálculo, os resultados desta pesquisa (curvas residuais) poderão, futuramente, ser incluídos no procedimento normativo nacional com o intuito de alimentar modelos computacionais e fomentar simulações numéricas.

3. *PROGRAMA EXPERIMENTAL*

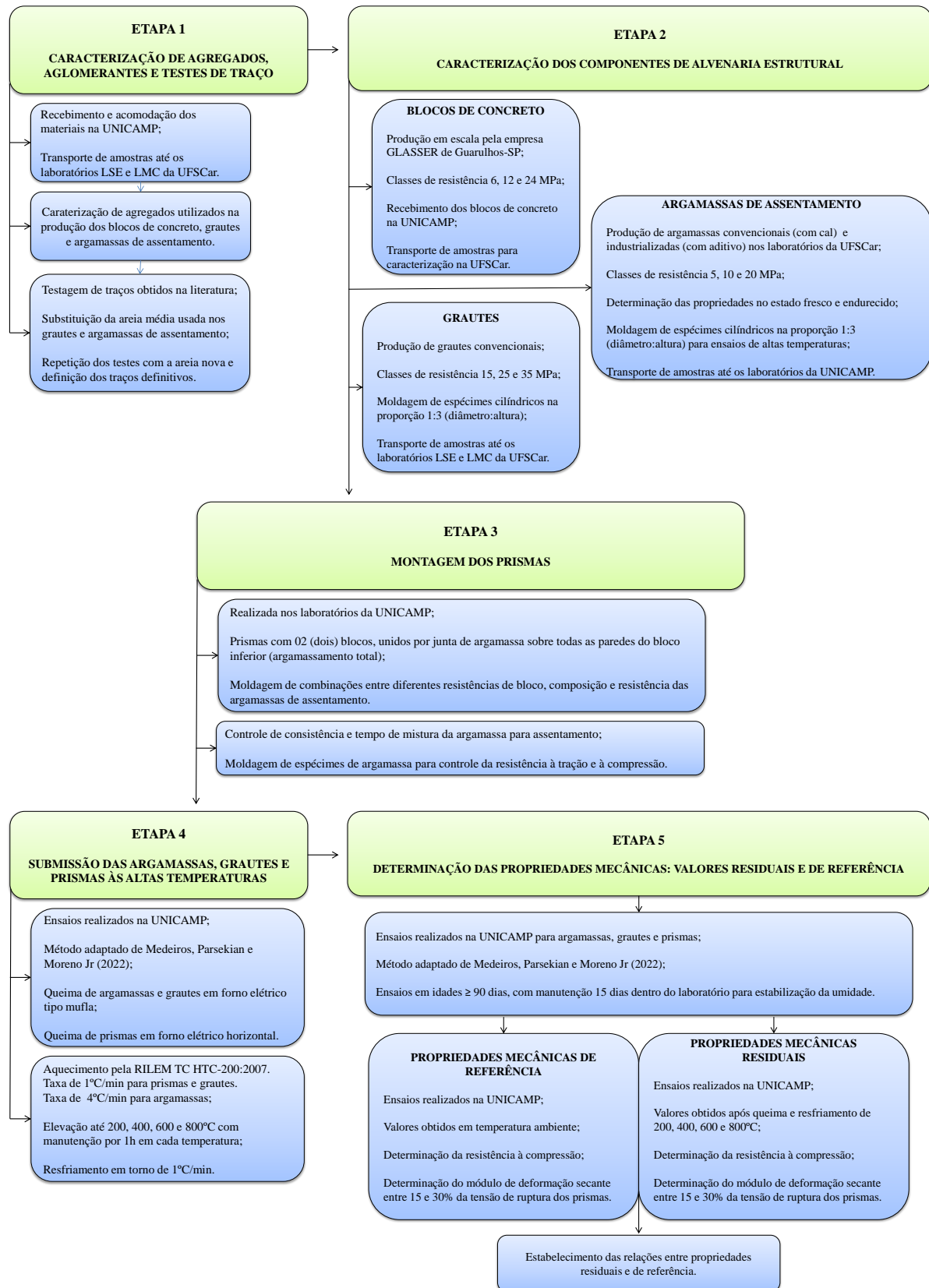
Neste capítulo são apresentados os materiais, equipamentos, as normas e os procedimentos referentes ao programa de ensaios desta pesquisa.

A realização dos ensaios se dividiu entre quatro laboratórios. Dois deles estão localizados em São Carlos-SP e pertencem ao Departamento de Engenharia Civil (DECiv) da UFSCar: Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) e Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE). Os outros dois são o Laboratório de Materiais de Construção (LMC) e Laboratório de Estruturas (LES), localizados na Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas – FEC/UNICAMP.

Para tornar a pesquisa viável, tanto sob o ponto de vista técnico quanto econômico, foi necessário limitar as variáveis sob análise e seus níveis de controle. Assim, dentre os diversos materiais disponíveis no mercado e suas características, apenas uma parcela foi investigada. Entretanto, as combinações de bloco, argamassa e graute adotadas refletem grande parte da realidade praticada nas obras brasileiras. A metodologia objetivou o melhor entendimento de seu comportamento mecânico após exposição a altas temperaturas. Ao mesmo tempo, buscou-se fornecer ao meio técnico resultados que auxiliem na elaboração de verificações ao incêndio mais seguras, eficazes, e condizentes com o desempenho apresentado por materiais de uso corrente no País.

O organograma da Figura 3.1 resume as etapas que compõem o programa experimental deste estudo e sua sequência de execução.

Figura 3.1 – Etapas do programa experimental.



Fonte: Autor (2023)

3.1 ETAPA 1 - CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS, AGLOMERANTES E TESTES DE TRAÇO

3.1.1 AGLOMERANTES

A fábrica dos blocos utilizados nesta pesquisa utiliza como aglomerante hidráulico um Cimento Portland do Tipo CPV ARI, adquirido a granel. A escolha de um cimento com ganho rápido de resistência nas primeiras idades é justificada por sua dinâmica de breve produção, desmolde e paletização dos artefatos produzidos com concreto seco. O fabricante do cimento usado na empresa é certificado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e disponibilizou um boletim técnico baseado na ABNT NBR 16697:2018, cujas informações são sintetizadas pela Tabela 3.1. A cópia do documento original consta no ANEXO A desta tese.

Tabela 3.1 – Propriedades do Cimento CP V ARI utilizado na fabricação dos blocos.

			Exigência	Média	Desvio padrão	Qtd. dados
EXIGÊNCIAS FÍSICAS E MECÂNICAS	Finura	Blaine (cm ³ /g)	-	5324	19,1	16
		#200 (%)	≤ 6,0	0,2	0,0	16
		# 325 (%)	-	1,5	0,6	15
	Tempo de pega	Início de pega (min)	≥ 60	165	15	16
		Fim de pega (min)	≤ 600	237	15	16
	Resistência à compressão	01 dia (MPa)	≥ 14,0	28,7	1,1	16
		03 dias (MPa)	≥ 24,0	39,2	1,1	15
07 dias (MPa)		≥ 34,0	43,1	1,6	10	
EXIGÊNCIAS QUÍMICAS	Óxido de Magnésio - MgO (%)		≤ 6,5	2,7	0,4	15
	Trióxido de Enxofre - SO₃ (%)		≤ 4,5	3,9	0,0	15
	Perda ao Fogo - PF (%)		≤ 6,5	3,8	0,3	15
	Resíduo insolúvel (%)		≤ 3,5	-	-	0

Data: junho de 2021.

Fonte: InterCement (2021)

A fábrica dos blocos não utiliza cal, mas sim um aditivo plastificante à base de tensoativos, adquirido em embalagens de 1025 kg. Os resultados de caracterização do aditivo (cedidos à fábrica pelo fornecedor) são apresentados na Tabela 3.2. A cópia do documento original também é exibida no ANEXO A deste trabalho.

Tabela 3.2 – Propriedades de interesse do aditivo utilizado na fabricação dos blocos.

Característica	Unidade	Especificação	Resultado
Cor	-	*Anotar	Dourado
Densidade	g/cm ³	1,01 – 1,05	1,03
pH	-	12,0 – 14,0	12,94
Viscosidade	s	35 – 65	38,93

*Cor é um dado qualitativo. Segundo o fabricante não influi na qualidade do produto.

Data de fabricação: 02/06/2021.

Lote: 023332

Fonte: Camargo Distribuidora de Produtos Químicos Ltda. (2021)

Para a produção das argamassas convencionais e dos grautes, utilizou-se o Cimento Portland CP II F 32. A escolha desse tipo de cimento é justificada por ser o mais utilizado na região. O material foi recebido na UNICAMP em sacos de 50 kg. Para garantir sua integridade até o momento do uso, as embalagens de cimento foram colocadas dentro de sacos plásticos, vedadas com fita adesiva e armazenadas dentro do laboratório sobre paletes de madeira (Figura 3.2), evitando o contato direto com o solo e paredes adjacentes.

Figura 3.2 – Aglomerantes dentro de sacos plásticos e sobre paletes de madeira.



Fonte: Autor (2021)

Além do cimento, as argamassas convencionais e os grautes contaram com um aglomerante aéreo. Utilizou-se a cal hidratada tipo CH III, recebida na UNICAMP em sacos de 20 kg. As embalagens de cal foram vedadas e armazenadas tal como os sacos de cimento.

Para fins de conversão de traço, as massas unitárias no estado solto e compactado foram obtidas para a cal e o Cimento CP II F32 utilizados na produção de argamassas e grautes. Os resultados obtidos são exibidos na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Massas unitárias da cal e do cimento utilizados nos grautes e argamassas convencionais.

NORMA	PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO	
		Cal CH III	Cimento CP II F 32
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.044,06	682,41
	Massa unitária no estado compactado (kg/m ³)	1.102,66	747,03

Fonte: Autor (2021)

Resultados de outras propriedades do cimento e da cal utilizados nos grautes e argamassas convencionais desta pesquisa constam no ANEXO A, sob a forma de boletins técnicos fornecidos pelo fabricante de ambos os materiais.

3.1.2 ÁGUA DE AMASSAMENTO

Tanto nos ensaios realizados em São Carlos-SP, na UFSCar, quanto em Campinas-SP, na UNICAMP, utilizou-se água proveniente da rede pública de abastecimento.

3.1.3 AGREGADOS

Todos os agregados utilizados na pesquisa foram caracterizados nos laboratórios LMC e LSE do DECiv/UFSCar. Os procedimentos de extração das amostras e seu preparo para as análises em laboratório seguiram as diretrizes da ABNT NBR 16915:2021. Feita a amostragem, agregados graúdos e agregados miúdos foram individualmente submetidos aos ensaios relacionados no Quadro 3.1.

Quadro 3.1 – Ensaios de caracterização dos agregados.

Ensaio	Norma reguladora	Tamanho do agregado	
		Miúdo	Graúdo
Determinação da composição granulométrica	ABNT NBR NM 248:2003	✓	✓
Determinação do teor de umidade total	ABNT NBR 9939:2011	✓	✓
Determinação da massa unitária e do índice de vazios	ABNT NBR 16972:2021	✓	✓
Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis	ABNT NBR 7218:2010	✓	✓
Determinação da densidade e da absorção de água	ABNT NBR 16916:2021	✓	
Determinação da densidade e da absorção de água	ABNT NBR 16917:2021		✓
Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem	ABNT NBR 16973:2021	✓	✓

Fonte: Autor (2021)

Em seguida, os resultados de caracterização foram confrontados com alguns limites propostos pela ABNT NBR 7211:2022 para utilização de agregados em concretos de cimento Portland. Quando utilizados na fabricação das unidades, observa-se o requisito preconizado pela ABNT NBR 6136:2016, segundo o qual a Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado não deve exceder metade da menor espessura de parede do bloco produzido.

3.1.3.1 Agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto

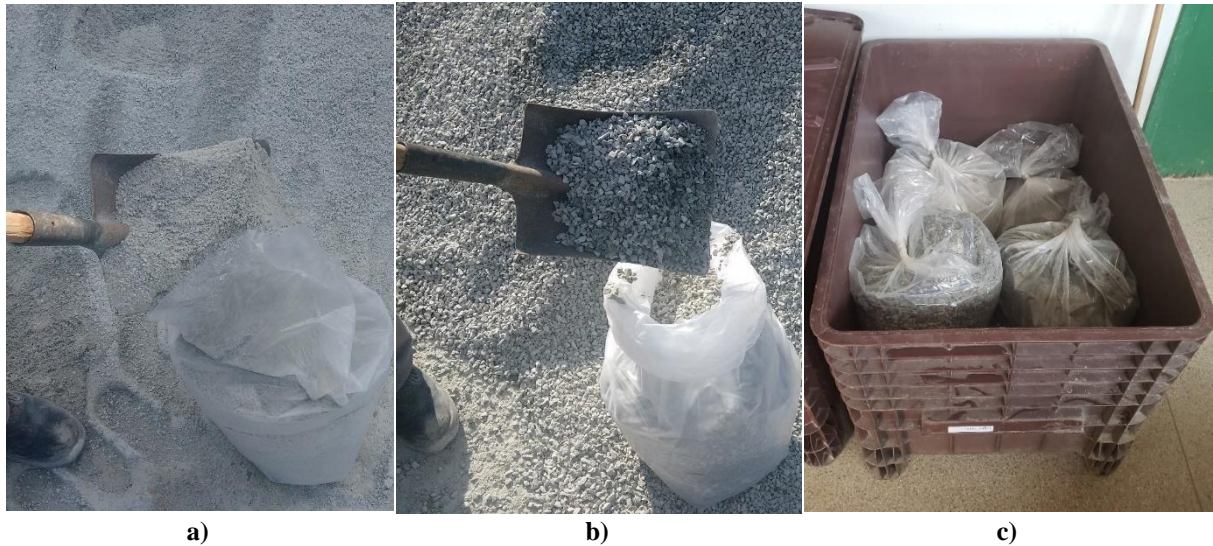
Os blocos utilizados neste estudo contaram com três agregados em sua composição: duas areias de britagem (agregados miúdos também conhecidos como areias artificiais ou “pós de pedra”) e um pedrisco (agregado graúdo também conhecido como “brita 0”).

Amostras com quantidades suficientes dos três agregados foram coletadas nas dependências da empresa responsável pela produção dos blocos (Figura 3.3a e Figura 3.3b),

localizada em Guarulhos-SP. Em seguida, foram transportadas até São Carlos-SP e devidamente acomodadas no LSE da UFSCar (Figura 3.3c).

Figura 3.3 – Caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:

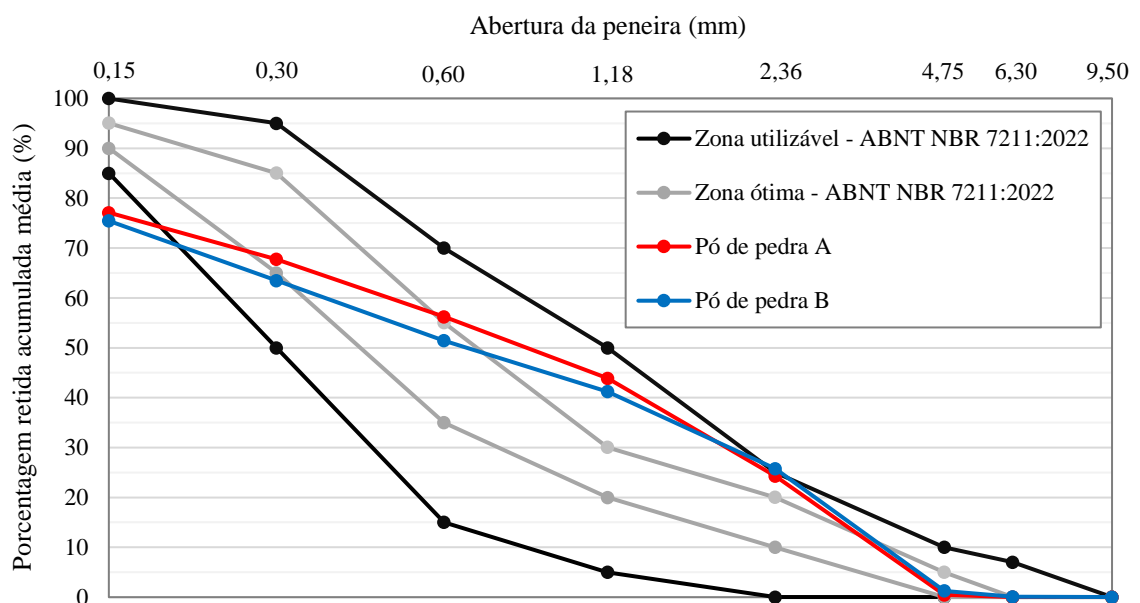
a) coleta pó de pedra; b) coleta pedrisco; c) acomodação no LSE da UFSCar.



Fonte: Autor (2021)

A primeira areia de britagem, daqui em diante chamada **Pó de pedra A**, é predominantemente composta por gnaiss e advém da região de Guarulhos-SP. A segunda areia de britagem, daqui em diante chamada **Pó de pedra B**, também é majoritariamente composta de gnaiss e provém de Santa Isabel-SP. Os resultados obtidos na caracterização dos dois materiais e a comparação com os limites da ABNT NBR 7211:2022 (para agregados utilizados em concretos) são expostos na Figura 3.4 e na Tabela 3.4.

Figura 3.4 – Curvas granulométricas das areias de britagem utilizadas na produção dos blocos.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 3.4 – Demais resultados de caracterização das areias de britagem utilizadas nos blocos.

NORMA	PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO		Requisito NBR 7211:2022
		Pó de pedra A	Pó de pedra B	
ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima característica (mm)	4,75	4,75	-
	Módulo de finura (zona utilizável)	2,70	2,59	1,55 - 3,50
ABNT NBR 9939:2011	Teor de umidade total (%)	2,04 ^a	2,32 ^a	-
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.659,95	1.649,14	-
	Massa unitária no estado compactado (kg/m ³)	1.806,35	1.799,27	-
	Índice de vazios no estado solto (%)	34,49	32,24	-
	Índice de vazios no estado compactado (%)	28,71	28,99	-
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	- ^b	- ^b	-
ABNT NBR 16916:2021	Densidade do agregado na condição seca (g/cm ³)	2,54	2,44	-
	Densidade do agregado na condição SSS (g/cm ³)	2,52 ^c	2,45 ^c	-
	Absorção de água (%)	0,47	0,40	-
ABNT NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	17,56	16,59	12%

^a Teor de umidade do agregado em estado natural, após coleta e armazenamento. Precede qualquer secagem.

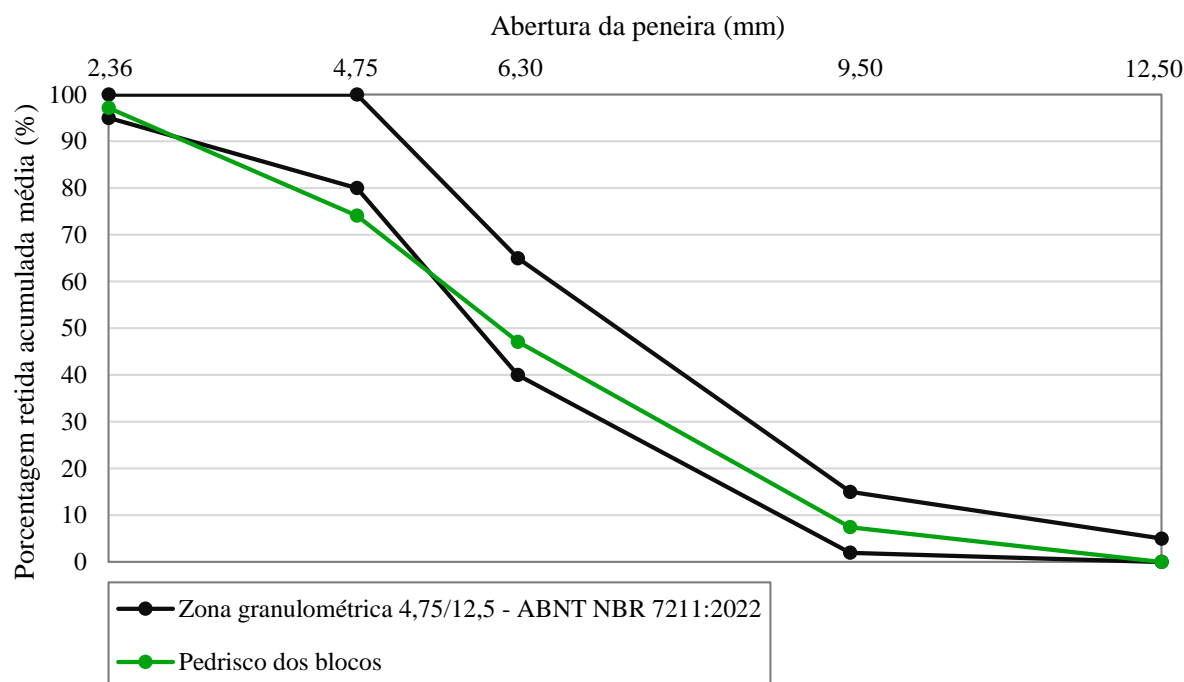
^b Não foi constatada a presença de torrões de argila ou materiais friáveis.

^c Saturado Superfície Seca.

Fonte: Autor (2022)

O agregado graúdo utilizado na confecção dos blocos foi um pedrisco de gnaiss, obtido na região de Guarulhos-SP. Neste texto, o material será identificado como **pedrisco dos blocos**. Os resultados de sua caracterização e comparação com os limites da ABNT NBR 7211:2022 estão contidos na Figura 3.5 e na Tabela 3.5.

Figura 3.5 – Curva granulométrica do pedrisco utilizado na produção dos blocos.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 3.5 – Demais resultados de caracterização do pedrisco utilizado na produção dos blocos.

NORMA	PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO	Limites NBR 7211:2022
ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima característica (mm)	12,50	-
	Módulo de finura	5,71	-
ABNT NBR 9939:2011	Teor de umidade total (%)	0,65 ^a	-
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.439,24	-
	Massa unitária no estado compactado (kg/m ³)	1.514,33	-
	Índice de vazios no estado solto (%)	46,36	-
	Índice de vazios no estado compactado (%)	43,57	-
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	- ^b	3%
ABNT NBR 16916:2021	Densidade do agregado na condição seca (g/cm ³)	2,69	-
	Densidade do agregado na condição SSS (g/cm ³)	2,70 ^c	-
	Absorção de água (%)	0,25	-
ABNT NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	3,21	1%

^a Teor de umidade do agregado em estado natural, após coleta e armazenamento. Precede qualquer secagem.

^b Não foi constatada a presença de torrões de argila ou materiais friáveis.

^c Saturado Superfície Seca.

Fonte: Autor (2022)

Da Tabela 3.4 e Tabela 3.5, nota-se que os limites propostos pela ABNT NBR 7211:2022 para material pulverulento foram ultrapassados por todos os agregados utilizados na produção dos blocos, sobretudo, os pós de pedra. Por se tratar de resíduos obtidos na britagem de rochas é natural que contenham maiores teores de finos que de areias extraídas em leitos de rios, por exemplo. Essa informação é reforçada pelos maiores limites de aceitação da ABNT NBR 7211: 2022 para areias de britagem. Além disso, como são agregados já empregados pela empresa fabricante dos blocos, e em um tipo de concreto que se difere dos convencionais (concreto seco, para qual a presença de finos representa uma contribuição), nenhuma intervenção (ex.: peneiramento, lavagem) foi realizada além da secagem dos agregados.

Quanto ao requisito proposto pela ABNR NBR 6136:2016, o maior valor de Dimensão Máxima Característica (DMC) obtido entre os agregados (do pedrisco) corresponde exatamente à metade da menor espessura de parede dos blocos estruturais de 6, 12, 18 e 24 MPa utilizados neste estudo (25 mm). O bloco de 4 MPa possui paredes mais finas (20 mm de espessura mínima) e, somente para esta classe de bloco, o valor de DMC excede o limite proposto.

A execução dos principais ensaios de caracterização dos agregados miúdos e do agregado graúdo utilizados na produção dos blocos de concreto é ilustrada na Figura 3.6 e Figura 3.7.

Figura 3.6 – Caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:
a) disposição em badeiras metálicas; b) secagem em estufa a 110°C; c) quartejamento Pó de pedra A; d) quartejamento pedrisco dos blocos.



a)



b)



c)



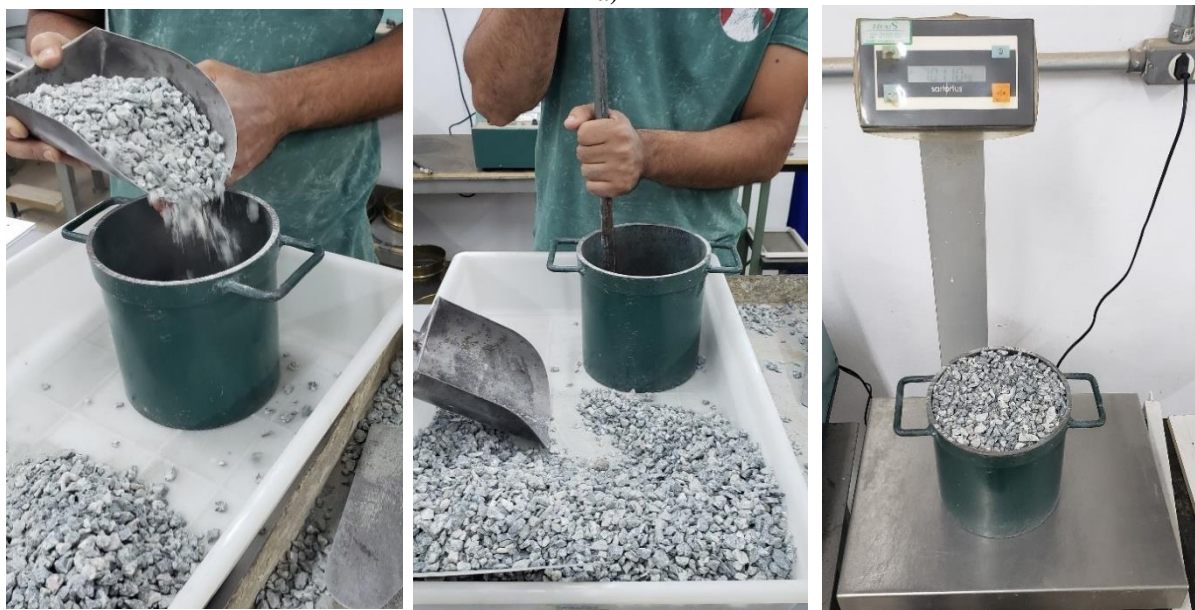
d)

Fonte: Autor (2021)

Figura 3.7 – Ensaio de caracterização dos agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto:
a) granulometria Pó de pedra A; b) massa unitária pedrisco dos blocos; c) densidade Pó de pedra B; d) material passante na peneira 75 µm por lavagem (material pulverulento) para Pó de pedra A.



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2021)

3.1.3.2 Agregados para produção de grautes e argamassas de assentamento convencionais

Para fabricação dos grautes e argamassas de assentamento convencionais foram inicialmente obtidos dois agregados: uma areia adquirida como média (agregado miúdo) e um pedrisco (agregado graúdo).

A **areia média** correspondeu a uma areia de cava extraída na região de Rafard-SP. O pedrisco, daqui em diante identificado como **pedrisco dos grautes**, era predominantemente composto por granito e proveniente da região de Jaguariúna-SP.

Quantidades suficientes para realização de toda a pesquisa foram adquiridas para os dois materiais na cidade de Campinas-SP e acomodadas nas proximidades do Laboratório de Estruturas (LES) da FEC/UNICAMP. Para evitar, respectivamente, a contaminação pelo contato com o solo e a ação de intempéries, os agregados foram dispostos sobre placas de

fibrocimento e cobertos com lonas plásticas (Figura 3.8a e Figura 3.8b). Amostras dos dois agregados também foram coletadas, transportadas até São Carlos-SP (Figura 3.8c), e acomodadas no LSE do DECiv/UFSCar.

Figura 3.8 – Caracterização dos agregados utilizados na produção dos grautes e argamassas de assentamento: a) disposição sobre placas de fibrocimento; b) proteção com lona plástica; c) preparo para transporte até São Carlos-SP.



Fonte: Autor (2021)

Os resultados obtidos na caracterização da areia média e do pedrisco dos grautes são apresentados pela Figura 3.9, Figura 3.10 e Tabela 3.6, juntamente com os limites propostos pela ABNT NBR 7211:2022. A execução dos principais ensaios é ilustrada pela Figura 3.11.

Figura 3.9 – Curva granulométrica da areia média.

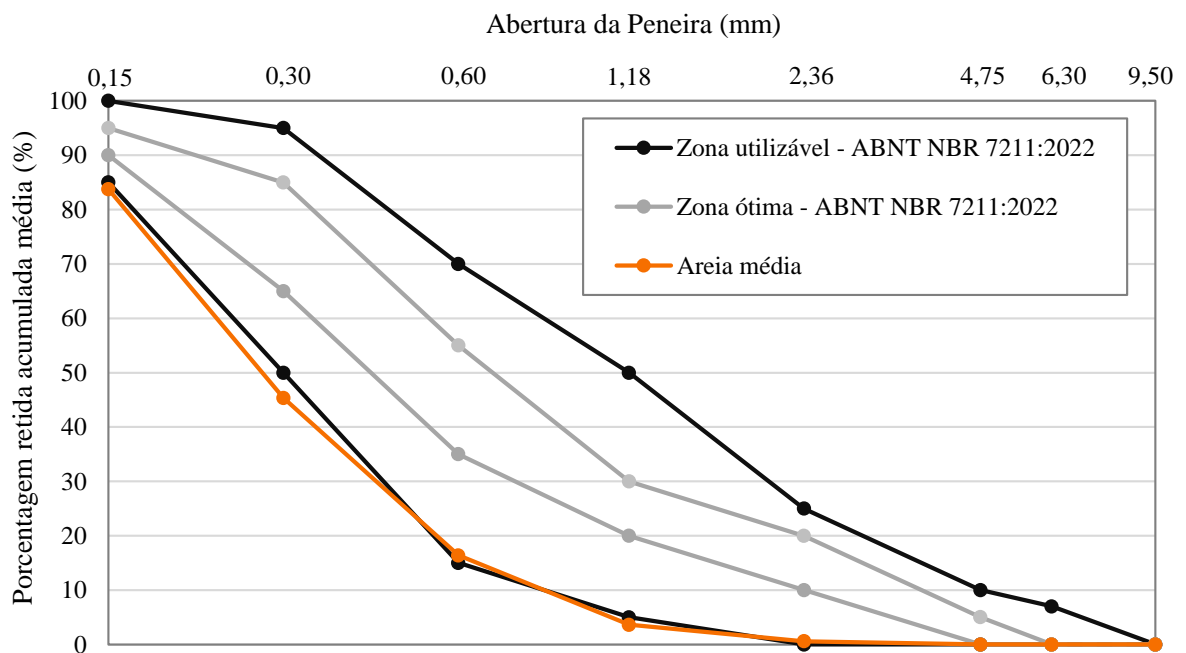
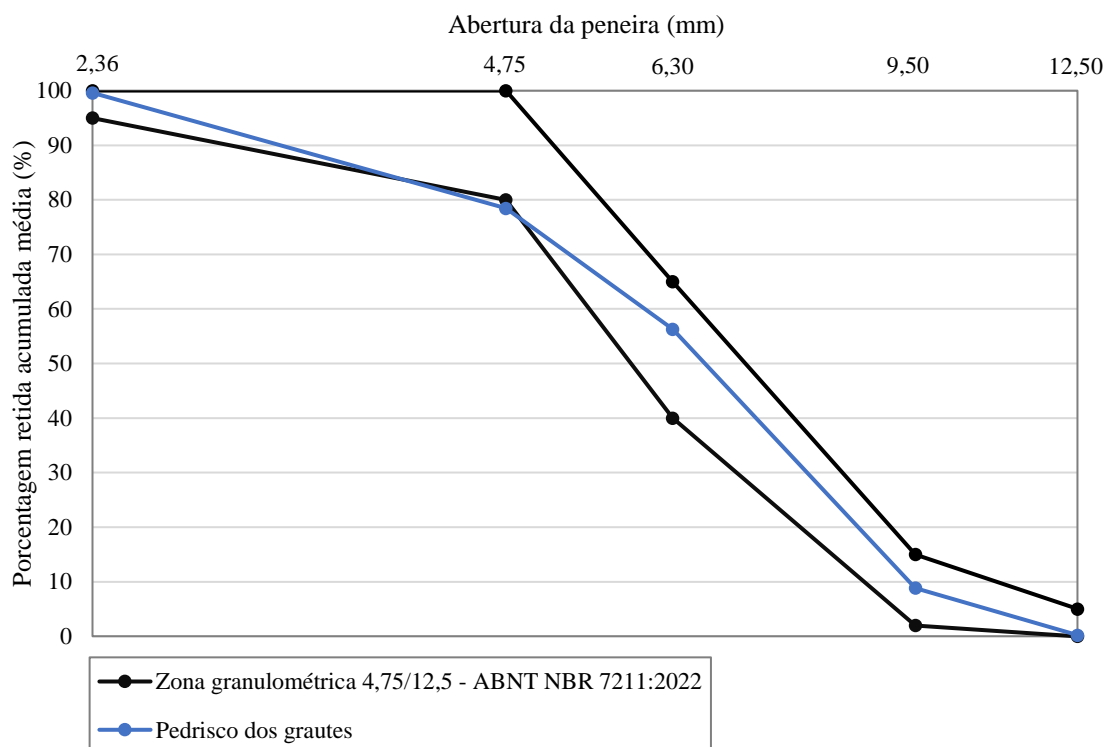


Figura 3.10 – Curva granulométrica do pedrisco dos grautes.



Fonte: Autor (2022)

Tabela 3.6 – Demais resultados de caracterização para areia média e pedrisco dos blocos.

NORMA	PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO			
		Areia média	Limites NBR 7211:2022	Pedrisco dos grautes	Limites NBR 7211:2022
ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima característica (mm)	1,18	-	12,50	-
	Módulo de finura	1,50	1,55 - 3,50	5,86	-
ABNT NBR 9939:2011	Teor de umidade total (%)	7,24 ^a	-	0,28 ^a	-
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.414,89	-	1.407,21	-
	Massa unitária no estado compactado (kg/m ³)	1.581,74	-	1.475,89	-
	Índice de vazios no estado solto (%)	36,96	-	47,16	-
	Índice de vazios no estado compactado (%)	29,52	-	44,58	-
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	- ^b	3%	- ^c	3%
ABNT NBR 16916:2021 (Areia)	Densidade do agregado na condição seca (g/cm ³)	2,25	-	2,66	-
	Densidade do agregado na condição SSS (g/cm ³)	2,29 ^d	-	2,67 ^d	-
ABNT NBR 16917:2021 (Pedrisco)	Absorção de água (%)	2,00	-	0,26	-
ABNT NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	7,18	5%	0,79	1%

^a Teor de umidade do agregado em estado natural, após coleta e armazenamento. Precede qualquer secagem.^b Massa compreendida pelo intervalo de peneiras ≥ 1.18 mm e < 4.75 mm menor que 5% da massa total das amostras testadas.^c Não foi observada a presença de torrões de argila ou materiais friáveis.^d Saturado Superfície Seca

Fonte: Autor (2022)

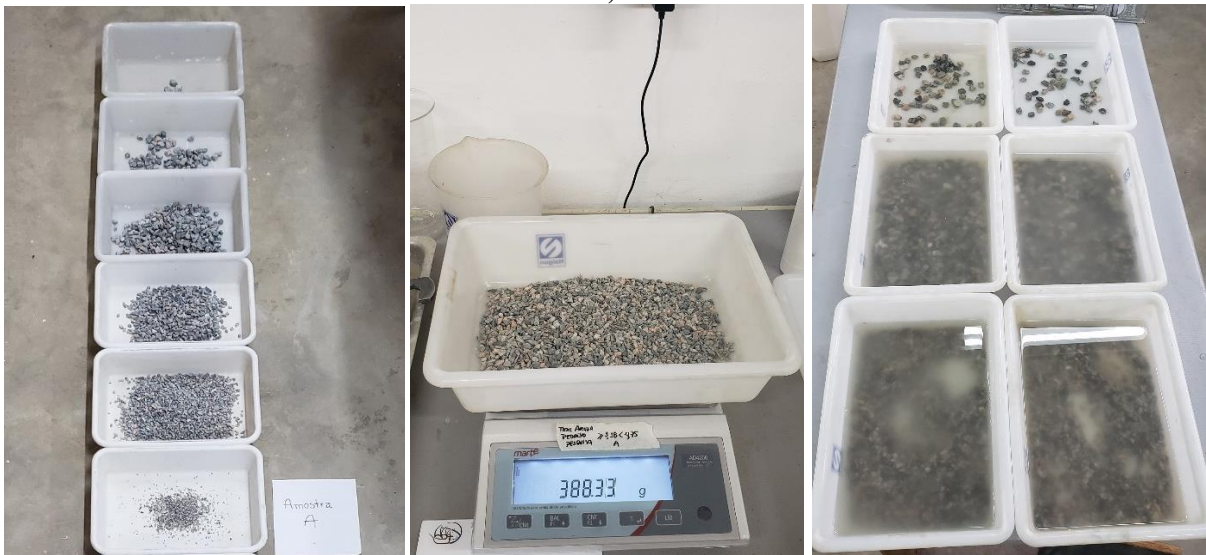
Observa-se na Tabela 3.6 que o limite proposto pela ABNT NBR 7211:2022 para material pulverulento foi ultrapassado apenas pela areia média. Nota-se também, que apesar de ser comercializada como “areia média”, a areia apresentou Módulo de Finura (MF) abaixo da zona utilizável inferior.

Figura 3.11 – Ensaios de caracterização dos agregados para grautes e argamassas de assentamento:

a) granulometria areia média; b) teor de argila pedrisco dos grautes; c) massa unitária pedrisco dos grautes; d) densidade areia média; e) densidade pedrisco dos grautes; f) material passante na peneira 75 μm por lavagem (material pulverulento) para areia média.



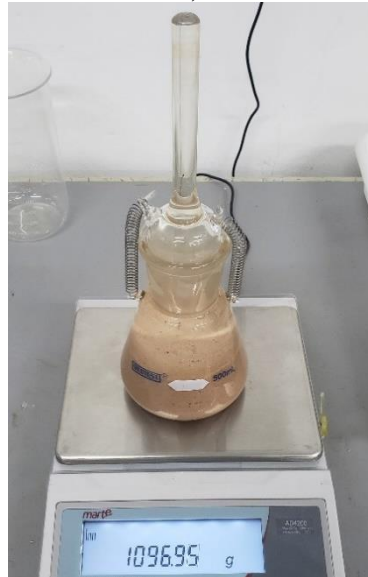
a)



b)



c)



d)



e)



f)

Fonte: Autor (2021)

3.1.4 TESTES DE TRAÇO E SUBSTITUIÇÃO DA AREIA MÉDIA

3.1.4.1 Testes iniciais

Antes de utilizar definitivamente os agregados destinados à produção dos grautes e argamassas convencionais, optou-se por testá-los em traços disponíveis na literatura. Para tanto, as proporções utilizadas nos trabalhos de Fortes (2012, 2017); Fortes, Parsekian e Fonseca (2015) foram tomadas como referência. Para testar as argamassas, seus traços originais em volume foram convertidos em massa, usando as massas unitárias (no estado compactado) obtidas na caracterização dos agregados e aglomerantes desta pesquisa. Nos testes dos grautes, os mesmos traços em massa de Fortes (2012) foram replicados. Antes das moldagens, todos os agregados foram secos em estufa a 110 °C.

Durante as moldagens, a alta absorção de água de amassamento pela areia foi evidente. Cabe enfatizar que Fortes (2012, 2017) utilizou uma areia de rio média (DMC=2,4 mm) obtida na região de São Carlos-SP. Em função da indisponibilidade de areias de rio na região de Campinas quando os agregados foram adquiridos, o presente estudo contou com uma areia de cava de Rafard-SP (apresentada no Item 3.1.3.2). Mesmo sendo vendida como uma areia “média”, nota-se que a areia adquirida em Campinas é, na realidade, bem mais fina (DMC=1,18mm) que a areia da referência citada. Além disso, observou-se que, após a secagem, a areia média altera consideravelmente seu aspecto, exibindo torrões friáveis e assumindo a aparência semelhante à de um “solo argiloso” (Figura 3.12).

Figura 3.12 – Areia média: a) no estado saturado superfície seca; b) após secagem em estufa.



a)

b)

Fonte: Autor (2021)

A quantidade de água foi ajustada até que a consistência das argamassas no estado fresco atendesse ao intervalo de 240 ± 20 mm, entendido como ideal para o assentamento dos blocos utilizados neste estudo. Importante destacar que, durante os ensaios de consistência, as argamassas foram testadas no assentamento de alguns blocos (Figura 3.13). Para a maioria das unidades aqui utilizadas, com massas entre 12 e 13kg, a consistência de 260 ± 5 mm recomendada pela ABNT NBR 16541:2016 não se mostrou adequada, de tal forma que, durante a montagem dos prismas de dois blocos as juntas de argamassas foram esmagadas pelo peso dos blocos superiores.

Figura 3.13 – Teste de aplicação de argamassa durante os ensaios de consistência no LMC da UFSCar.



Fonte: Autor (2021)

Os traços originais e os convertidos em massa (com correção da água de amassamento) para as argamassas e grautes testados são exibidos pela Tabela 3.7 e Tabela 3.8, respectivamente.

Tabela 3.7 – Traços unitários considerados no teste inicial de agregados em argamassas.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	a/c	Resistência esperada (MPa)
Original em volume	1	2	5	1,39	6,56
Convertido em massa ^a	1	1,34	7,17	2,10 ^b	
Original em volume	1	1,5	4	1,12	12,43
Convertido em massa ^a	1	1	5,74	1,72 ^b	
Original em volume	1	0,5	4	0,86	19,35
Convertido em massa ^a	1	0,33	5,74	1,50 ^b	

^a Convertido em massa utilizando as massas unitárias no estado compactado, obtidas na caracterização dos materiais desta pesquisa.

^b Relação água/cimento ajustada para consistência de argamassa no estado fresco 240 ± 20 mm.

Fonte: Adaptado de Fortes (2012, 2017)

Para caracterização no estado fresco, as argamassas de teste foram submetidas ao ensaio de determinação do índice de consistência (ABNT NBR 13276:2016) e os grautes submetidos ao ensaio de abatimento (ABNT NBR NM 67:1998).

Assim como feito nas argamassas, a água de amassamento dos grautes foi corrigida em função da alta absorção de água da areia média. A relação água/cimento (a/c) adotada foi aquela que forneceu um abatimento compreendido pelo intervalo de 203 a 279 mm, proposto pela recomendação técnica ACI TMS 402/602-22.

Tabela 3.8 – Traços unitários considerados no teste inicial de agregados em grautes.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	Pedrisco	a/c	Resistência esperada (MPa)
Original em volume	1	0,1	2,4	2,2	0,80	12,52
Original em massa	1	0,05	3,40	2,78	1,25*	
Original em volume	1	0,1	1,5	1,6	0,58	24,45
Original em massa	1	0,05	2,12	2,02	0,88*	
Original em volume	1	0,1	1	1,3	0,45	35,92
Original em massa	1	0,1	1,42	1,64	0,73*	

* Relação água/cimento ajustada para abatimento entre 203 e 279 mm.

Fonte: Adaptado de Fortes (2012)

Os resultados obtidos para argamassas e grautes de teste nos ensaios de estado fresco são expostos na Tabela 3.9.

Tabela 3.9 – Resultados de ensaios no estado fresco para argamassas e grautes de teste.

Argamassas	Índice de consistência em mm (ABNT NBR 13276:2016)	Grautes	Abatimento em mm (ABNT NBR NM 67:1998)
Resistência esperada aos 28 dias (MPa)	6,56	230	12,52
	12,43	235	24,45
	19,35	240	35,92

Fonte: Autor (2021)

Os procedimentos de moldagem das argamassas de teste seguiram as prescrições da ABNT NBR 16541:2016, ABNT NBR 13279:2005 e ABNT NBR 16868-2:2020. Para os grautes, seguiu-se a ABNT NBR 5738:2015. A moldagem dos materiais e execução dos ensaios no estado fresco são ilustrados pela Figura 3.14.

Figura 3.14 – Moldagem e ensaios no estado fresco de argamassas e grautes para teste de agregados:
a) moldagem argamassa; b) moldagem graute; c) ensaios no estado fresco argamassa - índice de consistência; d) ensaio no estado fresco graute – abatimento.





d)

Fonte: Autor (2021)

Concluídas as moldagens, as amostras de argamassa e de graute foram desformadas aos 3 dias de idade e permaneceram dentro do ambiente de laboratório (sem imersão em água) até a realização dos ensaios no estado endurecido.

Após a cura, as argamassas foram então ensaiadas à compressão em cubos de 40 mm de aresta, aos 14 dias e próximo aos 28 dias de idade. O procedimento seguiu as prescrições da ABNT NBR 16868-2:2020. Aos 28 dias de idade, as argamassas também foram testadas à tração por flexão, com seguida compressão das metades resultantes, conforme especificação da ABNT NBR 13279:2005. Os corpos de prova de graute tiveram suas superfícies de aplicação de carga retificadas e, em seguida, foram ensaiados à compressão aos 14 e aos 28 dias de idade, segundo procedimento estabelecido pela ABNT NBR 5739:2018. Os resultados dos ensaios no estado endurecido das argamassas e dos grautes de teste são apresentados na Tabela 3.10 e Tabela 3.11, respectivamente.

Tabela 3.10 – Resultados médios de ensaios no estado endurecido: argamassas de teste.

Argamassas		Compressão cubo 40 mm (ABNT NBR 16868-2:2020)		Resistência à tração na flexão (ABNT NBR 13279:2005)	Compressão metades da flexão (ABNT NBR 13279:2005)
		14 dias	Próx. 28 dias	28 dias	28 dias
Resistência esperada aos 28 dias (MPa)	6,56	3,83	4,71 ^a	1,49	4,62
	12,43	5,41	6,49 ^b	1,91	6,20
	19,35	5,89	6,37 ^b	1,62	6,55

^a ensaio realizado aos 26 dias de idade dos corpos de prova.

^b ensaio realizado aos 24 dias de idade dos corpos de prova.

Fonte: Autor (2021)

Tabela 3.11 – Resultados médios de ensaios no estado endurecido: grautes de teste.

	Grautes	Resistência à compressão CP cilíndrico 100 x 200 mm (ABNT NBR 5739:2005)	
		14 dias	28 dias
Resistência esperada aos 28 dias (MPa)	12,52	7,00	8,13
	24,45	15,17	17,48
	35,92	22,03	25,10

Fonte: Autor (2021)

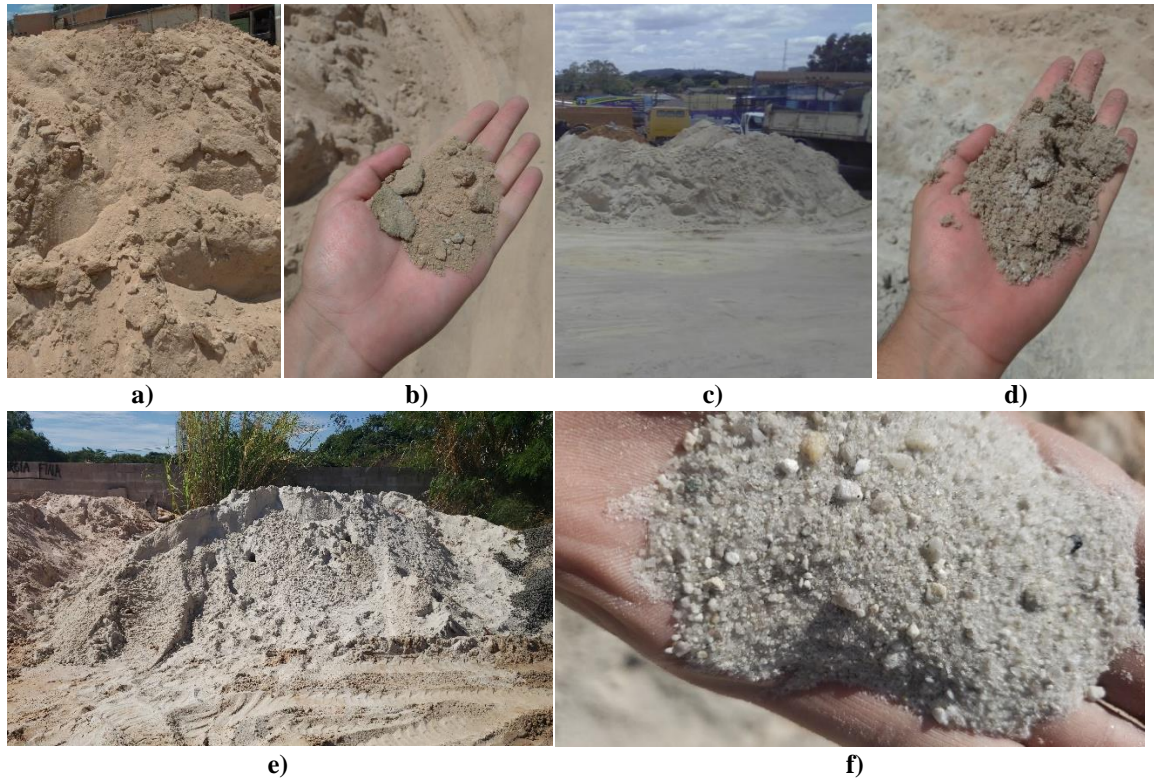
Embora valores satisfatórios para as propriedades no estado fresco tenham sido alcançados para as argamassas e grautes após a correção da água de amassamento (Tabela 3.9), os resultados apresentados nas Tabela 3.10 e Tabela 3.11 evidenciaram que essa adição de água nas misturas reduziu drasticamente os valores das propriedades no estado endurecido. Os resultados obtidos mostraram-se bem abaixo dos valores esperados pelos traços de referência, sobretudo para as maiores resistências.

3.1.4.2 Substituição da Areia média

Tendo em vista os resultados de caracterização da areia média (mais fina que o esperado e com teor excedente de material pulverulento), sua alta absorção durante a moldagem de argamassas e grautes, e as baixas resistências alcançadas para ambos os materiais no estado endurecido, optou-se pela substituição do agregado.

Antes de adquirir a nova areia, foram visitados 5 depósitos de Materiais de Construção na cidade de Campinas-SP. Em nenhum estabelecimento foi encontrado areia extraída em leito de rios. As areias disponíveis foram observadas em suas pilhas de armazenamento, especificamente no topo e em porções superiores, onde geralmente se encontram as parcelas mais finas e é possível examinar o material seco. Escolheu-se a areia que, quando manuseada, deixou menos resquícios nas mãos, como um indicativo da presença de material pulverulento. Algumas das areias avaliadas e a areia escolhida são exibidas na Figura 3.15.

Figura 3.15 – Escolha de uma nova areia: a) primeira areia na pilha; b) aspecto quando manuseada; c) segunda areia na pilha; d) aspecto quando manuseada; e) areia escolhida; f) areia escolhida manuseada.

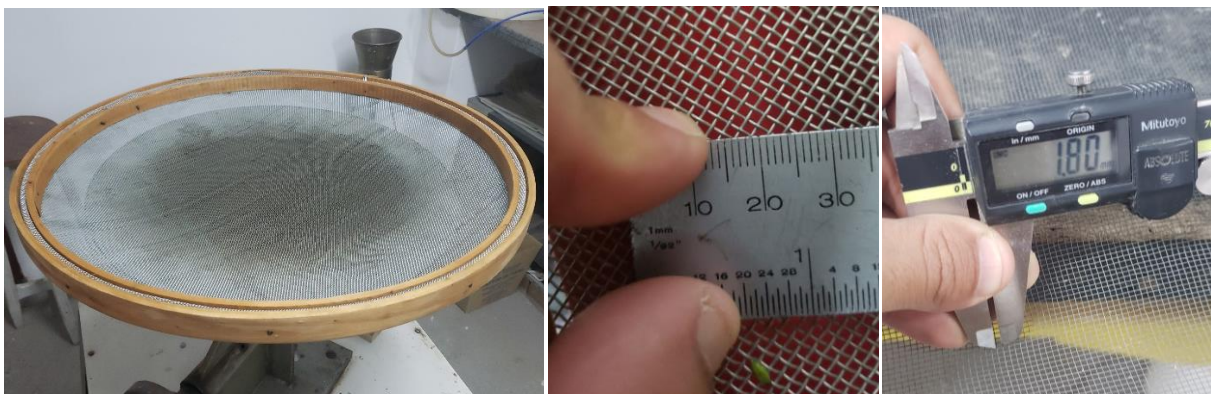


Fonte: Autor (2021)

O agregado escolhido para substituir a areia média na fabricação de grautes e argamassas de assentamento correspondeu a uma areia de mineração, comercializada em Campinas-SP como “areia grossa”. Possui coloração clara e tem origem na região de Mogi Guaçu-SP. Daqui em diante, será identificado como **areia branca**.

Percebida a presença de alguns grãos maiores (Figura 3.15f), decidiu-se que, para uso nas argamassas de assentamento a areia branca seria peneirada, enquanto na moldagem dos grautes seria utilizada sem peneiramento. A peneira adotada possui aberturas com cerca de 1,8 mm (Figura 3.16) e não pertence às séries de peneiras normais ou intermediárias.

Figura 3.16 – Peneiramento da areia branca: a) peneira utilizada; b) medição de abertura; c) inserção na peneira; d) areia peneirada à esquerda e material retido à direita.

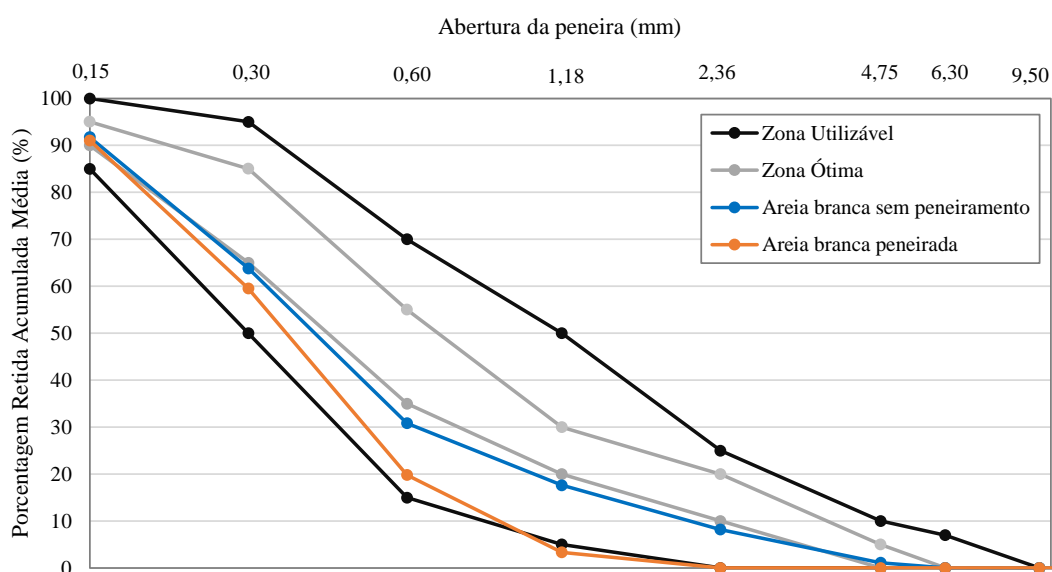




Fonte: Autor (2021)

Amostras suficientes para estudo da areia branca foram levadas até a UFSCar, em São Carlos-SP, onde foram submetidas aos ensaios apresentados no Quadro 3.1. Os resultados de caracterização da areia branca peneirada e sem peneiramento são exibidos pela Figura 3.17 e Tabela 3.12. A execução de alguns dos ensaios é ilustrada na Figura 3.18.

Figura 3.17 – Curvas granulométricas da areia branca com e sem peneiramento.



Fonte: Autor (2021)

Tabela 3.12 – Demais resultados de caracterização da areia branca para grautes e arg. de assentamento.

NORMA	PROPRIEDADE	VALOR MÉDIO		
		Sem peneiramento	Limites NBR 7211:2022	Peneirada
ABNT NBR NM 248:2003	Dimensão máxima característica (mm)	4,75	-	1,18
	Módulo de finura	2,13	1,55 - 3,50	1,74
ABNT NBR 9939:2011	Teor de umidade total (%)	2,83 ^a	-	-
ABNT NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1.684,57	-	1.597,11
	Massa unitária no estado compactado (kg/m ³)	1.773,70	-	1.723,01
	Índice de vazios no estado solto (%)	18,22	-	22,47

	Índice de vazios no estado compactado (%)	13,90	-	16,36
ABNT NBR 7218:2010	Teor de argila em torrões e materiais friáveis (%)	0,33	3%	- ^b
ABNT NBR 16916:2021	Densidade do agregado na condição seca (g/cm ³)	2,43	-	2,36
	Densidade do agregado na condição SSS (g/cm ³)	2,41 ^c	-	2,34 ^c
	Absorção de água (%)	0,75	-	0,66
ABNT NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	1,89	5%	2,12

^a Teor de umidade do agregado em estado natural, após coleta e armazenamento. Precede qualquer secagem.

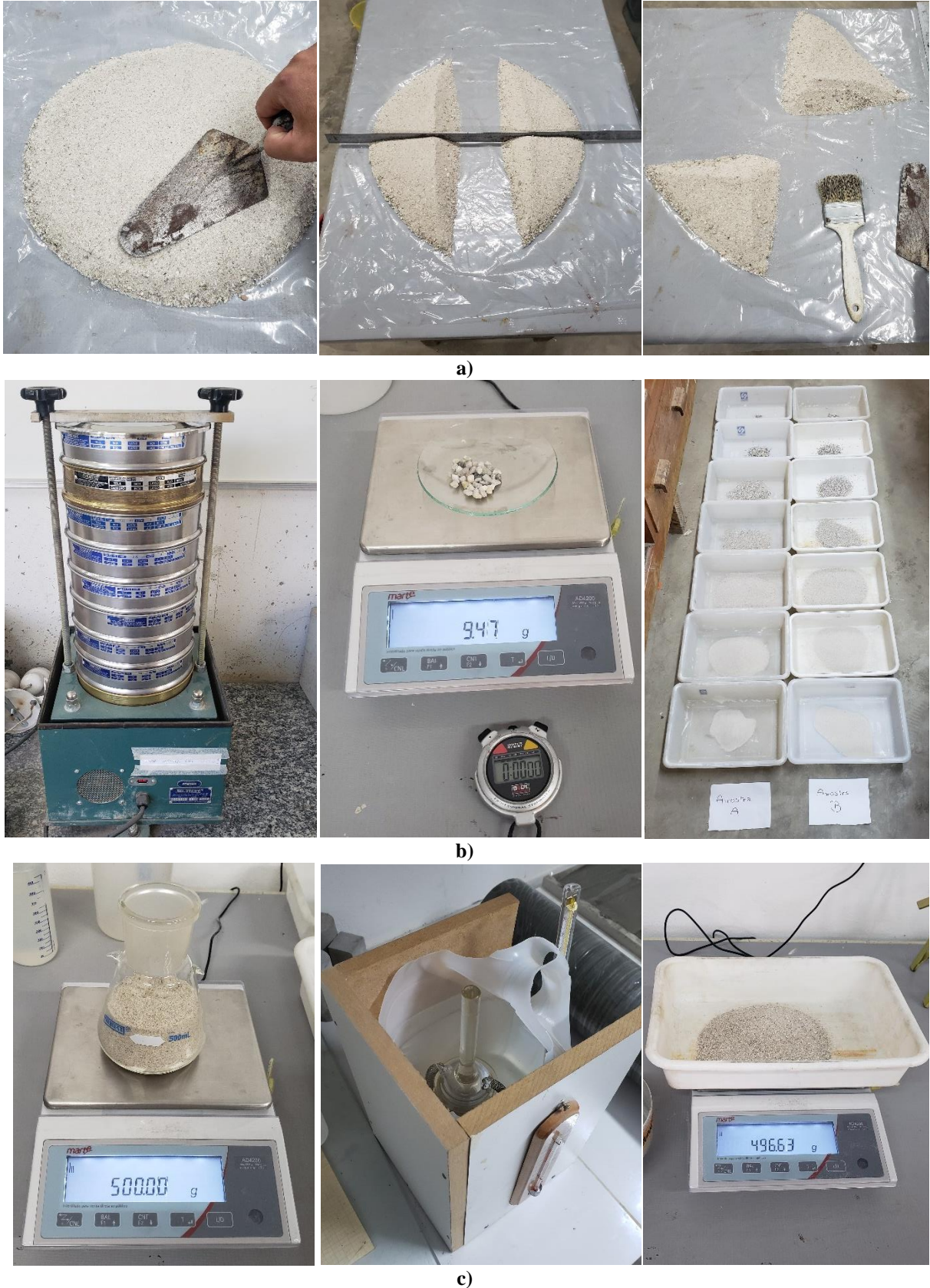
^b Massa compreendida pelo intervalo de peneiras ≥ 1.18 mm e < 4.75 mm menor que 5% da massa total das amostras testadas.

^c Saturado Superfície Seca.

Fonte: Autor (2021)

Sobre os requisitos propostos pela ABNT NBR 7211:2022, nota-se da Tabela 3.12, que os valores de referência para módulo de finura e teor de material pulverulento foram satisfeitos pela areia branca peneirada e sem peneiramento. A quantidade de torrões de argila e materiais friáveis observada foi ínfima, sendo o ensaio dispensado para a areia branca peneirada. A ausência de torrões de argila pode ser atribuída à própria natureza do agregado: um produto de mineração e não extraído do leito de rios, onde a tendência à presença de argila tende a ser maior. Módulo de finura, massa unitária, densidade e absorção de água diminuíram com o peneiramento da areia branca. O índice de vazios e o teor de material pulverulento foram maiores para a areia branca peneirada.

Figura 3.18 – Ensaio de caracterização da areia branca utilizadas na produção das argamassas e grautes: a) quarteamento areia branca peneirada; b) granulometria areia branca sem peneiramento; c) densidade areia branca peneirada; d) massa unitária areia branca peneirada; e) material passante na peneira 75 μm por lavagem (material pulverulento) para areia branca sem peneiramento; f) teor de argila em torrões e materiais friáveis para areia branca sem peneiramento.





d)



e)



f)

Fonte: Autor (2021)

3.1.4.3 Testes com a nova areia

Após substituir a areia destinada à produção dos grautes e argamassas de assentamento (areia média pela areia branca), os traços de Fortes (2012, 2017) e Fortes, Parsekian e Fonseca (2015) foram novamente testados no LSE e LMC da UFSCar; agora com a nova areia. Além de traços provenientes da literatura, novas proporções foram testadas de forma exploratória. Tendo em vista que para misturas em grandes quantidades, posteriormente seria utilizada uma balança com precisão de 50 g (existente no LES da UNICAMP), os traços-piloto em massa foram concebidos com valores exatos, evitando-se que variações nas casas decimais gerassem erros entre 0 e 50 g durante a pesagem dos materiais. Levando-se em consideração que a areia utilizada neste trabalho apresentou maior absorção de água que as areias de rio utilizadas nos trabalhos de referência, a formulação dos novos traços também prezou pela redução nas frações de cal e areia, buscando-se misturas para compensar a provável redução de resistência associada à absorção da areia nova e, conseqüentemente, os maiores teores de água.

Para cada classe de resistência de argamassa desejada (5, 10 e 20 MPa) foram testadas de 4 a 5 dosagens distintas. Além da resistência à compressão obtida após 28 dias, a obtenção de índices de consistência (ABNT NBR 13276:2016) pertencentes ao intervalo de 240 ± 20 mm foi tomada como critério para escolha dos traços definitivos. Cada resistência desejada de graute (15, 25 e 35 MPa) foi explorada pela testagem de 3 a 4 misturas. Além da resistência após 28 dias, o intervalo para abatimento de 220 ± 20 mm (ABNT NBR NM 67:1998) foi respeitado para escolha dos traços definitivos. Cabe destacar, que os 220 mm de abatimento foram previamente testados para os grautes e considerados ideais ao preenchimento dos blocos utilizados neste estudo. Este valor de abatimento também atende ao intervalo de 203 a 279 mm, proposto pela recomendação técnica ACI TMS 402/602-22. Todos os traços testados com a areia branca na produção das argamassas (com peneiramento) e dos grautes (sem peneiramento) são exibidos pela Tabela 3.13 e Tabela 3.14, respectivamente.

Tabela 3.13 – Traços unitários considerados nos testes de argamassas com a areia branca peneirada.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	a/c	Resistência esperada (MPa)
Original em volume A	1	2	5	1,39	6,56
Convertido em massa A ^a	1	1,35	7,21	1,69 ^b	
Original em volume B	1	2,5	4,5	1,58	8,11
Convertido em massa B ^a	1	1,69	6,49	1,68 ^b	
Traço-piloto A em massa	1	1,1	6,5	1,60 ^b	entre 6,56 e 8,11
Traço-piloto B em massa	1	1	6	1,50 ^b	> 8,11
Original em volume C	1	1,5	4	1,12	12,43
Convertido em massa C ^a	1	1	5,76	1,32 ^b	
Original em volume D	1	2	3	0,985	14,34
Convertido em massa D ^a	1	1,02	4,32	1,085 ^b	
Traço-piloto C em massa	1	0,8	5	1,2 ^b	entre 12,43 e 14,34
Traço-piloto D em massa	1	0,75	4	1,05 ^b	> 14,34
Original em volume E	1	0,5	4,5	0,885	24,32
Convertido em massa E ^a	1	0,34	6,49	1,385 ^b	
Original em volume F	1	0,5	4	0,86	19,35
Convertido em massa F ^a	1	0,34	5,76	1,21 ^b	
Traço-piloto E em massa	1	0,25	4	0,85 ^b	> 19,35
Traço-piloto F em massa	1	0,20	3,5	0,75 ^b	> 24,32
Traço-piloto G em massa	1	0,20	3	0,7 ^b	> 24,32

^a Convertido em massa utilizando as massas unitárias no estado compactado, obtidas na caracterização dos materiais desta pesquisa.

^b Relação água/cimento ajustada para consistência de argamassa no estado fresco 240 ± 20 mm.

Tabela 3.14 – Traços unitários considerados nos testes de grautes com areia branca sem peneiramento.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	Pedrisco	a/c	Resistência esperada (MPa)
Traço-piloto A em massa	1	0,05	2,35	2,15	0,78 ^b	Entre 18 e 24
Traço-piloto B em massa	1	0,05	2,2	2	0,7 ^b	
Traço-piloto C em massa	1	0,05	2,9	2,5	0,77 ^b	15
Original em volume A	1	0,1	1,6	1,8	0,68	27
Convertido em massa A ^a	1	0,05	2,26	2,28	0,68 ^b	
Traço-piloto D em massa	1	0,05	2,15	2,15	0,70	entre 25 e 27
Traço-piloto E em massa	1	0,05	2	2	0,64	> 27
Traço-piloto F em massa	1	0,05	2,2	2,15	0,65	> 27
Original em volume B	1	0,1	1	1,3	0,45 ^b	35,92
Convertido em massa B ^a	1	0,1	1,42	1,64	0,56 ^b	
Traço-piloto G em massa	1	0,05	1,35	1,55	0,54 ^b	> 35,92
Traço-piloto H em massa	1	0,05	1,2	1,4	0,53 ^b	> 35,92
Traço-piloto I em massa	1	0,05	1,5	1,5	0,53 ^b	> 35,92

^a Convertido em massa utilizando as massas unitárias no estado compactado, obtidas na caracterização dos materiais desta pesquisa.

^b Relação água/cimento ajustada para abatimento de 220 ± 20 mm.

Fonte: Adaptado de Fortes (2012, 2017)

Para a escolha dos traços definitivos, as proporções contidas na Tabela 3.13 para argamassas foram reproduzidas na moldagem de corpos de prova cúbicos (40 mm de aresta), ensaiados à compressão aos 7 e aos 28 dias de idade. As médias dos resultados obtidos são apresentadas na Tabela 3.15. Para evitar maiores interferências no cronograma inicialmente estabelecido para o estudo e, tendo em vista o atraso já proporcionado pela substituição da areia média, os grautes de teste tiveram resistência à compressão obtida apenas aos 7 dias de idade, em corpos de prova cilíndricos $\varnothing 100 \times 200$ mm, cujos resultados são exibidos pela Tabela 3.16. Além da resistência à compressão, as argamassas e os grautes testados com a areia branca foram caracterizados no estado fresco e seus resultados constam na Tabela 3.17.

Tabela 3.15 – Resistências à compressão obtidas nos testes de argamassas com a areia branca peneirada.

Tipo de traço	Resistência à compressão média aos 7 dias (MPa)	Resistência à compressão média aos 28 dias (MPa)
Convertido em massa A *	3,78	5,57
Convertido em massa B *	4,58	6,91
Traço-piloto A em massa	4,08	6,49
Traço-piloto B em massa	5,19	7,82
Convertido em massa C *	6,45	9,48
Convertido em massa D *	10,42	14,71
Traço-piloto C em massa	8,17	11,71
Traço-piloto D em massa	11,07	15,43
Convertido em massa E *	4,69	7,07
Convertido em massa F *	6,39	9,64
Traço-piloto E em massa	14,75	20,54
Traço-piloto F em massa	21,63	28,43
Traço-piloto G em massa	18,84	25,41

* Convertido em massa utilizando as massas unitárias no estado compactado, obtidas na caracterização dos materiais desta pesquisa.

Tabela 3.16 – Resistências à compressão obtidas nos testes de grautes com a areia branca sem peneiramento.

Tipo de traço	Resistência à compressão média aos 7 dias (MPa)
Traço-piloto A em massa	16,28
Traço-piloto B em massa	18,57
Traço-piloto C em massa	19,25
Convertido em massa A *	20,08
Traço-piloto D em massa	20,29
Traço-piloto E em massa	19,51
Traço-piloto F em massa	21,72
Convertido em massa B *	29,16
Traço-piloto G em massa	29,18
Traço-piloto H em massa	28,94
Traço-piloto I em massa	26,49

* Convertido em massa utilizando as massas unitárias no estado compactado, obtidas na caracterização dos materiais desta pesquisa.

Tabela 3.17 – Resultados médios de ensaios no estado fresco para argamassas e grautes testados com a areia branca.

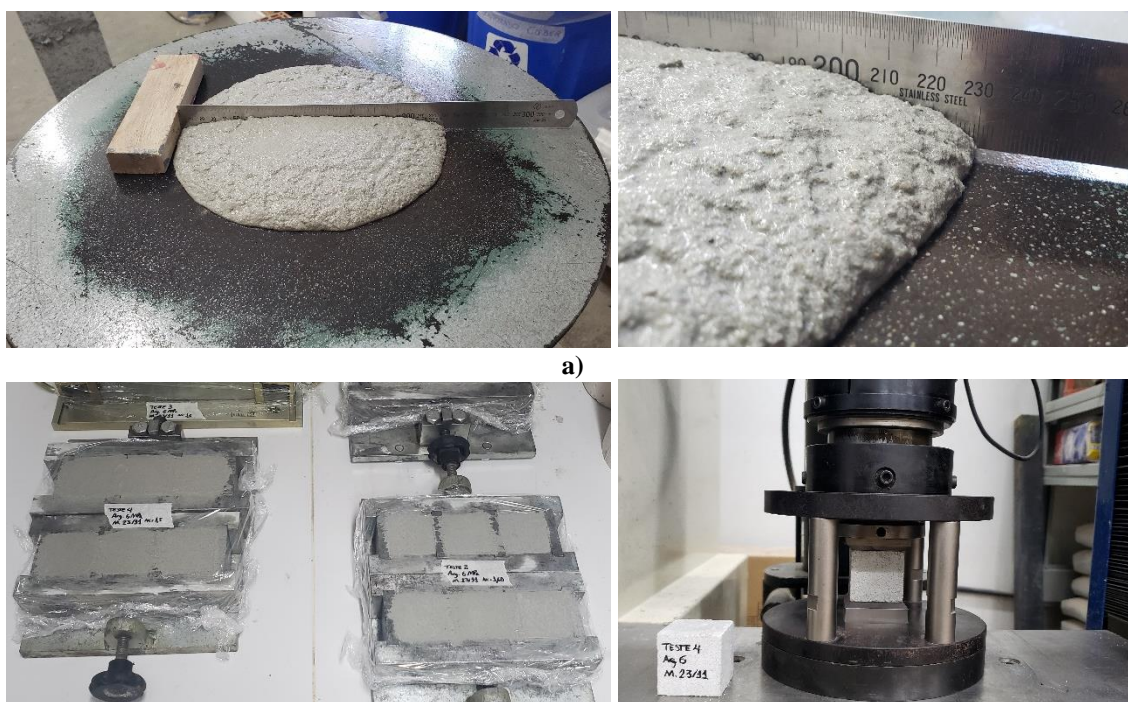
Argamassas	Índice de consistência em mm (ABNT NBR 13276:2016)	Grautes	Abatimento em mm (ABNT NBR NM 67:1998)	
Identificação do traço (em massa)	Convertido A	230	Traço-piloto A	230
	Convertido B	230	Traço-piloto B	230
	Traço-piloto A	230	Traço-piloto C	230
	Traço-piloto B	230		
	Convertido C	225	Convertido A	220
	Convertido D	225	Traço-piloto D	220
	Traço-piloto C	235	Traço-piloto E	215
	Traço-piloto D	225	Traço-piloto F	215
	Convertido E	235	Convertido B	215
	Convertido F	230	Traço-piloto G	220
	Traço-piloto E	230	Traço-piloto H	230
	Traço-piloto F	250	Traço-piloto I	225
	Traço-piloto G	230	Convertido B	220

Fonte: Autor (2021)

A execução dos ensaios realizados para os testes de argamassas e grautes com a areia branca é ilustrada na Figura 3.19 e Figura 3.20, respectivamente. Os ensaios de resistência à compressão em grautes foram precedidos pela retificação dos corpos de prova.

Figura 3.19 – Ensaios no estado fresco e endurecido para testes de argamassas com a areia branca:

a) consistência no estado fresco; b) moldagem e ruptura do cubo de aresta 40 mm.



Fonte: Autor (2021)

Figura 3.20 – Ensaio no estado fresco e endurecido para testes de grautes com a areia branca:
a) materiais pesados e mistura; b) abatimento no estado fresco e corpos de prova recém moldados; b) corpos de prova cilíndricos cilindro Ø100 x 200 mm após a retífica e ruptura.



Fonte: Autor (2021)

3.1.4.4 Estabelecimento dos traços definitivos

Como conclusão dos testes de traço, chegou-se às proporções adotadas como definitivas para produção das argamassas (Tabela 3.18) e grautes (Tabela 3.19). Esses traços foram novamente moldados para os ensaios de caracterização, agora incluindo testes aos 28 dias. Posteriormente seriam replicados na UNICAMP para os ensaios de altas temperaturas e determinação de propriedades residuais.

Tabela 3.18 – Traços unitários definitivos para argamassas de assentamento convencionais desta pesquisa.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	a/c	Resistência esperada (MPa)
Traço-piloto A em massa	1	1,1	6,5	1,6 *	6,49
Traço-piloto C em massa	1	0,8	5	1,2 *	11,71
Traço-piloto E em massa	1	0,25	4	0,85 *	20,54

* Relação água/cimento ajustada para consistência de argamassa no estado fresco 240 ± 20 mm.

Tabela 3.19 – Traços unitários definitivos para grautes desta pesquisa.

Tipo de traço	Cimento	Cal hidratada	Areia média	Pedrisco	a/c	Resistência esperada (MPa)
Traço-piloto C em massa	1	0,05	2,9	2,5	0,77 *	> 15,0
Traço-piloto F em massa	1	0,05	2,2	2,15	0,65	> 25,0
Traço-piloto I em massa	1	0,05	1,5	1,5	0,53 *	> 35,0

* Relação água/cimento ajustada para abatimento de 220 ± 20 mm.

Fonte: Autor (2021)

3.2 ETAPA 2 - CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DE ALVENARIA ESTRUTURAL

3.2.1 FABRICAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Os blocos utilizados nesta pesquisa foram produzidos na indústria Glasser Pisos e Pré-Moldados Ltda., localizada na cidade de Guarulhos-SP. Trata-se de uma empresa fundada em 1971 e já consolidada no mercado da construção, que dispõe de tecnologias atuais para obtenção das unidades e conta com uma capacidade instalada que supera os 4 milhões de blocos por mês (Figura 3.21d). A máquina vibroprensa utilizada na confecção das peças é da marca BESSER® (norte americana) modelo Vibropac 4312J (Figura 3.21a). Além da eficiência de compactação, o equipamento dispõe de sistema para aquecimento dos moldes e controle automatizado de umidade durante as misturas.

A dosagem dos materiais é feita em massa. Sua inserção no misturador (Figura 3.21b) é realizada pelo acionamento de botões em uma cabine de controle que promovem a abertura/fechamento dos silos armazenadores de agregados e aglomerantes. Concluído o processo de mistura, um carrinho é enchido (Figura 3.21c), içado e vertido sobre um reservatório superior para posterior preenchimento dos moldes. Após a moldagem, os blocos são colocados em prateleiras e levados a uma câmara de cura úmida (dotada de controle de temperatura e aspersores de água). Lá permanecem até a paletização (Figura 3.21e).

Figura 3.21 – Vibroprensa utilizada na produção dos blocos: a) máquina visão frontal; b) misturadores; c) preenchimento do carrinho; d) saída dos blocos moldados.





e)

Fonte: Autor (2021)

Conforme mencionado no Item 3.1 deste Capítulo, os blocos foram produzidos com cimento Portland do Tipo CPV ARI, adquirido a granel (Tabela 3.1); aditivo plastificante à base de tensoativos e já diluído na água de mistura (Tabela 3.2); duas areias de britagem predominantemente compostas por gnaíse (Figura 3.4 e Tabela 3.4) e um pedrisco predominantemente composto por gnaíse (Figura 3.5 e Tabela 3.5). As dosagens adotadas pela fábrica para os blocos de classes de resistência 6, 12 e 24 MPa são exibidos na Tabela 3.20.

Tabela 3.20 – Traços em massa (kg) para os blocos de concreto utilizados nesta pesquisa.

Identificação do traço	Cimento	Pó de pedra A + Pó de pedra B	Pedrisco	Aditivo diluído ^{ab}	Água ^a
Bloco 6 MPa	190	1950	1000	1,65 L	197,82
Bloco 12 MPa	260	1850	1100	2,35 L	218,28
Bloco 24 MPa	324	1039	610	2,90 L	137,12

^a Quantidade fornecidas em volume pela empresa fabricante.

^b 0,1 L de aditivo para cada 100 kg de cimento. Aditivo diluído em água na proporção volumétrica de 1:9.

Fonte: Adaptado de Glasser Pisos e Pré-moldados Ltda. (2021)

Para cada um dos três traços apresentados na Tabela 3.20 foram fabricadas cerca de 500 unidades, com dimensões nominais de 140 × 190 × 390 mm (largura × altura × comprimento). Em seguida, os blocos foram entregues pela empresa fabricante no Laboratório de Estruturas (LES) da UNICAMP (Figura 3.22a); acomodados e cobertos com lona para proteção contra intempéries (Figura 3.22b). Uma quantidade suficiente para cada classe de resistência de bloco foi separada (Figura 3.22c) e transportada até a UFSCar (Figura 3.22d), para os ensaios de caracterização.

Figura 3.22 – Entrega, no LES da UNICAMP, dos blocos utilizados na pesquisa: a) descarregamento; b) blocos acomodados e protegidos com lona; c) amostra separada para transporte até a UFSCar; d) blocos acomodados no LSE da UFSCar.



a)



c)



d)



e)

Fonte: Autor (2021)

3.2.2 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Toda a caracterização dos blocos foi desempenhada nos laboratórios LMC e LSE da UFSCar. A execução dos ensaios seguiu as prescrições da ABNT NBR 12118:2013 e os resultados obtidos foram posteriormente confrontados com os requisitos estabelecidos pela ABNT NBR 6136:2016. O resumo dos testes realizados consta na Tabela 3.21.

Tabela 3.21 – Ensaios de caracterização dos blocos de concreto.

Componente	Ensaio	Parâmetros		Norma reguladora
		Tamanho de amostra* (n° de exemplares)	Idade (dias)	
	Análise dimensional	6	> 28	
Blocos de concreto	Determinação da umidade relativa, absorção de água e área líquida	6	> 28	ABNT NBR 12118:2013
	Resistência à compressão	6	28	

*Uma amostra para cada classe de resistência de bloco produzido.

Fonte: Autor (2021)

Ensaios de resistência à compressão também foram realizados pela própria empresa fabricante dos blocos, por volta dos 2 dias de idade e próximo aos 28 dias de idade de cada lote produzido e utilizado nesta pesquisa. Os resultados fornecidos pela fábrica estão no Anexo B desta tese.

Para facilitar a identificação dos blocos neste estudo, uma nomenclatura composta por letra maiúscula seguida de um número foi adotada. A letra refere-se ao componente em questão; neste caso, o bloco. O número faz menção à resistência nominal da unidade, em MegaPascal (6, 12 e 24). Dessa forma, têm-se blocos B6, B12 e B24. Antes dos ensaios, cada corpo de prova a ser testado foi identificado como CP1, CP2, CP3, e assim por diante.

A primeira investigação realizada correspondeu à inspeção visual dos blocos, na busca de trincas, fraturas ou outros defeitos que pudessem dificultar sua utilização ou inserir vícios nos resultados de caracterização.

Em seguida, iniciou-se a verificação de sua regularidade dimensional (Figura 3.23). Segundo a ABNT NBR 6136:2016, o termo “família de blocos” define um conjunto de componentes de alvenaria que interagem modularmente entre si e com outros elementos construtivos. Para este estudo, os blocos de concreto pertenceram à Família 15 × 40 e, por isso, deveriam atender às dimensões de 140 ± 2 mm para largura, 390 ± 3 mm para o comprimento igual, 190 ± 3 mm de altura.

Figura 3.23 – Análise dimensional dos blocos: a) largura em bloco 6 MPa; altura em bloco 12 MPa; comprimento em bloco 24 MPa .



a)



b)



c)

Fonte: Autor (2021)

As espessuras de parede dos blocos de concreto, dimensões de furos e raio de mísulas também foram analisadas (Figura 3.24). Para isso, levou-se em consideração a classificação prévia das unidades conforme a ABNT NBR 6136:2016, em função de valores de retração, absorção de água e resistência característica à compressão. Considerando as resistências nominais de 6, 12 e 24 MPa dos blocos utilizados nesta pesquisa, nota-se no Quadro 3.2 que estes pertencem às classes A, B, e C, respectivamente.

Figura 3.24 – Análise dimensional dos blocos: a) espessura parede longitudinal A; b) espessura parede longitudinal B; c) espessura parede transversal borda A; d) espessura parede transversal central; e) comprimento do furo; f) largura do furo; g) marcação; h) raio de mísulas.



Fonte: Autor (2021)

Quadro 3.2 – Classificação dos blocos vazados de concreto

Classificação	Classe	Resistência característica à compressão axial (MPa) ^a	Absorção%				Retração ^c (%)
			Agregado normal ^b		Agregado leve ^b		
			Individual	Média	Individual	Média	
Com função estrutural	A	$fbk \geq 8,0$	$\leq 9,0$	$\leq 8,0$	$\leq 16,0$	$\leq 13,0$	$\leq 0,065$
	B	$4,0 \leq fbk < 8,0$	$\leq 10,0$	$\leq 9,0$			
Com ou sem função estrutural	C	$fbk \geq 3,0$	$\leq 11,0$	$\leq 10,0$			

^a Resistência característica à compressão axial obtida aos 28 dias.

^b Blocos fabricados com agregado leve ou de densidade normal, conforme ABNT NBR 9935:2011.

^c Ensaio facultativo.

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6136:2016

As espessuras de parede para blocos vazados de concreto devem satisfazer os valores mínimos contidos no Quadro 3.3, de acordo com a classe de resistência das unidades. Cada dimensão apresentada possui uma tolerância de 1,0 mm.

Quadro 3.3 – Espessuras mínimas de paredes para blocos vazados de concreto segundo ABNT NBR 6136:2016.

Classe	Largura Nominal	Paredes longitudinais ^a	Paredes transversais	
			Paredes ^a (mm)	Espessura equivalente ^b (mm/m)
A	190	32	25	188
	140	25	25	188
B	190	32	25	188
	140	25	25	188
C	190	18	18	135
	140	18	18	135
	115	18	18	135
	90	18	18	135
	65	15	18	113

^a Média das medidas das paredes tomadas no ponto mais estreito.

^b Soma das espessuras de todas as paredes transversais aos blocos (em milímetros), dividida pelo comprimento nominal do bloco (em metros).

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6136:2016

Para os blocos das classes A e B (com função estrutural) a menor dimensão de furo deve ser maior ou igual a 70 mm quando a largura do bloco for 140 mm, e maior ou igual a 110 mm para blocos com largura 190 mm. As mísulas, que delimitam os cantos internos dos furos, também devem possuir raio mínimo de 20 mm para blocos classe C, e de 40 mm para blocos das classes A e B.

Concluída a análise dimensional, as propriedades de área líquida e absorção de água dos blocos foram determinadas por meio dos procedimentos detalhados no Item 5 da ABNT NBR 12118:2013 (Figura 3.25).

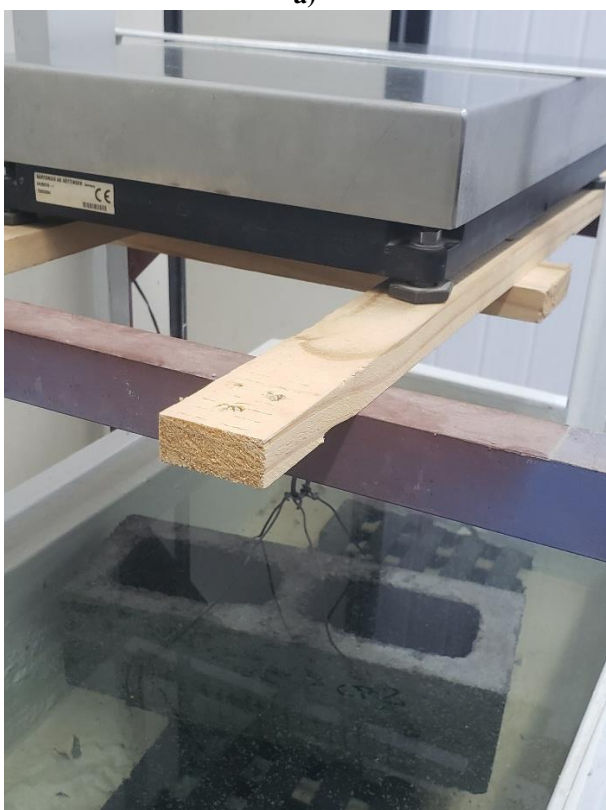
Figura 3.25 – Ensaio de absorção de água e determinação de área líquida: a) secagem em estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$; b) blocos imersos para saturação; c) pesagem bloco submerso; d) pesagem bloco saturado.



a)



b)



c)



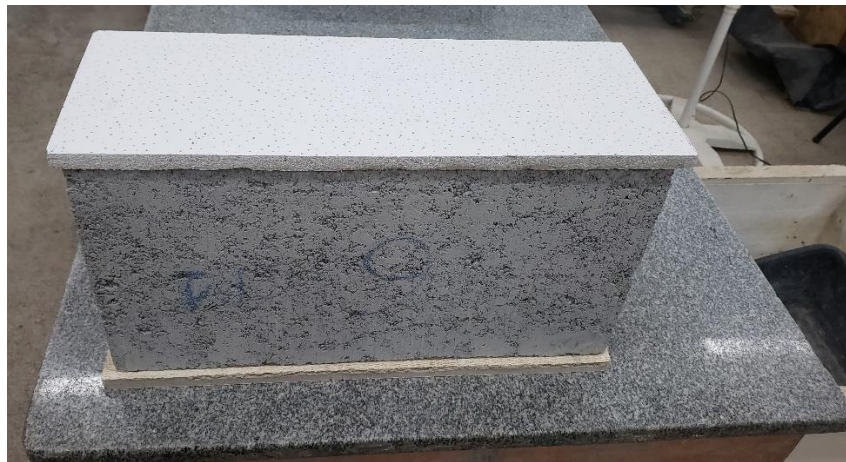
d)

Fonte: Autor (2021)

Na sequência, os blocos de concreto foram ensaiados à compressão, conforme o Item 6 da ABNT NBR 12118:2013. Antes dos ensaios, a umidade relativa de três unidades para cada traço foi mensurada. A propriedade representa a relação entre a massa de água contida no corpo de prova em condição de ensaio e a quantidade máxima de água que ele pode absorver. De acordo com o Item 6.2.3 da mesma norma, são considerados adequados para ensaio de resistência à compressão os blocos que possuam umidade relativa média de $(40 \pm 20) \%$ quando sua resistência específica característica for maior ou igual a 8 MPa, e $(25 \pm 15) \%$ quando possuírem resistência característica específica inferior a 8 MPa.

Para garantir que a aplicação de carga ocorra uniformemente ao longo da superfície dos blocos, estas devem ser regularizadas. A ABNT NBR 12118:2013 recomenda o uso de pastas de concreto e argamassas, desde que suportem as tensões de ensaio e a espessura não exceda 3 mm. A norma admite ainda a regularização por meio de retífica e do capeamento com enxofre. Neste estudo, adotou-se o capeamento do tipo seco, com chapas do forro de fibra mineral, também conhecido como “forro-pacote” (Figura 3.26).

Figura 3.26 – Capeamento do bloco com placas de forro de fibra mineral.



Fonte: Autor (2021)

Segundo Fortes (2012), o capeamento com pasta de cimento é um procedimento lento, que requer cuidado e prática por parte do laboratorista. Sua substituição por outro capeamento, do tipo seco, pode representar melhora no tempo e facilidade de execução; além de menor dependência da experiência do executor. Neste trabalho, a principal justificativa para a adoção do forro-pacote foi a dificuldade prevista para a execução do capeamento com pasta de cimento nos prismas de concreto que tenham sido submetidos às mais altas temperaturas, eventualmente friáveis e consideravelmente degradados. Para uniformizar o procedimento entre blocos e prismas, aquecidos e testados em temperatura ambiente, optou-se por empregar desde o início as chapas de forro de fibra mineral.

Após serem capeados, os blocos de concreto foram levados à prensa para ruptura. A prensa universal de ensaios utilizada para a compressão dos blocos foi da marca EMIC, modelo PC 200 CS. A máquina possui capacidade de carga de 200 toneladas (200 MN), resolução de leitura de 0,1 kN (10 kgf) e automação pelo software TESC. A execução do ensaio de compressão nos blocos de concreto é ilustrada pela Figura 3.27.

Nesse caso, a taxa do carregamento aplicado correspondeu a $(0,15 \pm 0,03)$ MPa/s para os corpos de prova de resistência nominal superior a 8 MPa (blocos 12 e 24 MPa) e $(0,05 \pm 0,01)$ MPa/s para as unidades com resistências nominais inferiores a 8 MPa (bloco 6 MPa), conforme especificado no Item 6.2.5 da ABNT NBR 12118:2013.

Figura 3.27 – Ensaio de resistência à compressão nos blocos de concreto: a) centralização do bloco na placa de ensaio; b) bloco centralizado; c) início de ensaio; d) final do ensaio.



a)



b)



Fonte: Autor (2021)

3.2.3 PRODUÇÃO DAS ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO

Nesta pesquisa foram investigados dois tipos de argamassa para assentamento. O primeiro tipo correspondeu à argamassa convencional, composta por cimento, cal e areia. Para este tipo, as classes de resistência de 5, 10 e 20 MPa foram obtidas com as dosagens exibidas na Tabela 3.18.

O segundo tipo correspondeu à argamassa industrializada, sem cal e com aditivos. Três argamassas industrializadas e ensacadas foram consideradas neste estudo. Para a classe de 5 MPa, utilizou-se a argamassa MATRIX 1202 – Assentamento Estrutural 5 MPa da empresa Votorantim Cimentos (Figura 3.28a). Para a classe de 10 MPa, utilizou-se a MATRIX 1204 – Assentamento Estrutural 10 MPa do mesmo fornecedor (Figura 3.28b). Ambas as argamassas foram produzidas na unidade de Cajamar-SP entregues em sacos de 50 kg pela própria empresa no LES da UNICAMP. São compostas por uma mistura de areias provenientes de rocha calcária, areia de quartzo (silicosa), cimento Portland, aditivo retentor de água à base de éter de celulose e superplastificantes. Para cada embalagem de 50 kg das argamassas industrializadas

de 5 e 10 MPa considerou-se a adição de 7,5 litros de água (relação água/materiais de 0,15), sendo essa a quantidade mínima especificada pelo fabricante.

Para a classe de 20 MPa, utilizou-se a argamassa ensacada da empresa Argafácil de Descalvado, situada em Descalvado-SP. Trata-se de uma argamassa que conta com cimento Portland do Tipo CPV, uma mistura de três areias advindas da própria região e aditivos. A argamassa de Descalvado-SP também é entregue em sacos de 50 kg (Figura 3.28c). Contudo, ao contrário das argamassas de 5 e 10 MPa cujos sacos acomodavam misturas secas de todos os constituintes, na embalagem de argamassa industrializada 20 MPa havia aproximadamente 39,9 kg de uma mistura de areias ainda úmidas e um saco separado contendo cerca de 10,1kg de cimento anidro, já misturado aos aditivos. Para cada 50 kg da argamassa industrializada de 20 MPa considerou-se adição de 5,5 litros de água (relação água/materiais igual a 0,11), quantidade mínima especificada pelo fabricante.

Figura 3.28 – Argamassas de assentamento industrializadas: a) 5 MPa; b) 10 MPa; c) 20 MPa.

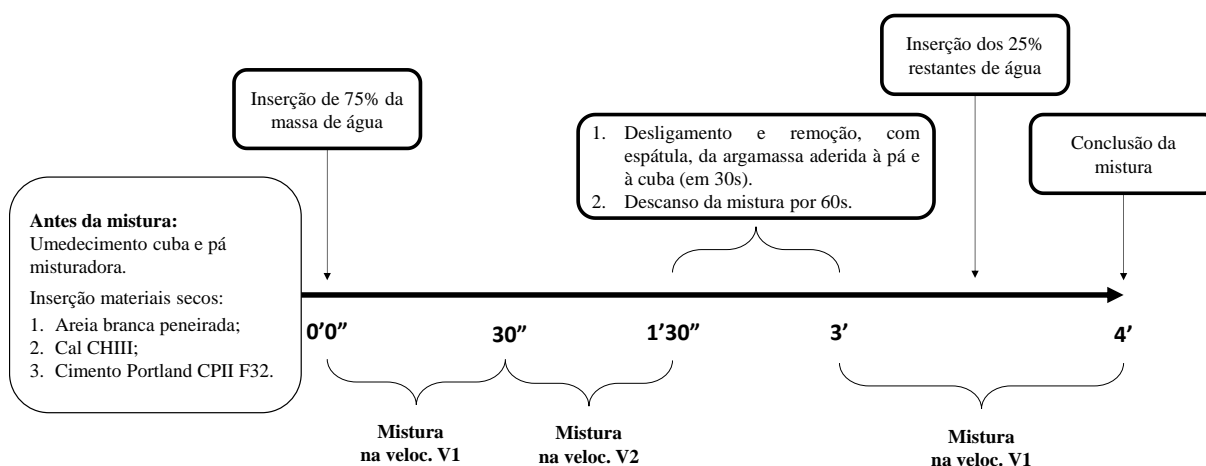


Fonte: Site Votorantim cimentos (2023) e Autor (2021).

Para facilitar a identificação durante os ensaios de caracterização das argamassas de assentamento, estabeleceu-se a seguinte nomenclatura: duas letras maiúsculas seguidas de um número. A primeira era “A” e identificava o componente argamassa. A segunda letra era “C” quando a argamassa de assentamento fosse convencional com cal e “I” quando a argamassa de assentamento fosse industrializada. Em seguida, o número 5, 10 ou 20 representava a classe de resistência da argamassa. Dessa forma foram testadas: AC5, AC10, AC20, AI5, AI10 e AI20.

As argamassas foram produzidas em misturador mecânico, com movimento planetário de pá metálica, capacidade volumétrica útil de 4 litros e duas velocidades de rotação (V1 - baixa e V2 - alta). O procedimento de mistura, correspondeu à uma adaptação do proposto na ABNT NBR 7215:2019 (Figura 3.29), com duração total de 4 minutos.

Figura 3.29 – Procedimento de mistura das argamassas utilizadas nesta pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

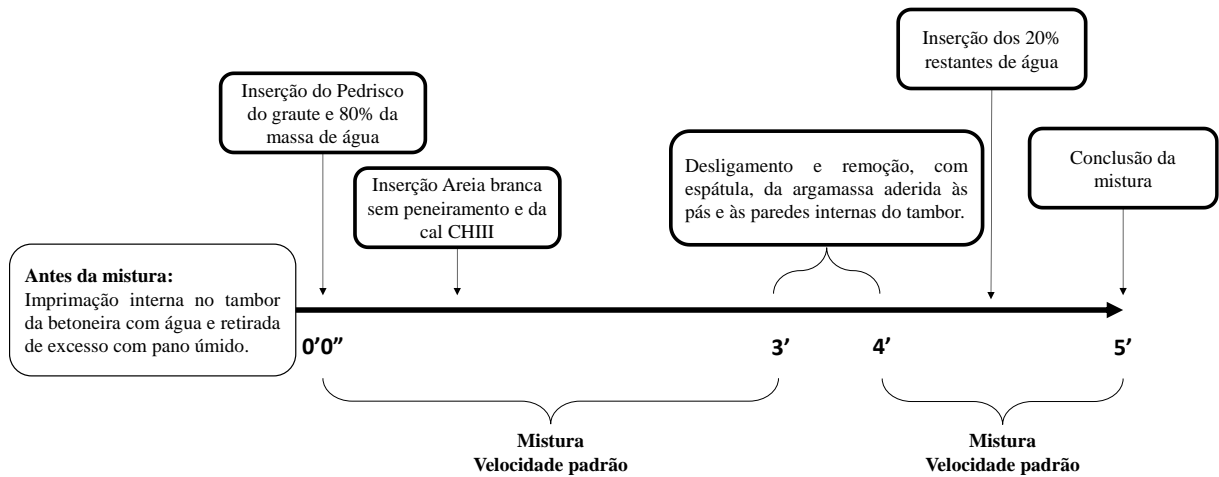
Após as misturas foram realizados os ensaios de caracterização do estado fresco e a moldagem dos corpos de prova para caracterização no estado endurecido.

3.2.4 PRODUÇÃO DOS GRAUTES

Para caracterização dos grautes convencionais foram reproduzidos os traços definitivos contidos na Tabela 3.19, com resistências esperadas maiores ou iguais a 15, 25 e 35 MPa. Os grautes foram produzidos com uso de uma betoneira com capacidade de 150 litros, no LMC da UFSCar. O procedimento de mistura adotado é ilustrado pela **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e Figura 3.31.

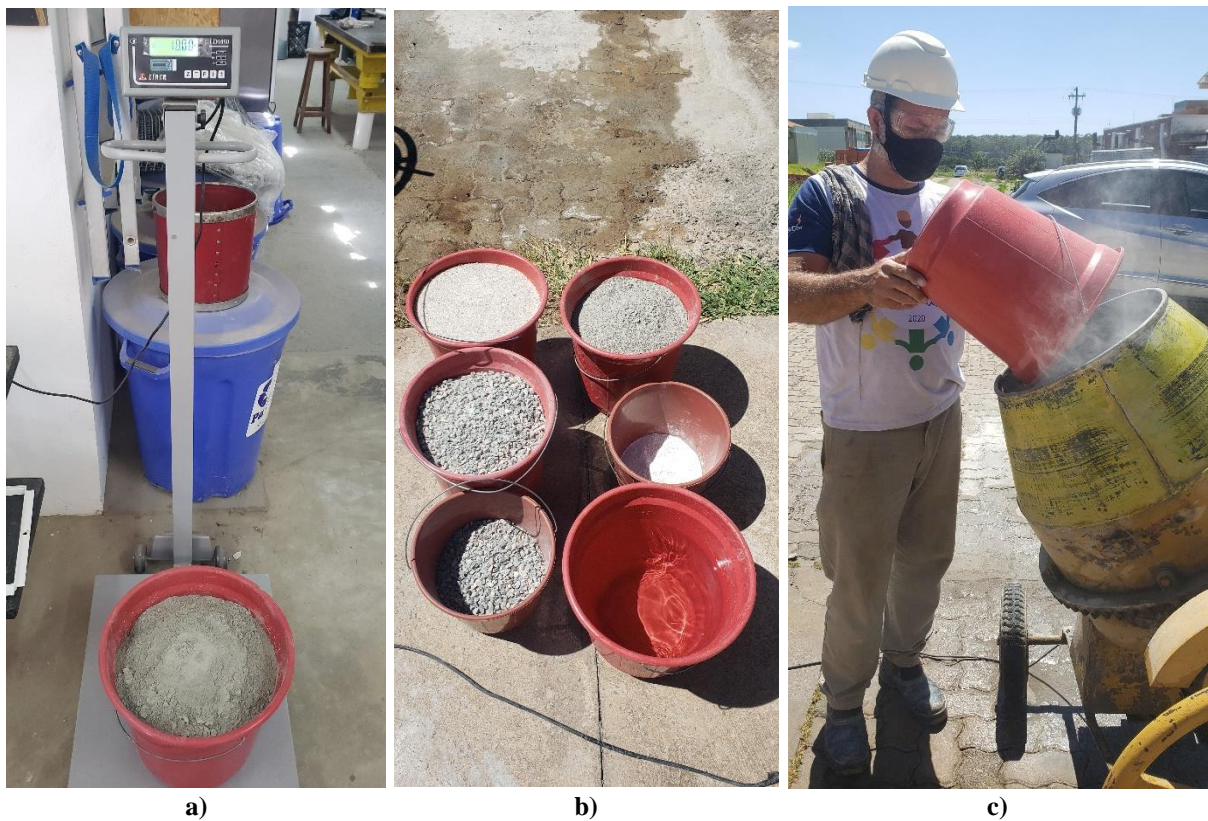
Quanto à identificação dos grautes, adotou-se nomenclatura configurada por uma letra, seguida de um número. A letra (G) representa o componente da alvenaria a ser testado, o “graute”; enquanto o número representa sua resistência nominal. Desse modo, têm-se nesta pesquisa grautes G15, G25 e G35.

Figura 3.30 – Procedimento de mistura dos grautes utilizados nesta pesquisa.



Fonte: Autor (2022).

Figura 3.31 – Mistura dos grautes: a) pesagem do cimento Portland CII F32; b) materiais pesados; c) inserção da areia branca sem peneiramento durante a mistura.



Fonte: Autor (2022).

De modo semelhante às argamassas, após a mistura dos grautes foram realizados os ensaios de caracterização do estado fresco e a moldagem de exemplares para caracterização no estado endurecido. Durante o processo, as condições ambientais de temperatura e umidade relativa foram medidas.

3.2.5 ARGAMASSAS E GRAUTES: ENSAIOS NO ESTADO FRESCO E MOLDAGENS PARA TESTES NO ESTADO ENDURECIDO

Logo após serem misturados, as argamassas e os grautes tiveram suas propriedades no estado fresco determinadas conforme o Quadro 3.4. A execução dos ensaios para alguns tipos dentre os testados é elucidada pela Figura 3.32.

Quadro 3.4 – Caracterização dos grautes e das argamassas no estado fresco.

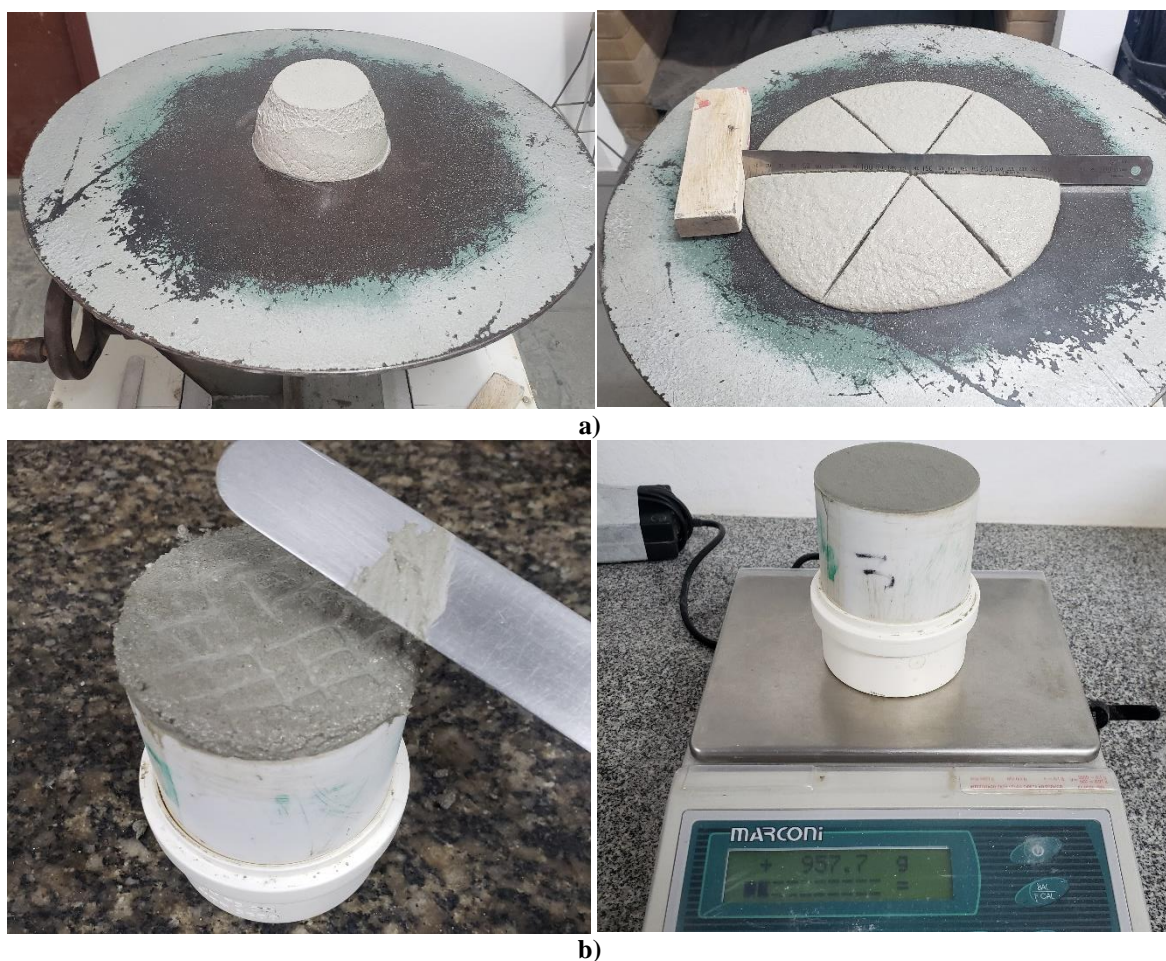
Ensaio ^a	Norma reguladora	Componente testado		Determinações ^b
		Grautes	Argamassas	
Determinação do índice de consistência	ABNT NBR 13276:2016		✓	3
Determinação da retenção de água	BS EN 413-2:2016		✓	2
Determinação da densidade de massa	ABNT NBR 13278:2005		✓	2
Determinação do abatimento de tronco de cone	ABNT NBR NM 67:1998	✓		2

^aO preparo das misturas para ensaio seguiu as recomendações da ABNT NBR 16541:2016.

^bn° de determinações para cada mistura realizada.

Fonte: Autor (2022)

Figura 3.32 – Ensaio de argamassas e grautes no estado fresco: a) índice de consistência AC5; densidade de massa AC10; c) retenção de água AI10; d) abatimento em tronco de cone G25; e) medida abatimento G25; f) medição da temperatura e umidade relativa.

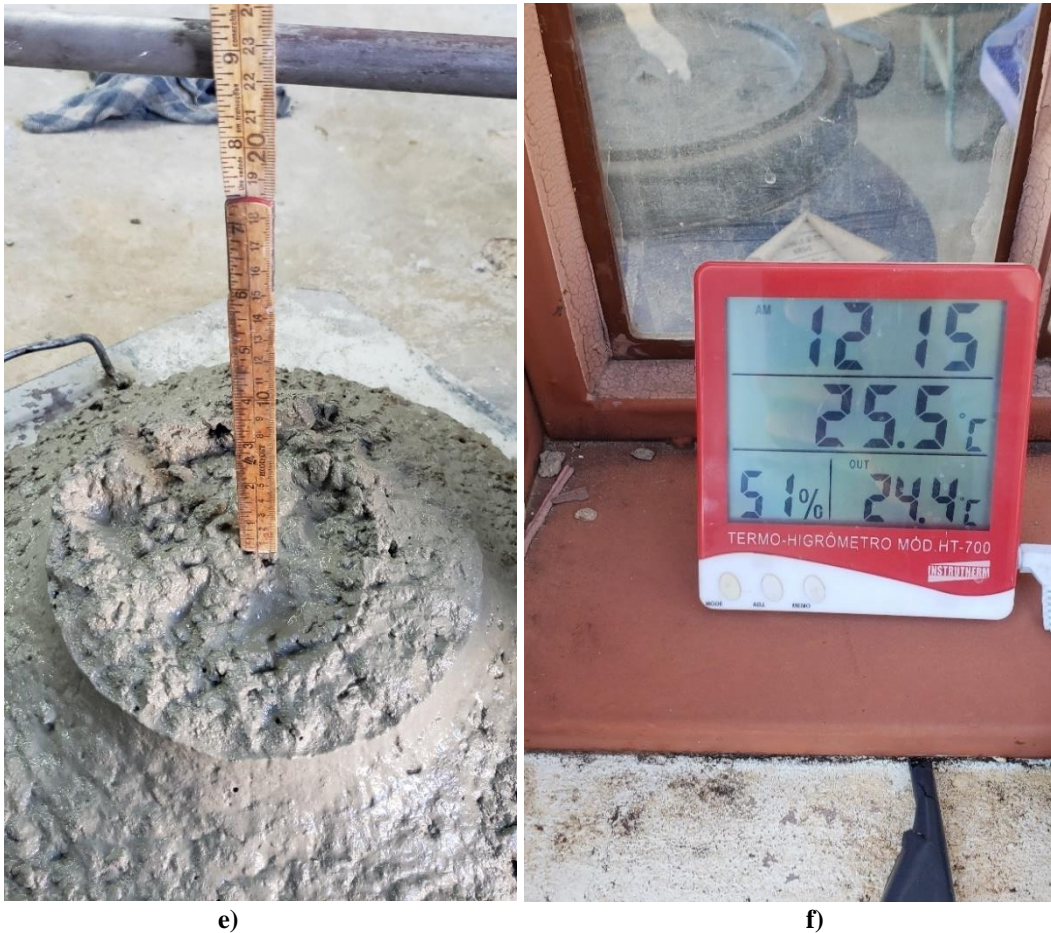




c)



d)



Fonte: Autor (2022)

Na sequência, foram realizadas as moldagens de corpos de prova para os ensaios de caracterização no estado endurecido das argamassas e dos grautes. Para as argamassas foram conformados corpos de prova cilíndricos ($\text{Ø } 50 \times 100 \text{ mm}$); corpos de prova cúbicos (aresta 40 mm) e corpos de prova prismáticos ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$). Para os grautes foram moldados apenas corpos de prova cilíndricos ($\text{Ø } 100 \times 200 \text{ mm}$).

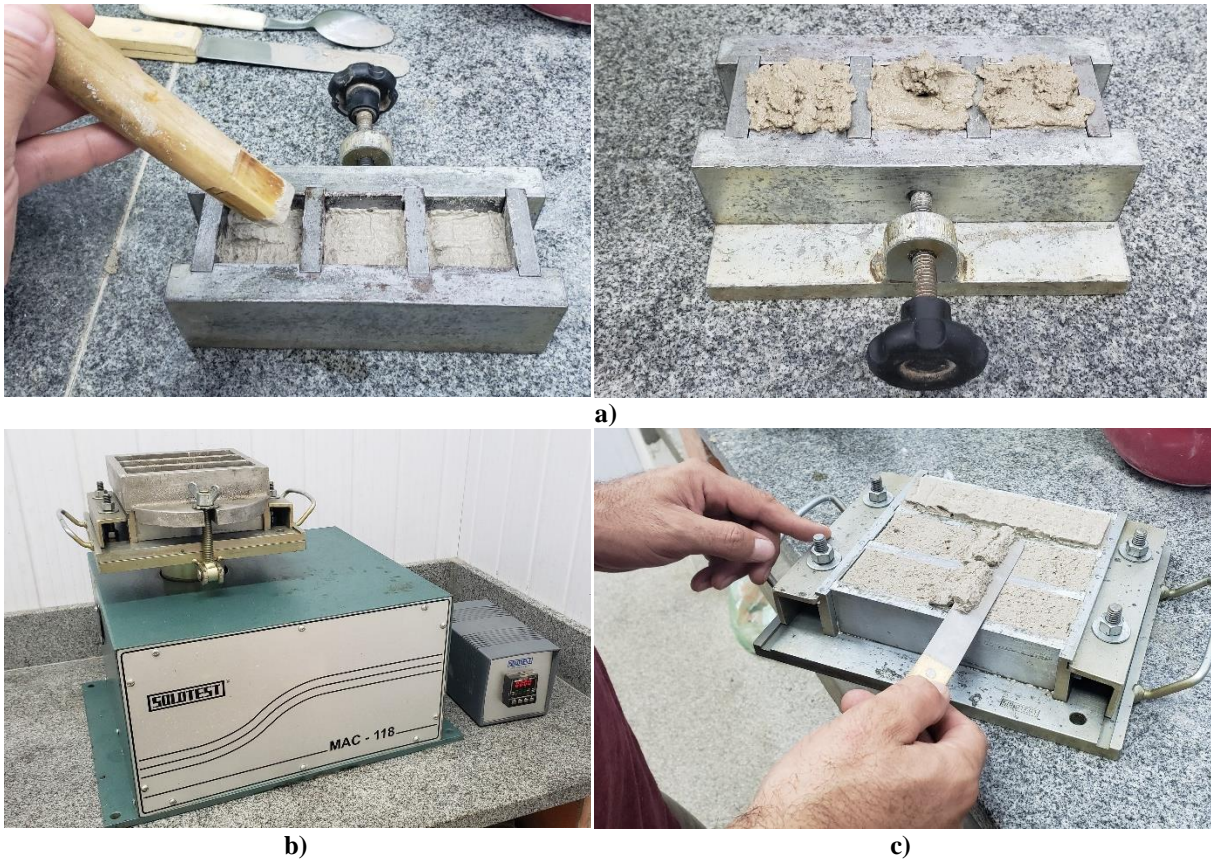
O adensamento dos corpos de prova cilíndricos ocorreu de forma manual, tanto para as argamassas quanto para os grautes. Os moldes de argamassa foram preenchidos em 4 (quatro) camadas, com 30 golpes de soquete metálico em cada camada, conforme ABNT NBR 7215:2019. Os cilindros de graute foram preenchidos em 2 camadas, com 12 golpes de haste metálica em cada camada, conforme ABNT NBR 5738:2015 (Figura 3.33d). Os corpos de prova cúbicos de argamassa (aresta 40 mm) foram adensados manualmente, em 2 camadas, com 30 golpes por camada e uso de soquete em madeira, conforme especificações da ABNT NBR 16868-2:2020 (Figura 3.33a). Os corpos de prova prismáticos de argamassa ($40 \times 40 \times 160 \text{ mm}$) foram preenchidos em 2 camadas (Figura 3.33c) e adensados em mesa de

adensamento (Figura 3.33b) com automação das quedas (1 queda/segundo, durante 30 segundos).

Como desmoldante, utilizou-se óleo utilizado em máquinas hidráulicas, aplicado com pincel. Após a aplicação, os moldes foram vertidos sobre papel absorvente e mantidos assim até a remoção do excesso (Figura 3.33f).

Logo após a moldagem, as fôrmas de argamassas e de grautes foram cobertas por plástico-filme para evitar a perda da água de hidratação (Figura 3.33e e Figura 3.33g). A desmoldagem ocorreu com 3 dias de idade e a cura dos corpos de prova de argamassa, até a data de ensaio (28 dias), foi realizada sobre bancada (Figura 3.33h), dentro do laboratório. Para os grautes a cura ocorreu por submersão em tanque com solução saturada de cal (Figura 3.33i).

Figura 3.33 – Moldagem e cura de argamassas e grautes: a) adensamento em molde cúbico de argamassa; b) mesa automatizada para adensamento de argamassas; c) preenchimento de molde prismático com argamassa; d) adensamento corpos de prova cilíndricos de graute; e) corpos de prova de argamassa vedados com plástico filme; f) retirada de excesso de desmoldante; g) corpos de prova de graute vedados com plástico filme; h) cura das argamassas sobre bancada; i) cura submersa dos grautes.





d)



e)



f)



g)

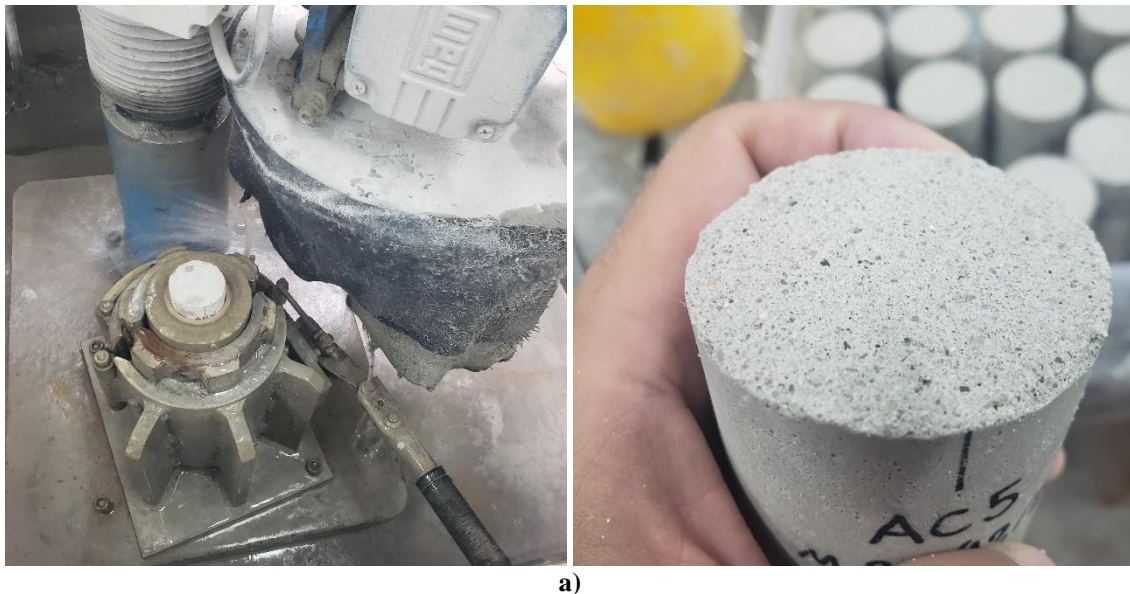


Fonte: Autor (2022)

3.2.6 ARGAMASSAS E GRAUTES: CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Amstras suficientes de argamassas e grautes foram produzidas, curadas e desmoldadas de forma a atender aos ensaios e n° de repetições elencados no Quadro 3.5. Antes dos ensaios, as superfícies de carga dos corpos de prova cilíndricos foram retificadas (Figura 3.34). As saliências existentes nas arestas dos corpos de prova cúbicos e prismáticos de argamassa foram eliminadas com uso de lima e de lixa.

Figura 3.34 – Retificação das superfícies de aplicação de carga: a) em argamassas; b) em grautes.





b)
Fonte: Autor (2022)

Quadro 3.5 – Caracterização de argamassas e grautes no estado endurecido.

Ensaio ^a		Norma reguladora	Componente testado		Determinações ^e
			Graute	Argamassa	
Propriedades mecânicas	Determinação da resistência à compressão	ABNT NBR 5739:2018 ^b	✓		6
		ABNT NBR 7215:2019 ^c		✓	6
		ABNT NBR 13279:2005 ^d		✓	6
		ABNT NBR 16868-2:2020 ^e		✓	6
	Determinação dos módulos de deformação	ABNT NBR 8522-1:2021 ^{b,c}	✓	✓	4
	Determinação da resistência à tração por compressão diametral	ABNT NBR 7222:2011 ^{b,c}	✓	✓	3
	Determinação da resistência à tração na flexão	ABNT NBR 13279:2005 ^f		✓	3
Propriedades físicas	Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica	ABNT NBR 9778:2005 ^g	✓	✓	3

^a Todos os ensaios dos componentes no estado endurecido foram realizados aos 28 dias de idade dos corpos de prova.

^b Corpos de prova cilíndricos Ø100 x 200 mm para grautes.

^c Corpos de prova cilíndricos Ø50 x 100 mm para argamassas.

^d Metades dos corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

^e Corpos de prova cúbicos de aresta 40 mm.

^f Corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

^g n° de determinações para cada mistura realizada.

Fonte: Autor (2022)

O módulo de deformação secante foi tomado entre 5 e 30% da tensão última, com o auxílio de extensômetros do tipo *clipgagem*, de configuração dupla. A prensa utilizada para determinar as propriedades mecânicas das argamassas e grautes no estado endurecido foi da marca EMIC; autoportante, modelo DL-60000. Possui capacidade de carga de 60 toneladas (600 kN), com controle pelo software TESC. Os ensaios de caracterização das argamassas e grautes no estado endurecido são ilustrados pela Figura 3.35 e Figura 3.36, respectivamente.

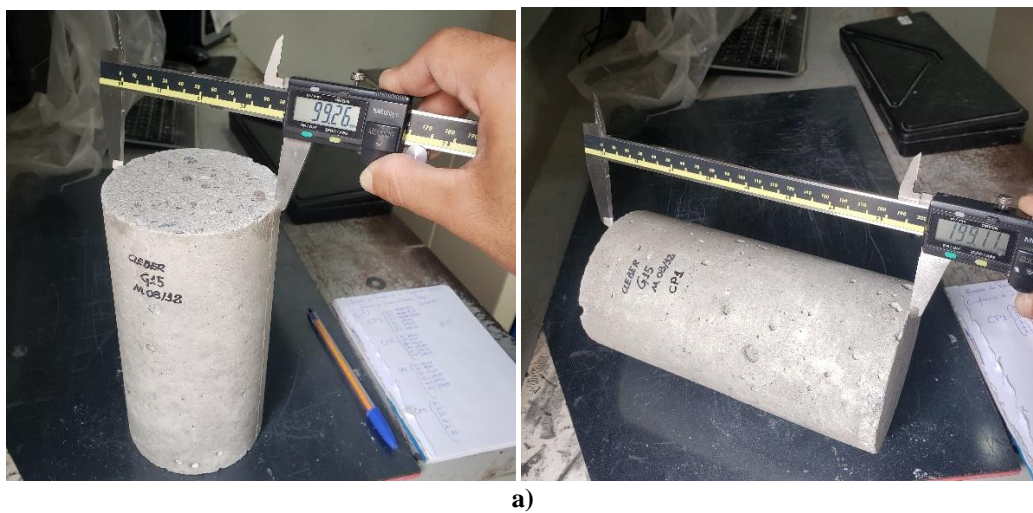
Figura 3.35 – Execução dos ensaios de caracterização de argamassas no estado endurecido: a) compressão cilindro; b) módulo de deformação; c) tração por compressão diametral; d) tração na flexão e compressão das metades resultantes; e) compressão cubo aresta 40 mm; f) absorção de água, vazios e massa específica.





Fonte: Autor (2022)

Figura 3.36 – Execução dos ensaios de caracterização de grautes no estado endurecido: a) conferência dimensional; b) resistência à compressão; c) módulo de deformação; d) tração por compressão diametral; e) absorção de água, vazios e massa específica.



a)



b)



c)



d)



e)

Fonte: Autor (2022)

3.2.7 ARGAMASSAS E GRAUTES: MOLDAGENS PARA AQUECIMENTO E DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS

Concluída a caracterização das argamassas e grautes nos estados fresco e endurecido, deu-se início às moldagens de corpos de prova para submissão a altas temperaturas e posterior determinação das propriedades mecânicas residuais. As argamassas foram moldadas no LMC da UFSCar e os grautes no LES da UNICAMP.

Nesta etapa, misturas determinadas pelos traços da Tabela 3.18 (para as argamassas) e Tabela 3.19 (para os grautes) foram reproduzidas seguindo os procedimentos detalhados na Figura 3.29 e Figura 3.30, respectivamente.

Para a moldagem dos grautes, foram seguidas as prescrições da RILEM TC 200-HTC:2007 Part 2. Para moldar as argamassas, a mesma norma foi tomada como referência, com alteração na forma de adensamento. Para cada traço de graute (G15, G25 e G35) foram produzidos 30 corpos de prova cilíndricos de dimensões $\text{Ø}100 \times 300$ mm (proporção diâmetro:altura igual à 1:3), totalizando 90 exemplares. Fôrmas metálicas prontas e em conformidade com a geometria requerida pela norma RILEM TC 200-HTC:2007 Part 2 foram utilizadas para obter os corpos de prova de graute. Na ausência de moldes prontos para as argamassas, estes foram produzidos. Tubos em PVC para água fria, com diâmetro externo 60 mm e interno de aproximadamente 53 mm foram cortados em segmentos de 160 mm, atendendo a proporção “diâmetro interno: altura” de 1:3. Para permitir seu preenchimento, discos circulares extraídos de placas de acrílico (com serra copo) foram utilizados como tampas. Sua fixação ocorreu por simples encaixe e pressão, sendo facilitada pelo desgaste das bordas de um dos lados do disco com auxílio de uma lima. Amostras com 30 corpos de prova $\text{Ø}53 \times 160$ mm foram produzidas para cada traço de argamassa (Figura 3.37a).

O adensamento dos grautes foi realizado em mesa vibratória (Figura 3.37b), conforme RILEM TC 200-HTC:2007 Part 2. Em função da forma como a tampa dos moldes de argamassa foram fixados, optou-se pelo adensamento manual, sendo 4 camadas e 30 golpes de soquete metálico para cada camada, tal como proposto pela ABNT NBR 7215:2019.

Os corpos de prova de graute permaneceram de 5 a 7 dias dentro dos moldes, cobertos por plástico filme (Figura 3.37c). Após isso, a cura foi concluída sem imersão em água e dentro do ambiente de laboratório. Para as argamassas, o tempo de permanência dentro dos moldes foi maior (ao menos 14 dias, seguido de cura no interior do laboratório como ilustrado na Figura 3.37d), a fim de garantir resistência suficiente para desmoldagem com auxílio da prensa hidráulica. Para viabilizar o reaproveitamento das fôrmas de argamassa 1:3 e evitar sua abertura, os corpos de prova já curados foram expulsos por compressão.

Figura 3.37 – Moldagens corpos de prova cilíndricos 1:3 para ensaios de altas temperaturas: a) corpos de prova de argamassas durante cura; b) adensamento de grautes em mesa vibratória; c) moldes de graute vedados com plástico filme; d) cura dos corpos de prova de graute dentro do laboratório.



a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2022)

3.3 ETAPA 3 - MONTAGEM DOS PRISMAS

A montagem de todos os prismas da pesquisa aconteceu no LES e LMC da FEC/UNICAMP. Foram moldadas as combinações e as quantidades descritas no Quadro 3.6. As amostras de prismas foram identificadas por uma nomenclatura que consistiu na associação de duas siglas: a primeira associada ao tipo de bloco (B6, B12, B24); e a segunda associada ao tipo de argamassa empregado (AC5, AC10, AC20, AI5, AI10, AI20).

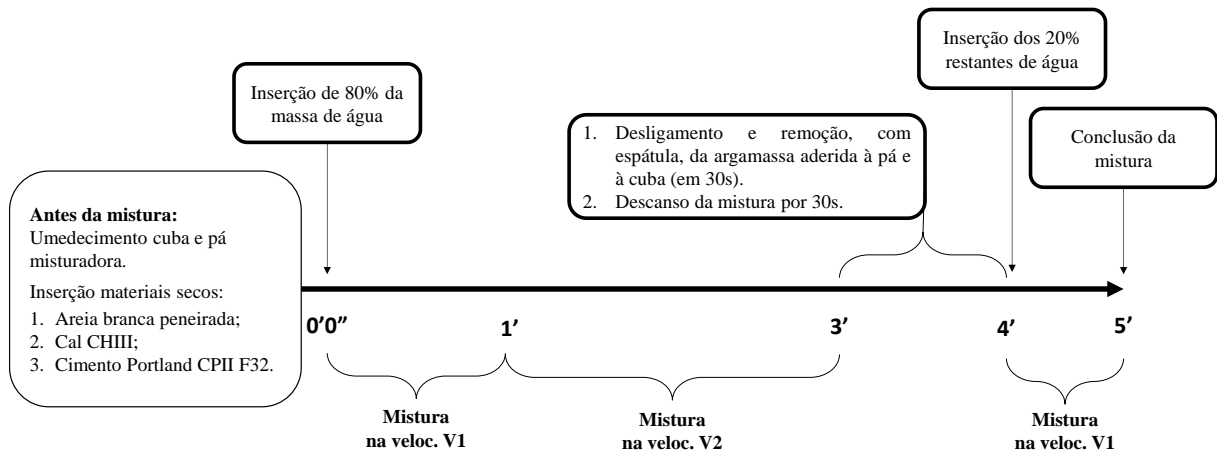
Quadro 3.6 – Combinações de prismas moldados.

Identificação	Combinação	Prismas moldados
B6 AC5	Bloco 6 MPa – Argamassa de assentamento convencional de 5 MPa, com cal.	30
B12 AC10	Bloco 12 MPa – Argamassa de assentamento convencional de 10 MPa, com cal.	30
B24 AC20	Bloco 24 MPa – Argamassa de assentamento convencional de 20 MPa, com cal.	30
B6 AI5	Bloco 6 MPa – Argamassa de assentamento industrializada de 5 MPa, sem cal e com aditivos.	30
B12 AI10	Bloco 12 MPa – Argamassa de assentamento industrializada de 10 MPa, sem cal e com aditivos.	30
B24 AI20	Bloco 24 MPa – Argamassa de assentamento industrializada de 20 MPa, sem cal e com aditivos.	30
TOTAL		180

Fonte: Autor (2022)

A montagem dos prismas com blocos de concreto seguiu as recomendações fornecidas pelo Itens 6.2.2 a 6.2.4 da ABNT NBR 16868-3:2020. Os elementos foram construídos por 2 unidades sobrepostas (blocos estruturais de concreto 140 × 390 × 190 mm) e unidas por junta argamassada. A espessura da junta foi igual a 10 mm, sendo controlada pela constante medição por trena e criação de um gabarito; mais especificamente filete de borracha suficientemente rígida e cortada na espessura desejada. Os prismas não contaram com revestimento e foram assentados com argamassamento total, ou seja, argamassa aplicada no topo de todas as paredes do bloco inferior (longitudinais e transversais).

A mistura das argamassas para assentamento de prismas foi realizada em um misturador mecânico, de movimento planetário, pá metálica, dotado de três velocidades e com cuba de capacidade volumétrica igual a vinte litros. O procedimento exposto pela Figura 3.29 foi ajustado em função do desempenho do misturador disponível e do conhecimento empírico adquirido pelo técnico atuante no laboratório, também responsável por supervisionar a execução dos ensaios. Os tempos e velocidades de rotação efetivamente adotados na mistura das argamassas de assentamento dos prismas são ilustrados pela Figura 3.38.

Figura 3.38 – Procedimento de mistura das argamassas de assentamento dos prismas.

Fonte: Autor (2022).

A fim de aproximar os procedimentos adotados neste estudo da realidade praticada no mercado da construção e evitar que erros na execução causados pela ausência de qualificação técnica viessem a interferir nos resultados obtidos, uma construtora atuante na cidade de Campinas-SP e com experiência em construções de alvenaria estrutural foi contratada para o assentamento dos prismas. A execução do serviço é ilustrada pela Figura 3.39.

Durante o assentamento dos prismas a consistência das argamassas foi medida conforme ABNT NBR 13276:2016. Medições foram tomadas no início (imediatamente após a mistura) e no final (com o resto da bandeja utilizada pelo pedreiro) de utilização de cada mistura. As determinações ocorreram tanto no período da manhã quanto da tarde, com registro das condições ambientais. Segundo os resultados obtidos por Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015), tempos de utilização superiores a quarenta minutos afetam significativamente a consistência e trabalhabilidade da argamassa fresca, sobretudo de argamassas industrializadas. Tendo em vista tal informação, evitou-se que a soma de materiais secos para mistura das argamassas de assentamento excedesse 10 kg. Para evitar a evaporação da água de amassamento, durante a exposição ao sol, as bandejas contendo argamassa foram cobertas com panos úmidos (Figura 3.39e). Dessa forma, foi possível garantir uma média de 37 minutos para o tempo de utilização de todos os seis traços e um decréscimo de consistência que não superasse os 20 mm.

Após determinar o índice de consistência, algumas das misturas foram utilizadas para moldagem de corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm). Posteriormente, os prismas de argamassa seriam testados em dois momentos: aos 28 dias após as moldagens e, durante a submissão à altas temperaturas.

Todos os prismas foram assentados sobre lajes de concretos previamente niveladas (Figura 3.39f). Contudo, em função de pequenas irregularidades em suas superfícies, o nível (Figura 3.39c) e o prumo (Figura 3.39d) de cada prisma foi verificado. Quando notada a necessidade, calços de madeira foram utilizados.

Corpos de prova adicionais, cúbicos e prismáticos, foram moldados com as argamassas utilizadas nos prismas para realização de ensaios de controle aos 28 dias (resistência à tração na flexão e resistência à compressão) e, posteriormente, na idade de queima dos prismas. Esses últimos tiveram por finalidade uma inferência da resistência atingida pela argamassa nas juntas dos prismas quando fossem submetidos às altas temperaturas e tivessem suas propriedades mecânicas residuais determinadas.

Figura 3.39 – Assentamento dos prismas com blocos de concreto: a) mistura das argamassas; b) determinação da consistência; c) conferência espessura de junta; d) conferência de prumo; e) pano úmido sobre argamassa; f) prismas moldados.





d)

e)



f)

Fonte: Autor (2022)

3.4 ETAPA 4 - SUBMISSÃO DAS ARGAMASSAS, GRAUTES E PRISMAS ÀS ALTAS TEMPERATURAS

Todos os ensaios envolvendo altas temperaturas foram realizados no LMC e LES da FEC/UNICAMP. Para a queima das argamassas e dos grautes fez-se uso de um forno elétrico do tipo mufla, modelo ML 1300/60, produzido pela empresa Fortelab Fornos Técnicos de Laboratório Ltda. em São Carlos-SP (Figura 3.40). O equipamento possui alimentação trifásica 220 V, potência de 32 kW, capacidade volumétrica de 60 litros e de aquecimento até 1300 °C. Externamente é revestido por chapas de inox e internamente possui isolamento com placas rígidas e espessas de fibra cerâmica. O controle da temperatura é realizado pela associação de um termopar de ponta (tipo K) em seu interior que alimenta uma central digital que permite programar diferentes regimes de aquecimento.

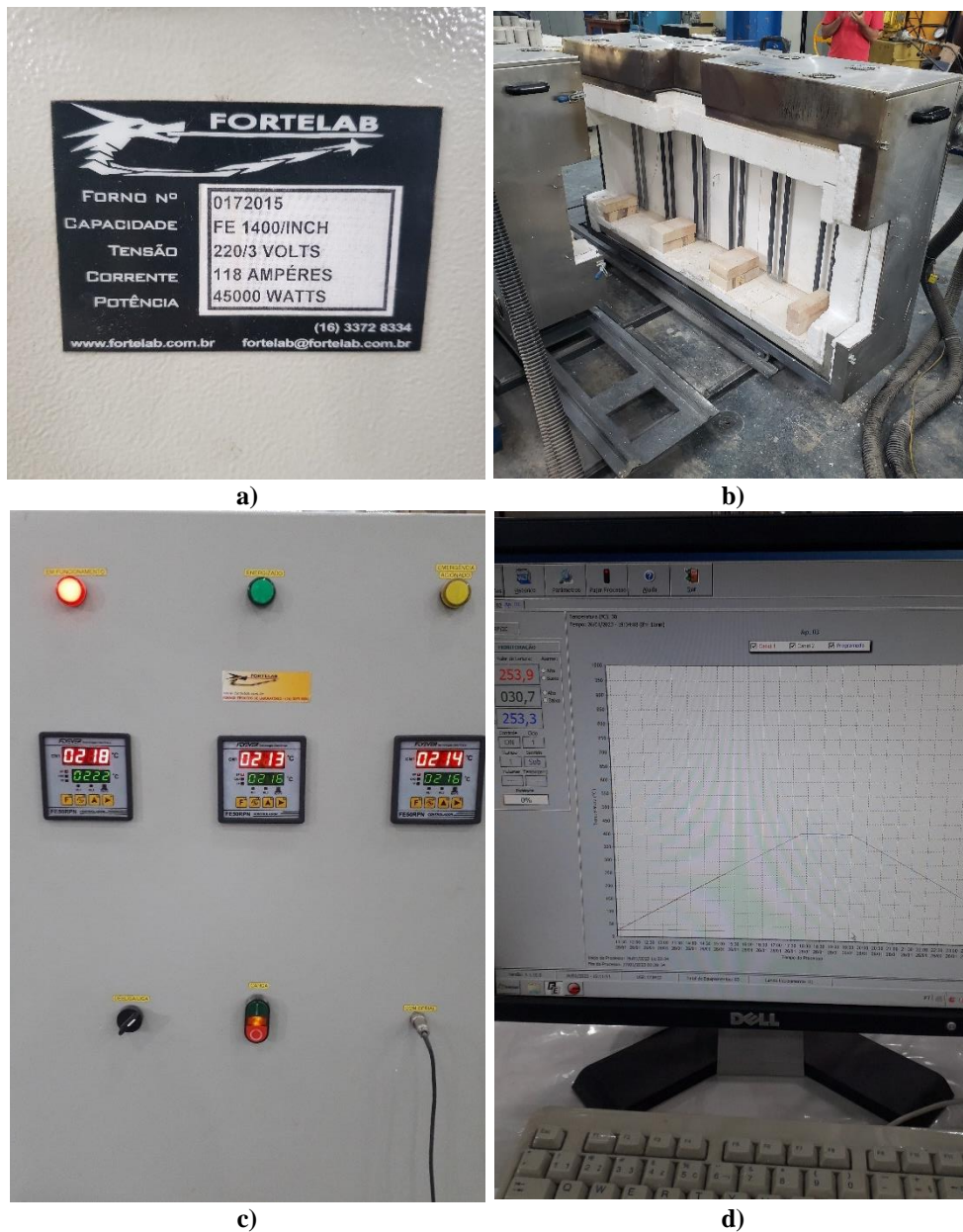
A queima dos prismas ocorreu em um forno horizontal, com abertura lateral e portas deslizantes, modelo FE 1400/INCH produzido pela mesma empresa (Figura 3.41). É alimentado com tensão trifásica 220 V e possui potência de 45 kW, distribuída em 12 resistências de barras paralelas e espaçadas 15 cm entre si. Também é revestido externamente por inox e internamente com placas rígidas de fibra cerâmica. O controle da temperatura no forno horizontal é realizado em três zonas de aquecimento distintas. Cada zona possui um termopar de ponta (tipo K) para medição de temperatura e uma central digital para programação do aquecimento.

Figura 3.40 – Forno mufla empregado nas queimas de argamassas e grautes: a) visão frontal do forno; b) controlador digital; c) interior do forno em temperatura ambiente; d) resistências aquecidas.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.41 – Forno horizontal usado na queima dos prismas: a) especificações do forno; b) metade deslizante e interior do forno; c) painel com controladores digitais das três zonas; d) software para gerenciamento do processo.



Fonte: Autor (2022)

Antes de serem efetivamente aquecidos, as argamassas, os grautes e os prismas foram curados por ao menos 90 dias e mantidos dentro do ambiente de laboratório por ao menos 15 dias, considerado o suficiente para estabilização da umidade (Medeiros; Parsekian; Moreno Jr, 2022).

Para transporte dos prismas até o interior dos laboratórios, produziu-se um dispositivo de travamento de modo a evitar seu descolamento e seccionamento nas juntas (Figura 3.42). O equipamento consiste, basicamente, em duas placas de madeirite (comumente utilizado na

confeção de fôrmas para concreto armado) unidas por ligação passante de barras roscadas presas com porcas em suas extremidades. Após serem inseridos sobre a primeira placa, os prismas eram comprimidos pela placa superior e travados com o aperto das porcas.

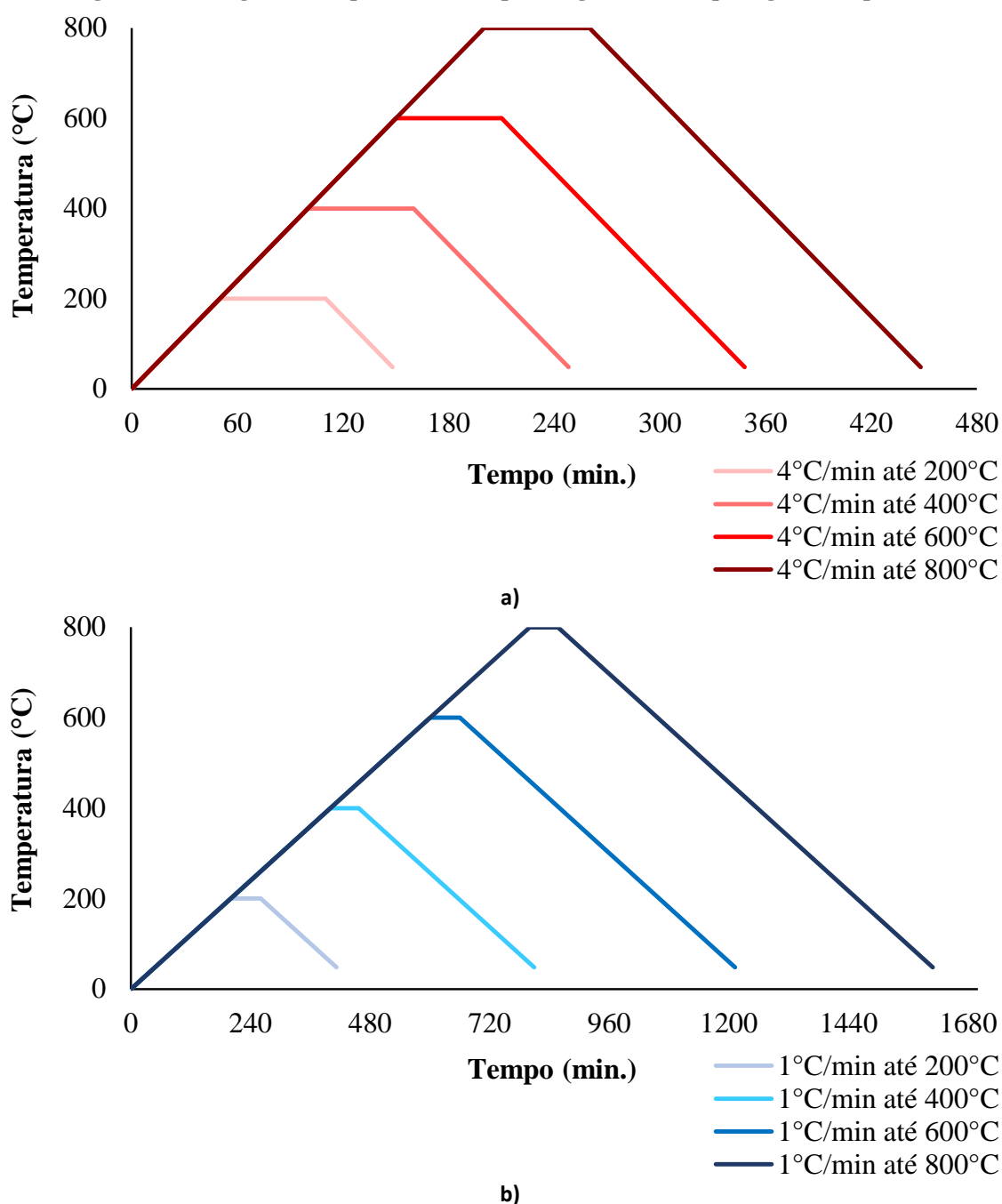
Os corpos de prova de argamassa, de graute e de prismas foram submetidos a 200, 400, 600 e 800°C. A taxa de aquecimento até as temperaturas desejadas variou entre os materiais estudados. Para as argamassas adotou-se 4°C/min. Para os grautes e prismas adotou-se 1°C/min. Atingidas as temperaturas de interesse, essas foram mantidas constantes durante 60 minutos. Em testes de instrumentação realizados por Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020) no mesmo forno, observou-se que a única taxa capaz de atender às diferenças máximas de temperatura estabelecidas pela RILEM TC 200-HTC:2007 em toda a extensão de blocos de concreto foi igual a 1°C/min. Após os 60 minutos, o resfriamento ocorreu próximo à mesma taxa, ou seja, cerca de 4°C/min para argamassas e 1°C/min para grautes e prismas (Figura 3.43).

Figura 3.42 – Dispositivo para transporte dos prismas: a) inserção dos prismas; b) travamento.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.43 – Regimes de aquecimento: a) para argamassas; b) para grautes e prismas.



Fonte: Autor (2020)

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho o emprego da curva RILEM TC 200 HTC:2007 (em detrimento da ISO 834-1:1999 ou ainda ASTM E119:2018) ocorreu com o intuito de determinar, de forma assertiva e estratificada, o comportamento/degradação dos materiais para cada temperatura explorada, e não simular simplesmente a submissão a um incêndio real. As baixas taxas de aquecimento propostas pela RILEM TC 200 HTC:2007 (Tabela 2.2) e testadas por Medeiros, Parsekian e Moreno Júnior (2020) visaram garantir que

os corpos de prova de argamassas, grautes e prismas alcançassem, em toda sua extensão, a uniformidade do aquecimento.

Para conferência dessa uniformidade as variações máximas de temperatura admitidas pela RILEM TC 200 HTC:2007 Part 2 (Item 2.9) foram cheçadas entre termopares distribuídos no interior do forno tipo mufla e do forno horizontal (Figura 3.44a). No forno mufla, quatro termopares foram posicionados nas quatro extremidades do agrupamento de cilindros aquecidos, à meia altura. Outros três termopares foram inseridos no centro do agrupamento, mais especificamente, abaixo, no topo e à meia altura do agrupamento. No forno horizontal, seis termopares foram inseridos no furo dos prismas (um para cada prisma) na altura das juntas de assentamento; e mais dois termopares nas extremidades, também à meia altura. A aquisição no forno mufla foi externa. O forno horizontal dispunha de módulo próprio e software de comunicação com os termopares.

Para facilitar o mecanismo de convecção no interior do forno e o envolvimento de todas as amostras pelos gases quentes, estas foram colocadas sobre calços, elevadas e centralizadas. Para evitar a perda de identificação com o desaparecimento das marcações feitas à tinta (Figura 3.44c), a posição de cada espécime no forno foi mapeada. A massa dos corpos de prova de argamassa, graute e os prismas foi medida antes de serem levados aos fornos e após as queimas, assim que seu resfriamento permitia uma temperatura segura ao tato (em torno de 50°C).

Figura 3.44 – Queima das argamassas: a) posicionamento dos termopares e corpos de prova; b) corpos de prova antes da queima; c) perda da identificação visual com a queima; d) pesagem após resfriamento; e) aquisição.



a)



Fonte: Autor (2022)

A execução dos ensaios de altas temperaturas para os grautes e os prismas é ilustrada pela Figura 3.45.

Figura 3.45 – Queima dos grautes e prismas: a) corpos de prova de graute no forno mufla; b) pesagem graute pós queima; c) prismas inseridos no forno; c) termopares nos furos dos blocos; e) aquisição.



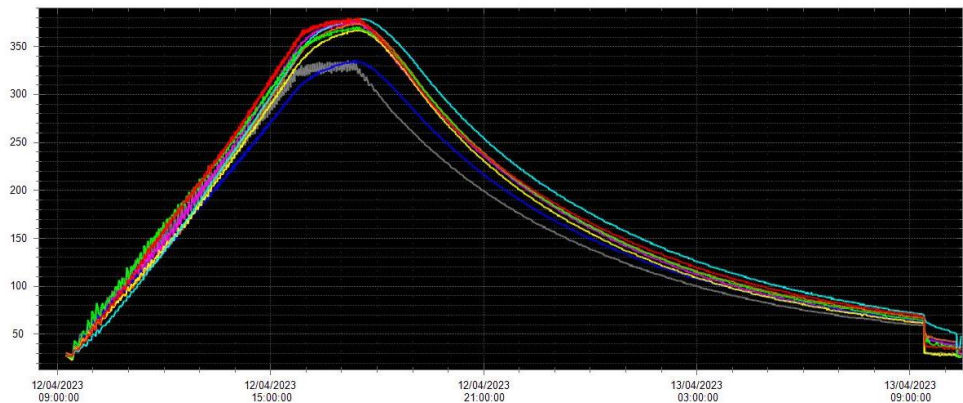
a)



b)



c)



d)

Fonte: Autor (2022)

3.5 ETAPA 5 - DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS: VALORES RESIDUAIS E DE REFERÊNCIA

Esta etapa também ocorreu no LES da FEC/UNICAMP. Consistiu na determinação, para argamassas, grautes e prismas, das propriedades mecânicas de resistência à compressão e o módulo de deformação secante. Os valores de referência para ambas as propriedades mecânicas foram determinados em corpos de prova ensaiados em temperatura ambiente. Os resultados residuais, para as mesmas propriedades, foram extraídos dos corpos de prova previamente submetidos a 200, 400, 600 e 800°C, após seu resfriamento (até temperaturas seguras ao tato) e pesagem. Dos trinta corpos de prova moldados para cada material, procedeu-se à seguinte divisão: uma amostra com seis corpos de prova foi ensaiada para cada uma das 5 temperaturas abordadas (ambiente, 200, 400, 600 e 800°C). Cada amostra com seis exemplares foi dividida em duas partes: inicialmente, três exemplares foram testados à compressão e a média de seus resultados utilizada com referência para aplicação do carregamento no ensaio de módulo. Os três corpos de prova restantes foram destinados à obtenção do módulo de deformação secante e, ao final, também levados à ruptura. A propriedade de resistência à compressão foi determinada pela média das tensões de ruptura dos seis corpos de prova. Os valores individuais que apresentassem diferenças superiores à 20% em relação à média amostral foram excluídos e, em seguida, a média recalculada.

No que se refere à compressão das argamassas, a taxa de aplicação de carga foi de $0,25 \pm 0,05$ MPa/s, conforme ABNT NBR 7215:2019. Para os grautes, adotou-se $0,5 \pm 0,1$ MPa/s conforme a RILEM TC 200-HTC Part 2 (2007). Para os prismas, a velocidade do carregamento foi controlada de tal forma que a ruptura ocorresse entre 1 e 2 minutos, tal como proposto no Item 6.3 da ABNT NBR 16868-3:2020. O módulo de deformação secante foi obtido com base nas tensões e deformações tomadas em 15 e 30% da tensão de ruptura dos corpos de prova de argamassas, grautes e prismas, conforme proposto pela RILEM TC 200-HTC Part 1 (2007).

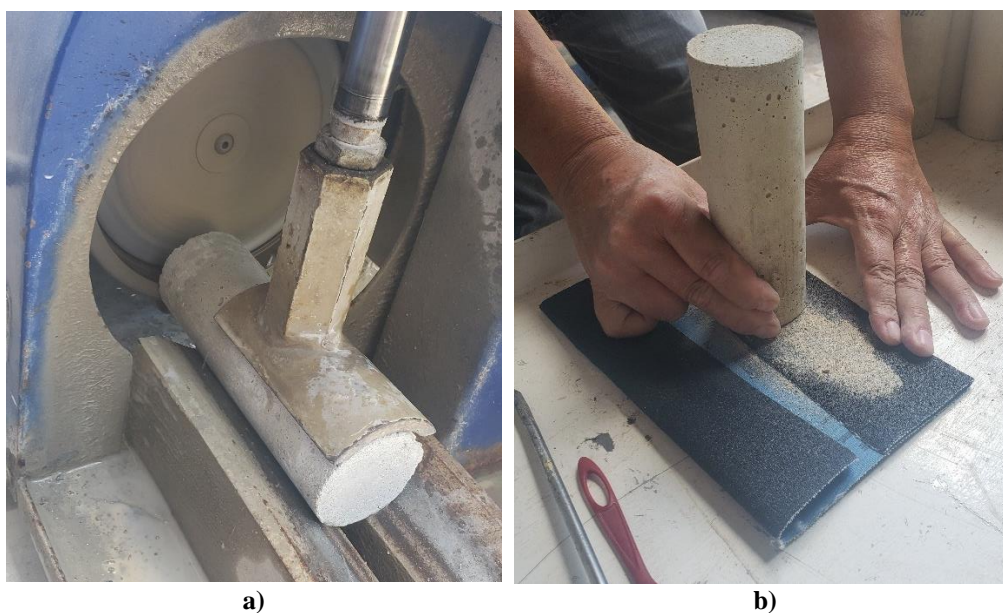
De modo semelhante ao realizado na etapa de caracterização, as superfícies de aplicação de carga dos corpos de prova de argamassa e de grautes foram retificadas. Vale ressaltar que, pelo fato de a retífica ser realizada na presença de água, tal procedimento ocorreu cerca de um mês antes das queimas; tempo hábil para redução da umidade. Imediatamente após a retificação, os corpos de prova também foram expostos ao sol por cerca de 2 horas. Quando necessário, o acabamento das superfícies foi realizado com auxílio de lixa. Importante também destacar que a retífica utilizada durante a caracterização das argamassas e grautes (existente no LSE da UFSCar) e aquela utilizada antes das queimas (no LES da UNICAMP) são diferentes. No equipamento existente na UFSCar os corpos de prova são retificados na posição vertical e

travados manualmente por uma presilha. Na retífica existente na UNICAMP, os corpos de prova são travados na posição horizontal por ação de uma garra pneumática.

Para o capeamento dos prismas foram posicionadas, no momento do ensaio, placas de forro de fibra mineral ou o também chamado “forro-pacote”. Lembrando que o objetivo do procedimento é garantir a integridade dos prismas já degradados pelo aquecimento (para os quais a manipulação requerida para o capeamento com pasta de cimento seria inviável) e assegurar a determinação das propriedades residuais.

A prensa utilizada para determinar as propriedades mecânicas das argamassas e grautes foi da marca EMIC, autoportante, modelo DL-30000. Possui capacidade de carga de 30 toneladas (300 kN), com controle pelo software TESC. Para ensaiar os prismas e, eventualmente, resistências que superassem a capacidade da prensa EMIC, uma segunda prensa hidráulica, da marca HECKERT, com capacidade igual a 100 toneladas (1 MN), foi utilizada. O equipamento indica (com base na pressão do fluido hidráulico) a força em toneladas. Contudo, para determinação do módulo secante utilizou-se um aquisitor de dados (marca IBM) acoplado a uma célula de carga (determinação da reação) e extensômetros do tipo *clipgage*, de configuração dupla (para medição dos deslocamentos). Os *clipgages* foram fixados aos corpos de prova por cintas elásticas, com ajuste em velcro. O procedimento para determinação das propriedades mecânicas residuais (idem para as de referência) em argamassas, grautes e prismas é ilustrado pela Figura 3.46, Figura 3.47 e Figura 3.48, respectivamente.

Figura 3.46 – Determinação das propriedades residuais em argamassas: a) retificação na UNICAMP antes das queimas; b) acabamento fino com lixa; c) conferência da ortogonalidade; d) secagem ao sol; e) temperatura segura ao tato em segurança; f) resistência à compressão; g) módulo de deformação; h) espécime após a ruptura.





c)



d)



e)



f)



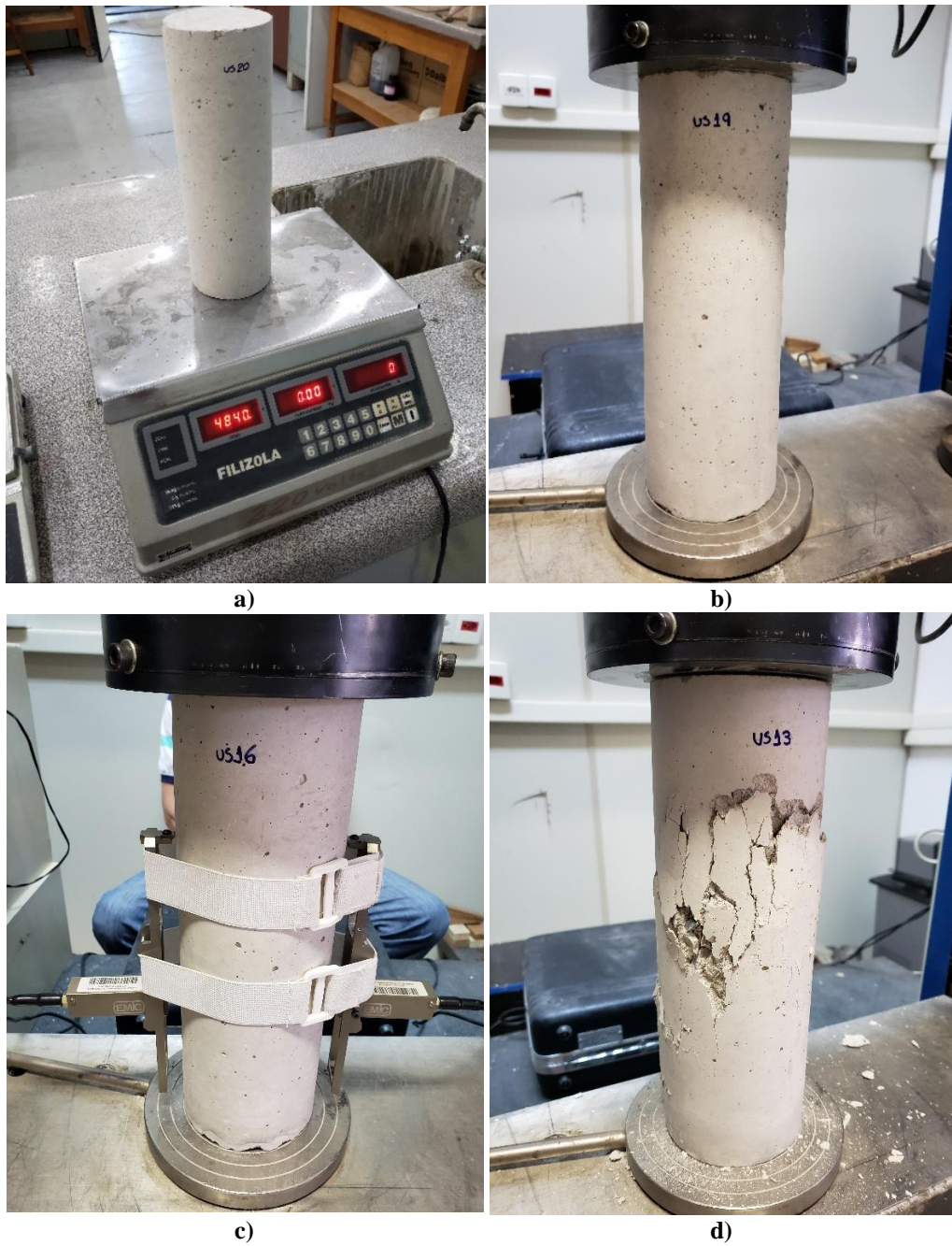
g)



h)

Fonte: Autor (2022)

Figura 3.47 – Determinação das propriedades residuais em grautes: a) pesagem pós queima; b) resistência à compressão; c) módulo de deformação; d) espécime rompido.



Fonte: Autor (2022)

Figura 3.48 – Determinação das propriedades residuais em prismas: a) prisma após queima de 600°C; b) pesagem pós queima; c) resistência à compressão; d) registro da força em toneladas pela prensa; e) módulo de deformação; f) prisma rompido.





e)



f)

Fonte: Autor (2022)

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS COMPONENTES DE ALVENARIA ESTRUTURAL

Os primeiros resultados a serem apresentados correspondem àqueles obtidos durante a caracterização dos blocos de concreto, das argamassas e dos grautes utilizados nesta pesquisa.

4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DOS BLOCOS DE CONCRETO

Os resultados médios obtidos aos 28 dias de idade durante a análise dimensional dos blocos de concreto de resistências nominais 6, 12 e 24 MPa são exibidos pela Tabela 4.1. Os valores individuais, bem como desvio padrão e coeficiente de variação, são apresentados no Apêndice A desta tese.

Tabela 4.1 – Caracterização dos blocos de concreto: resultados médios da análise dimensional.

DIMENSÕES	BLOCO 6 MPa	BLOCO 12 MPa	BLOCO 24 MPa
Largura (mm)	140,1	139,8	140,5
Altura (mm)	188,5	189,0	190,0
Comprimento (mm)	389,5	389,9	390,5
Área bruta (mm ²)	54558,1	54498,4	54872,0
Espessura paredes longitudinais (mm)	25,9	25,6	26,3
Espessura paredes transversais (mm)	25,9	26,0	25,6
Espessura equivalente (mm/m)	199,1	199,8	197,2
Menor dimensão de furo (mm)	79,5	79,6	88,3
Maior dimensão de furo (mm)	147,1	146,9	156,9
Raio de mísulas (mm)	47,5	47,2	42,9

Fonte: Autor (2023)

Quando confrontados com os requisitos propostos pela ABNT NBR 6136:2016 (Quadro 3.3), os valores de largura dos blocos de resistência nominal 6, 12 e 24 MPa atendem à variação máxima de 1 mm em relação ao valor de referência 140 mm. Quanto à altura, o bloco 6 MPa (classe B) excede em 0,5 mm a tolerância de 1 mm proposta para a referência de 190 mm, enquanto os blocos de 12 e 24 MPa (classe A) atendem à variação máxima. Para o comprimento, nenhum tipo de bloco entre os estudados apresentou variação superior a 1 mm em relação ao valor de referência de 390 mm. A área bruta dos blocos 24 MPa foi ligeiramente superior às apresentadas pelos blocos 6 e 12 MPa.

No que se refere às espessuras mínimas para paredes longitudinais (25 mm) e espessuras mínimas para paredes transversais (25 mm), todas as resistências nominais de bloco (6, 12 e 24 MPa) satisfizeram os requisitos normativos apresentados no Quadro 3.3. Os requisitos

espessura mínima equivalente (188 mm), raio mínimo de mísulas (igual à 40 mm para classes A e B) e menor dimensão de furo (70 mm) também foram satisfeitos por todos os tipos de bloco.

Os valores médios, desvio padrão e coeficientes de variação obtidos para as propriedades de umidade relativa, absorção de água, área líquida e resistência à compressão dos blocos de concreto são expostos na Tabela 4.2. Os resultados individuais das mesmas propriedades constam no Apêndice A deste trabalho. Os resultados de resistência à compressão obtidos no laboratório da própria empresa fabricante dos blocos, próximo aos 2 dias e aos 28 dias de idade, encontram-se no Anexo B desta tese.

Tabela 4.2 – Caracterização dos blocos de concreto: valores médios de propriedades físicas e mecânicas.

DIMENSÕES	BLOCO 6 MPa	BLOCO 12 MPa	BLOCO 24 MPa
Umidade relativa (%)	16,4	22,9	53,5
Absorção de água (%)	6,9	6,5	4,8
Área líquida (mm ²)	30096,1	30162,5	30630,5
Área Líquida/Área bruta	0,552	0,553	0,558
Resistência média à compressão f_{bm} (MPa) *	7,6	9,4	20,6
Desvio padrão	0,6	1,0	0,9
Coef. variação (%)	7,5	10,2	4,2
Resistência característica à compressão f_{bk} (MPa)*	6,5	8,1	19,2

* Ensaio realizado aos 28 dias de idade dos blocos. Resistência na área bruta.

Fonte: Autor (2023)

Comparando os resultados da Tabela 4.2 com os requisitos da ABNT NBR 6136:2016 apresentados no Quadro 3.2 conclui-se que, em função da resistência característica à compressão (f_{bk}) obtida, os blocos 6 MPa enquadram-se na classe B, enquanto os blocos de resistências nominais 12 e 24 MPa enquadram-se na classe A. Os resultados de absorção de água apresentados por cada resistência nominal de bloco satisfizeram com notória margem de segurança os limites normativos, confirmando o pertencimento às classes mencionadas. Os blocos 24 MPa foram os que apresentaram a menor absorção de água e a menor variação nos resultados de resistência à compressão. Comportamento atribuído à maior compactidade/menor quantidade de vazios dos blocos e confirmado pela maior massa dos blocos de maiores resistências. A maior variação de resistência foi observada nos blocos 12 MPa. Tanto os resultados médios quanto os valores característicos obtidos para resistência à compressão dos blocos 12 e 24 MPa foram inferiores aos valores nominais e aos resultados obtidos no laboratório da fábrica, aos 28 dias. Esses menores resultados são atribuídos ao emprego do forro de fibra mineral para capeamento na caracterização dos blocos. Na fábrica, resultados maiores também foram obtidos em blocos capeados com pasta de cimento, conforme previsto pela normalização nacional. Para o estabelecimento de comparações futuras, optou-se pelo mesmo tipo de capeamento desde a caracterização dos blocos até ensaios em prismas. A relação entre

área líquida e área bruta das unidades foi equivalente para os blocos de 6 e 12 MPa (cerca de 0,55) e infimamente superior para os blocos de 24 MPa (aproximadamente 0,56).

4.1.2 ARGAMASSAS E GRAUTES: RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO FRESCO

Os resultados de caracterização para os traços definitivos das argamassas convencionais (Tabela 3.18), argamassas industrializadas (Item 3.2.3) e dos grautes (Tabela 3.19) no estado fresco são apresentados pela Tabela 4.3, Tabela 4.4 e Tabela 4.5, respectivamente.

Tabela 4.3 – Resultados da caracterização no estado fresco para as argamassas convencionais.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS				
	Determinações	AC 5	AC 10	AC 20
Índice de consistência (mm)	1 ^a	250	245	235
	2 ^a	250	245	245
	3 ^a	250	240	240
	Valor médio	250	245	240
	Desvio Padrão	0,0	2,9	5,0
	Coef. Variação	0,0	1,2	2,1
Densidade de massa (kg/m³)	Determinações	AC 5	AC 10	AC 20
	1 ^a	2.122	2.130	2.168
	2 ^a	2.124	2.137	2.164
	Valor médio	2.123	2.133	2.166
	Desvio Padrão	1,6	5,3	2,8
	Coef. Variação	0,1	0,2	0,1
Retenção de água (%)	Determinações	AC 5	AC 10	AC 20
	1 ^a	90,9	91,2	90,5
	2 ^a	91,0	-	90,5
	Valor médio	90,9	91,2	90,5
	Desvio Padrão	0,0	-	0,0
	Coef. Variação	0,0	-	0,0

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.4 – Resultados da caracterização no estado fresco para as argamassas industrializadas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS				
	Determinações	AI 5	AI 10	AI 20
Índice de consistência (mm)	1 ^a	270	270	260
	2 ^a	275	270	250
	3 ^a	275	275	255
	Valor médio	275	270	255
	Desvio Padrão	2,9	2,9	5,0
	Coef. Variação	1,0	1,1	2,0
Densidade de massa (kg/m³)	Determinações	AI 5	AI 10	AI 20
	1 ^a	2.136	2.145	2.222
	2 ^a	2.135	2.156	2.228
	Valor médio	2.136	2.151	2.225
	Desvio Padrão	0,7	8,1	4,4
	Coef. Variação	0,0	0,4	0,2
Retenção de água (%)	Determinações	AI 5	AI 10	AI 20
	1 ^a	90,5	93,3	91,5
	2 ^a	91,2	93,2	91,9
	Valor médio	90,9	93,3	91,7
	Desvio Padrão	0,5	0,0	0,2
	Coef. Variação	0,6	0,0	0,3

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.5 – Resultados da caracterização no estado fresco para os grautes.

GRAUTES				
	Determinações	G 15	G 25	G 35
Abatimento em tronco de cone (mm)	1ª medida	215	220	240
	2ª medida	215	225	240
	3ª medida	-	220	-
	Valor médio	215	220	240
	Desvio Padrão	0	2,89	0
	Coef. Variação (%)	0	1,31	0

Fonte: Autor (2023)

Como observado na Tabela 4.3, todas as argamassas convencionais (5, 10 e 20 MPa) enquadraram-se no intervalo de 240 ± 20 mm para ao índice de consistência, sendo este o valor estabelecido como ideal para o assentamento dos blocos utilizados nesta pesquisa. Da Tabela 4.4 conclui-se que, de uma forma geral, as argamassas industrializadas apresentaram maior fluidez que as convencionais (260 ± 20 mm). As argamassas ensacadas de 5 e 10 MPa são de um mesmo fabricante e contam com a presença de aditivos plastificantes e retentores de água. Acredita-se que presença de tais aditivos seja responsável pelos maiores resultados de consistência, os quais extrapolaram o intervalo 240 ± 20 mm, mesmo sendo misturadas com as quantidades mínimas de água prescritas pelo fabricante.

Ainda na Tabela 4.3, observa-se que a consistência das argamassas convencionais é reduzida à medida que sua resistência nominal aumenta. Este fato é atribuído à necessidade em diminuir os teores de cal e de água para obtenção dos traços de maiores resistências. Esses dois componentes correspondem aos principais responsáveis por conferir fluidez e trabalhabilidade às misturas que não contam com aditivos plastificantes. Contudo, sua presença é inversamente proporcional à resistência mecânica obtida (Parsekian; Hamid; Drysdale, 2014). Menores índices de consistência também foram obtidos com o aumento na resistência das argamassas industrializadas (Tabela 4.4). Porém, a maior diferença observada ocorreu entre argamassas de diferentes fabricantes. Neste caso, dada a ausência de cal nas misturas, acredita-se que a variação nos resultados de consistência esteja associada às diferenças na composição (materiais) e dosagem (proporções) adotadas por cada fornecedor. Um dos fatores que ilustra essa diferença é a própria coloração das argamassas. As argamassas AI5 e AI10, produzidas na região de Cajamar-SP apresentam coloração acinzentada enquanto a argamassa industrializada de 20 MPa possui coloração amarelada; muito por conta das areias extraídas na região de Descalvado-SP.

Para a densidade de massa no estado fresco, a Tabela 4.3 revela um comportamento das argamassas convencionais contrário ao observado para o índice de consistência. Pequenos

aumentos de densidade foram observados à medida que as resistências nominais foram elevadas (5, 10 e 20 MPa), tanto para as argamassas industrializadas quanto para as convencionais. De modo geral, as densidades no estado fresco das argamassas industrializadas foram superiores às das argamassas convencionais. No que tange à classificação estabelecida pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas inorgânicas para assentamento de unidades de alvenaria estrutural (AAE), todas as misturas deste estudo enquadram-se na classe DF4, por apresentarem densidades de massa no estado fresco superiores a 2000 kg/m³.

Todas as argamassas forneceram valores altos de retenção de água (entre 90,5% e 93,3%), superando o mínimo de 80% estabelecido pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas de assentamento em alvenaria estrutural. Os resultados da propriedade foram exibidos pelas argamassas industrializadas. Acredita-se que os maiores valores de consistência e de retenção de água das argamassas industrializadas estejam relacionados à presença dos aditivos em sua composição. Contudo isso não se deu de maneira linear. O traço de argamassa que mais reteve água não correspondeu, necessariamente, ao que apresentou o maior índice de consistência.

A Tabela 4.5 indica que os resultados de abatimento em tronco de cone para os grautes desta pesquisa foram compreendidos pelo intervalo de 215 a 240 mm. A variabilidade observada nos resultados está relacionada à execução do próprio ensaio (ex.: uniformidade no preenchimento dos moldes, intensidade na aplicação dos golpes de adensamento e, após retirada do cone, ponto de medição do abatimento). Diferentemente do que ocorreu com as argamassas de assentamento, grautes de maiores resistências nominais forneceram maiores resultados de abatimento. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de que todas as resistências de graute foram obtidas com traços onde a quantidade de cal foi mantida constante, enquanto as proporções de areia e de pedrisco foram consideravelmente reduzidas em busca das maiores resistências mecânicas. Isso tornou as misturas mais sensíveis ao efeito da cal e à adição da água na mistura.

4.1.3 ARGAMASSAS E GRAUTES: RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO NO ESTADO ENDURECIDO

Os resultados individuais de caracterização para propriedades mecânicas no estado endurecido das argamassas convencionais, argamassas industrializadas e grautes são exibidos pela Tabela 4.6, Tabela 4.7 e Tabela 4.8, respectivamente.

Tabela 4.6 – Resultados de caracterização no estado endurecido para as argamassas convencionais.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS									
	Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20		Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) ^b	CP1	0,43	0,90	1,47	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa) ^c	CP1	1,57	2,50	3,62
	CP2	0,38	0,87	1,23		CP2	1,93	2,64	3,76
	CP3	0,47	0,94	1,85		CP3	1,58	-	4,20
	CP4	0,44	0,76	1,39		Valor médio	1,69	2,57	3,86
	Valor médio	0,43	0,87	1,49		Desvio Padrão	0,2	0,1	0,3
	Desvio Padrão	0,0	0,1	0,3		Coef. Variação (%)	12,1	3,9	7,8
	Coef. Variação (%)	8,7	8,9	17,7					
	Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20		Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CILINDRO (MPa) ^d	CP1	2,83	5,16	10,98	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CUBO (MPa) ^e	CP1	6,18	11,90	17,49
	CP2	2,89	5,81	10,82		CP2	6,41	11,51	18,32
	CP3	2,63	5,47	9,74		CP3	6,28	10,58	18,33
	CP4	2,66	5,67	9,98		CP4	6,55	12,04	15,73
	CP5	3,01	5,67	10,12		CP5	6,69	11,16	18,24
	CP6	3,28	4,82	8,39		CP6	6,50	11,37	20,00
	CP7	-	6,20	11,01		Valor médio	6,44	11,43	18,02
	Valor médio	2,88	5,54	10,15		Desvio Padrão	0,2	0,5	1,4
Desvio Padrão	0,2	0,4	0,9	Coef. Variação (%)	2,9	4,6	7,7		
Coef. Variação (%)	8,4	8,1	9,1						
	Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20		Corpo de Prova ^a	AC 5	AC 10	AC 20
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO METADES FLEXÃO (MPa) ^f	CP1	6,59	11,10	21,04	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE (GPa) ^g	CP1	7,62	9,96	14,22
	CP2	6,60	11,75	20,55		CP2	6,85	8,95	12,98
	CP3	6,48	11,06	20,55		CP3	6,05	8,95	13,70
	CP4	6,60	11,48	19,95		CP4	6,70	8,75	13,74
	CP5	6,59	11,56	19,96		CP5	-	-	12,01
	CP6	6,67	11,59	19,32		Valor médio	6,81	9,15	13,33
	Valor médio	6,59	11,42	20,23		Desvio Padrão	0,6	0,5	0,9
Desvio Padrão	0,1	0,3	0,6	Coef. Variação (%)	9,5	6,0	6,5		
Coef. Variação (%)	0,9	2,5	3,0						

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme ABNT NBR 7222:2011.

^c Ensaio em corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm, conforme ABNT NBR 13279:2005.

^d Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme adaptação da ABNT NBR 7215:2019.

^e Ensaio em cubos de aresta 40 mm, conforme ABNT NBR 16868-2:2020.

^f Ensaio nas metades dos corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm obtidas na flexão, conforme ABNT NBR 16868-2:2020.

^g Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme adaptação da ABNT NBR 8522-1:2021.

Fonte: Autor (2023)

No que se refere à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas inorgânicas de assentamento em alvenaria estrutural (AAE), cabe a seguinte observação: os resultados da Tabela 4.6 para resistência à compressão obtida em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram, em função dos valores médios, as argamassas convencionais AC5, AC10 e AC20 nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE8 (8,0 MPa ≤ f_a < 12,0 MPa) e AAE20 (20,0 MPa ≤ f_a < 24,0 MPa), respectivamente.

Tabela 4.7 – Resultados de caracterização no estado endurecido para as argamassas industrializadas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS									
Corpo de Prova ^a					Corpo de Prova ^a				
		AI5	AI10	AI20		AI5	AI10	AI20	
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) ^b	CP1	0,71	1,69	2,56	RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO (MPa) ^c	CP1	1,91	4,32	5,93
	CP2	0,68	2,40	2,60		CP2	2,21	4,73	6,46
	CP3	0,75	2,19	2,31		CP3	2,00	5,07	7,10
	CP4	-	1,56	2,49		Valor médio	2,04	4,71	6,50
	Valor médio	0,71	1,96	2,49		Desvio Padrão	0,2	0,4	0,6
	Desvio Padrão	0,0	0,4	0,1		Coef. Variação (%)	7,5	8,0	9,0
Coef. Variação (%)	4,9	20,4	5,2						
Corpo de Prova ^a					Corpo de Prova ^a				
		AI5	AI10	AI20		AI5	AI10	AI20	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CILINDRO (MPa) ^d	CP1	4,10	11,10	17,22	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CUBO (MPa) ^e	CP1	6,08	16,74	24,27
	CP2	4,40	11,11	19,09		CP2	6,11	17,14	25,31
	CP3	3,74	11,01	18,38		CP3	5,48	17,98	24,86
	CP4	4,04	11,30	18,09		CP4	5,56	16,92	24,99
	CP5	4,42	10,44	15,89		CP5	5,56	17,32	25,31
	CP6	4,33	11,13	17,19		CP6	5,95	17,46	25,62
	CP7	-	-	16,05		Valor médio	5,79	17,26	25,06
	Valor médio	4,17	11,02	17,42		Desvio Padrão	0,3	0,4	0,5
Desvio Padrão	0,3	0,3	1,2	Coef. Variação (%)	5,0	2,5	1,9		
Coef. Variação (%)	6,3	2,7	6,8						
Corpo de Prova ^a					Corpo de Prova ^a				
		AI5	AI10	AI20		AI5	AI10	AI20	
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO METADES FLEXÃO (MPa) ^f	CP1	5,70	17,33	25,66	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE (GPa) ^g	CP1	7,74	12,43	19,83
	CP2	5,95	17,12	24,89		CP2	8,59	12,93	19,05
	CP3	6,07	17,22	25,62		CP3	8,51	13,32	19,13
	CP4	6,06	17,60	25,91		CP4	9,26	12,76	19,70
	CP5	6,33	17,60	25,92		CP5	-	13,14	17,82
	CP6	6,25	17,67	25,49		Valor médio	8,53	12,92	19,11
	Valor médio	6,06	17,42	25,58		Desvio Padrão	0,6	0,3	0,8
Desvio Padrão	0,2	0,2	0,4	Coef. Variação (%)	7,3	2,7	4,2		
Coef. Variação (%)	3,7	1,3	1,5						

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme ABNT NBR 7222:2011.

^c Ensaio em corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm, conforme ABNT NBR 13279:2005.

^d Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme adaptação da ABNT NBR 7215:2019.

^e Ensaio em cubos de aresta 40 mm, conforme ABNT NBR 16868-2:2020.

^f Ensaio nas metades dos corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm obtidas na flexão, conforme ABNT NBR 16868-2:2020.

^g Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme adaptação da ABNT NBR 8522-1:2021.

Fonte: Autor (2023)

Quanto à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas de assentamento estrutural, os resultados de resistência à compressão em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram, em função dos valores médios, as argamassas industrializadas AI5, AI10 e AI20 nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE16 (16,0 MPa ≤ f_a < 20,0 MPa) e AAEE (f_a ≥ 24,0 MPa), respectivamente.

Tabela 4.8 – Resultados de caracterização no estado endurecido para os grautes.

GRAUTES										
Corpo de Prova ^a		G 15	G 25	G 35	Corpo de Prova ^a		G 15	G 25	G 35	
RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL (MPa) ^b	CP1	2,68	3,31	3,82	MÓDULO DE DEFORMAÇÃO SECANTE (GPa) ^c	CP1	29,47	36,14	34,11	
	CP2	2,70	3,16	3,44		CP2	35,62	27,66	35,71	
	CP3	2,78	2,72	3,88		CP3	33,96	36,15	30,26	
	CP4					CP4	34,49	29,86	37,84	
	Valor médio	2,72	3,06	3,71		Valor médio	33,39	32,45	34,48	
	Desvio Padrão	0,1	0,3	0,2		Desvio Padrão	2,7	4,4	3,2	
	Coef. Variação (%)	1,9	10,0	6,4		Coef. Variação (%)	8,1	13,4	9,3	
Corpo de Prova ^a		G 15			G 25			G 35		
RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO CILINDRO (MPa) ^d	CP1	22,27			28,94			38,45		
	CP2	21,45			28,45			39,69		
	CP3	21,46			29,41			39,02		
	CP4	21,15			29,51			38,54		
	CP5	23,01			28,56			38,87		
	CP6	21,95			28,02			37,11		
	Valor médio	21,88			28,82			38,61		
	Desvio Padrão	0,7			0,6			0,9		
	Coef. Variação (%)	3,1			2,0			2,2		

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø100 x 200 mm, conforme ABNT NBR 7222:2011.

^c Ensaio em espécimes cilíndricos Ø100 x 200 mm, conforme ABNT NBR 8522-1:2021.

^d Ensaio em espécimes cilíndricos Ø100 x 200 mm, conforme ABNT NBR 5739:2018.

Fonte: Autor (2023)

Da Tabela 4.6 nota-se que, para as argamassas convencionais, as demais propriedades mecânicas tendem a crescer nas misturas com maiores resistências nominais. Também é clara a influência da geometria dos corpos de prova nos resultados de resistência à compressão. Os valores fornecidos pelos corpos de prova cilíndricos (Ø50 x 100 mm) das argamassas AC5, AC10 e AC20 correspondem, respectivamente, a cerca de 45%, 48% e 56% da resistência obtida nos cubos de aresta 40 mm. Quando comparados com as resistências obtidas nas metades dos prismas rompidos na flexão, os valores exibidos pelos cilindros correspondem a 44%, 49% e 56% para as argamassas AC5, AC10 e AC20, respectivamente. A diferença entre os resultados de tração obtidos nos ensaios de flexão em prismas (40 × 40 × 160 mm) de argamassa e compressão diametral de cilindros (Ø50 x 100 mm) também é relevante. Os valores obtidos com os cilindros das argamassas AC5, AC10 e AC20 correspondem, respectivamente, a 25%, 34% e 39% dos obtidos na flexão dos prismas moldados com as mesmas misturas.

Para as argamassas industrializadas, a resistência à tração por compressão diametral, resistência à tração na flexão, módulo de deformação secante e resistência à compressão obtida em diferentes corpos de prova também cresceram em direção às argamassas de maiores resistências nominais (AI5, AI10, AI20). A influência da geometria dos corpos de prova também foi notável, contudo, as diferenças observadas foram menores que das argamassas convencionais. Os valores exibidos pelos cilindros de argamassas AI5, AI10 e AI20

correspondem, respectivamente, a 72%, 64% e 70% das resistências obtidas nas metades dos prismas rompidos na flexão. Em comparação com as resistências obtidas nas metades dos prismas rompidos na flexão, os valores exibidos pelos cilindros correspondem a 69%, 63% e 68% para as argamassas AI5, AI10 e AI20, respectivamente. Para a resistência à tração, os resultados obtidos com cilindros ($\varnothing 50 \times 100$ mm) representaram 35%, 42% e 38% dos resultados fornecidos pela flexão em prismas ($40 \times 40 \times 160$ mm) moldados com as argamassas AI5, AI10 e AI20, respectivamente.

Da Tabela 4.6 e Tabela 4.7, cabe ainda destacar que as argamassas industrializadas apresentaram valores de resistência à tração e módulo de deformação secante consideravelmente maiores que aqueles exibidos pelas argamassas convencionais. Para a resistência à tração indireta (compressão diametral), por exemplo, os resultados das argamassas AI5, AI10 e AI20 superaram em 65%, 125% e 67% aqueles fornecidos pelas misturas AC5, AC10 e AC20. Quanto ao módulo de deformação secante, as argamassas industrializadas exibiram resultados 25%, 41% e 43% maiores que as argamassas convencionais para as resistências nominais de 5, 10 e 20 MPa, respectivamente.

Observando a Tabela 4.8, nota-se que as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração por compressão diametral obtidas para os grautes de 15, 25 e 35 MPa apresentaram valores maiores, à medida que a classe de resistência nominal do componente foi elevada. Enquanto isso, o módulo de deformação secante não seguiu a mesma tendência e exibiu valores muito próximos entre todas as misturas de graute testadas (G15, G25 e G35). As relações entre resistência à tração e compressão obtida para os grautes G15, G25 e G35 foram iguais a 0,12; 0,11 e 0,10, respectivamente.

Os resultados individuais de caracterização para propriedades físicas no estado endurecido das argamassas convencionais, argamassas industrializadas e grautes são respectivamente exibidos na Tabela 4.9, Tabela 4.10 e Tabela 4.11.

Tabela 4.9 – Propriedades físicas no estado endurecido para as argamassas convencionais.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS									
	Corpo de Prova ^a	Massa seca	Massa submersa ^c	Massa saturada	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
AC 5 ^b	CP1	352,45	212,44	404,87	14,87	27,24	1,83	2,10	2,52
	CP2	352,00	212,05	404,00	14,77	27,09	1,83	2,10	2,52
	CP3	349,61	209,61	401,52	14,85	27,05	1,82	2,09	2,50
	Valor médio	351,35	211,37	403,46	14,83	27,13	1,83	2,10	2,51
	Desvio Padrão	1,5	1,5	1,7	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,4	0,7	0,4	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4
AC 10 ^b	CP1	359,02	214,66	407,73	13,57	25,23	1,86	2,11	2,49
	CP2	360,62	217,00	410,60	13,86	25,82	1,86	2,12	2,51
	CP3	361,59	218,45	413,23	14,28	26,51	1,86	2,12	2,53
	Valor médio	360,41	216,70	410,52	13,90	25,85	1,86	2,12	2,51
	Desvio Padrão	1,3	1,9	2,8	0,4	0,6	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,4	0,9	0,7	2,6	2,5	0,2	0,3	0,8
AC 20 ^b	CP1	371,07	224,30	417,57	12,53	24,06	1,92	2,16	2,53
	CP2	372,59	224,17	418,03	12,20	23,44	1,92	2,16	2,51
	CP3	374,44	225,92	420,05	12,18	23,49	1,93	2,16	2,52
	Valor médio	372,70	224,80	418,55	12,30	23,66	1,92	2,16	2,52
	Desvio Padrão	1,7	1,0	1,3	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,5	0,4	0,3	1,6	1,5	0,2	0,2	0,4

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme ABNT NBR 9778:2005.

^c Ensaio realizado com água em temperatura ambiente 23 ± 2 °C.

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.10 – Propriedades físicas no estado endurecido para as argamassas industrializadas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS									
	Corpo de Prova ^a	Massa seca	Massa submersa ^c	Massa saturada	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
AI5 ^b	CP1	372,83	222,07	417,36	11,94	22,80	1,91	2,14	2,47
	CP2	372,40	222,12	416,33	11,80	22,62	1,92	2,14	2,48
	CP3	373,47	222,69	416,96	11,64	22,39	1,92	2,15	2,48
	Valor médio	372,90	222,29	416,88	11,80	22,60	1,92	2,14	2,48
	Desvio Padrão	0,5	0,3	0,5	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,1	0,2	0,1	1,3	0,9	0,4	0,2	0,1
AI10 ^b	CP1	369,37	217,40	411,26	11,34	21,61	1,91	2,12	2,43
	CP2	371,42	219,28	413,00	11,19	21,46	1,92	2,13	2,44
	CP3	372,50	219,51	413,52	11,01	21,14	1,92	2,13	2,43
	Valor médio	371,10	218,73	412,59	11,18	21,41	1,91	2,13	2,44
	Desvio Padrão	1,6	1,2	1,2	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,4	0,5	0,3	1,5	1,1	0,4	0,3	0,2
AI20 ^b	CP1	379,24	227,48	418,51	10,35	20,56	1,99	2,19	2,50
	CP2	379,94	228,39	419,83	10,50	20,84	1,98	2,19	2,51
	CP3	375,87	226,14	414,21	10,20	20,39	2,00	2,20	2,51
	Valor médio	378,35	227,34	417,52	10,35	20,59	1,99	2,20	2,51
	Desvio Padrão	2,2	1,1	2,9	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,6	0,5	0,7	1,4	1,1	0,4	0,3	0,2

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø50 x 100 mm, conforme ABNT NBR 9778:2005.

^c Ensaio realizado com água em temperatura ambiente 23 ± 2 °C.

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.11 – Propriedades físicas no estado endurecido para os grautes.

GRAUTES									
	Corpo de Prova ^a	Massa seca	Massa submersa ^c	Massa saturada	Absorção de água (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica seca (g/cm ³)	Massa específica saturada (g/cm ³)	Massa específica real (g/cm ³)
G 15 ^b	CP1	3.365,00	2.070,00	3.640,00	8,17	17,52	2,14	2,32	2,60
	CP2	3.355,00	2.065,00	3.635,00	8,35	17,83	2,14	2,32	2,60
	CP3	3.360,00	2.075,00	3.645,00	8,48	18,15	2,14	2,32	2,61
	Valor médio	3.360,00	2.070,00	3.640,00	8,33	17,83	2,14	2,32	2,60
	Desvio Padrão	5,0	5,0	5,0	0,2	0,3	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,1	0,2	0,1	1,9	1,8	0,1	0,1	0,3
G 25 ^b	CP1	3.380,00	2.080,00	3.660,00	8,28	17,72	2,14	2,32	2,60
	CP2	3.400,00	2.095,00	3.675,00	8,09	17,41	2,15	2,33	2,61
	CP3	3.370,00	2.075,00	3.650,00	8,31	17,78	2,14	2,32	2,60
	Valor médio	3.383,33	2.083,33	3.661,67	8,23	17,63	2,14	2,32	2,60
	Desvio Padrão	15,3	10,4	12,6	0,1	0,2	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,5	0,5	0,3	1,5	1,1	0,3	0,2	0,1
G 35 ^b	CP1	3.365,00	2.070,00	3.650,00	8,47	18,04	2,13	2,31	2,60
	CP2	3.360,00	2.070,00	3.645,00	8,48	18,10	2,13	2,31	2,60
	CP3	3.390,00	2.085,00	3.665,00	8,11	17,41	2,15	2,32	2,60
	Valor médio	3.371,67	2.075,00	3.653,33	8,35	17,85	2,14	2,31	2,60
	Desvio Padrão	16,1	8,7	10,4	0,2	0,4	0,0	0,0	0,0
	Coef. Variação (%)	0,5	0,4	0,3	2,5	2,1	0,4	0,2	0,1

^a Ensaios no estado endurecido realizados aos 28 dias de idade dos espécimes.

^b Ensaio em espécimes cilíndricos Ø100 x 200 mm, conforme ABNT NBR 9778:2005.

^c Ensaio realizado com água em temperatura ambiente 23 ± 2 °C.

Fonte: Autor (2023)

A partir da Tabela 4.9 e Tabela 4.10 é possível concluir, tanto para as argamassas convencionais quanto para as industrializadas, que aumentos nas resistências nominais refletiram em reduções nos índices de absorção de água e índices de vazios obtidos no estado endurecido. Para as argamassas convencionais, os aumentos nas resistências nominais (AC5, AC10, AC20) refletiram em aumentos sensíveis das massas específicas seca, saturada e real. Para as argamassas industrializadas, esse comportamento foi identificado apenas nos valores da massa específica seca. Para os grautes, a elevação da resistência nominal não refletiu em reduções proporcionais nos índices de absorção de água. Ao contrário do esperado, os maiores valores de absorção e índice de vazios foram fornecidos pela mistura do graute G35. A massa específica dos grautes no estado endurecido manteve-se constante diante dos aumentos na resistência nominal.

4.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CONTROLE: MONTAGEM DOS PRISMAS

Nesta sessão são apresentados os resultados dos ensaios de controle realizados com amostras de argamassa extraídas durante a montagem dos prismas. Incluem-se ensaios de consistência no estado fresco e determinação de propriedades mecânicas no estado endurecido.

A análise da consistência ocorreu em dois momentos: imediatamente após a mistura e após a utilização da argamassa pelo pedreiro (com a quantidade restante na bandeja); ora período da manhã e ora no período da tarde, com registro das condições ambientais.

As propriedades mecânicas (resistência à tração na flexão e à compressão) também foram determinadas em dois momentos: 28 dias após o assentamento dos prismas e na época de ensaiar os componentes sob altas temperaturas. Nesta etapa as condições ambientais foram igualmente registradas.

4.2.1 ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO: CONTROLE DE CONSISTÊNCIA DURANTE O USO

Os índices de consistência obtidos para as misturas das argamassas de assentamento convencionais e industrializadas empregadas na moldagem de corpos de prova para ensaios aos 28 dias são exibidos no Quadro 4.1 e Quadro 4.2, respectivamente.

Quadro 4.1 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas convencionais ensaiadas aos 28 dias.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS								
Prisma moldado: B6 AC5			AC 5					
Temperatura ambiente: 27,7°C								
Umidade relativa: 62%								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 4ª massada - Período da tarde (13h - 17h)			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 4ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^c		
Determinações		Valor	Determinações		Valor	Determinações		Valor
Índice de consistência (mm)	1ª	230	Índice de consistência (mm)	1ª	230	Índice de consistência (mm)	1ª	não registrado
	2ª	225		2ª	240		2ª	não registrado
	3ª	225		3ª	235		3ª	não registrado
	Valor médio	225		Valor médio	235		Valor médio	-
	Desvio Padrão	2,9		Desvio Padrão	5,0		Desvio Padrão	-
Coef. Variação (%)	1,3	Coef. Variação (%)	2,1	Coef. Variação (%)	-			
Prisma moldado: B12 AC10			AC 10					
Temperatura ambiente: 28,8 °C								
Umidade relativa: 51%								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 2ª massada - Período da manhã (13h - 17h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 4ª massada - Período da tarde (13h - 17h)		
Determinações		Valor	Determinações		Valor	Determinações		Valor
Índice de consistência (mm)	1ª	225	Índice de consistência (mm)	1ª	190	Índice de consistência (mm)	1ª	230
	2ª	225		2ª	185		2ª	225
	3ª	220		3ª	185		3ª	230
	Valor médio	225		Valor médio	185		Valor médio	230
	Desvio Padrão	2,9		Desvio Padrão	2,9		Desvio Padrão	2,9
Coef. Variação (%)	1,3	Coef. Variação (%)	1,6	Coef. Variação (%)	1,3			
Prisma moldado: B24 AC20			AC 20					
Temperatura ambiente: não registrado								
Umidade relativa: não registrado								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da tarde (13h - 17h)			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 3ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^c					
Determinações		Valor	Determinações		Valor			
Índice de consistência (mm)	1ª	220	Índice de consistência (mm)	1ª	215			
	2ª	220		2ª	220			
	3ª	225		3ª	215			
	Valor médio	220		Valor médio	215			
	Desvio Padrão	2,9		Desvio Padrão	2,9			
Coef. Variação (%)	1,3	Coef. Variação (%)	1,3					

^a Ensaio realizado imediatamente após a mistura da argamassa.

^b Amostra extraída da quantidade restante na bandeja, após sua utilização.

^c Moldagem de corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Quadro 4.2 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas industrializadas ensaiadas aos 28 dias.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS								
Prisma moldado: B6 AI5			AI 5					
Temperatura ambiente: 25,4 °C								
Umidade relativa: 61%								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 4ª massada - Período da tarde (13h - 17h)			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 4ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^c		
	Determinações	Valor		Determinações	Valor		Determinações	Valor
Índice de consistência (mm)	1ª	255	Índice de consistência (mm)	1ª	260	Índice de consistência (mm)	1ª	240
	2ª	245		2ª	250		2ª	235
	3ª	245		3ª	260		3ª	245
	Valor médio	250		Valor médio	255		Valor médio	240
	Desvio Padrão	5,8		Desvio Padrão	5,8		Desvio Padrão	5,0
	Coef. Variação	2,3		Coef. Variação	2,3		Coef. Variação	2,1
Prisma moldado: B12 AI10			AI 10					
Temperatura ambiente: não registrado								
Umidade relativa: não registrado								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da manhã (8h - 12h)			Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 4ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 4ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^c		
	Determinações	Valor		Determinações	Valor		Determinações	Valor
Índice de consistência (mm)	1ª	240	Índice de consistência (mm)	1ª	240	Índice de consistência (mm)	1ª	250
	2ª	240		2ª	240		2ª	250
	3ª	240		3ª	240		3ª	250
	Valor médio	240		Valor médio	240		Valor médio	250
	Desvio Padrão	0,0		Desvio Padrão	0,0		Desvio Padrão	0,0
	Coef. Variação (%)	0,0		Coef. Variação (%)	0,0		Coef. Variação (%)	0,0
Prisma moldado: B24 AI20			AI 20					
Temperatura ambiente: não registrado								
Umidade relativa: não registrado								
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 2ª massada - Período da tarde (13h - 17h)			Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 3ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^c			Momento de extração da argamassa: ^b FIM da 3ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^c		
	Determinações	Valor		Determinações	Valor		Determinações	Valor
Índice de consistência (mm)	1ª	240	Índice de consistência (mm)	1ª	240	Índice de consistência (mm)	1ª	220
	2ª	240		2ª	235		2ª	215
	3ª	245		3ª	245		3ª	215
	Valor médio	240		Valor médio	240		Valor médio	215
	Desvio Padrão	2,9		Desvio Padrão	5,0		Desvio Padrão	2,9
	Coef. Variação (%)	1,2		Coef. Variação (%)	2,1		Coef. Variação (%)	1,3

^a Ensaio realizado imediatamente após a mistura da argamassa.

^b Amostra extraída da quantidade restante na bandeja, após sua utilização.

^c Moldagem de corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Do Quadro 4.1 e Quadro 4.2 observa-se que reduções expressivas ocorreram na consistência das argamassas entre sua mistura até seu consumo total durante o assentamento dos prismas. Todavia, apenas a medição realizada ao final de utilização da segunda massada do traço AC10 não atendeu ao intervalo de 240 ± 20 mm estabelecido como ideal para o assentamento dos blocos utilizados neste estudo. Conforme exposto no Item 3.3 deste texto, cabe salientar que o tempo médio transcorrido entre a mistura de todas as argamassas de assentamento e sua completa utilização não excedeu os quarenta minutos apontados na literatura com determinantes para a perdas significativas de consistência, sobretudo, de argamassas industrializadas.

4.2.2 ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO: CONTROLE TECNOLÓGICO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS AOS 28 DIAS

Os resultados de resistência à tração na flexão (ANBT NBR 13279:2005) obtidos após 28 dias em corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm) para argamassas de assentamento convencionais e industrializadas são exibidos no Quadro 4.3 e Quadro 4.4, respectivamente.

Quadro 4.3 – Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias para argamassas convencionais extraídas durante moldagem dos prismas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS							
Prisma moldado: B6 AC5							
Temperatura ambiente: 27,4°C							
Umidade relativa: 50%							
AC 5							
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - tarde			
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor	
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	80	1,84	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	122 2,81	
	CP2	108	2,48		CP2	122 2,81	
	CP3	112	2,58		CP3	108 2,48	
	Valor médio		2,30		Valor médio		2,70
	Desvio Padrão		0,4		Desvio Padrão		0,2
	Coef. Variação (%)		17,4		Coef. Variação (%)	6,9	
Prisma moldado: B12 AC10							
Temperatura ambiente: 27,4°C							
Umidade relativa: 50%							
AC 10							
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: FIM da 2ª massada - manhã			
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor	
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	140	3,22	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	166 3,82	
	CP2	164	3,77		CP2	150 3,45	
	CP3	166	3,82		CP3	164 3,77	
	Valor médio		3,60		Valor médio		3,68
	Desvio Padrão		0,3		Desvio Padrão		0,2
	Coef. Variação (%)		9,2		Coef. Variação (%)	5,4	
Prisma moldado: B24 AC20							
Temperatura ambiente: 27,4°C							
Umidade relativa: 50%							
AC 20							
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - tarde				Momento de extração da argamassa: FIM da 3ª massada - tarde			
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor	
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	252	5,79	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	222 5,10	
	CP2	234	5,38		CP2	242 5,56	
	CP3	246	5,66		CP3	242 5,56	
	Valor médio		5,61		Valor médio		5,41
	Desvio Padrão		0,2		Desvio Padrão		0,3
	Coef. Variação (%)		3,8		Coef. Variação (%)	4,9	

* Ensaio realizado aos 28 dias em espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Quadro 4.4 – Resultados de resistência à tração na flexão aos 28 dias para argamassas industrializadas extraídas durante moldagem dos prismas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS						
Prisma moldado: B6 AI5 Temperatura ambiente: 26,2 °C Umidade relativa: 44%						
AI 5						
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - tarde		
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	134	3,08	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	108 2,48
	CP2	136	3,13		CP2	108 2,48
	CP3	124	2,85		CP3	104 2,39
	Valor médio		3,02		Valor médio	
	Desvio Padrão		0,1		Desvio Padrão	0,1
	Coef. Variação (%)		4,9		Coef. Variação (%)	2,2
Prisma moldado: B12 AI10 Temperatura ambiente: 26,2 °C Umidade relativa: 44%						
AI 10						
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 4ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - manhã		
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	224	5,15	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	220 5,06
	CP2	220	5,06		CP2	250 5,75
	CP3	230	5,29		CP3	244 5,61
	Valor médio		5,17		Valor médio	
	Desvio Padrão		0,1		Desvio Padrão	0,4
	Coef. Variação (%)		2,2		Coef. Variação (%)	6,7
Prisma moldado: B24 AC20 Temperatura ambiente: 26,2 °C Umidade relativa: 44%						
AI 20						
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 3ª massada - tarde				Momento de extração da argamassa: FIM da 3ª massada - tarde		
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor		Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf) Valor
Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	300	6,90	Resistência à tração na flexão (MPa) *	CP1	320 7,36
	CP2	302	6,94		CP2	348 8,00
	CP3	290	6,67		CP3	304 6,99
	Valor médio		6,84		Valor médio	
	Desvio Padrão		0,1		Desvio Padrão	0,5
	Coef. Variação (%)		2,2		Coef. Variação (%)	6,9

* Ensaio realizado aos 28 dias em espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Do Quadro 4.3 e Quadro 4.4 nota-se que, para a resistência de tração na flexão, os ensaios de controle tecnológico das argamassas convencionais e industrializadas exibiram resultados coerentes e até superiores aos obtidos durante a caracterização preliminar das misturas (Tabela 4.6 e Tabela 4.7).

Os resultados de controle para resistência à compressão (ANBT NBR 13279:2005) obtidos, aos 28 dias, em metades ensaiadas na flexão de corpos de prova prismáticos (40 × 40

× 160 mm) das argamassas de assentamento convencionais e industrializadas são exibidos no Quadro 4.5 e Quadro 4.6, respectivamente.

Quadro 4.5 – Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas convencionais extraídas durante assentamento dos prismas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS									
Prisma moldado: B6 AC5									
Temperatura ambiente: 27,8 °C									
Umidade relativa: 48%									
AC 5					AC 5				
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã					Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - tarde				
Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
CP1	744	4,56	926	5,68	CP1	930	5,70	800	4,91
CP2	842	5,16	1002	6,14	CP2	926	5,68	902	5,53
CP3	1000	6,13	994	6,09	CP3	748	4,59	784	4,81
Valor médio	862	5,29	974	5,97	Valor médio	868	5,32	829	5,08
Desvio Padrão	129,2	0,8	41,8	0,3	Desvio Padrão	103,9	0,6	64,0	0,4
Coef. Variação (%)	15,0	15,0	4,3	4,3	Coef. Variação (%)	12,0	12,0	7,7	7,7
Média geral resistência à compressão (MPa)			5,63		Média geral resistência à compressão (MPa)			5,20	
Prisma moldado: B12 AC10									
Temperatura ambiente: 27,8 °C									
Umidade relativa: 48%									
AC 10					AC 10				
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã					Momento de extração da argamassa: FIM da 2ª massada - manhã				
Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
CP1	1568	9,61	1596	9,79	CP1	1728	10,59	1656	10,15
CP2	1864	11,43	1786	10,95	CP2	1620	9,93	1938	11,88
CP3	1798	11,02	1860	11,40	CP3	1464	8,98	1784	10,94
Valor médio	1.743	10,69	1.747	10,71	Valor médio	1.604	9,83	1.793	10,99
Desvio Padrão	155,4	1,0	136,2	0,8	Desvio Padrão	132,7	0,8	141,2	0,9
Coef. Variação (%)	8,9	8,9	7,8	7,8	Coef. Variação (%)	8,3	8,3	7,9	7,9
Média geral resistência à compressão (MPa)			10,70		Média geral resistência à compressão (MPa)			10,41	
Prisma moldado: B24 AC20									
Temperatura ambiente: 27,8 °C									
Umidade relativa: 48%									
AC 20					AC 20				
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - tarde					Momento de extração da argamassa: FIM da 3ª massada - tarde				
Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
CP1	2734	16,76	2742	16,81	CP1	3030	18,58	3018	18,50
CP2	2710	16,62	2666	16,35	CP2	2378	14,58	2904	17,81
CP3	3088	18,93	3020	18,52	CP3	2336	14,32	2770	16,98
Valor médio	2.844	17,44	2.809	17,22	Valor médio	2.581	15,83	2.897	17,76
Desvio Padrão	211,7	1,3	186,4	1,1	Desvio Padrão	389,1	2,4	124,1	0,8
Coef. Variação (%)	7,4	7,4	6,6	6,6	Coef. Variação (%)	15,1	15,1	4,3	4,3
Média geral resistência à compressão (MPa)			17,33		Média geral resistência à compressão (MPa)			16,80	

* Ensaio realizado aos 28 dias nas metades dos espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm testados na flexão.

Fonte: Autor (2023)

Em relação à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023, os resultados do Quadro 4.5 para resistência à compressão obtida em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram as amostras de AC5, AC10 e AC20 extraídas durante a montagem dos prismas nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE8 (8,0 MPa ≤ f_a < 12,0 MPa) e AAE16 (16,0 MPa ≤ f_a < 20,0 MPa), respectivamente.

Quadro 4.6 – Resistência à compressão aos 28 dias para argamassas industrializadas extraídas durante assentamento dos prismas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS											
Prisma moldado: B6 AI5											
Temperatura ambiente: 26,4 °C											
Umidade relativa: 44%											
AI5											
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 2ª massada - manhã						Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - tarde					
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)		Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
Resistência à compressão das metades *	CP1	1198	7,35	1128	6,92	Resistência à compressão das metades *	CP1	568	3,48	634	3,89
	CP2	1196	7,33	1120	6,87		CP2	506	3,10	704	4,32
	CP3	904	5,54	1114	6,83		CP3	754	4,62	684	4,19
	Valor médio	1.099	6,74	1.121	6,87		Valor médio	609	3,74	674	4,13
	Desvio Padrão	169,2	1,0	7,0	0,0		Desvio Padrão	129,1	0,8	36,1	0,2
	Coef. Variação (%)	15,4	15,4	0,6	0,6		Coef. Variação (%)	21,2	21,2	5,3	5,3
	Média geral resistência à compressão (MPa)				6,81					Média geral resistência à compressão (MPa)	3,93
Prisma moldado: B12 AI10											
Temperatura ambiente: 26,4 °C											
Umidade relativa: 44%											
AI10											
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 4ª massada - manhã						Momento de extração da argamassa: FIM da 4ª massada - manhã					
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)		Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
Resistência à compressão das metades *	CP1	1802	11,05	1774	10,88	Resistência à compressão das metades *	CP1	2174	13,33	2296	14,08
	CP2	1630	9,99	1740	10,67		CP2	2128	13,05	1770	10,85
	CP3	2144	13,15	2148	13,17		CP3	2138	13,11	1996	12,24
	Valor médio	1.859	11,40	1.887	11,57		Valor médio	2.147	13,16	2.021	12,39
	Desvio Padrão	261,6	1,6	226,4	1,4		Desvio Padrão	24,2	0,1	263,9	1,6
	Coef. Variação (%)	14,1	14,1	12,0	12,0		Coef. Variação (%)	1,1	1,1	13,1	13,1
	Média geral resistência à compressão (MPa)				11,48					Média geral resistência à compressão (MPa)	12,78
Prisma moldado: B24 AI20											
Temperatura ambiente: 26,4 °C											
Umidade relativa: 44%											
AI20											
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 3ª massada - tarde						Momento de extração da argamassa: FIM da 3ª massada - tarde					
	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)		Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
Resistência à compressão das metades *	CP1	3272	20,06	2664	16,33	Resistência à compressão das metades *	CP1	3198	19,61	2714	16,64
	CP2	3170	19,44	3508	21,51		CP2	4028	24,70	3338	20,47
	CP3	3220	19,74	3628	22,24		CP3	3626	22,23	3512	21,53
	Valor médio	3.221	19,75	3.267	20,03		Valor médio	3.617	22,18	3.188	19,55
	Desvio Padrão	51,0	0,3	525,4	3,2		Desvio Padrão	415,1	2,5	419,6	2,6
	Coef. Variação (%)	1,6	1,6	16,1	16,1		Coef. Variação (%)	11,5	11,5	13,2	13,2
	Média geral resistência à compressão (MPa)				19,89					Média geral resistência à compressão (MPa)	20,86

* Ensaio realizado aos 28 dias nas metades dos espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm testados na flexão.

Fonte: Autor (2023)

Quanto à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023, os resultados do Quadro 4.6 para resistência à compressão obtida em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram as amostras de AI5, AI10 e AI20 extraídas durante a montagem dos prismas nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE12 (12,0 MPa ≤ f_a < 16,0 MPa) e AAE20 (20,0 MPa ≤ f_a < 24,0 MPa), respectivamente. Observa-se do Quadro 4.5 e Quadro 4.6 um comportamento contrário ao verificado para propriedade de tração na flexão: menores valores foram obtidos para as amostras extraídas durante a montagem dos prismas.

4.2.3 ARGAMASSAS DE ASSENTAMENTO: CONTROLE DE PROPRIEDADES MECÂNICAS NA IDADE DE AQUECIMENTO DOS PRISMAS

Os resultados de consistência obtidos para as misturas das argamassas de assentamento convencionais e industrializadas empregadas na moldagem de corpos de prova para ensaios na época da queima dos prismas são apresentados pelo Quadro 4.7.

Quadro 4.7 – Argamassas de assentamento dos prismas: controle de consistência de argamassas convencionais ensaiadas na época da queima dos prismas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS						
Temperatura ambiente: 27,7°C						
Umidade relativa: 62%						
AC 5		AC 10		AC 20		
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da tarde (13h - 17h) ^b		Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^b		Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^b		
Determinações	Valor	Determinações	Valor	Determinações	Valor	
Índice de consistência (mm)	1ª	não registrado	1ª	215	1ª	210
	2ª	não registrado	2ª	225	2ª	225
	3ª	não registrado	3ª	225	3ª	215
	Valor médio	-	Valor médio	220	Valor médio	215
	Desvio Padrão	-	Desvio Padrão	5,8	Desvio Padrão	7,6
Coef. Variação (%)	-	Coef. Variação (%)	2,6	Coef. Variação (%)	3,6	
ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS						
Temperatura ambiente: 25,8°C						
Umidade relativa: 66%						
AI 5		AI 10		AI 20		
Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^b		Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^b		Momento de extração da argamassa: ^a INÍCIO da 5ª massada - Período da manhã (8h - 12h) ^b		
Determinações	Valor	Determinações	Valor	Determinações	Valor	
Índice de consistência (mm)	1ª	255	1ª	260	1ª	225
	2ª	255	2ª	250	2ª	225
	3ª	255	3ª	255	3ª	225
	Valor médio	255	Valor médio	255	Valor médio	225
	Desvio Padrão	0,0	Desvio Padrão	5,0	Desvio Padrão	0,0
Coef. Variação (%)	0,0	Coef. Variação (%)	2,0	Coef. Variação (%)	0,0	

^a Ensaio realizado imediatamente após a mistura da argamassa.

^b Moldagem de corpos de prova prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Neste caso, observa-se no Quadro 4.7 que todos os valores de consistências foram contemplados pelo intervalo de 240 ± 20 mm.

Os resultados de resistência à tração na flexão (ANBT NBR 13279:2005) obtidos na época da queima dos prismas em corpos de prova prismáticos (40 × 40 × 160 mm) para argamassas de assentamento convencionais e industrializadas são exibidos no Quadro 4.8 e Quadro 4.9, respectivamente.

Quadro 4.8 – Resultados de resistência à tração na flexão na época de queima dos prismas para argamassas convencionais extraídas durante moldagem dos prismas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS								
Prisma moldado: B6 AC5 Temperatura ambiente: 18,9 °C Umidade relativa: 61 % AC 5			Prisma moldado: B12 AC10 Temperatura ambiente: 22,9 °C Umidade relativa: 67 % AC 10			Prisma moldado: B24 AC20 Temperatura ambiente: 26,4 °C Umidade relativa: 64 % AC 20		
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - tarde			Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã			Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã		
Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor
CP1	120	2,76	CP1	60	1,38	CP1	148	3,40
CP2	86	1,98	CP2	90	2,07	CP2	190	4,37
CP3	80	1,84	CP3	92	2,12	CP3	164	3,77
Valor médio		2,19	Valor médio		1,85	Valor médio		3,85
Desvio Padrão		0,5	Desvio Padrão		0,4	Desvio Padrão		0,5
Coef. Variação (%)		22,6	Coef. Variação (%)		22,2	Coef. Variação (%)		12,7

* Ensaio realizado na idade de queima dos prismas, em espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Quadro 4.9 – Resultados de resistência à tração na flexão na época de queima dos prismas para argamassas industrializadas extraídas durante moldagem dos prismas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS								
Prisma moldado: B6 AI5 Temperatura ambiente: 18,9 °C Umidade relativa: 61 % AI 5			Prisma moldado: B12 AI10 Temperatura ambiente: 25,6 °C Umidade relativa: 58 % AI 10			Prisma moldado: B24 AI20 Temperatura ambiente: 26,4 °C Umidade relativa: 64 % AI 20		
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã			Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã			Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã		
Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor	Corpo de Prova	Carga de Ruptura (kgf)	Valor
CP1	100	2,30	CP1	156	3,59	CP1	246	5,66
CP2	114	2,62	CP2	194	4,46	CP2	262	6,02
CP3	106	2,44	CP3	214	4,92	CP3	252	5,79
Valor médio		2,45	Valor médio		4,32	Valor médio		5,82
Desvio Padrão		0,2	Desvio Padrão		0,7	Desvio Padrão		0,2
Coef. Variação (%)		6,6	Coef. Variação (%)		15,7	Coef. Variação (%)		3,2

* Ensaio realizado na idade de queima dos prismas, em espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm.

Fonte: Autor (2023)

Os resultados de resistência à compressão (ANBT NBR 13279:2005) obtidos na época de queima dos prismas para as metades ensaiadas na flexão de corpos de prova prismáticos (40 x 40 x 160 mm) das argamassas de assentamento convencionais e industrializadas são exibidos no Quadro 4.10 e Quadro 4.11, respectivamente.

Quadro 4.10 – Resistência à compressão na época de queima para argamassas convencionais extraídas durante assentamento dos prismas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS														
Prisma moldado: B6 AC5 Temperatura ambiente: 18,9 °C Umidade relativa: 61 % AC 5				Prisma moldado: B12 AC10 Temperatura ambiente: 22,9 °C Umidade relativa: 67 % AC 10				Prisma moldado: B24 AC20 Temperatura ambiente: 26,4 °C Umidade relativa: 64 % AC 20						
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - tarde				Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã						
Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Corpo de Prova	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)
CP1	1198	7,35	1234	7,57	CP1	1290	7,91	1452	8,90	CP1	2674	16,39	2928	17,95
CP2	1198	7,35	1152	7,06	CP2	1760	10,79	1840	11,28	CP2	3168	19,42	2404	14,74
CP3	1056	6,47	1150	7,05	CP3	1716	10,52	1912	11,72	CP3	2324	14,25	2350	14,41
Valor médio	1.151	7,06	1.179	7,23	Valor médio	1.589	9,74	1.735	10,64	Valor médio	2.722	16,69	2.561	15,70
Desvio Padrão	82,0	0,5	47,9	0,3	Desvio Padrão	259,6	1,6	247,4	1,5	Desvio Padrão	424,0	2,6	319,3	2,0
Coef. Variação (%)	7,1	7,1	4,1	4,1	Coef. Variação (%)	16,3	16,3	14,3	14,3	Coef. Variação (%)	15,6	15,6	12,5	12,5
Média geral resistência à compressão (MPa)				7,14	Média geral resistência à compressão (MPa)				10,19	Média geral resistência à compressão (MPa)				16,19

* Ensaio realizado na idade de queima dos prismas, nas metades dos espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm testados na flexão.

Fonte: Autor (2023)

No que tange à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas de assentamento em alvenaria estrutural (AAE), os resultados do Quadro 4.10 para

resistência à compressão obtida em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram as amostras de AC5, AC10 e AC20 moldadas para teste no mesmo período de queima dos prismas nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE8 (8,0 MPa ≤ f_a < 12,0 MPa) e AAE16 (16,0 MPa ≤ f_a < 20,0 MPa), respectivamente.

Quadro 4.11 – Resistência à compressão na época de queima para argamassas industrializadas extraídas durante assentamento dos prismas.

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS															
Prisma moldado: B6 AI5 Temperatura ambiente: 18,9 °C Umidade relativa: 61 %				Prisma moldado: B12 AI10 Temperatura ambiente: 25,6 °C Umidade relativa: 58 %				Prisma moldado: B24 AI20 Temperatura ambiente: 26,4 °C Umidade relativa: 64 %							
AI5				AI10				AI20							
Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã				Momento de extração da argamassa: INÍCIO da 5ª massada - manhã							
Resistência à compressão das metades *	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Resistência à compressão das metades *	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	Resistência à compressão das metades *	Carga de Ruptura Lado A (kgf)	Resistência Lado A (MPa)	Carga de Ruptura Lado B (kgf)	Resistência Lado B (MPa)	
		848	5,20	886		5,43		1652	10,13		1780	10,91		1714	10,51
	864	5,30	830	5,09		1920	11,77	1626	9,97		4286	26,28	3508	21,51	
	874	5,36	878	5,38		1770	10,85	1600	9,81		3632	22,27	3692	22,64	
	862	5,29	865	5,30		Valor médio	1,781	10,92	1,669	10,23	Valor médio	3,211	19,69	3,761	23,06
	13,1	0,1	30,3	0,2		Desvio Padrão	134,3	0,8	97,3	0,6	Desvio Padrão	1.336,8	8,2	294,2	1,8
	1,5	1,5	3,5	3,5		Coef. Variação (%)	7,5	7,5	5,8	5,8	Coef. Variação (%)	41,6	41,6	7,8	7,8
	Média geral resistência à compressão (MPa)			5,29		Média geral resistência à compressão (MPa)			10,57		Média geral resistência à compressão (MPa)			21,37	

* Ensaio realizado na idade de queima dos prismas, nas metades dos espécimes prismáticos 40 x 40 x 160 mm testados na flexão.

Fonte: Autor (2023)

Quanto à classificação de uso proposta pela ABNT NBR 13281-2:2023 para argamassas de assentamento em alvenaria estrutural (AAE), os resultados do Quadro 4.11 para resistência à compressão obtida em metades de prismas (40 × 40 × 160 mm) enquadram as amostras de AI5, AI10 e AI20 moldadas para teste no mesmo período de queima dos prismas nos grupos AAE5 (5,0 MPa ≤ f_a < 8,0 MPa), AAE8 (8,0 MPa ≤ f_a < 12,0 MPa) e AAE20 (20,0 MPa ≤ f_a < 24,0 MPa), respectivamente.

4.3 RESULTADOS DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS RESIDUAIS

Neste item são apresentados os resultados obtidos na determinação das propriedades mecânicas residuais (após queima e resfriamento) para as argamassas, grautes e prismas, bem como os resultados de referência das mesmas propriedades, obtidos em temperatura ambiente.

4.3.1 ARGAMASSAS

Os valores médios para as propriedades mecânicas residuais e as relações com os valores obtidos em temperatura ambiente (relações residuais) para as argamassas de assentamento convencionais são exibidos pela Tabela 4.12. Os resultados individuais, valores de desvio padrão e coeficiente de variação são expostos no Apêndice B deste texto.

Tabela 4.12 – Propriedades mecânicas residuais das argamassas de assentamento convencionais.

ARGAMASSA CONVENCIONAL 5 MPa - AC 5				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	5,15	1,00	3940	1,00
200	5,62	1,09	2910	0,74
400	3,67	0,71	1328	0,34
600	1,36	0,26	189	0,05
800	-	-	-	-

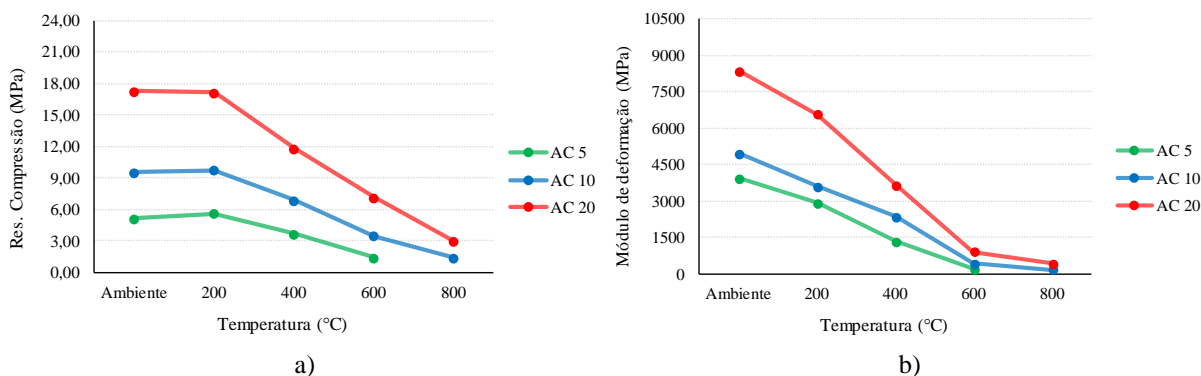
ARGAMASSA CONVENCIONAL 10 MPa - AC 10				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	9,53	1,00	4936	1,00
200	9,76	1,02	3580	0,73
400	6,85	0,72	2327	0,47
600	3,49	0,37	402	0,08
800	1,38	0,14	152	0,03

ARGAMASSA CONVENCIONAL 20 MPa - AC 20				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	17,28	1,00	8346	1,00
200	17,12	0,99	6577	0,79
400	11,81	0,68	3655	0,44
600	7,13	0,41	903	0,11
800	2,98	0,17	400	0,05

Fonte: Autor (2023)

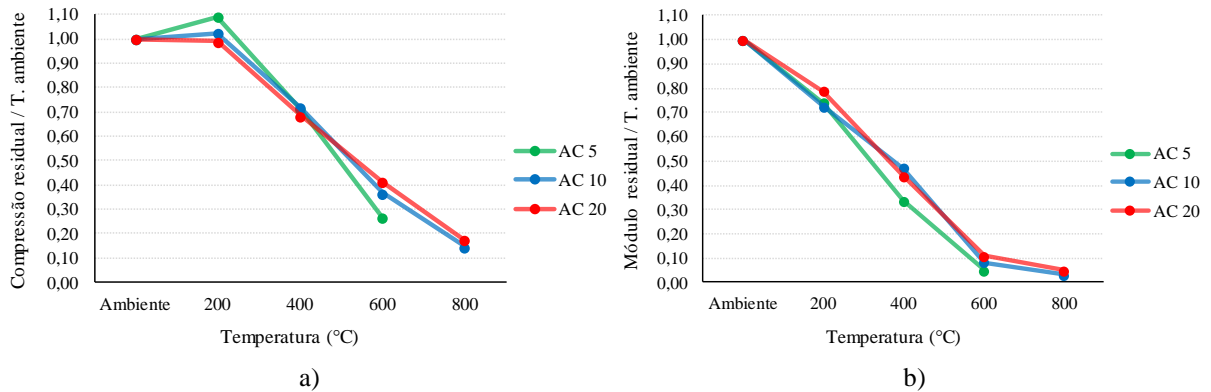
A progressão dos valores e das relações residuais são ilustradas pelos gráficos contidos na Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente.

Figura 4.1 – Propriedades residuais das argamassas de assentamento convencionais: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

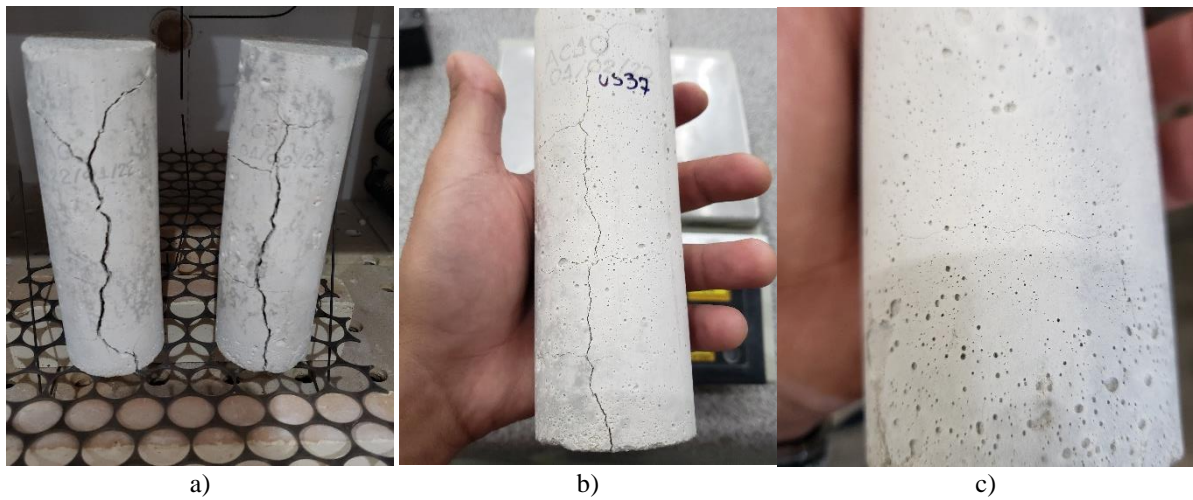
Figura 4.2 – Relações residuais para argamassas de assentamento convencionais: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

Para os aquecimentos superiores a 400°C observou-se a fissuração dos corpos de prova cilíndricos moldados com as argamassas convencionais, conforme exposto pela Figura 4.3 e Figura 4.4.

Figura 4.3 – Fissuração das argamassas convencionais após 600°C: a) AC5; b) AC10; c) AC20.



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.4 – Fissuração das argamassas convencionais após 800°C: a) AC10; b) AC20.

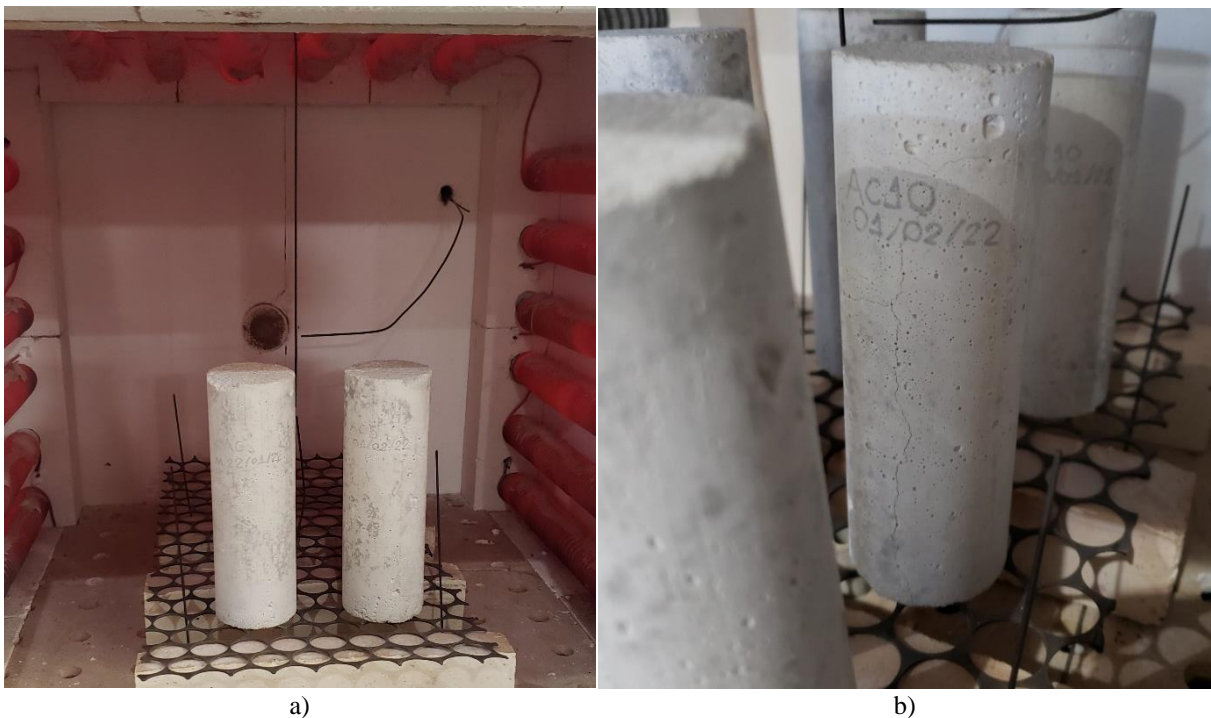


Fonte: Autor (2023)

A distribuição das fissuras ocorreu na forma de mapa e seu tamanho foi proporcional à quantidade de cal contida nas misturas. Assim, as fissuras de maior intensidade foram apresentadas pela argamassa convencional de 5 MPa e as de menor intensidade foram observadas na argamassa convencional de 20 MPa.

A fim de identificar o início da fissuração, duas das argamassas (AC5 e AC10) foram observadas em diferentes estágios do aquecimento, com a rápida abertura do forno (Figura 4.5).

Figura 4.5 – Argamassas AC5 e AC10 aquecidas a 600°C: a) corpos de prova de AC5 íntegros após trinta minutos de manutenção da temperatura de interesse; b) início da fissuração nos corpos de prova de AC10.



Fonte: Autor (2023)

Para as amostras de AC5 e AC10 ensaiadas até os 600°C, constatou-se que a fissuração não ocorreu durante todo o trecho ascendente da curva RILEM TC 200 HTC:2007. Posteriormente, com nova abertura do forno, trinta minutos após o início do período de manutenção da temperatura de 600°C, os corpos de prova ainda se mostravam íntegros (Figura 4.5a). A hipótese de que a macro fissuração das amostras ocorreu somente durante o período de resfriamento foi confirmada pela observação da argamassa AC10, cujas fissuras tornaram-se visíveis a olho nu somente após o interior do forno retornar aos 1+08°C (Figura 4.5b).

Observando a Tabela 4.12, nota-se que as maiores reduções das propriedades mecânicas ocorreram para as argamassas aquecidas acima dos 400°C. Conforme apresentado na literatura correlata (Baradan *et al.*, 2002; Alonso e Fernandez, 2004; Mehta e Monteiro, 2014; Pham e Prince, 2014; Pimienta *et al.*, 2017; Alani; Hassan; Jaber, 2020), tais reduções são causadas pela desidratação de compostos do cimento, sobretudo do silicato de cálcio hidratado(C-S-H) e do hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂.

A fissuração durante o resfriamento das argamassas, por sua vez, está associada à reincorporação do vapor de água presente na atmosfera. Com a recuperação de umidade, a cal (CaO) sofre reidratação e retorna à forma de hidróxido de cálcio - Ca(OH)₂, com significativa expansão da pasta de cimento (Castellone *et al.*, 2004; Szoke, 2006; Neville, 2016). Essa expansão resulta no aparecimento das fissuras de forma característica e disseminada, tal com as observadas neste (Figura 4.3, Figura 4.4) e em outros trabalhos da literatura (Zhang e Ye, 2011; Henry, Suzuki e Kato, 2011; Pachta, Triantafyllaki e Stefanidou, 2018).

Os valores médios para as propriedades mecânicas residuais e as relações com os valores obtidos em temperatura ambiente para as argamassas de assentamento industrializadas constam na Tabela 4.13.

Tabela 4.13 – Propriedades mecânicas residuais das argamassas de assentamento e industrializadas.

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 5 MPa - AI 5				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	3,98	1,00	3844	1,00
200	3,76	0,94	3032	0,79
400	3,48	0,88	1739	0,45
600	2,75	0,69	637	0,17
800	0,65	0,16	133	0,03

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 10 MPa - AI 10				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.

Ambiente	13,42	1,00	6497	1,00
200	13,87	1,03	5950	0,92
400	11,03	0,82	3593	0,55
600	8,70	0,65	1541	0,24
800	2,31	0,17	392	0,06

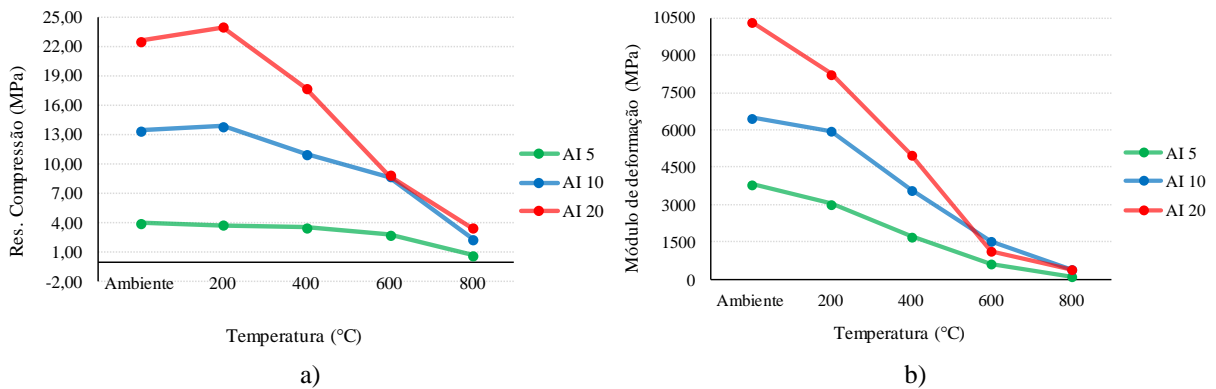
ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 20 MPa - AI 20

Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	22,55	1,00	10352	1,00
200	24,01	1,06	8261	0,80
400	17,79	0,79	5015	0,48
600	8,85	0,39	1136	0,11
800	3,45	0,15	404	0,04

Fonte: Autor (2023)

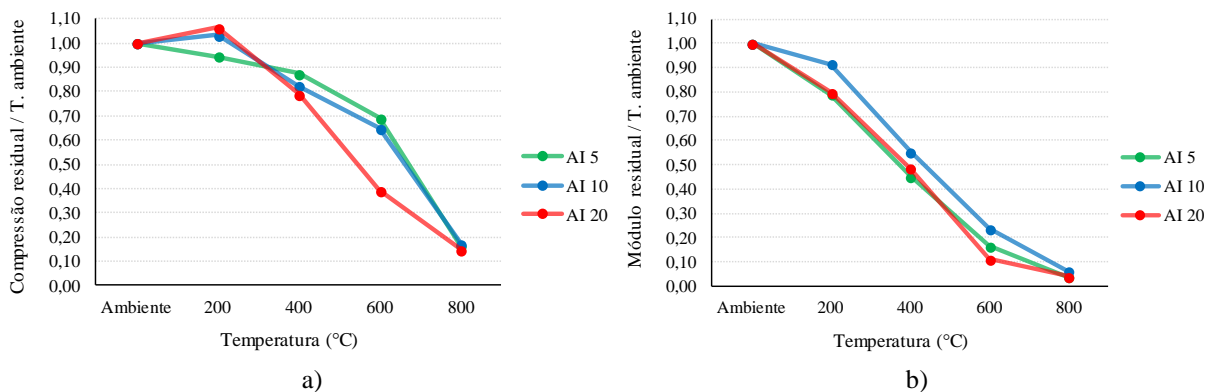
A progressão dos valores e das relações residuais são ilustradas pelos gráficos contidos na Figura 4.6 e Figura 4.7, respectivamente.

Figura 4.6 – Propriedades residuais das argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

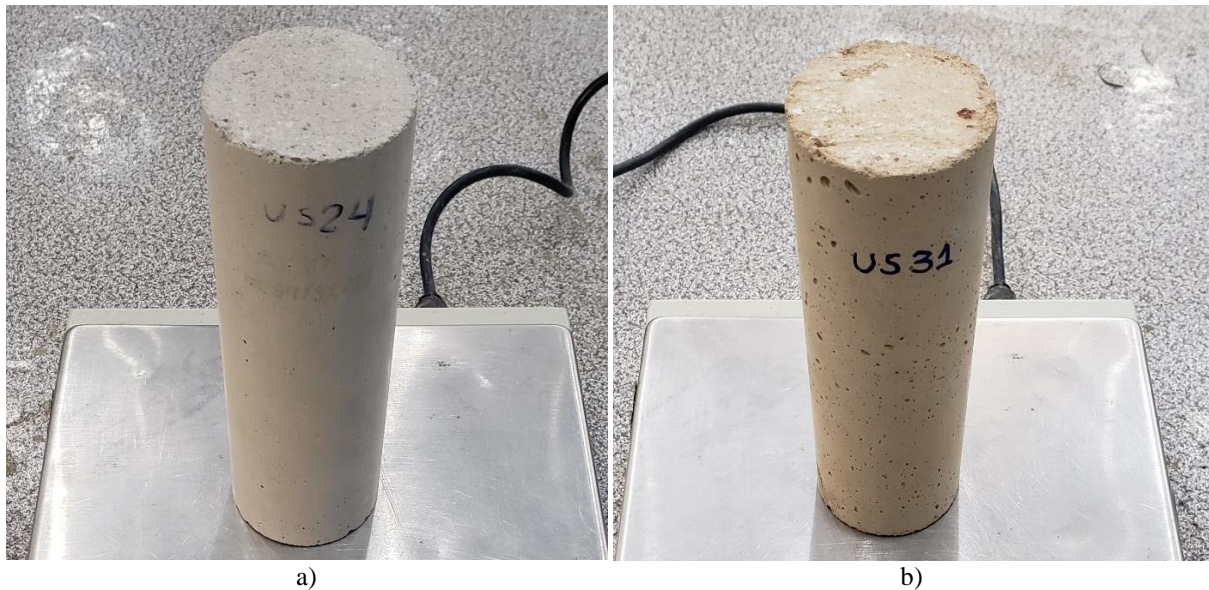
Figura 4.7 – Relações residuais das argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

Um mesmo comportamento foi observado nas argamassas convencionais e nas argamassas industrializadas: a degradação precoce do módulo de deformação secante em comparação à resistência à compressão. Quanto à fissuração, visível a olho nu nas argamassas convencionais, esta não foi observada nos corpos de prova de argamassas industrializadas, o que evidencia a presença da cal como determinante para a ocorrência do fenômeno (Figura 4.8).

Figura 4.8 – Ausência de fissuração durante resfriamento das argamassas industrializadas submetidas a 600°C: a) AI10; b) AI20.



Fonte: Autor (2023)

Mesmo na ausência de fissuras visíveis, é possível notar que as maiores reduções das propriedades mecânicas também ocorreram para as argamassas industrializadas aquecidas acima dos 400°C. Assim como nas argamassas com cal, essa redução está associada à decomposição dos hidratos do cimento: o silicato de cálcio hidratado (C-S-H), hidróxido de cálcio - Ca(OH)_2 .

Destaca-se que após serem aquecidas até 600°C, as argamassas AI5 e AI10 (de um mesmo fabricante) apresentaram relações residuais para resistência à compressão consideravelmente maiores que as fornecidas pelas argamassas convencionais de 5 e de 10 MPa. Enquanto as argamassas AC5 e AC10 mantiveram, respectivamente, 26% e 35% da resistência à compressão obtida em temperatura ambiente, as argamassas industrializadas AI5 e AI10 conservaram, respectivamente, 69% e 65% da resistência de referência. Para o módulo de deformação o mesmo comportamento foi observado, porém, com menor intensidade. Após 600°C, as argamassas AC5 e AC10 conservaram, respectivamente, 5% e 8% da propriedade enquanto AI5 e AI10 mantiveram, respectivamente, 17% e 24% do módulo de referência.

4.3.1.1 Análise estatística: influência da temperatura na resistência das argamassas

A influência do fator “temperatura” nas propriedades de resistência à compressão e módulo de deformação das argamassas de assentamento (convencionais e industrializadas) foi investigada por meio de Análise de Variância (ANOVA) *One Way* e complementada pelo Teste de Tukey. Para ambas as análises, considerou-se nível de significância igual a 5% ($\alpha=0,05$). A normalidade na distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk, também com significância de 5%. Todo o processo foi auxiliado pelo software estatístico OriginPro.

Os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para valores de resistência à compressão das argamassas de assentamento são apresentados na Figura 4.9. Se p-valor é maior ou igual ao nível de significância ($\alpha=0,05$), existe uma tendência significativa de normalidade na distribuição dos resultados.

Figura 4.9 – Resultado do teste de normalidade para valores de resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AC5 - T amb.	6	0,88598	0,29768	Can't reject normality
AC5 - 200°C	6	0,93357	0,60795	Can't reject normality
AC5 - 400°C	6	0,82952	0,10649	Can't reject normality
AC5 - 600°C	4	0,87978	0,33768	Can't reject normality

a)

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AC10 - T amb.	6	0,86421	0,20409	Can't reject normality
AC10 - 200°C	6	0,888	0,30783	Can't reject normality
AC10 - 400°C	6	0,94303	0,68366	Can't reject normality
AC10 - 600°C	5	0,85895	0,2245	Can't reject normality
AC10 - 800°C	6	0,81203	0,0752	Can't reject normality

b)

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AC20 - T amb.	6	0,90125	0,38137	Can't reject normality
AC20 - 200°C	6	0,9261	0,55031	Can't reject normality
AC20 - 400°C	6	0,95315	0,76572	Can't reject normality
AC20 - 600°C	6	0,85758	0,18101	Can't reject normality
AC20 - 800°C	6	0,93952	0,6553	Can't reject normality

c)

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AI5 - T amb.	6	0,96697	0,87149	Can't reject normality
AI5 - 200°C	5	0,73741	0,02266	Reject normality
AI5 - 400°C	6	0,86594	0,2105	Can't reject normality
AI5 - 600°C	6	0,90752	0,42029	Can't reject normality
AI5 - 800°C	6	0,82896	0,10533	Can't reject normality

d)

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AI10 - T amb.	6	0,87	0,22619	Can't reject normality
AI10 - 200°C	6	0,9178	0,48967	Can't reject normality
AI10 - 400°C	6	0,99214	0,99375	Can't reject normality
AI10 - 600°C	6	0,92574	0,54764	Can't reject normality
AI10 - 800°C	6	0,9697	0,89039	Can't reject normality

e)

NormalityTest
Shapiro-Wilk

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
AI20 - T amb.	6	0,91577	0,47542	Can't reject normality
AI20 - 200°C	6	0,9782	0,94227	Can't reject normality
AI20 - 400°C	6	0,94835	0,72693	Can't reject normality
AI20 - 600°C	6	0,95577	0,78658	Can't reject normality
AI20 - 800°C	5	0,9319	0,60942	Can't reject normality

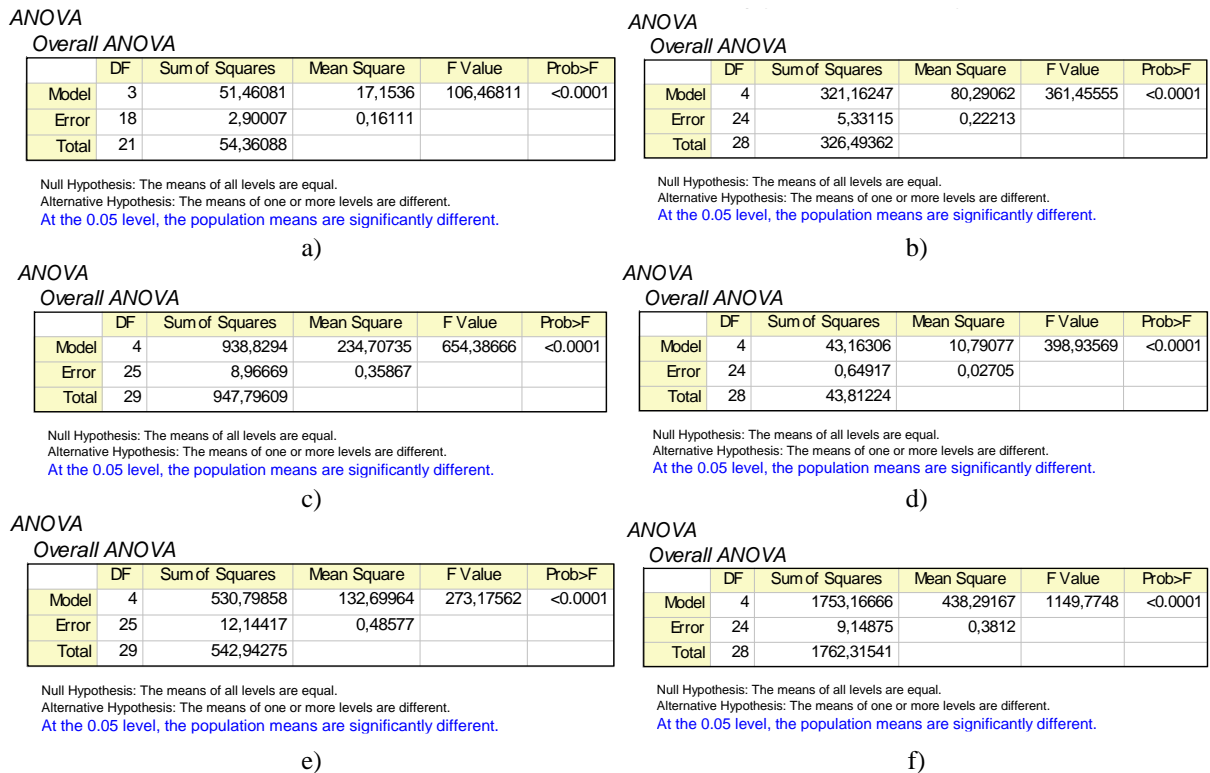
f)

Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 4.9 que, com exceção dos resultados de 200°C na argamassa AI5, as argamassas de assentamento apresentaram distribuições normais para os resultados de resistência à compressão. Precedeu-se então com a ANOVA (Figura 4.10). Para a ANOVA, p-valor (Prob) maior ou igual ao nível de significância ($\alpha=0,05$), aceita-se a hipótese nula (H0) de que as médias dos grupos analisados são estatisticamente equivalentes. De modo contrário,

p-valor menor que α aponta para rejeição da hipótese nula, e indica que existe uma diferença significativa no grupo de resultados analisados.

Figura 4.10 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.

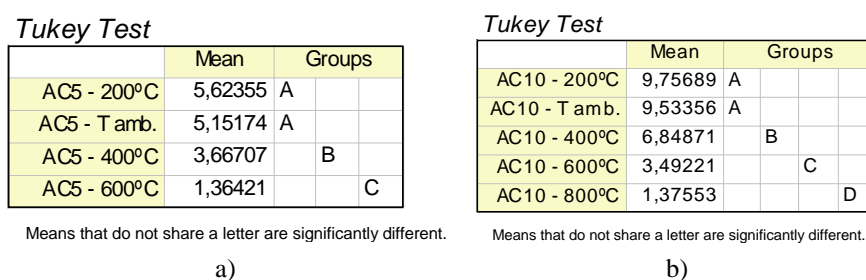


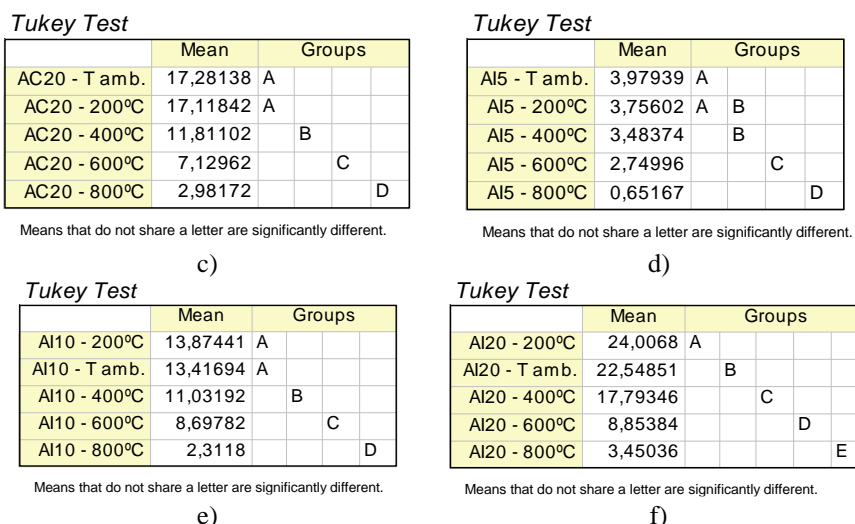
Fonte: Autor (2023)

A análise da Figura 4.16 ratifica o que foi observado durante a execução dos ensaios. A variação no fator temperatura alterou significativamente os resultados de resistência à compressão de todas as argamassas de assentamento, independentemente de sua composição.

Constatada a existência de diferença significativa dentro do conjunto de resultados (T amb., 200, 400, 600 e 800°C) de cada argamassa, o teste de Tukey foi realizado para localizar, dentro deste grupo, entre quais temperaturas especificamente ocorriam tais diferenças. Os resultados do teste Tukey são exibidos na Figura 4.11. Letras iguais representam equivalência entre as médias dos resultados e letras diferentes apontam para diferença significativa.

Figura 4.11 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre resistência à compressão das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.





Fonte: Autor (2023)

A Figura 4.21a, por exemplo, indica que dentro do grupo de resultados obtidos para as argamassas AC5, AC10, AC20, AI5 e AI10 a diferença entre os resultados passou e se tornar significativa a partir dos 200°C. Em outras palavras, as temperaturas de 400°C e superiores alteraram significativamente os valores de resistência à compressão obtidos. As temperaturas de 200°C e 400°C forneceram médias equivalentes para a argamassa AI10 e para a argamassa AI20 todas as temperaturas forneceram médias de resultados estatisticamente diferentes entre si.

4.3.1.2 Análise estatística: influência da temperatura no módulo de deformação secante das argamassas

Assim como realizado para a propriedade de resistência à compressão, a normalidade dos resultados de módulo de deformação secante das argamassas foi submetida ao teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$). Constatou-se por meio do teste que, com exceção dos resultados da argamassa AI20 para temperatura de 400°C (p-valor=0,03), as argamassas de assentamento testadas nesta pesquisa apresentaram, para as cinco temperaturas de ensaio (T amb., 200, 400, 600 e 800°C) valores de módulo normalmente distribuídos.

A realização da ANOVA para o fator temperatura e a propriedade módulo de deformação revelou diferenças significativas dentro dos grupos de resultados de todas as argamassas testadas nesta tese. Por meio do teste de Tukey ($\alpha=0,05$), identificou-se entre quais temperaturas, especificamente, ocorriam tais diferenças. Os resultados do teste de Tukey constam na Figura 4.22. Médias não representadas por letras iguais são consideradas estatisticamente diferentes.

Figura 4.12 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação secante das argamassas: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AC5 - T amb.	3940,33333	A	
AC5 - 200°C	2910	B	
AC5 - 400°C	1328		C
AC5 - 600°C	189		D

a)

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AC10 - T amb.	4936,33333	A	
AC10 - 200°C	3580		B
AC10 - 400°C	2327		C
AC10 - 600°C	402,33333		D
AC10 - 800°C	152,33333		D

b)

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AC20 - T amb.	8346,33333	A	
AC20 - 200°C	6576,66667		B
AC20 - 400°C	3654,66667		C
AC20 - 600°C	903,33333		D
AC20 - 800°C	400		D

c)

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AI5 - T amb.	3844,33333	A	
AI5 - 200°C	3032		B
AI5 - 400°C	1739		C
AI5 - 600°C	637		D
AI5 - 800°C	132,66667		E

d)

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AI10 - T amb.	6497	A	
AI10 - 200°C	5949,66667	A	
AI10 - 400°C	3592,66667		B
AI10 - 600°C	1541,33333		C
AI10 - 800°C	392,33333		D

e)

Tukey Test			
	Mean	Groups	
AI20 - T amb.	10351,66667	A	
AI20 - 200°C	8261,33333		B
AI20 - 400°C	5015,33333		C
AI20 - 600°C	1136		D
AI20 - 800°C	403,66667		E

f)

Fonte: Autor (2023)

4.3.1.3 Análise estatística: influência da composição na resistência das argamassas

O fator tipo de argamassa foi analisado via ANOVA *OneWay* e teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Fixando-se a temperatura (T. amb.) e analisando uma classe de resistência nominal por vez (5, 10 e 20 MPa), as resistências à compressão de argamassas convencionais (com cal) e argamassas industrializadas foram comparadas (Figura 4.13).

Figura 4.13 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa na resistência das argamassas em temperatura ambiente: a) ANOVA AC5 – AI5; b) Tukey AC5 – AI5; c) ANOVA AC10 – AI10; d) Tukey AC10 – AI10; e) ANOVA AC20 – AI20; f) Tukey AC20 – AI20.

Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	4,12323	4,12323	48,03028	<0.0001
Error	10	0,85846	0,08585		
Total	11	4,98169			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

a)

Tukey Test		
	Mean	Groups
AC5 - T amb.	5,15174	A
AI5 - T amb.	3,97939	B

Means that do not share a letter are significantly different.

b)

Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	45,24199	45,24199	133,42091	<0.0001
Error	10	3,39092	0,33909		
Total	11	48,63291			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

c)

Tukey Test		
	Mean	Groups
AI10 - T amb.	13,41694	A
AC10 - T amb.	9,53356	B

Means that do not share a letter are significantly different.

d)

Overall ANOVA					
	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	83,22798	83,22798	123,74143	<0.0001
Error	10	6,72596	0,6726		
Total	11	89,95394			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
At the 0.05 level, the population means are significantly different.

e)

Tukey Test		
	Mean	Groups
AI20 - T amb.	22,54851	A
AC20 - T amb.	17,28138	B

Means that do not share a letter are significantly different.

f)

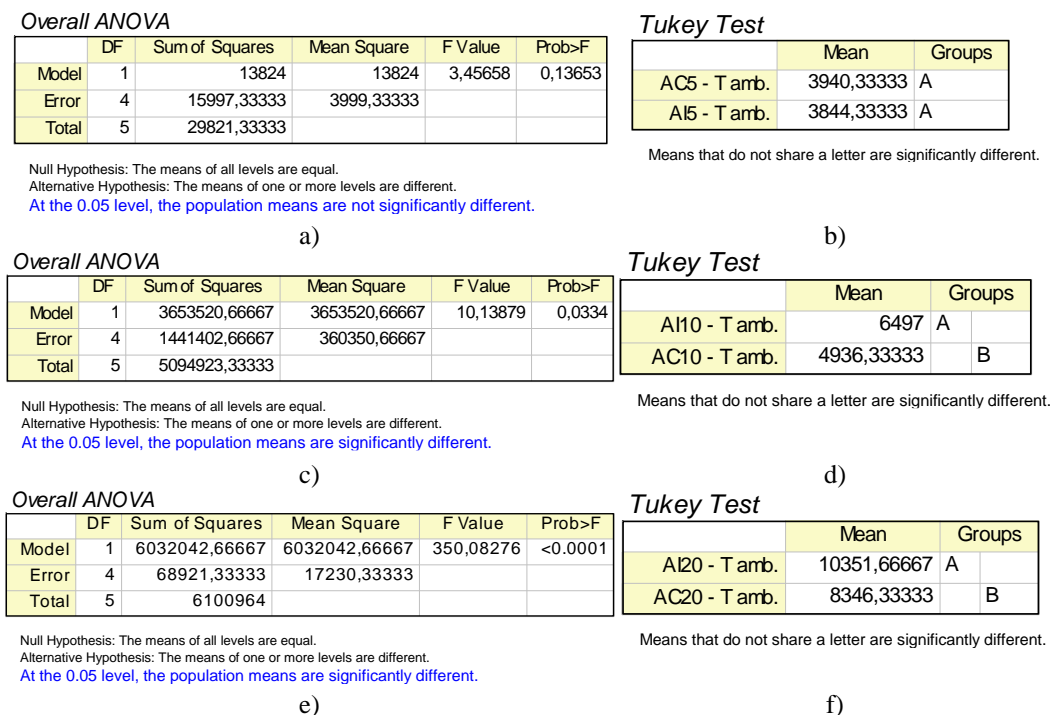
Fonte: Autor (2023)

A Figura 4.13 evidencia a constatação de diferenças significativas em todas as comparações entre argamassas convencionais e industrializadas de mesma resistência nominal. Isso significa que a alterações no tipo da argamassa e, conseqüentemente, em sua composição (incluindo a presença de cal nas misturas) interferem de forma significativa em seus resultados de resistência à compressão.

4.3.1.4 Análise estatística: influência da composição no módulo de deformação secante das argamassas

O fator tipo de argamassa também foi analisado via ANOVA *OneWay* e teste de Tukey para o módulo de deformação secante das argamassas. Considerou-se nível de significância de 5%. Fixando-se a temperatura (T. amb.) e analisando uma classe de resistência nominal por vez (5, 10 e 20 MPa), os resultados de módulo das argamassas convencionais (com cal) e argamassas industrializadas foram comparados (Figura 4.14).

Figura 4.14 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa no módulo de deformação secante das argamassas em temperatura ambiente: a) ANOVA AC5 – AI5; b) Tukey AC5 – AI5; c) ANOVA AC10 – AI10; d) Tukey AC10 – AI10; e) ANOVA AC20 – AI20; f) Tukey AC20 – AI20.



Fonte: Autor (2023)

A Figura 4.14 evidencia a existência de diferenças significativas em todas as comparações entre módulos de deformação de argamassas convencionais e industrializadas, quando considerada uma mesma resistência nominal. Isso significa que a alterações no tipo da argamassa e, conseqüentemente, em sua composição (incluindo a presença de cal nas misturas) também alteram significativamente seus resultados de módulo de deformação secante.

Merece destaque o fato de que durante a caracterização (Tabela 4.7) as argamassas ensacadas forneceram valores de resistência à compressão consideravelmente superiores às resistências nominais, quando moldadas com a quantidade mínima de água recomendada pelo fabricante. Dentre as argamassas industrializadas, a que forneceu a maior diferença em relação à resistência nominal (como é comercializada) foi a AI10. O fato de as argamassas convencionais terem seus traços testados, ajustados e escolhidos em função da resistência nominal desejada (Tabela 3.13) justifica a maior proximidade com as resistências propostas de 5, 10 e 20 MPa.

4.3.2 GRAUTES

Os valores médios das propriedades mecânicas residuais e as relações com os valores obtidos em temperatura ambiente para os grautes desta pesquisa são exibidos na Tabela 4.14. Resultados individuais, desvio padrão e coeficiente de variação estão no Apêndice B.

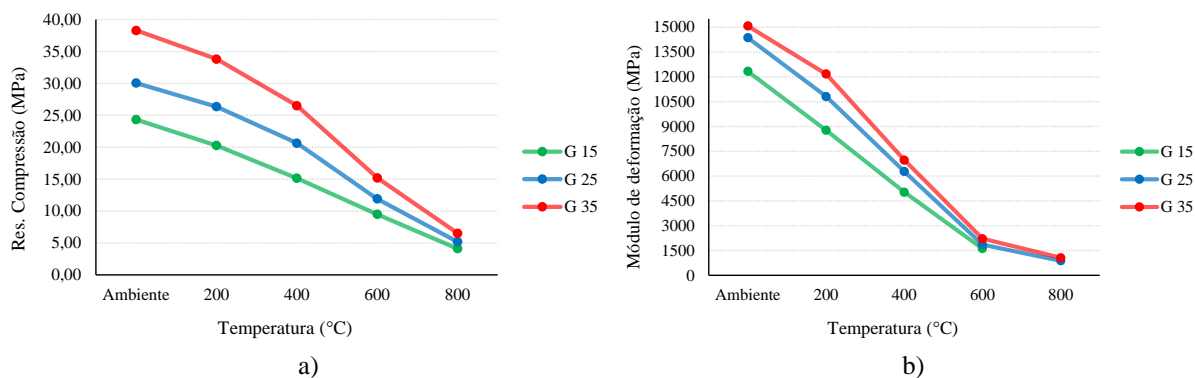
Tabela 4.14 – Propriedades mecânicas residuais dos grautes.

GRAUTE 15 MPa - G 15				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	24,33	1,00	12328	1,00
200	20,27	0,83	8765	0,71
400	15,15	0,62	5025	0,41
600	9,49	0,39	1614	0,13
800	4,12	0,17	709	0,06
GRAUTE 25 MPa - G 25				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	30,07	1,00	14368	1,00
200	26,36	0,88	10808	0,75
400	20,65	0,69	6275	0,44
600	11,91	0,40	1858	0,13
800	5,18	0,17	877	0,06
GRAUTE 35 MPa - G 35				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	38,31	1,00	15076	1,00
200	33,83	0,88	12170	0,81
400	26,52	0,69	6966	0,46
600	15,19	0,40	2214	0,15
800	6,51	0,17	1061	0,07

Fonte: Autor (2023)

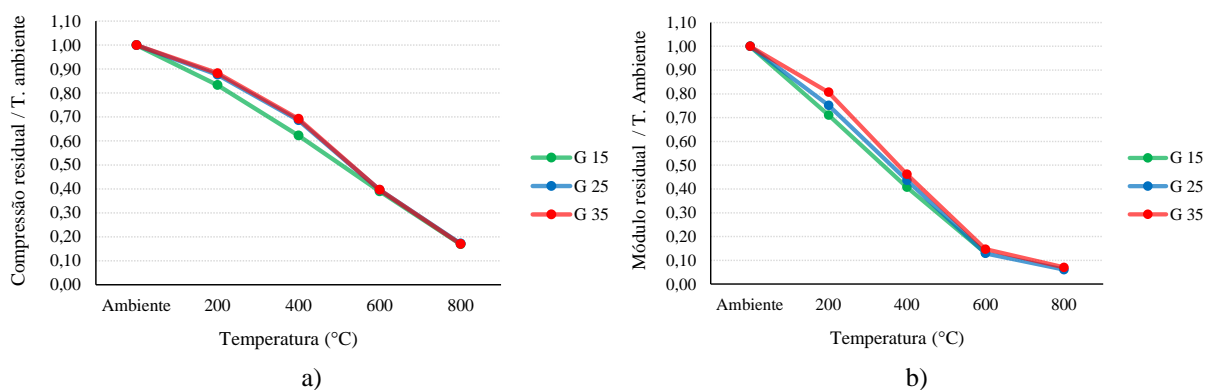
A progressão dos valores e das relações residuais também são ilustradas pelos gráficos contidos na Figura 4.15 e Figura 4.16, respectivamente.

Figura 4.15 – Propriedades residuais dos grautes: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.16 – Relações residuais para os grautes: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante.



Fonte: Autor (2023)

A análise da Tabela 4.14 e da Figura 4.16 torna evidente que, para todas as resistências de graute, a degradação do módulo de deformação secante sob altas temperaturas ocorre precocemente em comparação à resistência à compressão. Após os 600°C cerca de 40% da resistência à compressão inicial dos grautes é mantida, enquanto o maior valor residual de módulo exibido entre os as misturas (G35) correspondeu a 15% da referência (valor obtido em temperatura ambiente).

4.3.2.1 Análise estatística: influência da temperatura na resistência dos grautes

A influência do fator “temperatura” na propriedade de resistência à compressão dos grautes abordados neste estudo foi investigada por meio de Análise de Variância (ANOVA) *One Way* e complementada pelo Teste de Tukey. Para ambas as análises, considerou-se nível

de significância igual a 5% ($\alpha=0,05$). A normalidade na distribuição dos dados foi verificada pelo teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$).

Os resultados do teste de normalidade de Shapiro-Wilk para a resistência à compressão dos grautes são apresentados pela Figura 4.17. Lembrando que, na interpretação do teste p-valor é maior ou igual ao nível de significância ($\alpha=0,05$), existe uma tendência significativa de normalidade na distribuição dos resultados.

Figura 4.17 – Resultado do teste de normalidade para valores de resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.

*NormalityTest
Shapiro-Wilk*

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
G15 - T amb.	6	0,79258	0,05035	Can't reject normality
G15 - 200°C	6	0,84627	0,1468	Can't reject normality
G15 - 400°C	6	0,9101	0,43705	Can't reject normality
G15 - 600°C	6	0,96954	0,88935	Can't reject normality
G15 - 800°C	6	0,91213	0,45056	Can't reject normality

a)

*NormalityTest
Shapiro-Wilk*

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
G25 - T amb.	6	0,91622	0,47854	Can't reject normality
G25 - 200°C	6	0,86383	0,20269	Can't reject normality
G25 - 400°C	6	0,91574	0,47524	Can't reject normality
G25 - 600°C	6	0,84403	0,14073	Can't reject normality
G25 - 800°C	6	0,94507	0,70027	Can't reject normality

b)

*NormalityTest
Shapiro-Wilk*

	DF	Statistic	p-value	Decision at level(5%)
G35 - T amb.	6	0,87211	0,23476	Can't reject normality
G35 - 200°C	6	0,90481	0,40312	Can't reject normality
G35 - 400°C	6	0,85723	0,17987	Can't reject normality
G35 - 600°C	6	0,95116	0,7497	Can't reject normality
G35 - 800°C	6	0,93044	0,58348	Can't reject normality

c)

Fonte: Autor (2023)

Observa-se na Figura 4.17 que todos os grautes apresentaram distribuições normais para os resultados de resistência à compressão. A ANOVA ($\alpha=0,05$) foi então realizada para descobrir a existência de diferenças significativas dentro de cada conjunto de resultados de graute (Figura 4.18).

Figura 4.18 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	1577,732	394,433	622,36491	<0.0001
Error	25	15,84412	0,63376		
Total	29	1593,57612			

a)

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	2522,58584	630,64646	675,13783	<0.0001
Error	25	23,35251	0,9341		
Total	29	2545,93834			

b)

Overall ANOVA

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	4146,21179	1036,55295	857,50759	<0.0001
Error	25	30,21993	1,2088		
Total	29	4176,43173			

c)

Fonte: Autor (2023)

Com observado na Figura 4.18, o p-valor (Prob) consideravelmente menor que o nível de significância ($\alpha=0,05$) indica que variação no fator temperatura alterou significativamente os resultados de resistência à compressão de todos os grautes, independentemente de sua composição.

Na sequência, o teste de Tukey foi realizado ($\alpha=0,05$) e seus resultados são exibidos na Figura 4.19. Letras iguais traduzem equivalência entre as médias dos resultados e letras diferentes indicam existência de diferença significativa entre os grupos comparados.

Figura 4.19 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre resistência à compressão dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.

Tukey Test

	Mean	Groups
G15 - T amb.	24,32521	A
G15 - 200°C	20,26507	B
G15 - 400°C	15,1463	C
G15 - 600°C	9,48734	D
G15 - 800°C	4,11819	E

a)

Tukey Test

	Mean	Groups
G25 - T amb.	30,07146	A
G25 - 200°C	26,35606	B
G25 - 400°C	20,64766	C
G25 - 600°C	11,91229	D
G25 - 800°C	5,18227	E

b)

Tukey Test

	Mean	Groups
G35 - T amb.	38,31289	A
G35 - 200°C	33,82626	B
G35 - 400°C	26,5166	C
G35 - 600°C	15,19191	D
G35 - 800°C	6,51482	E

c)

Fonte: Autor (2023)

A Figura 4.19, quando comparadas, conclui-se que todas as temperaturas forneceram médias de resultados para resistência à compressão dos grautes G15, G25 e G35 estatisticamente diferentes entre si.

4.3.2.2 Análise estatística: influência da temperatura no módulo dos grautes

A normalidade dos resultados de módulo de deformação para os grautes também foi testada por Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$). Constatou-se por meio do teste que, com exceção dos resultados do graute G15 para temperatura de 600°C (p-valor=0,04), os grautes da pesquisa apresentaram, para as cinco temperaturas de ensaio (T amb., 200, 400, 600 e 800°C) valores de módulo normalmente distribuídos.

A ANOVA para o fator temperatura e a propriedade módulo de deformação revelou diferenças significativas dentro dos grupos de resultados de todos os grautes. Por meio do teste de Tukey ($\alpha=0,05$), identificou-se entre quais temperaturas existiam tais diferenças. Os resultados do teste de Tukey constam na Figura 4.20, onde as médias representadas por letras distintas são consideradas estatisticamente diferentes.

Figura 4.20 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação dos grautes: a) G15; b) G25; c) G35.

Tukey Test		
	Mean	Groups
G15 - T amb.	12328	A
G15 - 200°C	8764,66667	B
G15 - 400°C	5024,66667	C
G15 - 600°C	1614	D

a)

Tukey Test		
	Mean	Groups
G25 - T amb.	14367,66667	A
G25 - 200°C	10808,33333	B
G25 - 400°C	6275	C
G25 - 600°C	1858,33333	D
G25 - 800°C	876,66667	E

b)

Tukey Test		
	Mean	Groups
G25 - T amb.	14367,66667	A
G25 - 200°C	10808,33333	B
G25 - 400°C	6275	C
G25 - 600°C	1858,33333	D
G25 - 800°C	876,66667	E

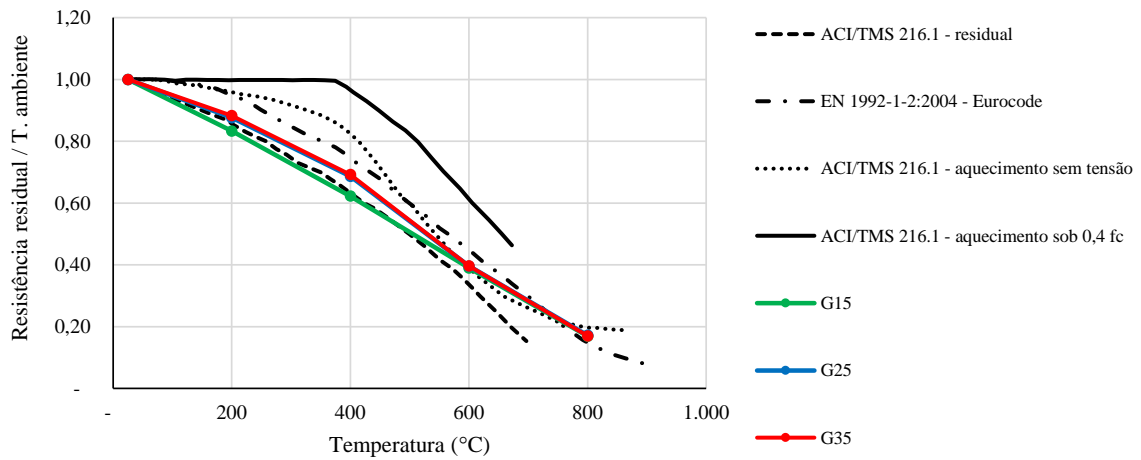
c)

Fonte: Autor (2023)

4.3.2.3 Comparação com especificações de normas

O gráfico contido na Figura 4.21 ilustra uma comparação entre os resultados residuais de resistência à compressão obtidos para os grautes G15, G25 e G35 com curvas normativas de degradação. Para compor o gráfico foram consideradas três curvas do código norte americano ACI/TMS 216.1-14:2014 para concretos constituídos de agregados silicosos: a primeira para propriedades residuais, ou seja, obtidas após o resfriamento das amostras (método adotado nesta tese); a segunda para amostras aquecidas sem carregamento e rompidas nas temperaturas de interesse; e uma terceira para amostras aquecidas sob 40% da carga de ruptura e rompidas após atingimento das temperaturas de interesse. A quarta e última curva de degradação foi fornecida pela norma europeia EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2004 para concretos de agregados silicosos testados sob altas temperaturas.

Figura 4.21 – Comparação entre relações residuais de resistência à compressão dos grautes desta pesquisa e curvas normativas.



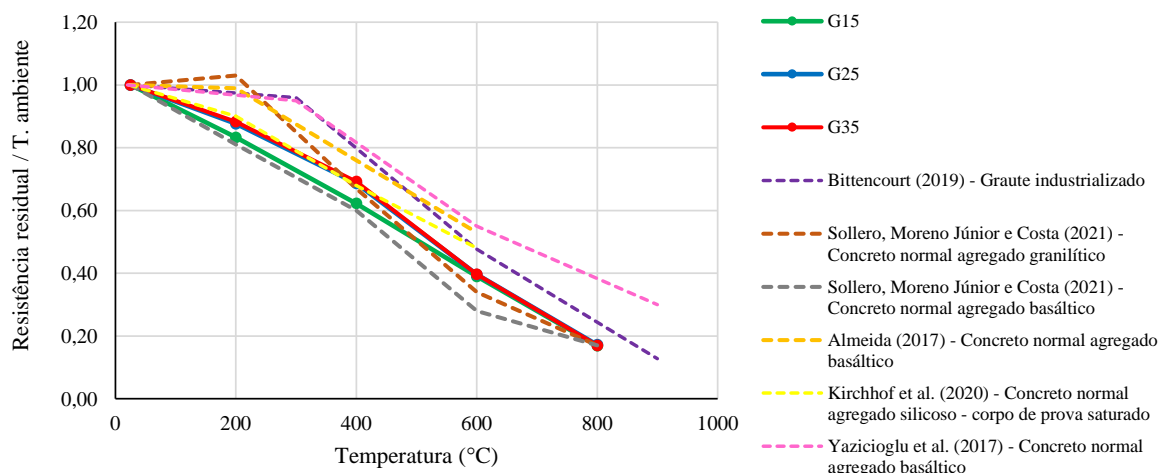
Fonte: Autor (2023)

Da Figura 4.21, conclui-se que os resultados de graute mostraram-se comportamentos semelhantes entre si e em consonância com as curvas normativas, sendo maior semelhança observada em relação à curva residual do ACI/TMS 216.1-14:2014 e curva do Eurocode EN 1992-1-2: Eurocode2: 2004.

4.3.2.4 Comparação com resultados de outras pesquisas

O gráfico da Figura 4.22, por sua vez, permite a comparação entre os resultados residuais de resistência à compressão dos grautes aqui testados e os resultados de concretos convencionais obtidos por outros autores. Foram escolhidos trabalhos que abordassem misturas produzidas com agregados de mesma formação mineralógica (silicosos), amostras submetidas a regimes de aquecimento semelhantes (aquecimentos lentos e manutenção nas temperaturas de interesse) e testadas após o resfriamento.

Figura 4.22 – Comparação entre as relações residuais de resistência à compressão dos grautes desta pesquisa e resultados de outros pesquisadores.

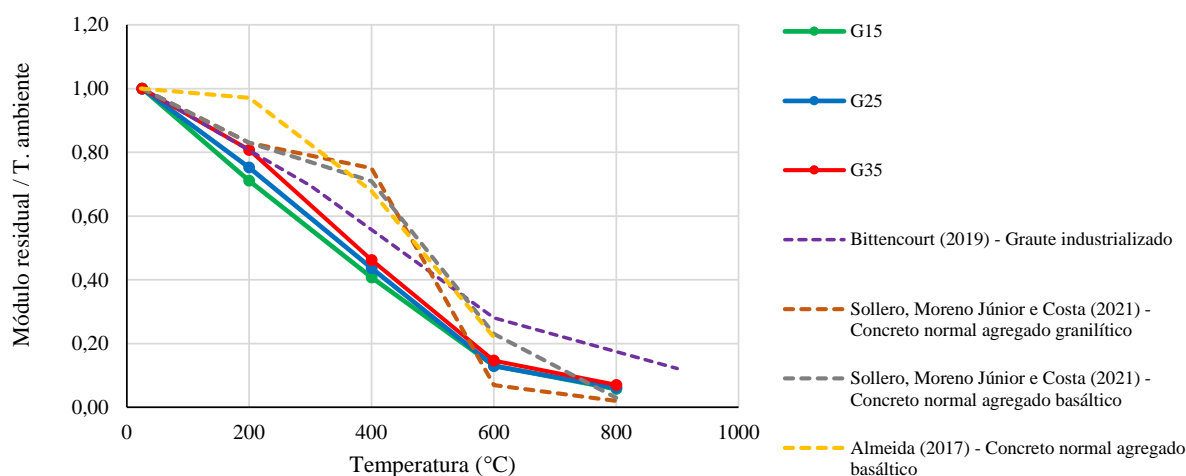


Fonte: Autor (2023)

Nota-se, na Figura 4.22, que os resultados obtidos neste trabalho se mostram coerentes com os resultados disponíveis na literatura. As maiores semelhanças foram observadas para os concretos normais testados por Kirchhof et al. (2020) e Sollero, Moreno Júnior e Costa (2021).

De maneira semelhante, a Figura 4.23 permite a comparação entre os resultados residuais de módulo de deformação secante para os grautes G15, G25 e G35 deste estudo com aqueles advindos de outros pesquisadores.

Figura 4.23 – Comparação entre relações residuais para módulo de deformação secante dos grautes desta pesquisa e resultados de outros pesquisadores.



Fonte: Autor (2023)

A observação do gráfico contido na Figura 4.23 permite concluir que, em relação às demais pesquisas, os grautes G15, G25 e G35 testados aqui apresentam uma degradação mais acentuada para o módulo de deformação secante, sobretudo, acima dos 200°C. Enquanto os concretos testados por Sollero, Moreno Júnior e Costa (2021) mantiveram cerca de 70 a 75% do valor inicial da propriedade mecânica após 400°C, os grautes G15, G25 e G35 conservaram, respectivamente, 41, 44 e 46% do módulo obtido em temperatura ambiente. Um possível agente causador dessa degradação mais intensa é a presença de cal nos traços de graute adotados nesta pesquisa. Os demais concretos não contavam com cal em sua composição.

4.3.3 PRISMAS

Os valores médios para as propriedades mecânicas residuais e as relações com os valores obtidos em temperatura ambiente para os prismas testados nesta pesquisa são exibidos pela Tabela 4.15. Os resultados individuais, valores de desvio padrão e coeficiente de variação são expostos no Apêndice B, ao final deste texto.

Tabela 4.15 – Propriedades mecânicas residuais dos prismas.

PRISMA BLOCO 24 MPa + ARG. CONVENCIONAL 20 MPa - B24 AC20				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	18,25	1,00	16167	1,00
200	15,90	0,87	13333	0,82
400	16,23	0,89	9002	0,56
600	15,01	0,82	4447	0,28
800	7,43	0,41	1775	0,11

PRISMA BLOCO 24 MPa + ARG. INDUSTRIALIZADA 20 MPa - B24 AI20				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	21,40	1,00	19146	1,00
200	20,19	0,94	15561	0,81
400	18,19	0,85	9340	0,49
600	14,80	0,69	3298	0,17
800	6,20	0,29	1652	0,09

PRISMA BLOCO 12 MPa + ARG. CONVENCIONAL 10 MPa – B12 AC10				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	9,90	1,00	10881	1,00
200	11,70	1,18	8852	0,81
400	9,21	0,93	6581	0,60
600	7,35	0,74	2502	0,23
800	2,16	0,22	643	0,06

PRISMA BLOCO 12 MPa + ARG. INDUSTRIALIZADA 10 MPa – B12 AI10				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	9,41	1,00	11154	1,00
200	11,90	1,26	10315	0,92
400	10,15	1,08	7243	0,65
600	7,96	0,85	2109	0,19
800	1,58	0,17	433	0,04

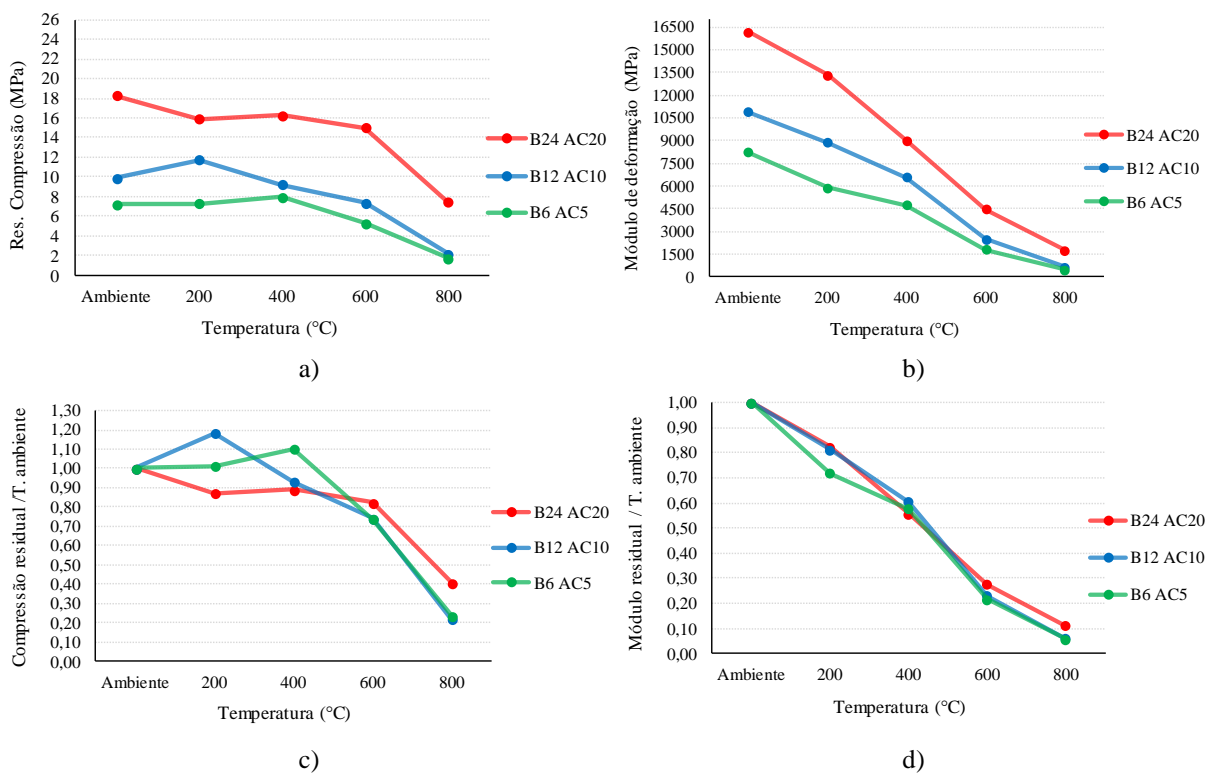
PRISMA BLOCO 6 MPa + ARG. CONVENCIONAL 5 MPa – B6 AC5				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	7,20	1,00	8211	1,00
200	7,29	1,01	5906	0,72
400	7,93	1,10	4745	0,58
600	5,31	0,74	1787	0,22
800	1,71	0,24	471	0,06

PRISMA BLOCO 6 MPa + ARG. INDUSTRIALIZADA 5 MPa – B6 AI5				
Temperatura de exposição (°C)	Resistência à compressão		Módulo de deformação	
	Valor (MPa)	Residual / T. amb.	Valor (MPa)	Residual / T. amb.
Ambiente	6,65	1,00	8603	1,00
200	7,92	1,19	7601	0,88
400	5,95	0,89	4335	0,50
600	5,03	0,76	1937	0,23
800	1,34	0,20	453	0,05

Fonte: Autor (2023)

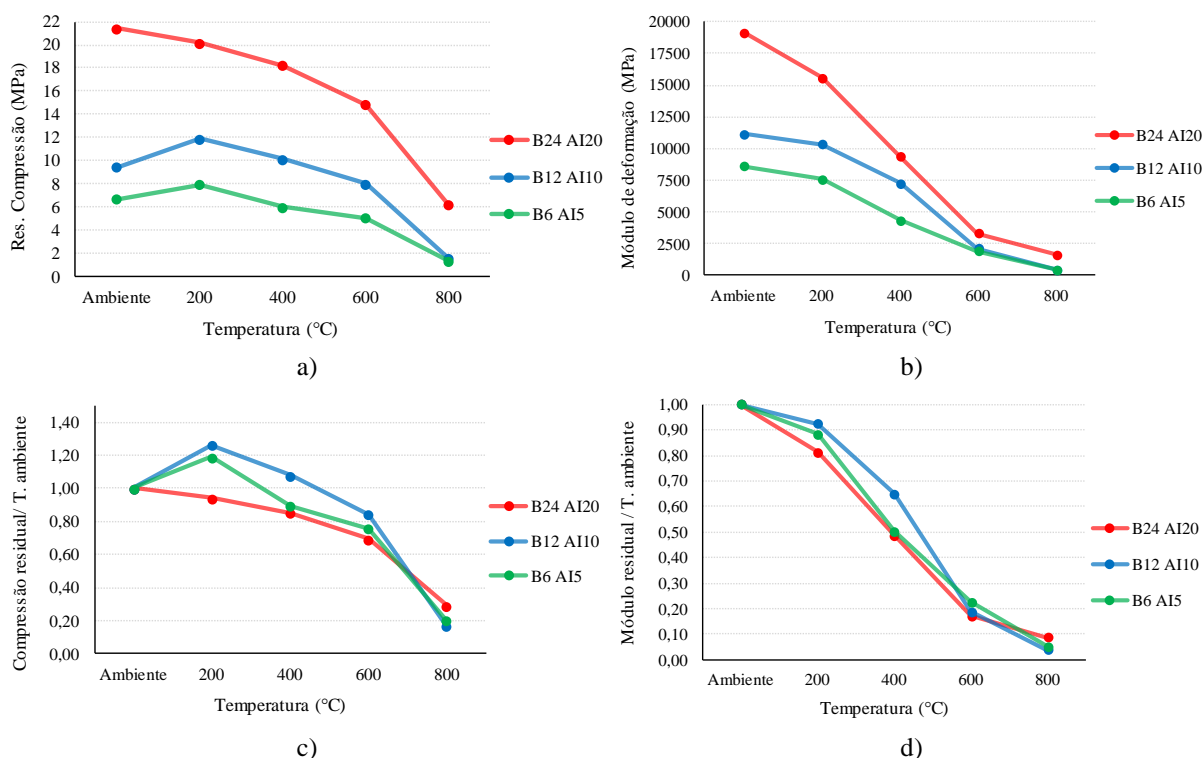
A progressão dos valores e das relações residuais para os prismas produzidos com argamassas convencionais e industrializadas de assentamento são ilustradas pelos gráficos contidos na Figura 4.24 e Figura 4.25, respectivamente.

Figura 4.24 – Propriedades residuais dos prismas com argamassas convencionais de assentamento: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante; c) relações residuais para resistência; d) relações residuais para o módulo de deformação.



Fonte: Autor (2023)

Figura 4.25 – Propriedades residuais dos prismas com argamassas de assentamento industrializadas: a) resistência à compressão; b) módulo de deformação secante; c) relações residuais para resistência; d) relações residuais para o módulo de deformação.

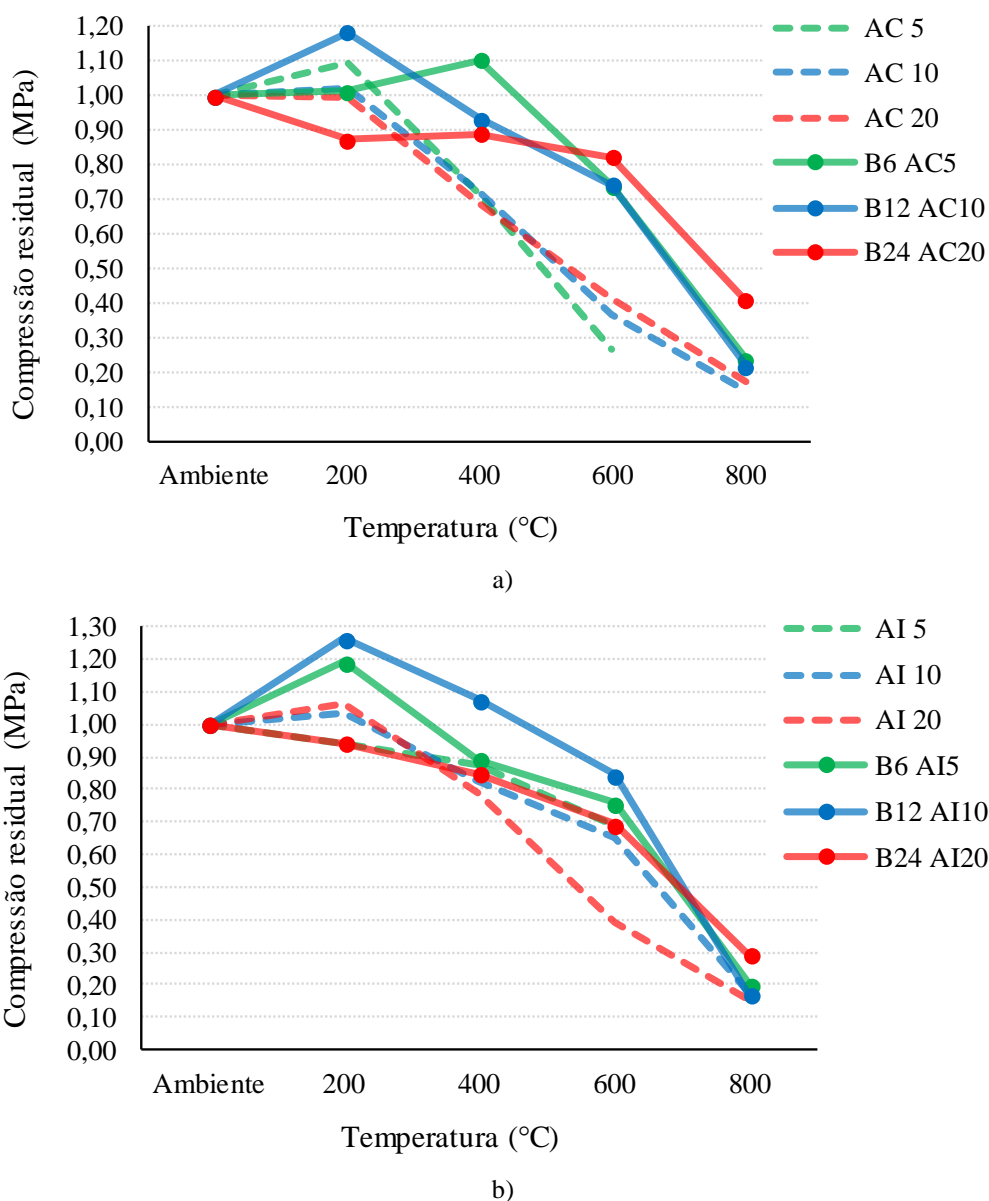


Fonte: Autor (2023)

Assim como observado nas argamassas e nos grautes, os prismas apresentaram reduções no módulo de deformação secante mais pronunciadas que da resistência à compressão. Após submissão a 600°, por exemplo, mais de 70% da resistência à compressão inicial foi mantida pelos prismas enquanto cerca de 20% do valor obtido em temperatura ambiente para o módulo de deformação foi conservado.

Comparando os resultados de resistência à compressão residual dos prismas (Tabela 4.15) com os resultados das argamassas (Tabela 4.12 e Tabela 4.13) quando testadas separadamente, conclui-se que os prismas retêm suas propriedades até temperaturas maiores, sobretudo a resistência à compressão. Após 600°C, os corpos de prova de argamassas AC5, AC10, AC20, AI5, AI10 e AI20 apresentaram, respectivamente, 26, 35, 41, 69, 65 e 39% da resistência obtida em temperatura ambiente, enquanto os prismas assentados com as referidas argamassas exibiram valores residuais correspondentes a 74, 71, 82, 76, 85 e 69% da resistência inicial. As relações residuais para resistência à compressão de corpos de prova de argamassa e de prismas são confrontadas, para todas as temperaturas de aquecimento, pela Figura 4.26.

Figura 4.26 – Comparação entre relações residuais para resistência à compressão de corpos de prova de argamassas e de prismas assentados com tais argamassas: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.

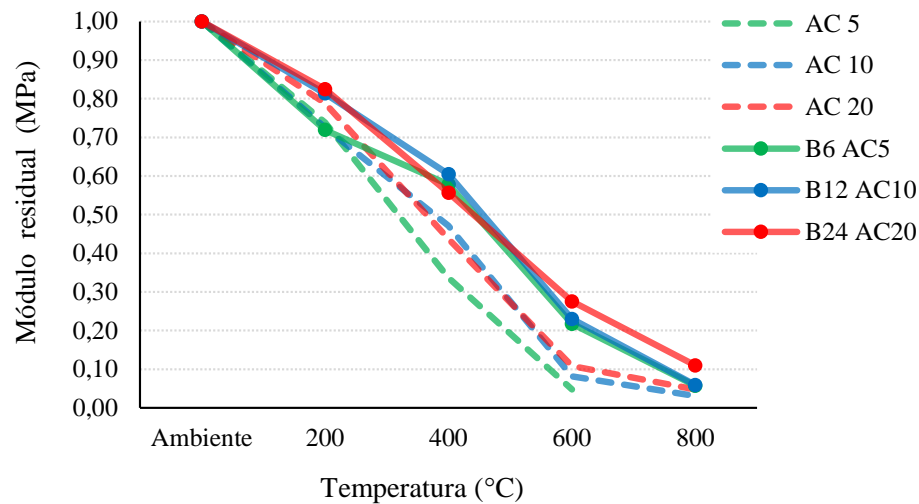


Fonte: Autor (2023)

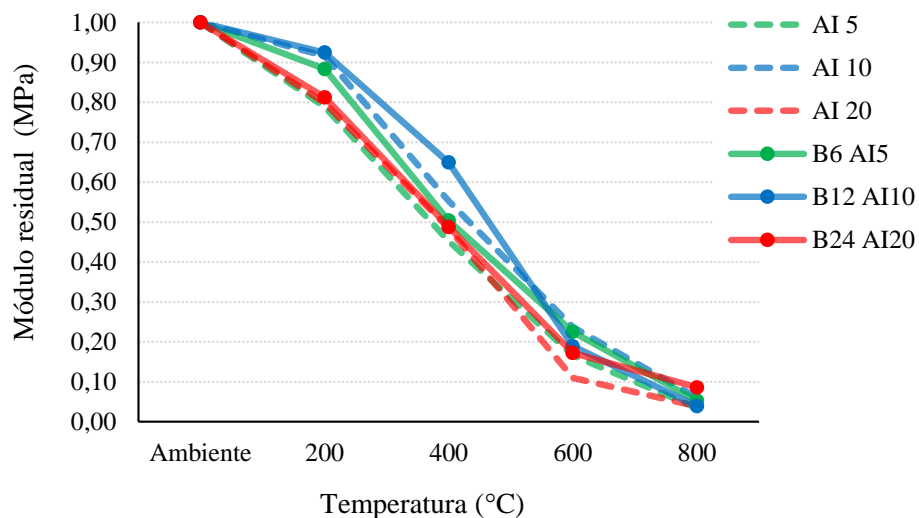
Com exceção da argamassa AI10, maiores relações residuais para o módulo de deformação secante também foram apresentadas pelos prismas (Tabela 4.15) em comparação aos em corpos de prova de argamassa (Tabela 4.12 e Tabela 4.13). Contudo, essa diferença mostrou-se menor que a observada para a propriedade de resistência à compressão. Com aquecimento a 600°C, os exemplares das argamassas AC5, AC10, AC20, AI5, AI10 e AI20 apresentaram, respectivamente, 5, 8, 11, 17, 24 e 11% do módulo de deformação obtido em temperatura ambiente, enquanto os prismas assentados com as referidas argamassas exibiram valores de módulo correspondentes a 22, 23, 28, 23, 19 e 17% da referência (Tabela 4.15). As

relações residuais para o módulo de deformação secante obtido em corpos de prova de argamassa e nos prismas são comparados, para todas os níveis de aquecimento, na Figura 4.27.

Figura 4.27 – Comparação entre relações residuais para módulo de deformação secante de corpos de prova de argamassas e de prismas assentados com tais argamassas: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.



a)



b)

Fonte: Autor (2023)

4.3.3.1 Análise: resultados residuais de prisma

A hipótese para o comportamento observado, ou seja, para obtenção de maiores valores residuais de módulo e de resistência nos prismas, está relacionada com o fato da argamassa estar confinada entre os blocos e ter volume comparativamente menor que o volume do cilindro utilizado no ensaio do material. Como pode ser constatado na Figura 4.28, após 600°C o nível de degradação exibido pelos corpos de prova cilíndricos de argamassa foi notadamente superior ao observado nas juntas de assentamento dos prismas assentados com as mesmas misturas.

Figura 4.28 – Degradação da argamassa moldada em cilindros e disposta na junta dos prismas após 600°C: a) AC5; b) AC10; c) AC20; d) AI5; e) AI10; f) AI20.





f)
Fonte: Autor (2023)

A hipótese para justificar a menor degradação das argamassas dispostas nas juntas de assentamento dos prismas relaciona-se ao efeito de confinamento a que estão submetidas. Conforme exibido anteriormente (Figura 2.28), no prisma a expansão da argamassa e a deformação lateral da junta é impedida pelo atrito com os blocos. Esse atrito dá origem a um estado biaxial de tensões. Acredita-se que este efeito do atrito seja o responsável por impedir a livre fissuração da argamassa quando exposta a altas temperaturas, retardando sua degradação e postergando, conseqüentemente, o declínio das propriedades residuais exibidas pelos prismas. A geometria do corpo de prova de argamassa (cilindro de relação diâmetro: altura igual a 1:3) não proporciona o mesmo efeito de confinamento sobre o material que retrai, se expande e fissura livremente durante as fases de aquecimento e resfriamento.

Supõe-se que a pequena “pré-carga” correspondente à massa do bloco superior (entre 12,04 e 13,27 kg), aliada à expansão restrita, contribua para o confinamento da junta e minimização de fissuras nas juntas de argamassa, tal como observado na Figura 4.28.

4.3.3.2 Análise estatística: influência da temperatura na resistência dos prismas

A influência do fator “temperatura” na resistência à compressão dos prismas foi investigada por meio de Análise de Variância (ANOVA) *One Way* e complementada pelo Teste de Tukey. Para ambas as análises, o nível de significância foi de 5% ($\alpha=0,05$). As análises foram precedidas pelo teste de Shapiro-Wilk, também com significância de 5%.

Como resultado do teste de normalidade constatou se que, com exceção dos resultados de 200°C para o prisma B12 AI10 (p-valor=0,002), e de 400°C (p-valor=0,04) e 600°C (p-valor=0,03) para o prisma B24 AI20 os prismas distribuição normal de resultados. A divergência observada para o prisma B12 AI10, por exemplo, pode ser atribuída ao fato de que, a temperatura de 200°C gerou o maior entre os aumentos observados para resistência à compressão (cerca de 26% em relação ao valor obtido em temperatura ambiente, conforme Tabela 4.15).

A ANOVA foi realizada e seus resultados são apresentados, para cada combinação de prisma, na Figura 4.29.

Figura 4.29 – Resultados de ANOVA do fator temperatura para resistência à compressão dos prismas: a) B6AC5; b) B12AC10; c) B24AC20; d) B6AI5; e) B12AI10; f) B24AI20.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	147,81492	36,95373	150,65647	<0.0001
Error	23	5,64155	0,24528		
Total	27	153,45646			

a)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	318,06036	79,51509	115,93918	<0.0001
Error	23	15,77419	0,68583		
Total	27	333,83456			

b)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	410,01918	102,5048	92,94362	<0.0001
Error	22	24,26315	1,10287		
Total	26	434,28234			

c)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	144,25001	36,0625	79,93723	<0.0001
Error	24	10,82725	0,45114		
Total	28	155,07725			

d)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	236,11245	59,02811	27,30337	<0.0001
Error	17	36,7529	2,16194		
Total	21	272,86534			

e)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	4	616,33354	154,08338	78,89061	<0.0001
Error	18	35,15629	1,95313		
Total	22	651,48982			

f)

Fonte: Autor (2023)

A partir da Figura 4.29 observa-se que para todos os prismas analisados p-valor (Prob) é menor que α , indicando existência diferença significativa dentro do conjunto de resultados. Em outras palavras, a variação da temperatura alterou significativamente os resultados de resistência à compressão de todas as configurações de prismas testadas, independentemente da argamassa utilizada. Para rastrear tais diferenças, realizou-se o teste de Tukey cujos resultados

são apresentados pela Figura 4.30. Letras iguais representam equivalência entre as médias dos resultados e letras diferentes apontam para diferença significativa.

Figura 4.30 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura e resistência à compressão dos prismas: a) B6 AC5; b) B12 AC10; c) B24 AC20; d) B6 AI5; e) B12 AI10; f) B24 AI20.

	Mean	Groups		Mean	Groups		Mean	Groups
B6 AC5 - 400°C	7,93393	A	B12 AC10 - 200°C	11,7037	A	B24 AC20 - T amb.	18,25067	A
B6 AC5 - 200°C	7,28857	A	B12 AC10 - T amb.	9,89753	B	B24 AC20 - 400°C	16,23484	B
B6 AC5 - T amb.	7,20077	A	B12 AC10 - 400°C	9,21347	B	B24 AC20 - 200°C	15,9049	B
B6 AC5 - 600°C	5,30994	B	B12 AC10 - 600°C	7,3525	C	B24 AC20 - 600°C	15,01283	B
B6 AC5 - 800°C	1,70674	C	B12 AC10 - 800°C	2,15817	D	B24 AC20 - 800°C	7,42608	C

	Mean	Groups		Mean	Groups		Mean	Groups
B6 AI5 - 200°C	7,91876	A	B12 AI10 - 200°C	10,81609	A	B24 AI20 - T amb.	21,39982	A
B6 AI5 - T amb.	6,65126	B	B12 AI10 - 400°C	10,15038	A	B24 AI20 - 200°C	20,18517	A
B6 AI5 - 400°C	6,22372	B	B12 AI10 - T amb.	9,41458	A	B24 AI20 - 400°C	18,19144	B
B6 AI5 - 600°C	5,03378	C	B12 AI10 - 600°C	7,95802	A	B24 AI20 - 600°C	14,79809	C
B6 AI5 - 800°C	1,35172	D	B12 AI10 - 800°C	1,57711	B	B24 AI20 - 800°C	6,20365	D

Fonte: Autor (2023)

A equivalência estatística entre alguns dos resultados expressa pelas letras iguais da Figura 4.30, confirma o observado na Tabela 4.15: a degradação da resistência à compressão aconteceu tardiamente nos prismas quando comparada aos corpos de prova cilíndricos de argamassa. Por isso, alguns dos resultados da propriedade permaneceram equivalentes até determinadas temperaturas de queima (600°C).

4.3.3.3 Análise estatística: influência da temperatura no módulo de deformação secante dos prismas

A normalidade dos resultados de módulo de deformação secante dos prismas foi submetida ao teste de Shapiro-Wilk ($\alpha=0,05$). Inferiu-se por meio que todas as combinações de prisma testadas nesta pesquisa apresentaram, para as cinco temperaturas de ensaio (T amb., 200, 400, 600 e 800°C) valores de módulo normalmente distribuídos.

A realização da ANOVA para o fator temperatura e a propriedade módulo de deformação revelou diferenças significativas dentro dos grupos de resultados de todos os prismas testados nesta tese ($p\text{-valor}<\alpha$). Por meio do teste de Tukey ($\alpha=0,05$), identificou-se entre quais temperaturas, especificamente, ocorriam tais diferenças. Os resultados do teste de Tukey estão na Figura 4.31. Médias não representadas por letras iguais são tidas como estatisticamente diferentes.

Figura 4.31 – Resultados do teste Tukey para fator temperatura sobre módulo de deformação secante dos prismas: a) B6 AC5; b) B12 AC10; c) B24 AC20; d) B6 AI5; e) B12 AI10; f) B24 AI20.

Tukey Test			Mean	Groups
B6 AC5 - T amb.	8211	A		
B6 AC5 - 200°C	5906	B		
B6 AC5 - 400°C	4745	B		
B6 AC5 - 600°C	1786,66667	C		
B6 AC5 - 800°C	470,66667	D		

a)

Tukey Test			Mean	Groups
B12 AC10 - T amb.	10880,66667	A		
B12 AC10 - 200°C	8852,33333	B		
B12 AC10 - 400°C	6581	C		
B12 AC10 - 600°C	2502	D		
B12 AC10 - 800°C	643	E		

b)

Tukey Test			Mean	Groups
B24 AC20 - T amb.	16166,66667	A		
B24 AC20 - 200°C	13332,66667	B		
B24 AC20 - 400°C	9002,33333	C		
B24 AC20 - 600°C	4447	D		
B24 AC20 - 800°C	1775,33333	E		

c)

Tukey Test			Mean	Groups
B6 AI5 - T amb.	8602,66667	A		
B6 AI5 - 200°C	7601	A		
B6 AI5 - 400°C	4335	B		
B6 AI5 - 600°C	1937	C		
B6 AI5 - 800°C	453,33333	C		

d)

Tukey Test			Mean	Groups
B12 AI10 - T amb.	11154,33333	A		
B12 AI10 - 200°C	10241,66667	A		
B12 AI10 - 400°C	7242,66667	B		
B12 AI10 - 600°C	2109	C		
B12 AI10 - 800°C	433,33333	D		

e)

Tukey Test			Mean	Groups
B24 AI20 - T amb.	19146	A		
B24 AI20 - 200°C	15560,66667	B		
B24 AI20 - 400°C	9339,66667	C		
B24 AI20 - 600°C	3297,5	D		
B24 AI20 - 800°C	1652,33333	D		

f)

Fonte: Autor (2023)

4.3.3.4 Análise estatística: influência do tipo de argamassa na resistência dos prismas

O fator tipo de argamassa de assentamento foi analisado via ANOVA *OneWay* e teste de Tukey, ao nível de significância de 5%. Fixando-se a temperatura (T. amb.) e analisando uma classe de resistência nominal por vez para as argamassas de assentamento (5, 10 e 20 MPa, com blocos de resistências compatíveis), as resistências à compressão de prismas assentados com argamassas convencionais (com cal) e assentados com argamassas industrializadas foram comparadas (Figura 4.32).

Figura 4.32 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa na resistência dos prismas em temperatura ambiente: a) ANOVA B6AC5 – B6AI5; b) Tukey B6AC5 – B6AI5; c) ANOVA B12AC10 – B12AI10; d) Tukey B12AC10 – AI10; e) ANOVA B24AC20 – B24AI20; f) Tukey B24AC20 – B24AI20.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0,82353	0,82353	2,40483	0,15537
Error	9	3,08204	0,34245		
Total	10	3,90558			

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

a)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	0,63611	0,63611	0,50945	0,49347
Error	9	11,23748	1,24861		
Total	10	11,87359			

c)

	Mean	Groups
B6 AC5 - T amb.	7,20077	A
B6 AI5 - T amb.	6,65126	A

b)

	Mean	Groups
B12 AC10 - T amb.	9,89753	A
B12 AI10 - T amb.	9,41458	A

d)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	23,80114	23,80114	8,71588	0,01836
Error	8	21,84622	2,73078		
Total	9	45,64736			

	Mean	Groups
B24 AI20 - T amb.	21,39982	A
B24 AC20 - T amb.	18,25067	B

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

e)

f)

Fonte: Autor (2023)

Diferentemente das argamassas e dos grautes, a Figura 4.32 aponta para equivalência de resultados entre os prismas assentados com argamassas de 5 e 10 MPa. Diferenças significativas foram apontadas somente entre resistências de prismas moldados com argamassas convencionais e industrializadas de resistência nominal 20 MPa. Em suma, esse comportamento significa que, no prisma, a influência na resistência à compressão causada pela variação na composição dos materiais é atenuada em relação aos exemplares cilíndricos de argamassas, testados isoladamente.

4.3.3.5 Análise estatística: influência da composição no módulo de deformação secante dos prismas

A influência do fator tipo de argamassa também foi analisada via ANOVA *OneWay* e teste de Tukey para o módulo de deformação secante dos prismas. Para tal, adotou-se nível de significância $\alpha=0,05$. Fixando-se a temperatura (T. amb.) e analisando uma classe de resistência nominal de argamassa por vez (5, 10 e 20 MPa), os resultados de módulo dos prismas assentados argamassas convencionais (com cal) e argamassas industrializadas foram comparados (Figura 4.33).

Figura 4.33 – Resultados de ANOVA e teste Tukey para influência do fator tipo de argamassa no módulo de deformação dos prismas em temperatura ambiente: a) ANOVA B6AC5 – B6AI5; b) Tukey B6AC5 – B6AI5; c) ANOVA B12AC10 – B12AI10; d) Tukey B12AC10 – AI10; e) ANOVA B24AC20 – B24AI20; f) Tukey B24AC20 – B24AI20.

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	230104,16667	230104,16667	0,24788	0,6447
Error	4	3713088,66667	928272,16667		
Total	5	3943192,83333			

	Mean	Groups
B6 AI5 - T amb.	8602,66667	A
B6 AC5 - T amb.	8211	A

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

a)

b)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F
Model	1	112340,16667	112340,16667	0,16082	0,7089
Error	4	2794165,33333	698541,33333		
Total	5	2906505,5			

	Mean	Groups
B12 AI10 - T amb.	11154,33333	A
B12 AC10 - T amb.	10880,66667	A

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are not significantly different.

c)

d)

	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Prob>F		Mean	Groups
Model	1	1,33146E7	1,33146E7	8,47424	0,04363	B24 AI20 - T amb.	19146	A
Error	4	6284756,66667	1571189,16667			B24 AC20 - T amb.	16166,66667	B
Total	5	1,95994E7						

Null Hypothesis: The means of all levels are equal.
 Alternative Hypothesis: The means of one or more levels are different.
 At the 0.05 level, the population means are significantly different.

e)

f)

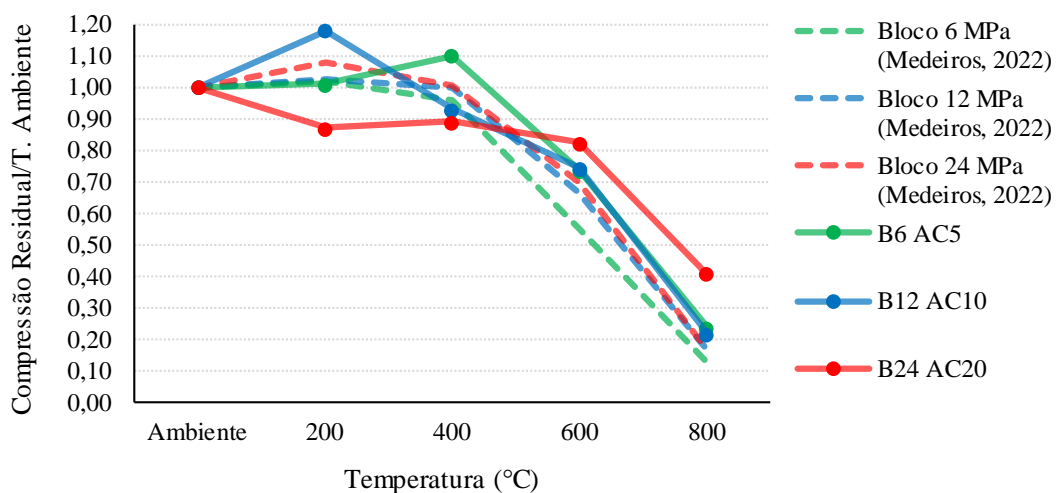
Fonte: Autor (2023)

Para o módulo de deformação secante dos prismas a Figura 4.33 evidencia um comportamento semelhante ao observado para a propriedade de resistência à compressão. Diferenças significativas foram notadas somente entre os módulos de prismas moldados com argamassas convencionais e industrializadas de resistência nominal 20 MPa. Da mesma forma, tal comportamento reitera a afirmação de que, no prisma, a influência no módulo de deformação causada pela variação na composição dos materiais também é atenuada em relação às argamassas, quando testadas isoladamente.

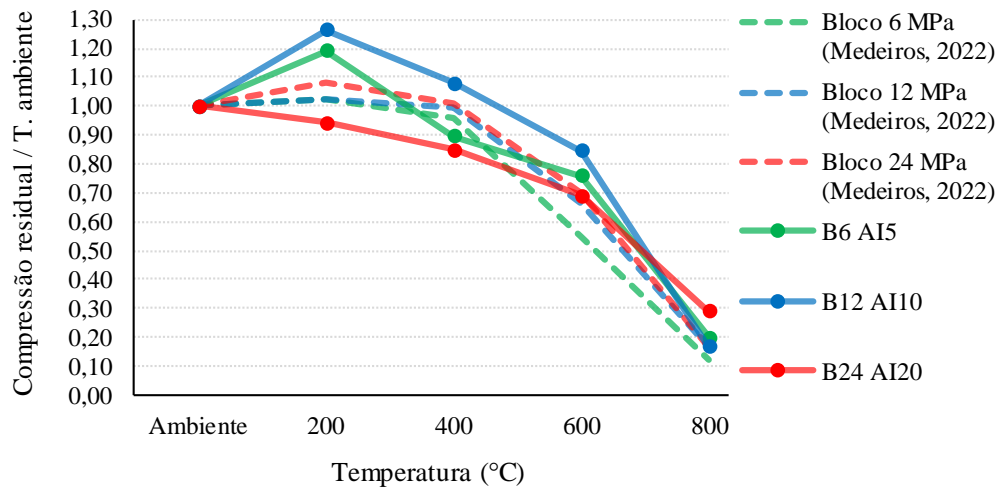
4.3.3.6 Comparação com resultados da literatura

Os gráficos contidos na Figura 4.34 e Figura 4.35 apresentam, para a resistência à compressão e módulo de deformação secante, uma comparação entre as relações residuais obtidas por Medeiros (2022) para blocos produzidos com agregados silicosos (gnaisse) e para os prismas testados nesta pesquisa. Cabe destacar que os blocos investigados pelo autor possuíam composição semelhante e tiveram origem na mesma fábrica responsável por fornecer as unidades exploradas nesta tese.

Figura 4.34 – Comparação entre relações residuais para resistência à compressão de blocos produzidos com concreto silicoso e prismas desta tese assentados com: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.



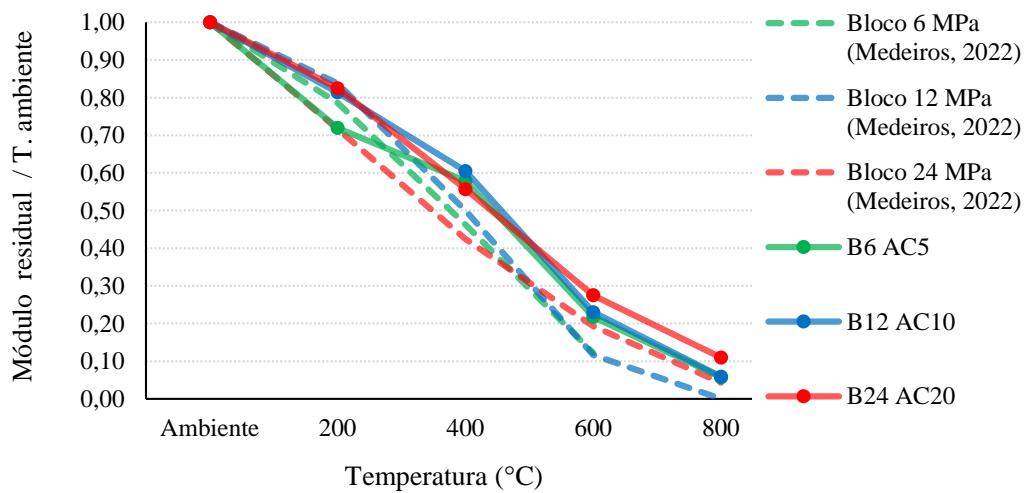
a)



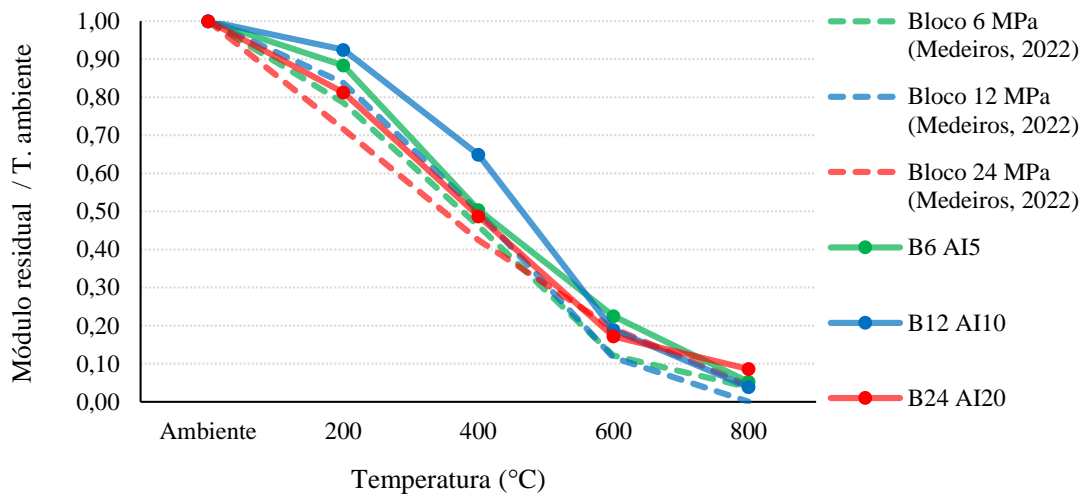
b)

Fonte: Medeiros (2022); Autor (2023)

Figura 4.35 – Comparação entre relações residuais para o módulo de deformação secante de blocos produzidos com concreto silicoso e prismas desta tese assentados com: a) argamassas convencionais; b) argamassas industrializadas.



a)



b)

Fonte: Medeiros (2022); Autor (2023)

Para ambas as propriedades mecânicas, módulo e resistência à compressão, as relações residuais exibidas pelos prismas desta pesquisa mostraram-se coerentes com os resultados apresentados por Medeiros (2022).

4.3.4 PROPOSTA DE CURVAS RESIDUAIS NORMALIZADAS

Como contribuição desta pesquisa ao meio técnico, propõe-se neste item o estabelecimento de curvas normativas residuais para as propriedades de resistência à compressão e módulo de deformação secante de argamassas, grautes e prismas. Para definição das curvas normativas, os seguintes critérios foram adotados:

- I. Aumentos no valor das propriedades, que usualmente ocorrem em temperaturas próximas a 100 °C, foram desconsiderados;
- II. As curvas foram definidas como envoltórias, ou seja, os menores valores exibidos, para cada temperatura, foram tomados como referência;
- III. Cada valor menor foi arredondado em 0,05.

As curvas residuais propostas para argamassas, grautes e prismas são apresentadas pela Tabela 4.16, Tabela 4.17 e Tabela 4.18. Todas as curvas foram plotadas na Figura 4.36.

Tabela 4.16 – Relações residuais normativas para argamassas de assentamento convencionais e industrializadas.

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS DE ASSENTAMENTO ESTRUTURAL*		
Temperatura de exposição (°C)	Resistência residual / T. amb.	Módulo residual / T. amb.
Ambiente	1,00	1,00
200	1,00	0,75
400	0,70	0,35
600	0,25	0,05
800	0,15	0,00
ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE ASSENTAMENTO ESTRUTURAL		
Temperatura de exposição (°C)	Resistência residual / T. amb.	Módulo residual / T. amb.
Ambiente	1,00	1,00
200	0,95	0,80
400	0,80	0,45
600	0,40	0,10
800	0,15	0,05

*Produzidos *in-loco* com cimento CP II F32, cal CHII e areia de características semelhantes a este estudo.

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.17 – Relações residuais normativas para grautes convencionais.

GRAUTES CONVENCIONAIS*		
Temperatura de exposição (°C)	Resistência residual / T. amb.	Módulo residual / T. amb.
Ambiente	1,00	1,00
200	0,80	0,70
400	0,60	0,40
600	0,40	0,10
800	0,15	0,05

*Produzidos *in-loco* com cimento CP II F32, cal CHII, areia e pedrisco de características semelhantes a este estudo.

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4.18 – Relações residuais normativas para prismas moldados com blocos de 6 a 24 MPa, argamassas de assentamento convencionais e industrializadas de 5 a 20 MPa.

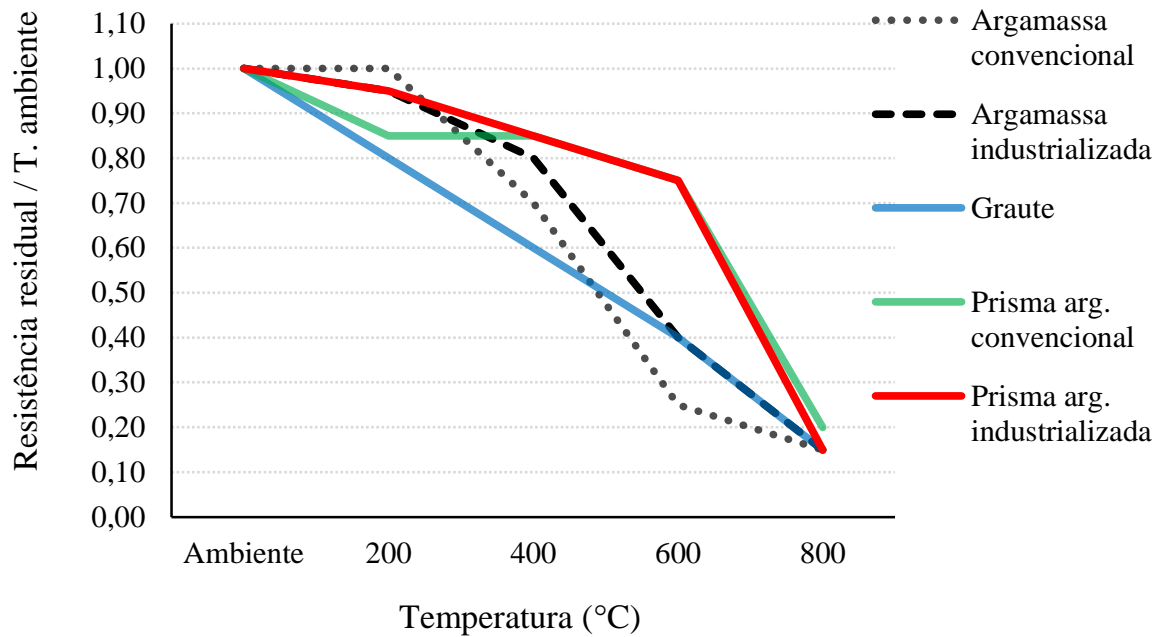
PRISMAS: BLOCO de 6 a 24 MPa - ARGAMASSAS CONVENCIONAIS de 5 a 20 MPa*		
Temperatura de exposição (°C)	Resistência residual / T. amb.	Módulo residual / T. amb.
Ambiente	1,00	1,00
200	0,85	0,70
400	0,85	0,55
600	0,75	0,20
800	0,20	0,05

PRISMAS: BLOCO DE 6 a 24 MPa - ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS DE 5 a 20 MPa		
Temperatura de exposição (°C)	Resistência residual / T. amb.	Módulo residual / T. amb.
Ambiente	1,00	1,00
200	0,95	0,80
400	0,85	0,50
600	0,75	0,15
800	0,15	0,05

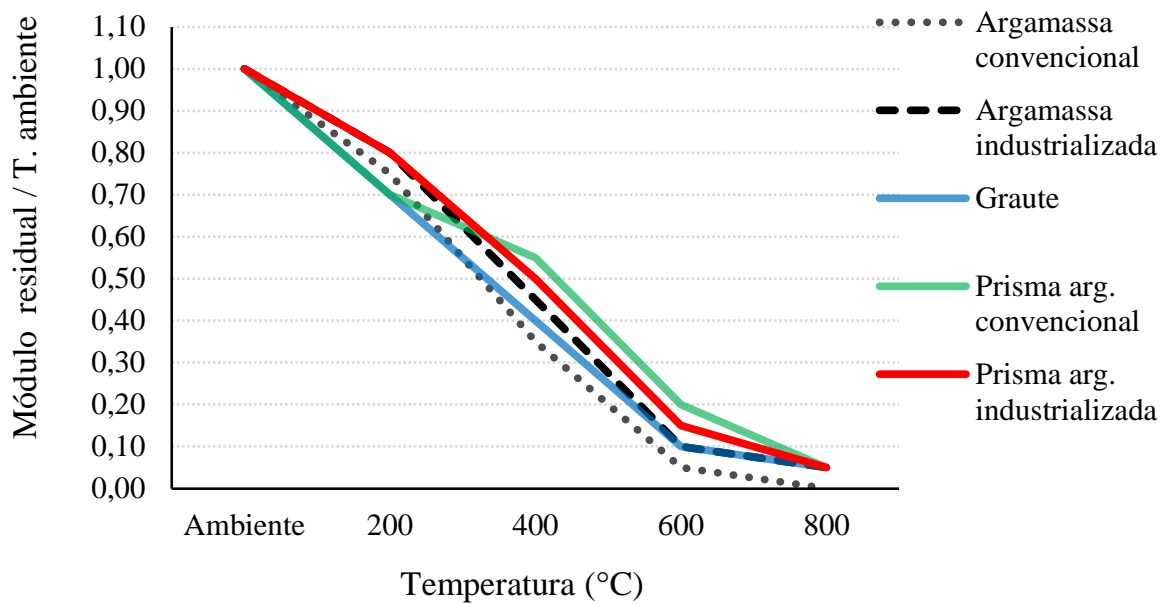
*Produzidas *in-loco* com cimento CP II F32, cal CHII e areia de características semelhantes a este estudo.

Fonte: Autor (2023)

Figura 4.36 – Propostas de curvas normativas: a) para resistência à compressão; b) para módulo de deformação secante.



a)



b)

Fonte: Autor (2023)

Vale ressaltar que a existência de patamares como o observado na Figura 4.36 para a envoltória de prismas assentados com argamassas convencionais é resultado da estratégia adotada de desconsiderar, a favor da segurança, eventuais aumentos observados nas propriedades mecânicas após os regimes de aquecimento e resfriamento.

5. *CONSIDERAÇÕES FINAIS*

Conhecer o comportamento dos materiais de uso corrente nas construções brasileiras de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas é o primeiro dos passos em direção à criação de uma norma nacional para verificação do sistema construtivo em situação de incêndio. Nesse sentido, esta tese propôs a determinação de propriedades mecânicas residuais para argamassas de assentamento, grautes e prismas com dois blocos de concreto, após aquecimentos de 200, 400, 600 e 800°C. Sintetizam-se, a seguir, os achados de relevância concernentes às fases de determinação e controle de propriedades físico-mecânicas dos componentes investigados.

Argamassas

Quando caracterizadas no estado fresco, as argamassas convencionais (com cal) apresentaram índices de consistência compreendidos, em sua maioria, pelo intervalo de 240 ± 20 mm. Mesmo com as quantidades mínimas de água recomendadas pelos fabricantes, as argamassas industrializadas (sem cal e contendo aditivos) apresentaram-se mais fluidas (260 ± 20 mm). As densidades das argamassas industrializadas no estado fresco foram superiores às das argamassas convencionais. Para ambos os tipos, a propriedade física aumentou sensivelmente com elevação da classe de resistência das misturas. A consistência das argamassas foi levemente reduzida em direção às maiores resistências nominais. Os valores de retenção de água (obtidos conforme norma internacional BS EN 413-2:2016) mostraram-se próximos e satisfatórios em relação aos requisitos da ABNT NBR 13281-2:2023 (entre 90,5% e 93,3%). Não foram observados aumentos ou decréscimos na retenção de água proporcionais ao elevar-se a classe de resistência das misturas.

No estado endurecido, resistências à tração por compressão diametral, tração por flexão, resistências à compressão em cubo, prisma, cilindro e módulo de deformação secante cresceram proporcionalmente aos aumentos da classe de resistência das argamassas. Foi evidente o efeito da geometria dos corpos de prova no resultado das propriedades mecânicas. Em sua maioria, os valores das propriedades mecânicas no estado endurecido das argamassas industrializadas foram superiores aos das argamassas convencionais; com destaque para a resistência à tração e módulo secante. Para todos os tipos de argamassas testados no estado endurecido, aumentos nas resistências nominais refletiram em reduções na absorção de água e índices de vazios.

Quanto aos ensaios de controle tecnológico, as amostras de argamassas convencionais e industrializadas extraídas durante a montagem dos prismas exibiram resultados de resistência à tração na flexão coerentes e até superiores aos obtidos durante a caracterização das misturas (Tabela 4.6 e Tabela 4.7). Para a resistência de compressão, o comportamento foi contrário: os menores valores foram obtidos nas amostras extraídas durante a montagem dos prismas.

Grautes

Os grautes estudados apresentaram, para o estado fresco, abatimentos em tronco de cone entre 215mm e 240mm. Diferentemente do observado na caracterização das argamassas, os grautes de maiores resistências apresentaram maior fluidez. As reduções nas proporções de areia e pedrisco tornaram as misturas mais sensíveis ao efeito da cal e quantidade de água na mistura.

No estado endurecido, a caracterização exibiu aumentos nas resistências à tração e à compressão em direção às classes de maiores resistências. Para o módulo de deformação secante todos os resultados foram próximos (de 32,45 GPa a 34,48 GPa), sendo o menor dos valores exibido pelo graute de resistências intermediária (G25).

A elevação da resistência não refletiu em reduções proporcionais nos índices de absorção de água. Os resultados de absorção foram próximos, sendo o maior deles fornecido pela mistura de maior resistência (G35). A massa específica dos grautes no estado endurecido não foi alterada com os aumentos na resistência das misturas.

Blocos

Durante a caracterização, os blocos apresentaram baixa variação dimensional, com medidas em conformidade com os limites da ABNT NBR 6136:2016. Devido à adoção das placas de forro de fibra mineral (forro-pacote) como capeamento, tanto as resistências médias quanto características à compressão obtidas aos 28 dias de idade foram inferiores às resistências nominais. A absorção de água dos blocos atendeu à ABNT NBR 6136:2016, diminuindo de modo inversamente proporcional ao aumento da resistência. A relação entre área líquida e área bruta para todas as classes de resistência de blocos testadas foi de 0,55.

Com relação aos objetivos inicialmente estabelecidos, conclui-se:

- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante para argamassas de assentamento com cal (convencionais) e sem cal (industrializadas).

As propriedades mecânicas de resistência à compressão e módulo de deformação secante foram determinadas para argamassas de assentamento convencionais e industrializadas de três resistências nominais (5, 10 e 20 MPa). Os valores de referência foram obtidos em temperatura ambiente (sem queima) e os valores residuais após exposições das amostras a 200, 400, 600 e 800°C.

Exposições a 400°C e a 600°C resultaram, respectivamente, em perdas de resistência à compressão na ordem de 30% e de 60% para as argamassas convencionais. Para o módulo de deformação, as reduções foram superiores a 50% com aquecimentos de 400°C, e cerca de 90% após os 600°C. Com 800°C, as argamassas convencionais apresentaram menos de 20% da resistência e em torno de 5% do módulo obtidos em temperatura ambiente

As argamassas industrializadas degradaram-se menos que as misturas convencionais quando expostas às altas temperaturas. Com 400°C, os resultados de resistência à compressão corresponderam a cerca de 80% dos obtidos em temperatura ambiente. Com 600°C, as argamassas AI5 e AI10 apresentaram reduções de 31 e 35% em relação aos valores de referência, respectivamente. Para a argamassa AI20, essa redução foi de 61%. Após os 800°C, as resistências das argamassas industrializadas conservaram entre 15% e 17% dos valores de referência. Cerca de 50% do módulo foi perdido com 400°C e, após os 800°C, entre 3% e 6% dos valores de módulo obtidos em temperatura ambiente foram conservados. Para todas as argamassas, a degradação do módulo secante ocorreu precocemente em comparação à resistência à compressão.

Observou-se que a presença da cal interferiu consideravelmente na degradação das argamassas convencionais, sobretudo, para as queimas acima dos 400°C. Durante o período de resfriamento (ao retornar a temperaturas próximas aos 100°C), o processo de reidratação da cal por absorção da umidade do ambiente gerou expansão e intensa fissuração nas argamassas convencionais. Este comportamento não foi exibido pelas argamassas industrializadas (contendo apenas aditivos).

- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante em grautes convencionais para preenchimento em alvenaria estrutural;

Corpos de prova cilíndricos foram ensaiados para três resistências de graute (15, 25 e 35 MPa). As propriedades de resistência à compressão e módulo secante também foram determinadas em temperatura ambiente e após submissão a aquecimentos de 200, 400, 600 e 800°C.

Mesmo contendo pequena quantidade de cal em sua composição (5% da massa de cimento), o comportamento dos grautes muito se aproximou do que é observado para concretos convencionais. Módulo e resistência decresceram linearmente, tal como expresso em normas internacionais (ACI/TMS 216.1-14:2014 e EN 1992-1-2: Eurocode 2: 2004) e em trabalhos da literatura envolvendo agregados e condições de aquecimento semelhantes (silicosos). Com 200°C, entre 83 e 88% dos valores de resistência à compressão obtidos em temperatura ambiente foram conservados. Após 400°C, entre 62 e 69% dos valores de referência foram mantidos. Frente aos 600°C e aos 800°C as resistências chegaram, respectivamente, a 40 e a 17% dos valores obtidos em temperatura ambiente. Para todas as resistências de graute, a degradação do módulo secante sob altas temperaturas ocorreu precocemente em comparação à resistência à compressão.

- ✓ Determinar os valores residuais (pós-resfriamento) de resistência à compressão e módulo de deformação secante em prismas ocos e não revestidos, com dois blocos de concreto;

De modo semelhante às argamassas e aos grautes, as propriedades de resistência à compressão e módulo de deformação secante foram obtidas em prismas com dois blocos de concreto, não preenchidos e sem revestimento. Os valores de referência foram determinados tomados em temperatura ambiente e os residuais após exposições a 200, 400, 600 e 800°C.

Quando aquecidos a 600°C, os cilindros de argamassas AC5, AC10, AC20, AI5, AI10 e AI20 apresentaram, respectivamente, 26, 35, 41, 69, 65 e 39% da resistência obtida em temperatura ambiente, enquanto os prismas assentados com as mesmas misturas exibiram valores residuais correspondentes a 74, 71, 82, 76, 85 e 69% da resistência inicial. Com exceção da argamassa AI10, maiores relações residuais de módulo de deformação secante também foram apresentadas pelos prismas, em comparação aos em corpos de prova de argamassa. Esse retardamento na degradação das propriedades mecânicas dos prismas está associado efeito de confinamento atuante na argamassa, quando disposta na junta de assentamento entre os blocos. Confinada, sua livre fissuração é impedida, postergando sua deterioração e, conseqüentemente, o declínio das propriedades residuais exibida pelos elementos de alvenaria.

Os resultados residuais de prisma foram comparados com valores obtidos por Medeiros (2022) para blocos estruturais de concreto, sendo estes produzidos na mesma fábrica e com composições semelhantes aos utilizados no presente estudo. Os resultados de resistência à compressão mostraram-se coerentes com os deste trabalho e semelhantes para o módulo de deformação secante.

- ✓ Estabelecer, para as argamassas, grautes e prismas, curvas que relacionam os valores das propriedades mecânicas (módulo de deformação secante e resistência à compressão) residuais com seus valores obtidos em temperatura ambiente;

Para cada um dos materiais testados, os valores residuais de resistência à compressão e módulo de deformação secante obtidos após 200, 400, 600 e 800°C foram divididos pelos valores de referência (obtidos em temperatura ambiente), dando origem às “relações residuais”.

- ✓ Verificar qual a influência dos fatores temperatura e tipo de argamassa nas propriedades residuais das argamassas, grautes e prismas testados;

A influência dos fatores temperatura e tipo de argamassa foi verificada via ANOVA e Teste de Tukey para os valores residuais e obtidos em temperatura ambiente de todos os materiais testados. Para as argamassas, constatou-se que variações no fator “temperatura de exposição” alteraram significativamente a resistência à compressão e o módulo de deformação secante, independentemente de sua composição (com ou sem cal). A presença de cal não alterou significativamente o módulo de deformação das argamassas pertencentes à classe de 5 MPa (AC5 e AI5). Para as demais misturas, a influência foi significativa.

Para os grautes, constatou-se via análise estatística que variações no fator “temperatura de exposição” refletiram em alterações significativas do módulo de deformação e resistência à compressão nas três classes investigadas (G15, G25 e G35).

Para os prismas assentados com as mesmas argamassas testadas individualmente, o comportamento observado foi distinto. O fator tipo de argamassa, por exemplo, passou a ser significativo somente para as maiores resistências de bloco e de argamassa.

- ✓ Propor curvas residuais normalizadas para argamassas, grautes e prismas.

Como fruto da análise das relações entre valores residuais (após exposições a 200, 400, 600 e 800°C) e obtidos em temperatura ambiente para módulo e resistência das argamassas, grautes e prismas, curvas envoltórias foram estabelecidas. Para tal, eventuais aumentos das propriedades mecânicas com o aquecimento foram desconsiderados e os valores definidos para degradação associada à cada temperatura de estudo corresponderam aos menores valores obtidos (piores situações) entre as diferentes classes de resistência de cada material ensaiadas.

Esta pesquisa proporcionou uma análise abrangente das propriedades mecânicas de materiais empregados no sistema construtivo de alvenaria estrutural em condições extremas de temperatura. Os resultados aqui obtidos fornecem uma contribuição valiosa para o entendimento do comportamento de argamassas, grautes e prismas com blocos de concreto, após submissão ao calor. Trata-se de informações importantes para engenheiros e projetistas;

capazes de fomentar melhores avaliações e melhores aproveitamentos do desempenho desses componentes diante da exposição a altas temperaturas. Elucidar a regressão das propriedades mecânicas dos componentes da alvenaria quando aquecidos também representa uma contribuição em direção segurança e confiabilidade do sistema construtivo.

A comparação das curvas e relações obtidas nesta tese com resultados de outras pesquisas, da normalização nacional e internacional permitiu validar e contextualizar os achados do estudo dentro de um contexto mais amplo. Acredita-se que os resultados obtidos contribuam para o avanço do conhecimento científico e melhoria das práticas de engenharia, com potencial de orientar projetos futuros bem como auxiliar no desenvolvimento de normas e diretrizes mais assertivas para o uso dos componentes da alvenaria estrutural em ambientes desafiadores.

5.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Em razão da necessidade de limitar o escopo da pesquisa, algumas questões que surgiram ao longo de sua elaboração não foram de um todo sanadas. Desta forma, recomenda-se para elaboração de trabalhos futuros:

- ✓ Simulações numéricas do comportamento termoestrutural de elementos de alvenaria, alimentando os modelos com os resultados obtidos neste estudo;
- ✓ Determinar módulo de deformação e resistência à compressão residuais em prismas preenchidos com graute;
- ✓ Determinar módulo de deformação e resistência à compressão residuais em prismas com dois blocos cerâmicos, variando resistências nominais de geometrias das unidades;
- ✓ Extrair as propriedades mecânicas em prismas com blocos de concreto e com blocos cerâmicos durante o aquecimento;
- ✓ Realização de ensaios não destrutivos (ex.: ultrassom) e estabelecimento de correlações com as propriedades mecânicas residuais;
- ✓ Realizar ensaios de Difractometria de raios-x (DRX) e Microscopia de Varredura (MEV) em fragmentos dos componentes ensaiados para investigar, em escala, microscópica a degradação dos hidratos do cimento e reações que envolvem a cal quando exposta a altas temperaturas.

REFERÊNCIAS

ABASI, A.; HASSANLI, R.; VINCENT, T.; MANALO, A. Influence of prism geometry on the compressive strength of concrete masonry. **Construction and Building Materials**, v.264, p. 1-17 2020.

ABDULHUSSEI, F.; ABBAS, W.; FRAYYEH, Q. Effect of high temperature and type of cooling on some mechanical properties of cement mortar. **MATEC Web of Conferences**, v. 162, 2018.

ABID, M.; HOU, X.; ZHENG, W.; HUSSAIN, R. R. High temperature and residual properties of reactive powder concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 147, p. 339-351, 2017.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 67: Concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998. 8p.

_____. **NBR NM 248: Agregados - determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003. 6p.

_____. **NBR 5628: Componentes construtivos estruturais – Ensaio de resistência ao fogo**. Rio de Janeiro, 2022. 65p.

_____. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015. 9p.

_____. **NBR 5739: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018. 9p.

_____. **NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2016. 10p.

_____. **NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira – Parte 1 – Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro, 2022. 81p.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Requisitos**. Rio de Janeiro, 2022. 10p.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – Determinação da resistência à tração por compressão de corpo de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2019. 12p.

_____. **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, 2010. 3p.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpo de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2011. 5p.

_____. **NBR 8522-1: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão**. Rio de Janeiro, 2021. 24p.

- _____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, 2005. 4p.
- _____. **NBR 9939: Agregado graúdo - Determinação do teor de umidade total – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2011. 3p.
- _____. **NBR 10636-1: Componentes construtivos não estruturais – Ensaio de resistência ao fogo. Parte 1: Paredes e divisórias de compartimentação.** Rio de Janeiro, 2022. 46p.
- _____. **NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro. 2014. 14p.
- _____. **NBR 13276: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação do índice de consistência.** Rio de Janeiro. 2016. 2p.
- _____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado.** Rio de Janeiro. 2005. 4p.
- _____. **NBR 13279: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão.** Rio de Janeiro. 2005. 9p.
- _____. **NBR 13281-2: Argamassas inorgânicas – Requisitos e métodos de ensaios - Parte 2: Argamassas para assentamento e argamassas para fixação de alvenaria.** Rio de Janeiro, 2023. 5p.
- _____. **NBR 16541: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura para a realização de ensaios.** Rio de Janeiro, 2016. 2p.
- _____. **NBR 16590-1: Composto polimérico para assentamento de alvenaria de vedação – Parte 1: Requisitos.** Rio de Janeiro, 2017. 4p.
- _____. **NBR 16697: Cimento Portland – Requisitos.** Rio de Janeiro, 2018. 12p.
- _____. **NBR 16868-1: Alvenaria estrutural – Parte 1 – Projeto.** Rio de Janeiro, 2020. 70p.
- _____. **NBR 16868-2: Alvenaria estrutural – Parte 2 – Execução e controle de obras.** Rio de Janeiro, 2020. 23p.
- _____. **NBR 16868-3: Alvenaria estrutural – Parte 3 – Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2020. 39p.
- _____. **NBR 16915: Agregados - Amostragem.** Rio de Janeiro, 2021. 8p.
- _____. **NBR 16916: Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021. 7p.
- _____. **NBR 16917: Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. **NBR 16945: Classificação da resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações.** Rio de Janeiro, 2021. 69p.

_____. **NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro, 2021. 6p.

_____. **NBR 16973: Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem.** Rio de Janeiro, 2021. 3p.

_____. **NBR 13860: Glossário de termos relacionados com a segurança contra incêndio.** Rio de Janeiro. 1997. 10p.

_____. **NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio.** Rio de Janeiro. 2013. 66p.

_____. **NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento.** Rio de Janeiro. 2001. 14p.

_____. **NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio.** Rio de Janeiro. 2012. 48p.

_____. **NBR 15575-4: Edificações habitacionais – Desempenho Parte 4 – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas SVVIE.** Rio de Janeiro. 2013. 63p.

_____. **NBR 15812-1: Alvenaria estrutural – Blocos cerâmicos Parte 1 – Projetos.** Rio de Janeiro, 2010. 41p.

_____. **NBR 15961-1: Alvenaria estrutural – Blocos de concreto Parte 1 – Projeto.** Rio de Janeiro, 2011. 42p.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 211.3R-02: Guide for Selecting Proportions for No-Slump Concrete.** Farmington Hills. 2002.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; TMS, THE MASONRY SOCIETY. **ACI/TMS 216.1-14: Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies.** Farmington Hills. 2014.

ACI, AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; TMS, THE MASONRY SOCIETY. **ACI/TMS 402/602-22: Building Code Requirements and Specification for Masonry Structures.** Farmington Hills. 2022.

ADEWOYIN, O.; ADESINA, A.; DAS, SREEKANTA. Physico-thermal and microstructural properties of thermal-efficient mortars made with low cement content. **Construction and Building Materials**, v. 325, 2022.

AHMED, A. R.; AL-ZUHAIRI, A. H. Behavior of Clay Masonry Prism under Vertical Load Using Detailed Micro Modeling Approach. **Association of Arab Universities Journal of Engineering Sciences**, v. 26, n. 1, p. 67-73, 2019.

ALANI, S. S.; HASSAN, M. S.; JABER, A. A. Residual strength and degradation of cement mortar containing polypropylene fibers at elevated temperature. **IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering**, v. 737, 2020.

ALONSO, C.; ANDRADE, C.; MEDENDEZ, E.; GAYO, E. Microstructural Changes in High and Ultra High Strength Concrete Exposed to High Temperature Environments. **Materials Science**, v. 229, 2005.

ALONSO, C.; FERNANDEZ, L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. **Journal of Materials Science**, v. 39, 2004.

ALVARENGA, R. C. S. S.; NALON, G. H.; FIORESI, L. A. F.; PINTO M. C.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Experimental Evaluation of the Influence of Mortar's Mechanical Properties on the Behavior of Clay Masonry. *In: Characterization of Minerals, Metals, and Materials 2017*. 2017.

ÁLVAREZ-PÉREZ, J.; CHÁVEZ-GÓMEZ, J. H.; TERÁN-TORRES, B. T.; MESA-LAVISTA, M. Multifactorial behavior of the elastic modulus and compressive strength in masonry prisms of hollow concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.

AMARAL, R. O.; MORENO JR, A. L.; MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A. Residual mechanical resistance of concrete blocks and laying mortars after high temperatures. **Fire and Materials**, 2023.

ANDREINI, M.; SASSU, M. Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action. *Fire Safety Journal*, v. 46, p. 440-450, July 2011.

ANDOLFATO, R. P.; CAMACHO, J. S.; RAMALHO, M. A. Brazilian Results on Structural Masonry Concrete Blocks. **ACI Materials Journal**, v. 104, N 1 p. 33-39, Jan-Febr 2007.

AKCA, A. H.; ÖZYURT, N. Effects of re-curing on residual mechanical properties of concrete after high temperature exposure. **Construction and Building Materials**, v. 159, p. 540-552, 2018.

U.S. - Japan Coordinated Program for Masonry Building Research. ATKINSON, R. H.; KINGSLEY, G. R. **A comparison of the behavior of clay and concrete masonry in compression**. Boulder, 1985, 164 p.

ARIOZ, O. Effects of elevated temperatures on properties of concrete. **Fire Safety Journal**, v. 42, p.516-522, 2007.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 3700-2018: Masonry Structures**. Sydney, NSW, 2018.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C140-22b: Standard Test Methods for Sampling and Testing Concrete Masonry Units and Related Units**. West onshohocken, 2022.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1314-14: Standard Test Method for Compressive Strength of Masonry Prisms**. West onshohocken, 2014.

ASTM, AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E119-18: Fire tests of building construction and materials**. West Conshohocken, 2018.

BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G. Properties of Concrete Subjected to Extreme Thermal Conditions. **Journal of Structural Fire Engineering**, v. 5, n. 1, 2014.

BAMONTE, P.; GAMBAROVA, P. G.; SCIARRETTA, F. Thermo-mechanical properties and stress-strain curves of ordinary cementitious mortars at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 267, p.1-11, 2021.

BARADAN, B.; YAZICI, H.; ÜN, H.; Betonarme Yapılarda Kalıcılık (Durabilite), DEU **Mühendislik Fakültesi Yayınları**, No: 298, 2002.

BATTAGIN, A. F.; SILVEIRA, A. L. Z P. Estudo da microestrutura do concreto em situação de incêndio: um termômetro da temperatura alcançada. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed.89, p.44-48, Jan-Mar, 2018.

BENLI, A.; KARATAS, M.; TOPRAK, H. A. Mechanical characteristics of self-compacting mortars with raw and expanded vermiculite as partial cement replacement at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 239, 2020.

BERTO, A. F.; OLIVEIRA, C. R. M. Resistência ao fogo das estruturas de concreto. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed.89, p.22-28, Jan-Mar, 2018.

BINGÖL, A. F.; GÜL, R. Effect of elevated temperatures and cooling regimes on normal strength concrete. **Fire and Materials**, v. 33, p. 79-88, 2009.

BITTENCOURT, B. S.; ANTUNES, E. G. P. **Comportamento mecânico de prismas grauteados frente a altas temperaturas: auxílio à futura normatização**. 2019. 18 f. Artigo (Graduação em Engenharia) – Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma, 2019.

BRITEZ, C.; CARVALHO, M.; HELENE, P. Ações e efeitos deletérios do fogo em estruturas de concreto. Uma breve revisão. **Revista ALCONPAT**, v. 10, n. 1, p.1-21, 2020.

BUCHANAN, A. H.; ABU, A. K. **Structural Design for Fire Safety**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2017. 415 p.

CALDEIRA, F. E.; NALON, G. H.; OLIVEIRA, D. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; FERREIRA, F. A.; CARVALHO, J. M. F. Influence of joint thickness and strength of mortars on the compressive behavior of prisms made of normal and high-strength concrete blocks. **Construction and Building Materials**, v. 234, 2020.

CAMACHO, J. S.; LOGULLO, B. P.; PARSEKIAN, G. A.; SOUDAIS, P. R. N. The Influence of Grouting and Reinforcement Ratio in the Concrete Block Masonry Compressive Behavior. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 8, p. 341-364, 2015.

CAVALHEIRO, O. P.; ARANTES, C. A. Influence of Grout on Hollow Clay Masonry Compressive Strength - IBMAC, 13, 2004, Amsterdam. **Proceedings**.

CARASEK, H. Argamassas. *In: ISAÍÁ, G. C. Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais*. São Paulo: IBRACON, 2017. p. 922-967.

CASALI, J. M.; OLIVEIRA, A. L.; SAKAMOTO, C.; SCHANKOSKI, R.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. P. The effect of mortar bedding type and hollow concrete block geometry on the mechanical behavior of high-strength structural masonry - *IBMAC*, 15, 2012, Florianópolis. **Proceedings**.

CASTELLONE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Concrete and Cement Research**, v. 34, 2004.

CASTRO, A. L.; TIBA, P. R. T.; PANDOLFELLI, V. C. Fibras de polipropileno e sua influência no comportamento de concretos expostos a altas temperaturas. Revisão. **Cerâmica**, v. 57, 2011.

CERQUEIRA, N. A.; MARVILA, M. T.; AZEVEDO, A. R. G.; ALEXANDRE, J.; XAVIER, G. C.; SOUZA, V. B. Analysis of deformability modulus by linear and nonlinear elastic methods in ceramic structural masonry and mortars. **Cerâmica**, v. 66, p. 379, Jul-Sep, 2020.

CEMEX MORTARS. **Educational guide to properties of masonry mortar**. 2022.

Disponível em < <https://www.cemex.co.uk/documents/45807659/45840198/mortar-cementitious.pdf/46571b2a-3efd-4743-20c8-d33feb1aed9d> >. Acesso em: 25 jun. 2023.

CHAN, Y. N.; PENG, G. F.; ANSON, M. Residual strength and pore structure of high-strength concrete and normal strength concrete after exposure to high temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 21, p. 23–27, 1999.

CIB W014: FIRE. **Rational fire safety engineering approach to fire resistance of buildings**. Rotterdam, 2001. (CIB Report. Publication, n. 269).

COSTA, C. N. **Dimensionamento de elementos de concreto armado em situação de incêndio**. 2008. 405 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CÜLFIK, M. S.; ÖZTURAN, T. Effect of elevated temperatures on the residual mechanical properties of high-performance mortar. **Cement and Concrete Research**, v. 32, p. 809–816, 2002.

DAWARE, A.; PEERZADA, A. B.; NASER, M. Z.; RANGARAJU, P.; BUTMAN, B. Examining the behavior of concrete masonry units under fire and post-fire conditions. **Fire and Materials**. v. 47, n. 2, p. 159-169, 2023.

DEVI, K.; SAINI, B.; AGGARWAL, P. Impact of high temperature on mortar mixes containing additives. **Journal of Engg. Research** v. 10, n. 1B, p. 68-85, 2021.

DHANASEKAR, M.; SHRIVE, N. G. Strength and Deformation of Confined and Unconfined Grouted Concrete Masonry. **ACI Structural Journal** v. 99, n. 6, p. 819-826, 2002.

DIAS, A. R. O.; AMANCIO, F. A.; RAFAEL, M. F. C.; CABRAL, A. E. B. Comportamento do concreto submetido a elevadas temperaturas. **Revista Matéria**, v. 25, n. 2, 2020.

DOUGKAS, A.; VERSTRYNGE, E.; HAYEN, R.; VAN BALEN, K. The confinement of mortar in masonry under compression: Experimental data and micro-mechanical analysis. **International Journal of Solids and Structures**, v. 162, 2019.

DRYSDALE, D. (2011). **An Introduction to Fire Dynamics**. 3rd Edition. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd., 2011. 564p.

DRZYMALA, T.; REK, W. J.; TOMASZEWSKI, M.; KUS, A.; GALAJ, J.; SUKYS, R. Effects of High Temperature on the Properties of High Performance Concrete (HPC). **Procedia Engineering**. v. 172, p. 256-263, 2017.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1991-1-2: Eurocode 1: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire**. 2, Brussels, 2002. 59p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1992-1-2: Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. 2, Brussels, 2004. 99p.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 1996-1-2: Eurocode 6 - Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design**. [S.l.]. 2005b. 83p.

FAN, K.; LI, J.; YU, M.; WU, M.; YAO, Y. Compressive stress-strain relationship for stressed concrete at high temperatures. **Fire Safety Journal**, v. 130, 2022.

FONSECA, F. S.; FORTES, E. S.; PARSEKIAN, G. A.; CAMACHO, J. S. Compressive strength of high-strength concrete masonry grouted prisms. **Construction and Building Materials**, v. 202, p. 861-876, 2019.

FIB, FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. **CEB-FIP - Bulletin 38: Fire design of concrete structures – materials, structures and modeling**. Lausanne, 2007. 105p.

FERNANDES B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L., TUTIKIAN, B. F. Microestrutura do concreto submetido a altas temperaturas: alterações físico-químicas e técnicas de análise. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 10, n. 4, 2017.

FERNANDES, I. **Blocos e Pavers – Produção e Controle de Qualidade**. 7 ed. Ribeirão Preto: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda., 2016. 200p.

FERNANDES NETO, J. A, D.; SOMBRA, T. N.; HAACH, V. G., CORRÊA, M. R. S. Effects of post-fire curing on the residual mechanical behavior of cement-lime masonry mortars. **Construction and Building Materials**, v. 327, 2022.

FORTES, E. S. **Influência do tipo de capeamento e caracterização da resistência à compressão de alvenaria estrutural de blocos de concreto**. 2012. 303 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2012.

FORTES, ERNESTO S.; PARSEKIAN, GUILHERME A.; FONSECA, FERNANDO S. Relationship between the Compressive Strength of Concrete Masonry and the Compressive Strength of Concrete Masonry Units. **Journal of matérias in Civil Engineering**, v. 26, p. 04014238-1-04014238-12, 2015.

FORTES, E. S. **Caracterização da alvenaria estrutural de alta resistência**. 2017. 349 f. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2017.

GAO, Z.; WANG, L.; YANG, H. Investigation of the Residual Mechanical and Porosity Properties of Cement Mortar under Axial Stress during Heating. **Materials**, v. 14, 2021.

GIL, A.; BOLINA, F.; MOREIRA, M.; FERNANDES, B.; TUTIKIAN, B. Estudos experimentais sobre o fenômeno de deslocamento em estruturas de concreto submetidas a elevadas temperaturas. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed. 89, p.71-78, Jan-Mar, 2018.

ABDELRAHMAN, B.; GALAL, K. Influence of pre-wetting, non-shrink grout, and scaling on the compressive strength of grouted concrete masonry prisms. **Construction and Building Materials**, v. 241, 2020.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, v. 61, No. 1, 2013.

HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. Suggested Failure Criteria for Grouted Concrete Masonry Under Axial Compression. **ACI JOURNAL**, v. 76, n. 3, p. 1047-1062, 1979.

HAMID, A. A.; CHUKWUNENYE, A. O. Compression behavior of concrete masonry prisms. **J. Struct. Eng.**, v. 112, n. 10, p. 605-613, 1986.

HEYDARILHA, J. Z.; DAS, S.; BANTING, B. Effect of grout strength and block size on the performance of masonry beam. **Construction and Building Materials**, v. 157, p. 685-693, 2017.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. R. **Design of Masonry Structures**. 3. ed. London: E & FN Spon, 2004. 279 p.

HENRY, M.; SUZUKI, M.; KATO, Y. Behavior of Fire-Damaged Mortar under Variable Re-curing Conditions. **ACI Materials Journal**, v. 108, N 3, May-June 2011.

HERTZ, K. Analyses of Concrete Structures Exposed to Fire. Part 1: Material Properties. **Danmarks Tekniske Universitet**. Lecture Notes BYG - DTU, 2007.

HORSZCZARUK, E.; SIKORA, P.; CENDROWSKI, K.; MIJOWSKA. The effect of elevated temperature on the properties of cement mortars containing nanosilica and heavyweight aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 137, 2017.

HILSDORF, H. K. Investigation into the failure mechanism of brick masonry loaded in axial compression, *In*: 1st International Brick and Block Masonry Conference, Austin, Texas, 1967.

INGHAM, J. P. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. **Materials Characterization**, v. 60, p. 700–709, 2009.

ISO, INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8421-1: Fire protection - Vocabulary - Part 1: General terms and phenomena of fire**. Genebra, 1987. 6p.

ISO, INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 834-1: Fire resistance tests - elements of building construction - Part 1: General requirements**. Geneva, 1999. 25p.

IZQUIERDO, O. S.; CORRÊA, M. R. S.; SOTO, I. I. The influence of mortar bedding on the compressive strength of concrete block masonry structures - IBMAC, 15, 2012, Florianópolis. **Proceedings**.

IZQUIERDO, O. S.; CORRÊA, M. R. S.; SOTO, I. Study of the block/grout interface in concrete and clay block masonry structures. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 10, n. 4, p. 924-936, 2017.

KHALAF, F. M.; HENDRY, A. W.; FAIRNAIRN, D. R. Study of the Compressive Strength of Blockwork Masonry. **ACI Structural Journal**, v. 91, No. 4, July-August 1994.

KHALIL, M. R. A.; SHRIVE, N. G.; AMENY, P. Three-dimensional stress distribution in concrete masonry prisms and walls. **Magazine of Concrete Research**, v. 39, n. 139, June 1987.

KARAHAN, O. Residual compressive strength of fire-damaged mortar after post-fire-air-curing. **Fire and Materials**, v. 35, p. 561–567, 2011.

KHAN, R. W. Z.; YAQUB, M.; NOMAN, M.; WAQAS, R. M. Evaluation of Mechanical and Microstructural Properties of Mortar Reinforced with Carbon Nanotubes at Elevated Temperatures. **Pakistan Journal of Engineering and Technology, PakJET**, v. 04, n. 01, p. 212–217, 2021.

KACI, A.; CHAOUICHE, M.; ANDRÉANI, P. A. Influence of bentonite clay on the rheological behaviour of fresh mortars. **Cement & Concrete Research**, v. 41, p. 373–379, 2011.

KARA, I. B. Effects of cooling regimes on limestone rock and concrete with limestone aggregates at elevated temperatures. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, v. 138, 2021.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Prog. Struct. Engng Mater**, v. 2, p. 429-447, 2000.

KIRCHHOF, L. D.; LIMA, R. C. A.; NETO, A. B. S. S.; QUISPE, A. C.; FILHO, L. C. P. S. Effect of Moisture Content on the Behavior of High Strength Concrete at High Temperatures. **Revista Matéria**, v. 25, n. 1, 2020.

LAKSHANI, M. M. T.; JAYATHILAKA, T. K. G. A.; THAMBOO, J. A. Experimental investigation of the unconfined compressive strength characteristics of masonry mortars, **Journal of Building Engineering**, v. 32, p. 1-14, 2020.

LEAL, C. E. F.; MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JÚNIOR, A. L. Proposta para determinação do tempo de resistência ao fogo em alvenaria estrutural quanto à isolamento térmica. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed.108, p.81-86, Out-Dez, 2022a.

LEAL, C. E. F.; MEDEIROS, W. A.; MAEBARA, A. K.; SILVA, D. H.; PARSEKIAN, G. A.; CHRISTOFORO, A. L. Influência do tipo de agregado na resistência e deformabilidade de blocos estruturais produzidos com concreto seco: estudo numérico, experimental e estatístico. **Revista Matéria**, v. 27, n. 03, 2022b.

LEITE, H. A. L.; MORENO JÚNIOR, A.; TORRES, D. L. Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 2., p. 89-107, abr./jun. 2016.

LI, L.; SHI, L.; WANG, Q.; LIU, Y.; DONG, J.; ZHANG, H.; ZHANG, G. A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing. **Construction and Building Materials**, v. 237, 2020.

LI, Q.; WANG, M.; SUN, H.; YU, G. Effect of heating rate on the free expansion deformation of concrete during the heating process. **Journal of Building Engineering**, v. 34, 2021.

LIMA, R. C. A.; KIRCHHOF, L. D.; SILVA FILHO, L. C. P. Variação de Propriedades Mecânicas de Concretos Convencionais e de Alta Resistência em Temperaturas Elevadas. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed. 46, p.65-68, Abr-Mai, 2007.

LIMA, F. B.; NASCIMENTO LIMA, A.; ASSIS, W.S. Study of the influence of compressive strength and thickness of capping-mortar on compressive strength of prisms of structural clay blocks - IBMAC, 15, 2012, Florianópolis. **Proceedings**.

LIN, W. M.; LIN, T. D.; COUCHE, L. J. P. Microstructures of Fire-Damaged Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 93, No. 3, May-June 1996.

LINSE, T.; GEBBEKEN, N.; ARAÚJO, T.; SILVA, R. M. Experimental investigations and validation of a new material model developed for masonry bricks. **Blucher Mechanical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 1., 2014.

MARCHAND, J.; BOISVERT, L.; TREMBLAY, S.; MALTAIS, J.; PIGEON, M. Air Entrainment in No-Slump Mixes. **Concrete International**, v. 20, n. 4 p. 38-44, April 1998.

MARTINS, R. O. G.; NALON, G. H.; ALVARENGA, R. C. S. S.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L. Influence of blocks and grout on compressive strength and stiffness of concrete masonry prisms. **Construction and Building Materials**, v. 182, p. 233-241, 2018.

MATA, R. C.; LA ROVERE, H. L.; PRUDÊNCIO JÚNIOR, L. R. Influence of mortar bedding on the mechanical behavior of hollow concrete masonry prisms under axial compression. International Brick and Block Masonry Conference - IBMAC, 14, 2008, Sydney. **Proceedings**.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JÚNIOR, A. L. Critical Analysis of Codes and Standards of Structural Fire Design of Masonry Structures. *In: North American Masonry Conference*, 13, 2019, Salt Lake City. **Proceedings**.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JÚNIOR, A. L. The effect of high temperatures on the mechanical performance of concrete blocks made with gneiss aggregates. *In: Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*. 2020.

MEDEIROS, W. A. **Comportamento de blocos estruturais de concreto com diferentes agregados sob altas temperaturas**. 2022. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JR., A. L. Test methodology for determining the mechanical properties of concrete blocks at high temperatures. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 55, n. February, p. 14, 2022.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JR., A. L. Residual mechanical properties of hollow concrete blocks with different aggregate types after exposure to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 377, 2023.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO. Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2014. 782p.

MEYER, U. Fire resistance assessment of masonry structures – Structural fire design of masonry buildings according to the Eurocodes. **Mauerwerk**, v. 17, 2013.

MEYER, U.; Van der PLUIJM, R.; ANDREINI, M.; PETTIT, G.; MICCOLI, L. Design of masonry panels subjected to fire in Europe: an overview on the new draft of EN 1996-1-2. *In: Brick and Block Masonry - From Historical to Sustainable Masonry*. 2020.

MINDEGUIA, J. C.; PIMIENTA, P.; CARRÉ, H.; LA BORDERIE, C. On the influence of aggregate nature on concrete behaviour at high temperature. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v. 16, No. 2, p. 236–253, 2012.

MOHAMAD, G. **Construções em alvenaria estrutural: materiais, projeto e desempenho**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2020. 424p.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Mechanics of hollow concrete block masonry prisms under compression: Review and prospects. **Cement & Concrete Composites**, v. 29, N. 03 p. 181–192, 2007.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R.; RIZATTI, E.; BARBOSA, C. S. Estudo de caracterização mecânica de blocos de concreto vibrocompactados à seco. *Revista Matéria*, v. 16, n. 1 p. 638-657, 2011.

MOHAMAD, G.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN. Study of the compressive strength of concrete block prisms – stack and running bond. **IBRACON Structures and Materials Journal**, v. 4, n. 3, p. 374-358, 2011.

MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E.; LOURENÇO, P. B.; ROMAN, H. R. Mechanical Behavior of Concrete Block Masonry. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 06, n. 10 p. 1354- 1361, Oct. 2012.

MOHAMAD, G.; RIZZATTI, E.; ROMAN, H.; ALVA, G. M. S.; LUBECK, A. Numerical Analysis of the Influence of Geometry of Ceramic Units (Blocks) on Structural Walls. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 10, p. 44-52, 2016.

MOHAMAD, G.; FONSECA, F. S.; VERMELTFOORT, A. T.; MARTENS D. R. W.; LOURENÇO, P. B. Strength, behavior, and failure mode of hollow concrete masonry Constructed with mortars of different strengths. **Construction and Building Materials**, v. 134, p. 489–496, 2017.

MOHAMED, Y. M. M. **Compressive Stress-strain Response of Unreinforced Masonry Boundary Element Prisms**. 2019. 101 p. Master of Applied Science (Civil Engineering) – Concordia University, Montreal, 2019.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F. A.; LAVERTY, D. A numerical model for the behavior of masonry under elevated temperatures. **Fire and Materials**, v. 27, p. 163-182, 2003.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F. A. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire. **Computer and Structures**, v. 81, p. 1923-1930, 2003.

NALON, G. H.; SANTOS, C. F. R.; PEDROTI, L. G.; RIBEIRO, J. C. L.; VERÍSSIMO, G. S.; FERREIRA, F. A. Strength and failure mechanisms of masonry prisms under compression, flexure and shear: Components’ mechanical properties as design constraints, **Journal of Building Engineering**, v. 28, 2020.

NALON, G. H.; RIBEIRO, J. C. L.; ARAÚJO, E. N. D.; PEDROTI, L. G.; CARVALHO, J. M. F.; SANTOS, R. F., OLIVEIRA, D. S. Residual mechanical properties of mortars containing carbon nanomaterials exposed to high temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 275, 2021.

NAJIMI, M.; SOBHANI, J.; POURKHORSHIDI, A.R. A comprehensive study on no-slump concrete: From laboratory towards manufactory. **Construction and Building Materials**, v. 30, p. 529-536, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução: Ruy Alberto Cremonini. 5 ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 888p.

OUYANG, J.; WU, F.; LÜ, W.; HUANG, H.; ZHOU, X. Prediction of compressive stress-strain curves of grouted masonry. **Construction and Building Materials**, v. 229, 2019.

PACHTA, V.; TRIANTAFYLLAKI, S.; STEFANIDOU, M. Performance of lime-based mortars at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, v. 189, 2018.

PARSEKIAN, G.A.; FONSECA, F.S.; PEREIRA, J.L. The Masonry Market is Booming in Brazil – Why? **The Masonry Society Journal**, v. 34, n. 1, p. 57-68, dec. 2016.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. (2014). **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2ª Edição. São Carlos: EdUFSCar, 2014. 625p.

PARSEKIAN, G.A.; MEDEIROS, W.A.; SIPP, G. High-rise concrete and clay block masonry building in Brazil. **Mauerwerk**, v. 22, n. 4, p. 260-272, 2018.

PEREIRA, M. C.; SOARES, A.; COLEN, I. F.; CORREIA, J. R. Influence of Exposure to Elevated Temperatures on the Physical and Mechanical Properties of Cementitious Thermal Mortars. **App. Sci.**, v. 10, 2020.

PHAM, S. T.; PRINCE, W. Effects of high temperature on the microstructure of cement mortar. **Applied Mechanics and Materials**, v. 556-562, p. 969-972, 2014.

PIMIENGA, P.; ALONSO, M. C.; MCNAMEE, R. J.; MINDEGUIA, J. C. Behaviour of high-performance concrete at high temperatures: some highlights. **RILEM Technical Letters**, v. 2, p. 45-52, 2017.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, C. D. B. **Instrução Técnica No. 03/2019**: Terminologia de segurança contra incêndio. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2019.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, C. D. B. **Instrução Técnica No. 08/2019**: Segurança estrutural contra incêndio. São Paulo: Secretaria de Estado dos Negócios da Segurança Pública, 2019.

RAMALHO, M.; CORRÊA, M. **Projeto de edifícios de alvenaria estrutural**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2003. 170p.

RAMAMURTHY, K. Behaviour of grouted concrete hollow block masonry prisms. **Magazine of Concrete Research**, v. 47, n. 173, p. 345-354, 1995.

RAMESH, M.; AZENHA, M.; LOURENÇO, P. B. Mechanical properties of lime–cement masonry mortars in their early ages. **Materials and Structures**, v. 52, n. 13, 2019.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications Part 1: Introduction—General presentation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 40, 841–853, 2007.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures—modelling and applications Part 2: Stress–strain relation. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, 40(5), 449–458, 2007.

ROBERT, G.; COLINA, H.; DEBICKI, G. A durabilidade do concreto mediante ao fogo. *In*: JEAN-PIERRE, O.; VICHOT, A. **Durabilidade do concreto**. Tradução de Oswaldo Cascudo e Helena Carasek. São Paulo: IBRACON, 2014. p. 509-557.

SAHA, A. K.; SARKER, P. K.; GOLOVANEVSKIY, V. Thermal properties and residual strength after high temperature exposure of cement mortar using ferronickel slag aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 199, p. 601-612, 2019.

SANDOVAL, C.; ARNAU, O. Experimental characterization and detailed micro-modeling of multi-perforated clay brick masonry structural response. **Materials and Structures**, v. 50, n. 34, p. 1-17, 2017.

SARHAT, S. R.; SHERWOOD, E. G. The prediction of compressive strength of ungrouted hollow concrete block masonry. **Construction and Building Materials**, v. 58, p. 111-121, 2014.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDÊNCIO JR., L. R.; PILAR, R. Influence of the type of mortar and its fresh properties on the mechanical properties of concrete blocks structural masonry for high-rise building. **Revista Matéria**, v. 20, n. 4, p. 1008-1023, 2015.

SCHLEICH, J. B. Fire actions in buildings. In: SCHLEICH, J. B.; HOLICKÝ, M.; ARTEAGA A.; RODRIGUEZ, L. **Implementation of Eurocodes: Design of buildings for the fire situation: Handbook 5**. Luxembourg: Leonardo Da Vinci Pilot Project CZ/02/B/F/PP-134007, 2005. Chapt. 1. p. I-1 - I-81.

SEITO, A. I.; GILL A. A.; PANNONI F. D.; SILVA R. O. S. B.; DEL CARLO, U.; SILVA V. P. (2008). **A segurança contra incêndio no Brasil**. 1 ed. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 496p.

SHRIVE, N. G.; JESSOP, E. L. Hollow concrete blocks with enhanced structural efficiency and a compatible grout. **Magazine of Concrete Research**, v. 39, n. 140, September 1987.

SILVA, P. V. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2016. 240p.

SILVA, R. F.; CAMACHO, J. S. Alvenaria estrutural de blocos de concreto: Forma dos corpos de prova e resistência à compressão, **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 13, n. 58, p. 1-16, 2011.

SIPP, G. **Avaliação do comportamento de aderência entre blocos cerâmicos e grautes**. 2019. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

SOLLERO, M. B. S.; MORENO JÚNIOR, A. L.; COSTA, C. N. Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, v. 287, 2021.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Avaliação do tipo de agregado e da reidratação do concreto submetido à elevadas temperaturas. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, 2010a.

SOUZA, A. A. A.; MORENO JR, A. L. Efeito de altas temperaturas na resistência à compressão, resistência à tração e módulo de deformação do concreto. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 3, n. 4, 2010b.

SULLIVAN, P. J. E. Deterioration and spalling of high strength concrete under fire. **Offshore Technology Report 2001/074**, United Kingdom, 2001.

SULISTYANA; PURWANTO; WIDOANINDYAWATI, V.; PRATAMA, M. M. A. The influence of compression applied during production to the compression strength of dry concrete: An experimental study. **Procedia Engineering**, v. 95, p. 465–472, 2014.

- SZOKE, S. S. Resistance to fire and high temperatures. Significance of Tests and Properties of Concrete and Concrete-Making Material. **ASTM International**; West Conshohocken, PA, USA: 2006. p. 169, 274–287.
- TAUIL, C. A.; NESSE, J. M. **Alvenaria Estrutural**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2010. 183p.
- TANTAWY, M. A. Effect of High Temperatures on the Microstructure of Cement Paste. **Journal of Materials Science and Chemical Engineering**, v. 5, p. 33-48, 2017.
- THAICKAVIL, N. N.; THOMAS, J. Behaviour and strength assessment of masonry prisms. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, p. 23-28, 2018.
- WENDLER, ARNOLDO. Situação de Incêndio no Sistema Construtivo Paredes de Concreto. **Revista Concreto & Construções - IBRACON**, ed.89, p.29-34, Jan-Mar, 2018.
- WU, Z.; LO, S. H.; TAN, K. H.; SU, K. L. High Strength Concrete Tests under Elevated Temperature. **Athens Journal of Technology and Engineering**, v. 3, N. 3, 2019.
- YANG, K. H.; LEE, Y.; HWANG, Y. H. A Stress-Strain Model for Brick Prism under Uniaxial Compression. **Advances in Civil Engineering**, v. 2019.
- YOON, M.; KIM, G.; GYEONG, C. C.; YOUNGWOOK, L; TAEGYU, L. Effect of coarse aggregate type and loading level on the high temperature properties of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 78, p.26-33, 2015.
- YOON, M.; KIM, G.; KIM, Y; TAEGYU, L.; CHOE, G.; HWANG, E.; NAM, J. Creep Behavior of High-Strength Concrete Subjected to Elevated Temperatures. **Materials**, v. 10, n. 10, p. 781, 2017.
- ZAHRA, T.; DHANASEKAR, M. Prediction of masonry compressive behaviour using a damage mechanics inspired modelling method. **Construction and Building Materials**, v. 109, p. 128-138, 2016.
- XIULI, D.; LIU, J.; GUOWEI, M. Macroscopic effective mechanical properties of porous dry concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 44, p. 87–96, 2013.
- XING, Z.; BEAUCOUR, A. L.; HEBERT, R.; NOUMOWÉ, A.; LEDESERT, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, v. 41, p. 392-402, 2011.
- XING, Z.; HEBERT, R.; BEAUCOUR, A. L.; LEDESERT, B.; NOUMOWÉ, A. Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behaviour at elevated temperature. **Materials and Structures**, v. 47, p. 1921-1940, 2014.
- XIONG, L. X.; ZHANG, X. J.; XU, Z. Y.; GENG, D. X. Scale Effect of Cement Mortar Specimens Subjected to High Temperatures Using Uniaxial Compressive and Splitting Tensile Tests. **Archives of Civil Engineering**, v. 66, n. 3., 2020.
- XUE, S.; ZHANG, P.; WANG, J.; BAO, J.; HAN, S.; HE, L. Influences of thermal damage on water transport in heat-treated cement mortar: Experimental and theoretical analyses. **Construction and Building Materials**, v. 288, 2021.

ZAHEDI, F.; DEHESTANI, M. Post-fire optimum mechanical properties of self-compacting mortar using Taguchi method and analysis of variance. **Construction and Building Materials**, v. 315, 2022.

ZEMRI, C.; BOUIADJRA, M. B. Comparison between physical–mechanical properties of mortar made with Portland cement (CEMI) and slag cement (CEMIII) subjected to elevated temperature. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, 2020.

ZHANG, Q.; YE, G. Microstructure Analysis of Heated Portland Cement Paste. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 830-836, 2011.

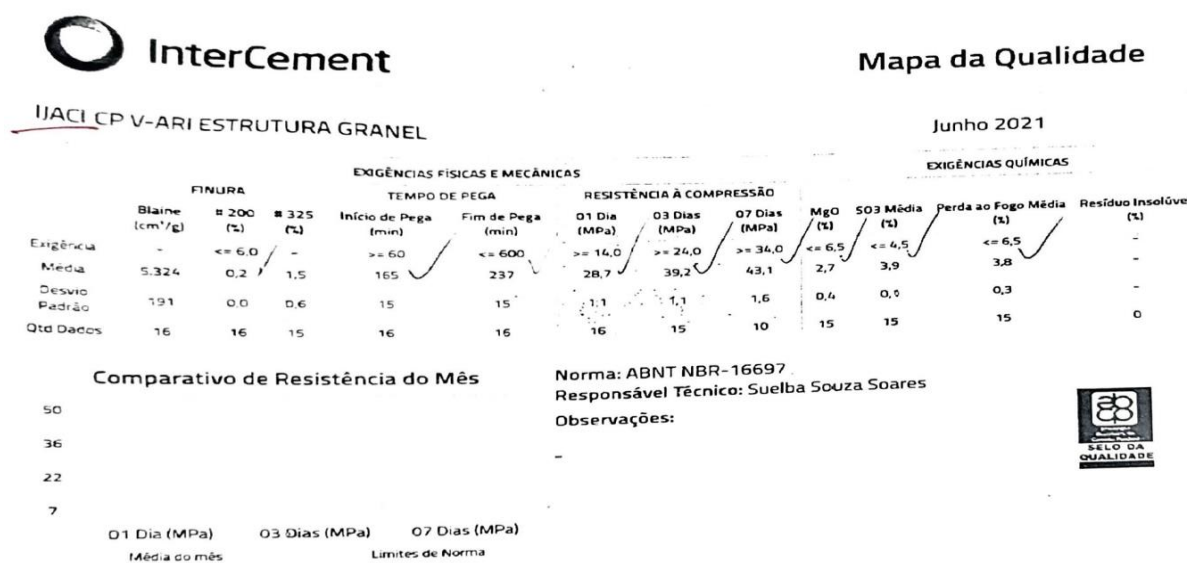
ZHOU, X. Axial Compression Behavior of Masonry Prisms considering the Influence of Mortar. **Advanced Materials Research**, v. 884-885, p. 641-644, 2014.

ZHOU, Q.; WANG, F.; ZHU, F. Estimation of compressive strength of hollow concrete masonry prisms using artificial neural networks and adaptive neuro-fuzzy inference systems. **Construction and Building Materials**, v. 125, 2016.

6. ANEXO A – BOLETINS TÉCNICOS

As informações técnicas fornecidas pelo fabricante do cimento utilizado na produção dos blocos são apresentadas na Figura 6.1.

Figura 6.1 – Boletim técnico: cimento CP V ARI utilizado na fabricação dos blocos.



Fonte: InterCement (2021)

Os dados técnicos fornecidos pelo fabricante do aditivo plastificante utilizado na produção dos blocos são apresentados na Figura 6.2.


Figura 6.2 – Boletim técnico: aditivo utilizado na fabricação dos blocos.

ADITIVO

CAMARGO
QUÍMICA

www.camargoquimica.com.br

contato@camargoquimica.com.br



CERTIFICADO DE ANÁLISE

CQ Plast PM 5000 - 1025 Kg - Contêiner Papelão Reciclável

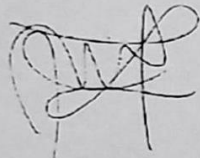
Código do Produto:	700012-1025	Data de Fabricação:	02/06/2021	Validade:	02/06/2022	Lote:	023332
--------------------	-------------	---------------------	------------	-----------	------------	-------	--------

RESULTADOS

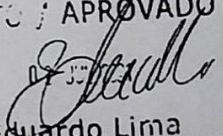
DADOS DE QUALIDADE			
Característica	Unidade	Especificação	Resultado
Cor	-	*Anotar	Dourado ✓
Densidade	g/cm ³	1,01 - 1,05	1,03 ✓
pH	-	12,0 - 14,0	12,94 ✓
Viscosidade	s	35 - 65	38,93 ✓

OBS: Cor é apenas um dado qualitativo, que não influencia na qualidade do produto.

Parecer Técnico: Aprovado



Kamille R Zancanaro
Responsável Técnico
CRQ-XII 13303014

VISTO / APROVADO

Eduardo Lima

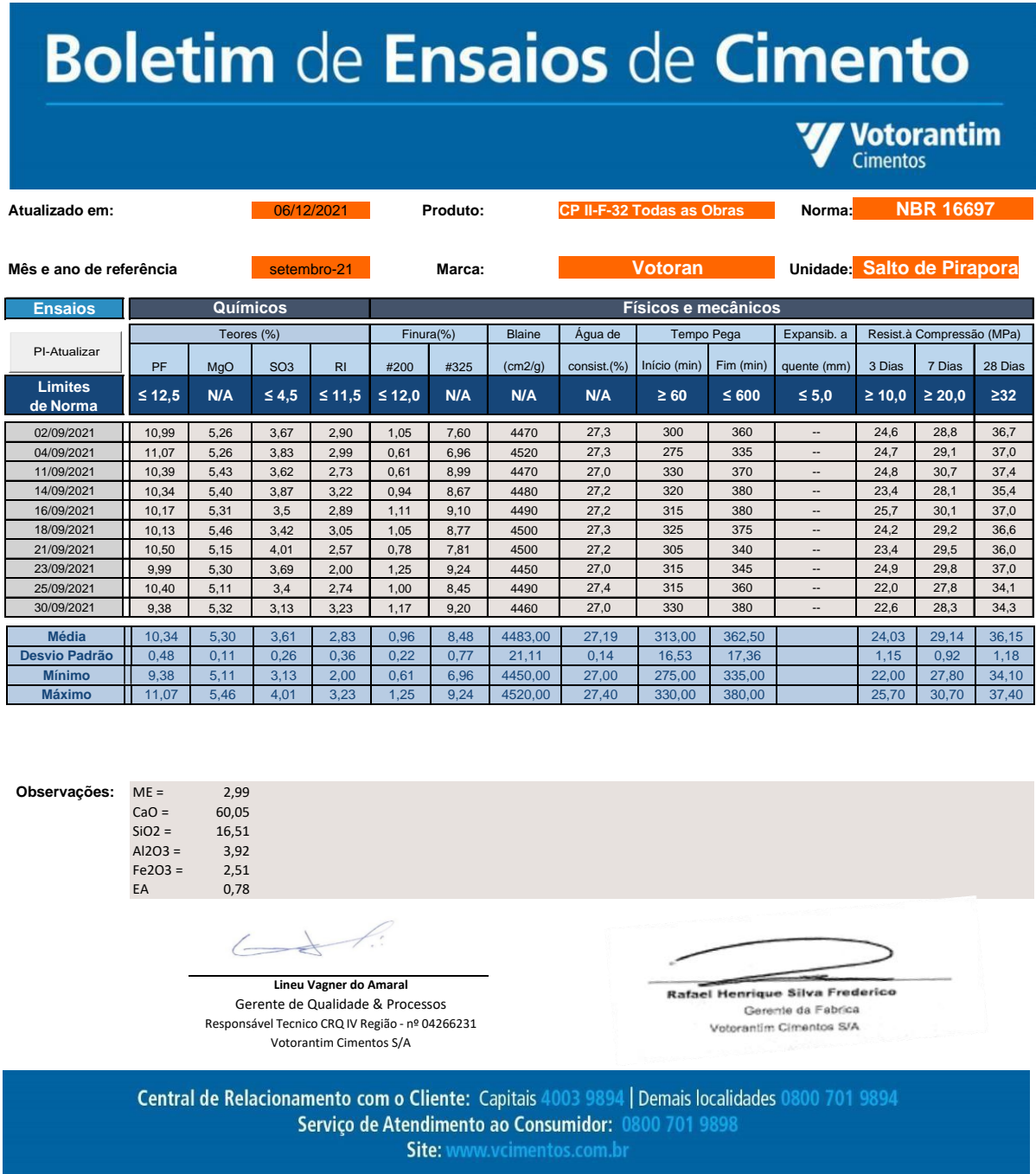
+55 47 3334 2435

R. Prof Herman Lange, 528 | Fidélis | Blumenau | SC | 89060-300

Fonte: Camargo Distribuidora de Produtos Químicos Ltda. (2021)





As informações técnicas fornecidas pelo fabricante do cimento utilizado na produção das argamassas e dos grautes são apresentados na Figura 6.3.

Figura 6.3 – Boletim técnico: cimento CP II F32 utilizado nas argamassas e grautes.



As informações técnicas fornecidas pelo fabricante da Cal utilizada na produção das argamassas e dos grautes são exibidas pela Figura 6.4.

Figura 6.4 – Boletim técnico: cal hidratada utilizada nas argamassas e grautes.

VOTORANTIM CIMENTOS - ITAÚ DE MINAS CONTROLE DA QUALIDADE BOLETIM DE ANÁLISES DA CAL		  agosto-21 Certificada pela NBR ISO 9001:2000	
ENSAIOS QUÍMICOS			
ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO
SiO ₂	%	3,15	<10%
Al ₂ O ₃	%	0,46	-
Fe ₂ O ₃	%	0,40	-
CaO (tot)	%	58,21	-
MgO	%	11,01	-
SO ₃	%	0,33	-
Perda ao fogo	%	27,06	-
Umidade	%	0,77	-
CO ₂	%	11,77	< 13%
P30 0,600mm	%	0,00	< 0,5%
P200 0,075mm	%	11,57	<15%
H ₂ O	%	15,29	-
CaO N/H	%	0,23	<=4
OXIDOS N/H	%	7,95	<15%
C+M (OT)	%	94,89	> 88%
			-
			-
ENSAIOS FÍSICOS			
ENSAIO	UNIDADE	RESULTADOS	ESPECIFICAÇÃO
Retenção de água		85	>70%
Estabilidade (APRO)		APRO	Ausência de cavidade ou protuberância
Observações: RESULTADOS MÉDIA MENSAL			
SUPERVISOR DE QUALIDADE		GERENTE DE QUALIDADE	
 Gilson Passos Ribeiro CRQ 02200286		 Roberto Ghimel Nunes CRQ 02202041	
Atualizado em: 08/09/2021 11:19			

Fonte: Votorantim Cimentos (2021)

7. ANEXO B – RESULTADOS OBTIDOS PELA FÁBRICA DOS BLOCOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados para os blocos de classe 6 MPa utilizados nesta pesquisa, por volta dos 2 e aos 28 dias de idade, no laboratório da própria empresa fabricante são apresentados na Figura 7.1.

Figura 7.1 – Blocos 6 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.

Empresa	GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS LTDA	Programa	RGRelEns	Data	06/09/21	
Relatório de Ensaio	Uop 1	Lote 44285	Data 27/06/2021	Hora	11:06:31	
	Máquina F	Turno		Página	1	
Produto	1541-EE	BLOCO INTEIRO - CLASSE "B" - 14X19X39 - 06 MPA	Total Produzido	8436		
		Data Ruptura	29/06/2021	Idade	2 dias	
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm2)	Resistência (MPa)	Sd - 0,170
1	12,675	26100	255953,57	54600,000	4,7	Fbm - 4,6
2	12,350	27140	266152,48	54600,000	4,9	
3	12,490	25300	248108,25	54600,000	4,5	Fbk Est - 4,3
4	12,665	26330	258209,09	54600,000	4,7	Limite Inf - 3,9
5	12,440	24400	239282,26	54600,000	4,4	Fbk Adotado - 4,3
6	12,325	25800	253011,57	54600,000	4,6	
Media	12,491					
		Data Ruptura	25/07/2021	Idade	28 dias	
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm2)	Resistência (MPa)	Sd - 0,226
1	12,300	41240	404426,25	54600,000	7,4	Fbm - 7,4
2	12,540	40350	395698,33	54600,000	7,3	
3	12,305	43620	427766,07	54600,000	7,8	Fbk Est - 7,2
4	12,460	40540	397561,59	54600,000	7,3	Limite Inf - 6,4
5	12,420	40440	396580,93	54600,000	7,3	Fbk Adotado - 7,2
6	12,345	41000	402072,65	54600,000	7,4	
Media	12,395					

Fonte: Glasser Pisos e Pré-moldados Ltda. (2021)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados para os blocos de classe 12 MPa, aos 2 e aos 28 dias de idade, no laboratório da empresa fabricante são exibidos na Figura 7.2.

Figura 7.2 – Blocos 12 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.

Empresa	GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS LTDA			Programa	RGRelEns	Data	06/09/21		
Relatório de Ensaio	Uop	1	Lote	44296	Data	27/06/2021	Hora	11:07:05	
	Máquina	*	Turno				Página	1	
Produto	1541-12 MPA	BLOCO INTEIRO - CLASSE "A" - 14X19X39 - 12 MPA			Total Produzido	15852			
		Data Ruptura	29/06/2021	Idade	2 dias				
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd -	0,345		
1	12,900	62240	610365,90	54600,000	11,2	Fbm	- 10,7		
2	12,880	58260	571335,43	54600,000	10,5				
3	12,915	61190	600068,91	54600,000	11,0	Fbk Est	- 10,2		
4	12,895	57270	561626,85	54600,000	10,3	Limite Inf	- 9,2		
5	12,880	60190	590262,26	54600,000	10,8	Fbk Adotado	- 10,2		
6	12,905	58780	576434,89	54600,000	10,6				
Media	12,896								
		Data Ruptura	25/07/2021	Idade	28 dias				
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd -	0,285		
1	12,800	73640	722161,71	54600,000	13,2	Fbm	- 13,3		
2	12,805	76560	750797,12	54600,000	13,8				
3	12,765	74550	731085,76	54600,000	13,4	Fbk Est	- 13,0		
4	12,840	75140	736871,68	54600,000	13,5	Limite Inf	- 11,6		
5	12,885	72110	707157,53	54600,000	13,0	Fbk Adotado	- 13,0		
6	12,870	73300	718827,45	54600,000	13,2				
Media	12,828								

Fonte: Glasser Pisos e Pré-moldados Ltda. (2021)

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão realizados para os blocos de classe 24 MPa, aos 4, 5, 7 e 28 dias de idade, no laboratório da empresa fabricante constam na Figura 7.3.

Figura 7.3 – Blocos 24 MPa: resultados de resistência à compressão realizados pela fábrica aos 2 e aos 28 dias de idade das unidades.

Empresa GLASSER PISOS E PRE MOLDADOS LTDA		Programa RGRelEns		Data 06/09/21		
Relatório de Ensaio		Uop 1	Lote 44379	Data 08/07/2021	Hora 11.07.33	
		Máquina F	Turno		Página 1	
Produto	1541-24 MPA	BLOCO INTEIRO - CLASSE "A" - 14X19X39 - 24 MPA		Total Produzido	2160	
Data Ruptura 12/07/2021 Idade 4 dias						
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd - 1,749
1	13,740	110806	1086635,66	54600,000	19,9	Fbm - 20,7
2	13,630	122689	1203168,08	54600,000	22,0	
3	13,755	126581	1241335,56	54600,000	22,7	Fbk Est - 18,0
4	13,705	100486	985431,03	54600,000	18,1	Limite Inf - 16,0
5	13,710	119366	1170580,58	54600,000	21,4	Fbk Adotado - 18,0
6	13,755	111034	1088871,58	54600,000	19,9	
Media	13,716					
Data Ruptura 13/07/2021 Idade 5 dias						
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd - 1,387
1	13,745	109367	1072523,89	54600,000	19,6	Fbm - 21,8
2	13,685	115940	1136983,00	54600,000	20,8	
3	13,840	127295	1248337,51	54600,000	22,9	Fbk Est - 18,6
4	13,710	121416	1190684,22	54600,000	21,8	Limite Inf - 17,4
5	13,555	123946	1215495,04	54600,000	22,3	Fbk Adotado - 18,6
6	13,555	129831	1273207,18	54600,000	23,3	
Media	13,682					
Data Ruptura 15/07/2021 Idade 7 dias						
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd - 2,619
1	0,000	144219	1414305,26	54600,000	25,9	Fbm - 24,9
2	0,000	162716	1595698,86	54600,000	29,2	
3	0,000	119873	1175552,56	54600,000	21,5	Fbk Est - 21,2
4	0,000	136611	1339696,26	54600,000	24,5	Limite Inf - 19,1
5	0,000	132771	1302038,73	54600,000	23,9	Fbk Adotado - 21,2
6	0,000	134013	1314218,59	54600,000	24,1	
Media	0,000					
Data Ruptura 05/08/2021 Idade 28 dias						
Seq	Massa (Kg)	Carga (Kgf)	Carga (KN)	Área (mm ²)	Resistência (MPa)	Sd - 0,879
1	13,645	148473	1456022,75	54600,000	26,7	Fbm - 25,0
2	13,535	139459	1367625,60	54600,000	25,1	
3	13,690	139375	1366801,84	54600,000	25,0	Fbk Est - 24,1
4	13,625	135276	1326604,39	54600,000	24,3	Limite Inf - 21,6
5	13,605	137188	1345354,70	54600,000	24,6	Fbk Adotado - 24,1
6	13,785	136074	1334430,09	54600,000	24,4	
Media	13,648					

8. APÊNDICE A – RESULTADOS DE CARACTERIZAÇÃO

BLOCOS DE CONCRETO: ANÁLISE DIMENSIONAL

Os Quadros 8.1 a 8.5 apresentam os resultados da análise dimensional para os blocos de concreto 6 MPa, conforme ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.1 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional.

Corpo de Prova	Valor de Referência	Largura (mm)			Corpo de Prova	Valor de Referência	Altura (mm)		
		Ponto de Medida	Medida	Verificação			Ponto de Medida	Medida	Verificação
CP1	140,0	Par. Transversal A	140,5	Conforme!	CP1	190,0	Par. Transversal A	187,1	Conforme!
		Par. Transversal B	140,6	Conforme!			Par. Transversal B	186,8	Não conforme!
		Par. Transversal C	140,5	Conforme!			Par. Transversal C	189,7	Conforme!
		Valor Médio	140,5	Conforme!			Valor Médio	187,9	Conforme!
CP2	140,0	Par. Transversal A	140,5	Conforme!	CP2	190,0	Par. Transversal A	188,1	Conforme!
		Par. Transversal B	140,3	Conforme!			Par. Transversal B	187,6	Conforme!
		Par. Transversal C	139,7	Conforme!			Par. Transversal C	189,0	Conforme!
		Valor Médio	140,2	Conforme!			Valor Médio	188,2	Conforme!
CP3	140,0	Par. Transversal A	139,9	Conforme!	CP3	190,0	Par. Transversal A	189,9	Conforme!
		Par. Transversal B	139,8	Conforme!			Par. Transversal B	185,5	Não conforme!
		Par. Transversal C	139,9	Conforme!			Par. Transversal C	187,2	Conforme!
		Valor Médio	139,9	Conforme!			Valor Médio	187,5	Conforme!
CP4	140,0	Par. Transversal A	140,2	Conforme!	CP4	190,0	Par. Transversal A	190,4	Conforme!
		Par. Transversal B	139,5	Conforme!			Par. Transversal B	188,8	Conforme!
		Par. Transversal C	139,8	Conforme!			Par. Transversal C	188,3	Conforme!
		Valor Médio	139,9	Conforme!			Valor Médio	189,2	Conforme!
CP5	140,0	Par. Transversal A	140,7	Conforme!	CP5	190,0	Par. Transversal A	187,7	Conforme!
		Par. Transversal B	139,8	Conforme!			Par. Transversal B	190,2	Conforme!
		Par. Transversal C	139,9	Conforme!			Par. Transversal C	187,3	Conforme!
		Valor Médio	140,1	Conforme!			Valor Médio	188,4	Conforme!
CP6	140,0	Par. Transversal A	140,0	Conforme!	CP6	190,0	Par. Transversal A	190,7	Conforme!
		Par. Transversal B	139,7	Conforme!			Par. Transversal B	189,2	Conforme!
		Par. Transversal C	140,1	Conforme!			Par. Transversal C	189,6	Conforme!
		Valor Médio	139,9	Conforme!			Valor Médio	189,8	Conforme!
		Média Total	140,1	Conforme!			Média Total	188,5	Conforme!
		Desvio Padrão	0,36				Desvio Padrão	1,43	
		Coef. Variação (%)	0,26				Coef. Variação (%)	0,76	

Quadro 8.2 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).

Corpo de Prova	Valor de Referência	Comprimento (mm)			Corpo de Prova	Resultado		
		Ponto de Medida	Medida	Verificação				
CP1	390,0	Par. Longitudinal A1	389,2	Conforme!	CP1	54795,2		
		Par. Longitudinal A2	390,3	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	390,2	Conforme!				
		Valor Médio	389,9	Conforme!				
CP2	390,0	Par. Longitudinal A1	389,2	Conforme!	CP2	54626,1		
		Par. Longitudinal A2	389,9	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	389,9	Conforme!				
		Valor Médio	389,7	Conforme!				
CP3	390,0	Par. Longitudinal A1	388,3	Conforme!	CP3	54471,6		
		Par. Longitudinal A2	389,9	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	390,3	Conforme!				
		Valor Médio	389,5	Conforme!				
CP4	390,0	Par. Longitudinal A1	388,0	Conforme!	CP4	54458,1		
		Par. Longitudinal A2	389,9	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	390,2	Conforme!				
		Valor Médio	389,4	Conforme!				
CP5	390,0	Par. Longitudinal A1	389,1	Conforme!	CP5	54574,4		
		Par. Longitudinal A2	389,8	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	389,8	Conforme!				
		Valor Médio	389,6	Conforme!				
CP6	390,0	Par. Longitudinal A1	388,1	Conforme!	CP6	54422,9		
		Par. Longitudinal A2	389,5	Conforme!				
		Par. Longitudinal A3	389,3	Conforme!				
		Valor Médio	389,0	Conforme!				
		Média Total	389,5	Conforme!			Média Total	54558,1
		Desvio Padrão	0,73				Desvio Padrão	139,20
		Coef. Variação (%)	0,19				Coef. Variação (%)	0,26

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.3 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação B).

Espessura das Paredes Longitudinais (mm)					Espessura das Paredes Transversais (mm)							
Corpo de Prova	Mínimo Exigido	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Mínimo Exigido	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Espessura Equivalente (mm/m)	Mínimo Exigido	Verificação
CP1	25,0	Par. Longitudinal A1	28,6	Conforme!	CP1	25,0	Par. Transversal A	25,5	Conforme!	200,0	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	25,3	Conforme!			Par. Transversal B	25,1	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	28,2	Conforme!			Par. Transversal C	27,4	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,6	Conforme!			Valor Médio	26,0	Conforme!			
		Valor Médio	26,9	Conforme!								
CP2	25,0	Par. Longitudinal A1	25,1	Conforme!	CP2	25,0	Par. Transversal A	27,1	Conforme!	196,5	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	25,7	Conforme!			Par. Transversal B	24,7	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	25,8	Conforme!			Par. Transversal C	24,9	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,9	Conforme!			Valor Médio	25,5	Conforme!			
		Valor Médio	25,6	Conforme!								
CP3	25,0	Par. Longitudinal A1	25,2	Conforme!	CP3	25,0	Par. Transversal A	27,1	Conforme!	202,6	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	26,4	Conforme!			Par. Transversal B	24,5	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	25,3	Conforme!			Par. Transversal C	27,4	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,6	Conforme!			Valor Médio	26,3	Conforme!			
		Valor Médio	25,6	Conforme!								
CP4	25,0	Par. Longitudinal A1	25,1	Conforme!	CP4	25,0	Par. Transversal A	26,8	Conforme!	199,8	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	26,1	Conforme!			Par. Transversal B	24,5	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	25,0	Conforme!			Par. Transversal C	26,7	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,7	Conforme!			Valor Médio	26,0	Conforme!			
		Valor Médio	25,5	Conforme!								
CP5	25,0	Par. Longitudinal A1	25,5	Conforme!	CP5	25,0	Par. Transversal A	28,1	Conforme!	199,0	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	25,6	Conforme!			Par. Transversal B	24,3	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	26,0	Conforme!			Par. Transversal C	25,2	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,9	Conforme!			Valor Médio	25,9	Conforme!			
		Valor Médio	25,7	Conforme!								
CP6	25,0	Par. Longitudinal A1	28,1	Conforme!	CP6	25,0	Par. Transversal A	25,3	Conforme!	197,0	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	24,2	Conforme!			Par. Transversal B	24,9	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	28,9	Conforme!			Par. Transversal C	26,7	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	23,4	Não conforme!			Valor Médio	25,6	Conforme!			
		Valor Médio	26,2	Conforme!								
Média Total				25,9	Conforme!	Média Total				25,9		
Desvio Padrão				1,31		Desvio Padrão				1,23		
Coef. Variação (%)				5,05		Coef. Variação (%)				4,77		
										199,1	< Média Total	Conforme!
										2,22	< Desvio Padrão	
										1,11	< Coef. Variação (%)	

Quadro 8.4 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).

Furo (mm)					
Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Ponto de Medição	Medida	Verificação	
CP1	70,0	Dir. Longitudinal A	146,2	Conforme!	
		Dir. Longitudinal B	146,7		
		Média	146,4		
		Dir. Transversal A	78,6		
		Dir. Transversal B	79,5		
Média		79,1			
CP2		Dir. Longitudinal A	146,7		Conforme!
		Dir. Longitudinal B	146,7		
		Média	146,7		
		Dir. Transversal A	79,2		
	Dir. Transversal B	79,2			
Média	79,2				
CP3	Dir. Longitudinal A	147,9	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	146,8			
	Média	147,4			
	Dir. Transversal A	80,3			
	Dir. Transversal B	80,4			
Média	80,3				
CP4	Dir. Longitudinal A	147,6	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	146,3			
	Média	147,0			
	Dir. Transversal A	79,0			
	Dir. Transversal B	80,5			
Média	79,8				
CP5	Dir. Longitudinal A	147,2	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	147,4			
	Média	147,3			
	Dir. Transversal A	79,7			
	Dir. Transversal B	79,5			
Média	79,6				
CP6	Dir. Longitudinal A	148,2	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	147,4			
	Média	147,8			
	Dir. Transversal A	79,0			
	Dir. Transversal B	78,8			
Média	78,9				
Média menor dimensão de furo			79,5	Conforme!	
Desvio Padrão			0,63		
Coef. Variação (%)			0,80		
Média maior dimensão de furo			147,1		
Desvio Padrão			0,64		
Coef. Variação (%)			0,44		

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.5 – Bloco 6 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).

Raio de Mísula (mm)				
Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Ponto de Medição	Medida	Verificação
CP1	40,0	Parede A	48,0	Conforme!
		Parede B	45,9	Conforme!
		Média	47,0	Conforme!
CP2		Parede A	47,9	Conforme!
		Parede B	50,0	Conforme!
		Média	49,0	Conforme!
CP3		Parede A	45,9	Conforme!
		Parede B	46,7	Conforme!
		Média	46,3	Conforme!
CP4		Parede A	47,2	Conforme!
		Parede B	46,7	Conforme!
		Média	46,9	Conforme!
CP5		Parede A	46,9	Conforme!
		Parede B	48,8	Conforme!
		Média	47,8	Conforme!
CP6	Parede A	44,2	Conforme!	
	Parede B	52,3	Conforme!	
	Média	48,3	Conforme!	
Média Total			47,5	Conforme!
Desvio Padrão			2,10	
Coef. Variação (%)			4,42	

Fonte: Autor (2021)

Os Quadros 8.6 a 8.10 exibem os resultados da análise dimensional realizada nos blocos de concreto 12 MPa, conforme ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.6 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional.

Largura (mm)					Altura (mm)				
Corpo de Prova	Valor de Referência	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Valor de Referência	Ponto de Medida	Medida	Verificação
CP1	140,0	Par. Transversal A	140,0	Conforme!	CP1	190,0	Par. Transversal A	185,8	Não conforme!
		Par. Transversal B	140,2	Conforme!			Par. Transversal B	190,2	Conforme!
		Par. Transversal C	140,0	Conforme!			Par. Transversal C	189,8	Conforme!
		Valor Médio	140,0	Conforme!			Valor Médio	188,6	Conforme!
CP2	140,0	Par. Transversal A	140,0	Conforme!	CP2	190,0	Par. Transversal A	189,2	Conforme!
		Par. Transversal B	140,3	Conforme!			Par. Transversal B	190,4	Conforme!
		Par. Transversal C	139,7	Conforme!			Par. Transversal C	190,7	Conforme!
		Valor Médio	140,0	Conforme!			Valor Médio	190,1	Conforme!
CP3	140,0	Par. Transversal A	139,3	Conforme!	CP3	190,0	Par. Transversal A	189,0	Conforme!
		Par. Transversal B	138,7	Conforme!			Par. Transversal B	189,1	Conforme!
		Par. Transversal C	139,5	Conforme!			Par. Transversal C	187,1	Conforme!
		Valor Médio	139,2	Conforme!			Valor Médio	188,4	Conforme!
CP4	140,0	Par. Transversal A	139,6	Conforme!	CP4	190,0	Par. Transversal A	189,7	Conforme!
		Par. Transversal B	138,9	Conforme!			Par. Transversal B	189,2	Conforme!
		Par. Transversal C	139,5	Conforme!			Par. Transversal C	187,1	Conforme!
		Valor Médio	139,3	Conforme!			Valor Médio	188,7	Conforme!
CP5	140,0	Par. Transversal A	139,6	Conforme!	CP5	190,0	Par. Transversal A	189,9	Conforme!
		Par. Transversal B	140,4	Conforme!			Par. Transversal B	189,2	Conforme!
		Par. Transversal C	140,3	Conforme!			Par. Transversal C	189,1	Conforme!
		Valor Médio	140,1	Conforme!			Valor Médio	189,4	Conforme!
CP6	140,0	Par. Transversal A	140,4	Conforme!	CP6	190,0	Par. Transversal A	188,2	Conforme!
		Par. Transversal B	140,3	Conforme!			Par. Transversal B	188,3	Conforme!
		Par. Transversal C	139,8	Conforme!			Par. Transversal C	189,7	Conforme!
		Valor Médio	140,2	Conforme!			Valor Médio	188,7	Conforme!
Média Total			139,8	Conforme!	Média Total			189,0	Conforme!
Desvio Padrão			0,50		Desvio Padrão			1,26	
Coef. Variação (%)			0,36		Coef. Variação (%)			0,67	

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.7 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).

Corpo de Prova	Valor de Referência	Comprimento (mm)			Área Bruta (mm²)		
		Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Resultado	
CP1	390,0	Par. Longitudinal A1	389,3	Conforme!	CP1	54591,7	
		Par. Longitudinal A2	390,0	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,3	Conforme!			
		Valor Médio	389,9	Conforme!			
CP2	390,0	Par. Longitudinal A1	389,0	Conforme!	CP2	54513,4	
		Par. Longitudinal A2	389,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	389,4	Conforme!			
		Valor Médio	389,4	Conforme!			
CP3	390,0	Par. Longitudinal A1	388,8	Conforme!	CP3	54195,6	
		Par. Longitudinal A2	389,6	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,0	Conforme!			
		Valor Médio	389,5	Conforme!			
CP4	390,0	Par. Longitudinal A1	388,9	Conforme!	CP4	54283,7	
		Par. Longitudinal A2	389,7	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,3	Conforme!			
		Valor Médio	389,6	Conforme!			
CP5	390,0	Par. Longitudinal A1	390,0	Conforme!	CP5	54653,8	
		Par. Longitudinal A2	390,5	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	389,9	Conforme!			
		Valor Médio	390,1	Conforme!			
CP6	390,0	Par. Longitudinal A1	390,2	Conforme!	CP6	54752,5	
		Par. Longitudinal A2	390,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,9	Conforme!			
		Valor Médio	390,6	Conforme!			
			Média Total	389,9	Conforme!	Média Total	54498,4
			Desvio Padrão	0,61		Desvio Padrão	216,99
			Coef. Variação (%)	0,16		Coef. Variação (%)	0,40

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.8 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação B).

Corpo de Prova	Espessura das Paredes Longitudinais (mm)				Corpo de Prova	Mínimo Exigido	Espessura das Paredes Transversais (mm)						
	Mínimo Exigido	Ponto de Medida	Medida	Verificação			Ponto de Medida	Medida	Verificação	Verificação			
CP1	250	Par. Longitudinal A1	26,1	Conforme!	CP1	250	Par. Transversal A	27,8	Conforme!	202,1	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	25,7	Conforme!			Par. Transversal B	24,8	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	25,1	Conforme!			Par. Transversal C	26,2	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	25,2	Conforme!			Valor Médio	26,3	Conforme!				
		Valor Médio	25,5	Conforme!									
CP2	250	Par. Longitudinal A1	25,4	Conforme!	CP2	250	Par. Transversal A	26,2	Conforme!	203,1	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	25,3	Conforme!			Par. Transversal B	24,9	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	25,9	Conforme!			Par. Transversal C	28,1	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	26,4	Conforme!			Valor Médio	26,4	Conforme!				
		Valor Médio	25,8	Conforme!									
CP3	250	Par. Longitudinal A1	25,3	Conforme!	CP3	250	Par. Transversal A	27,4	Conforme!	198,7	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	26,9	Conforme!			Par. Transversal B	24,2	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	23,5	Não conforme!			Par. Transversal C	25,9	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	26,5	Conforme!			Valor Médio	25,8	Conforme!				
		Valor Médio	25,5	Conforme!									
CP4	250	Par. Longitudinal A1	25,4	Conforme!	CP4	250	Par. Transversal A	27,3	Conforme!	199,1	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	27,0	Conforme!			Par. Transversal B	24,4	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	23,5	Não conforme!			Par. Transversal C	26,0	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	26,3	Conforme!			Valor Médio	25,9	Conforme!				
		Valor Médio	25,5	Conforme!									
CP5	250	Par. Longitudinal A1	26,8	Conforme!	CP5	250	Par. Transversal A	26,3	Conforme!	198,4	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	24,5	Conforme!			Par. Transversal B	24,8	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	26,6	Conforme!			Par. Transversal C	26,4	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	24,3	Conforme!			Valor Médio	25,8	Conforme!				
		Valor Médio	25,5	Conforme!									
CP6	250	Par. Longitudinal A1	27,0	Conforme!	CP6	250	Par. Transversal A	25,4	Conforme!	197,3	188,0	Conforme!	
		Par. Longitudinal A2	24,3	Conforme!			Par. Transversal B	24,8	Conforme!				
		Par. Longitudinal B1	26,7	Conforme!			Par. Transversal C	26,7	Conforme!				
		Par. Longitudinal B2	24,6	Conforme!			Valor Médio	25,6	Conforme!				
		Valor Médio	25,6	Conforme!									
			Média Total	25,6	Conforme!			Média Total	26,0	Conforme!	199,8	< Média Total	Conforme!
			Desvio Padrão	1,06				Desvio Padrão	1,19		2,29	< Desvio Padrão	
			Coef. Variação (%)	4,16				Coef. Variação (%)	4,58		1,15	< Coef. Variação (%)	

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.9 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).

Furo (mm)				
Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Ponto de Medição	Medida	Verificação
CP1	70,0	Dir. Longitudinal A	146,9	Conforme!
		Dir. Longitudinal B	145,9	
		Média	146,4	
		Dir. Transversal A	79,5	
		Dir. Transversal B	79,1	
		Média	79,3	
CP2		Dir. Longitudinal A	146,7	Conforme!
		Dir. Longitudinal B	147,4	
		Média	147,1	
		Dir. Transversal A	79,0	
		Dir. Transversal B	79,2	
		Média	79,1	
CP3		Dir. Longitudinal A	146,9	Conforme!
		Dir. Longitudinal B	146,6	
		Média	146,8	
	Dir. Transversal A	79,1		
	Dir. Transversal B	79,9		
	Média	79,5		
CP4	Dir. Longitudinal A	146,8	Conforme!	
	Dir. Longitudinal B	146,9		
	Média	146,8		
	Dir. Transversal A	79,2		
	Dir. Transversal B	80,0		
	Média	79,6		
CP5	Dir. Longitudinal A	147,8	Conforme!	
	Dir. Longitudinal B	147,2		
	Média	147,5		
	Dir. Transversal A	80,1		
	Dir. Transversal B	79,3		
	Média	79,7		
CP6	Dir. Longitudinal A	147,2	Conforme!	
	Dir. Longitudinal B	147,1		
	Média	147,2		
	Dir. Transversal A	80,3		
	Dir. Transversal B	80,4		
	Média	80,4		
Média menor dimensão de furo			79,6	Conforme!
Desvio Padrão			0,53	
Coef. Variação (%)			0,66	
Média maior dimensão de furo			146,9	
Desvio Padrão			0,47	
Coef. Variação (%)			0,32	

Quadro 8.10 – Bloco 12 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).

Raio de Mísula (mm)				
Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Ponto de Medição	Medida	Verificação
CP1	40,0	Parede A	45,3	Conforme!
		Parede B	47,6	Conforme!
		Média	46,5	Conforme!
CP2		Parede A	47,3	Conforme!
		Parede B	48,8	Conforme!
		Média	48,0	Conforme!
CP3		Parede A	45,2	Conforme!
		Parede B	49,3	Conforme!
		Média	47,3	Conforme!
CP4		Parede A	46,3	Conforme!
		Parede B	49,6	Conforme!
		Média	47,9	Conforme!
CP5	Parede A	46,4	Conforme!	
	Parede B	48,7	Conforme!	
	Média	47,5	Conforme!	
CP6	Parede A	46,2	Conforme!	
	Parede B	45,3	Conforme!	
	Média	45,8	Conforme!	
Média Total			47,2	Conforme!
Desvio Padrão			1,62	
Coef. Variação (%)			3,45	

Fonte: Autor (2021)

Os Quadros 8.11 a 8.15 trazem os resultados da análise dimensional realizada nos blocos de concreto 24 MPa, segundo a ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.11 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional.

Largura (mm)					Altura (mm)				
Corpo de Prova	Valor de Referência	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Valor de Referência	Ponto de Medida	Medida	Verificação
CP1	140,0	Par. Transversal A	140,3	Conforme!	CP1	190,0	Par. Transversal A	190,4	Conforme!
		Par. Transversal B	140,8	Conforme!			Par. Transversal B	189,9	Conforme!
		Par. Transversal C	140,1	Conforme!			Par. Transversal C	190,7	Conforme!
		Valor Médio	140,4	Conforme!			Valor Médio	190,3	Conforme!
CP2	140,0	Par. Transversal A	140,9	Conforme!	CP2	190,0	Par. Transversal A	188,8	Conforme!
		Par. Transversal B	141,5	Conforme!			Par. Transversal B	189,5	Conforme!
		Par. Transversal C	140,5	Conforme!			Par. Transversal C	190,3	Conforme!
		Valor Médio	140,9	Conforme!			Valor Médio	189,5	Conforme!
CP3	140,0	Par. Transversal A	140,8	Conforme!	CP3	190,0	Par. Transversal A	187,5	Conforme!
		Par. Transversal B	140,1	Conforme!			Par. Transversal B	190,1	Conforme!
		Par. Transversal C	140,3	Conforme!			Par. Transversal C	191,9	Conforme!
		Valor Médio	140,4	Conforme!			Valor Médio	189,8	Conforme!
CP4	140,0	Par. Transversal A	140,4	Conforme!	CP4	190,0	Par. Transversal A	187,9	Conforme!
		Par. Transversal B	140,6	Conforme!			Par. Transversal B	190,0	Conforme!
		Par. Transversal C	140,6	Conforme!			Par. Transversal C	191,7	Conforme!
		Valor Médio	140,5	Conforme!			Valor Médio	189,9	Conforme!
CP5	140,0	Par. Transversal A	140,4	Conforme!	CP5	190,0	Par. Transversal A	189,5	Conforme!
		Par. Transversal B	140,6	Conforme!			Par. Transversal B	189,8	Conforme!
		Par. Transversal C	140,4	Conforme!			Par. Transversal C	190,0	Conforme!
		Valor Médio	140,5	Conforme!			Valor Médio	189,8	Conforme!
CP6	140,0	Par. Transversal A	140,3	Conforme!	CP6	190,0	Par. Transversal A	191,6	Conforme!
		Par. Transversal B	140,1	Conforme!			Par. Transversal B	191,3	Conforme!
		Par. Transversal C	140,8	Conforme!			Par. Transversal C	190,1	Conforme!
		Valor Médio	140,4	Conforme!			Valor Médio	191,0	Conforme!
Média Total				Conforme!	Média Total				Conforme!
Desvio Padrão				0,34	Desvio Padrão				1,20
Coef. Variação (%)				0,24	Coef. Variação (%)				0,63

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.12 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação A).

Comprimento (mm)					Área Bruta (mm ²)		
Corpo de Prova	Valor de Referência	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Resultado	
CP1	390,0	Par. Longitudinal A1	390,0	Conforme!	CP1	54828,3	
		Par. Longitudinal A2	390,7	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,9	Conforme!			
		Valor Médio	390,5	Conforme!			
CP2	390,0	Par. Longitudinal A1	389,8	Conforme!	CP2	55100,8	
		Par. Longitudinal A2	391,6	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	391,4	Conforme!			
		Valor Médio	390,9	Conforme!			
CP3	390,0	Par. Longitudinal A1	390,4	Conforme!	CP3	54836,3	
		Par. Longitudinal A2	390,9	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,5	Conforme!			
		Valor Médio	390,6	Conforme!			
CP4	390,0	Par. Longitudinal A1	389,4	Conforme!	CP4	54844,7	
		Par. Longitudinal A2	390,5	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,8	Conforme!			
		Valor Médio	390,2	Conforme!			
CP5	390,0	Par. Longitudinal A1	389,7	Conforme!	CP5	54819,5	
		Par. Longitudinal A2	390,6	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	390,5	Conforme!			
		Valor Médio	390,3	Conforme!			
CP6	390,0	Par. Longitudinal A1	389,0	Conforme!	CP6	54802,3	
		Par. Longitudinal A2	390,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal A3	391,3	Conforme!			
		Valor Médio	390,4	Conforme!			
Média Total					Conforme!	Média Total	54872,0
Desvio Padrão					0,69	Desvio Padrão	113,03
Coef. Variação (%)					0,18	Coef. Variação (%)	0,21

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.13 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional conforme (continuação B).

Espessura das Paredes Longitudinais (mm)					Espessura das Paredes Transversais (mm)							
Corpo de Prova	Mínimo Exigido	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Corpo de Prova	Mínimo Exigido	Ponto de Medida	Medida	Verificação	Espessura Equivalente (mm/m)	Mínimo Exigido	Verificação
CP1	25,0	Par. Longitudinal A1	27,2	Conforme!	CP1	25,0	Par. Transversal A	25,8	Conforme!	196,6	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	26,3	Conforme!			Par. Transversal B	24,9	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	26,7	Conforme!			Par. Transversal C	25,9	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,8	Conforme!			Valor Médio	25,6	Conforme!			
		Valor Médio	26,5	Conforme!								
CP2	25,0	Par. Longitudinal A1	23,6	Não conforme!	CP2	25,0	Par. Transversal A	26,4	Conforme!	198,5	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	30,0	Conforme!			Par. Transversal B	25,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	24,3	Conforme!			Par. Transversal C	25,2	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	28,8	Conforme!			Valor Médio	25,8	Conforme!			
		Valor Médio	26,7	Conforme!								
CP3	25,0	Par. Longitudinal A1	25,1	Conforme!	CP3	25,0	Par. Transversal A	26,2	Conforme!	197,4	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	26,6	Conforme!			Par. Transversal B	24,0	Não conforme!			
		Par. Longitudinal B1	26,3	Conforme!			Par. Transversal C	26,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	26,3	Conforme!			Valor Médio	25,7	Conforme!			
		Valor Médio	26,1	Conforme!								
CP4	25,0	Par. Longitudinal A1	23,8	Não conforme!	CP4	25,0	Par. Transversal A	26,5	Conforme!	197,4	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	29,7	Conforme!			Par. Transversal B	25,2	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	24,1	Conforme!			Par. Transversal C	25,3	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	28,5	Conforme!			Valor Médio	25,7	Conforme!			
		Valor Médio	26,5	Conforme!								
CP5	25,0	Par. Longitudinal A1	26,6	Conforme!	CP5	25,0	Par. Transversal A	25,9	Conforme!	196,5	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	26,6	Conforme!			Par. Transversal B	24,8	Conforme!			
		Par. Longitudinal B1	26,8	Conforme!			Par. Transversal C	26,0	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,8	Conforme!			Valor Médio	25,5	Conforme!			
		Valor Médio	26,4	Conforme!								
CP6	25,0	Par. Longitudinal A1	26,1	Conforme!	CP6	25,0	Par. Transversal A	26,5	Conforme!	196,6	188,0	Conforme!
		Par. Longitudinal A2	25,1	Conforme!			Par. Transversal B	23,9	Não conforme!			
		Par. Longitudinal B1	26,4	Conforme!			Par. Transversal C	26,2	Conforme!			
		Par. Longitudinal B2	25,1	Conforme!			Valor Médio	25,6	Conforme!			
		Valor Médio	25,7	Conforme!								
		Média Total	26,3	Conforme!			Média Total	25,6	Conforme!	197,2	< Média Total	Conforme!
		Desvio Padrão	1,69				Desvio Padrão	0,83		0,75	< Desvio Padrão	
		Coef. Variação (%)	6,42				Coef. Variação (%)	3,24		0,38	< Coef. Variação (%)	

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.14 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação C).

Furo (mm)					
Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Ponto de Medição	Medida	Verificação	
CP1	70,0	Dir. Longitudinal A	157,1	Conforme!	
		Dir. Longitudinal B	157,2		
		Média	157,2		
		Dir. Transversal A	88,3		
		Dir. Transversal B	88,1		
Média		88,2			
CP2		Dir. Longitudinal A	157,5		Conforme!
		Dir. Longitudinal B	156,4		
		Média	157,0		
		Dir. Transversal A	87,0		
	Dir. Transversal B	89,5			
Média	88,2				
CP3	Dir. Longitudinal A	157,0	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	156,5			
	Média	156,7			
	Dir. Transversal A	88,4			
	Dir. Transversal B	88,9			
Média	88,7				
CP4	Dir. Longitudinal A	156,5	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	156,7			
	Média	156,6			
	Dir. Transversal A	87,5			
	Dir. Transversal B	88,6			
Média	88,0				
CP5	Dir. Longitudinal A	156,8	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	156,8			
	Média	156,8			
	Dir. Transversal A	88,2			
	Dir. Transversal B	87,8			
Média	88,0				
CP6	Dir. Longitudinal A	157,1	Conforme!		
	Dir. Longitudinal B	157,7			
	Média	157,4			
	Dir. Transversal A	89,0			
	Dir. Transversal B	88,2			
Média	88,6				
Média menor dimensão de furo			88,3	Não conforme!	
Desvio Padrão			0,68		
Coef. Variação (%)			0,77		
Média maior dimensão de furo			156,9		
Desvio Padrão			0,41		
Coef. Variação (%)			0,26		

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.15 – Bloco 24 MPa: resultados da análise dimensional (continuação D).

Corpo de Prova	Mínimo Requerido	Raio de Mísula (mm)		
		Ponto de Medição	Medida	Verificação
CP1	40,0	Parede A	41,8	Conforme!
		Parede B	44,0	Conforme!
		Média	42,9	Conforme!
CP2		Parede A	43,7	Conforme!
		Parede B	43,1	Conforme!
		Média	43,4	Conforme!
CP3		Parede A	43,1	Conforme!
		Parede B	42,3	Conforme!
		Média	42,7	Conforme!
CP4		Parede A	44,5	Conforme!
		Parede B	42,2	Conforme!
		Média	43,4	Conforme!
CP5		Parede A	42,6	Conforme!
		Parede B	43,4	Conforme!
		Média	43,0	Conforme!
CP6		Parede A	42,6	Conforme!
		Parede B	42,1	Conforme!
		Média	42,4	Conforme!
		Média Total	42,9	Conforme!
		Desvio Padrão	0,82	
		Coef. Variação (%)	1,91	

Fonte: Autor (2021)

BLOCOS DE CONCRETO: PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS

Os Quadros 8.16 a 8.18 apresentam os resultados das propriedades físicas e mecânicas para os blocos de concreto 6 MPa, conforme ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.16 – Bloco 06 MPa: umidade relativa.

Corpo de Prova	Massa na Condição de Ensaio - m (g) ^a	Massa Seca - m1 (g) ^b	Massa Saturada - m2 (g) ^c	Umidade Relativa - Ur (%)	Mínimo Requerido (%)	Verificação
CP1	12017,0	11884,5	12707,5	16,1	10,0	Conforme!
CP2	11910,0	11762,5	12586,0	17,9	10,0	Conforme!
CP3	12196,0	12070,0	12899,5	15,2	10,0	Conforme!
Valor Médio	12041,0	11905,7	12731,0	16,4	10,0	Conforme!
Desvio Padrão	144,5	154,8	158,1	1,4		
Coef. Variação (%)	1,2	1,3	1,2	8,4		

^a Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição natural/de ensaio).

^b Tomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 1h) com variação máxima de 0,25% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^c Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.17 – Bloco 06 MPa: absorção de água e área líquida.

Corpo de Prova	Massa Seca - m1 (g) ^a	Massa Saturada - m2 (g) ^b	Massa Aparente - m3 (g) ^b	Índice de Absorção de Água (%) ^c	Limite para Absorção (%)	Verificação Absorção	Área Líquida - Alíq (mm ²)
CP1	11884,5	12707,5	7037,0	6,9	10,0	Conforme!	30081,1
CP2	11762,5	12586,0	6982,5	7,0	10,0	Conforme!	29725,7
CP3	12070,0	12899,5	7153,5	6,9	10,0	Conforme!	30481,6
Valor Médio	11905,7	12731,0	7057,7	6,9	9,0	Conforme!	30096,1
Desvio Padrão	154,8	158,1	87,4	0,1			378,2
Coef. Variação (%)	1,3	1,2	1,2	0,9			1,3

^a Tomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 2h) com variação máxima de 0,5% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^b Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

^c massa específica da água considerada 1,00 g/cm³.

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.18 – Bloco 06 MPa: resistência à compressão.

Corpo de Prova	Carga de Ruptura (N) ^a	Área Bruta (mm ²) ^b	Resistência à Compressão (MPa)
CP1	409140,5	54795,2	7,5
CP2	389997,8	54626,1	7,1
CP3	369481,2	54471,6	6,8
CP4	458142,1	54458,1	8,4
CP5	425352,2	54574,4	7,8
CP6	419581,9	54422,9	7,7
Valor Médio	411949,3	54558,1	7,6
Desvio Padrão	30544,9	139,2	0,6
Coef. Variação (%)	7,4	0,3	7,5
Valor Característico - f_{bk} (MPa)			6,5

^aTaxa de carregamento de 0,05 MPa/s.

^bMedida na etapa de análise dimensional.

Fonte: Autor (2021)

Os Quadros 8.19 a 8.21 exibem os resultados das propriedades físicas e mecânicas para os blocos de concreto 12 MPa, segundo a ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.19 – Bloco 12 MPa: umidade relativa.

Corpo de Prova	Massa na Condição de Ensaio - m (g) ^a	Massa Seca - m1 (g) ^b	Massa Saturada - m2 (g) ^c	Umidade Relativa - Ur (%)	Mínimo Requerido (%)	Verificação
CP1	12314,5	12130,5	12929,0	23,0	20,0	Conforme!
CP2	12028,0	11852,5	12650,5	22,0	20,0	Conforme!
CP3	12702,0	12515,0	13300,5	23,8	20,0	Conforme!
Valor Médio	12348,2	12166,0	12960,0	22,9	20,0	Conforme!
Desvio Padrão	338,3	332,7	326,1	0,9		
Coef. Variação (%)	2,7	2,7	2,5	4,0		

^aMedida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição natural/de ensaio).

^bTomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 1h) com variação máxima de 0,25% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^cMedida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.20 – Bloco 12 MPa: absorção de água e área líquida.

Corpo de Prova	Massa Seca - m1 (g) ^a	Massa Saturada - m2 (g) ^b	Massa Aparente - m3 (g) ^b	Índice de Absorção de Água - a (%) ^c	Limite para Absorção (%)	Verificação Absorção	Área Líquida - Alíq (mm ²)
CP1	12130,5	12929,0	7234,0	6,6	9,0	Conforme!	30135,2
CP2	11852,5	12650,5	7047,0	6,7	9,0	Conforme!	29651,0
CP3	12515,0	13300,5	7498,5	6,3	9,0	Conforme!	30701,4
Valor Médio	12166,0	12960,0	7259,8	6,5	8,0	Conforme!	30162,5
Desvio Padrão	332,7	326,1	226,9	0,2			525,7
Coef. Variação (%)	2,7	2,5	3,1	3,6			1,7

^aTomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 2h) com variação máxima de 0,5% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^bMedida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

^cmassa específica da água considerada 1,00 g/cm³.

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.21 – Bloco 12 MPa: resistência à compressão.

Corpo de Prova	Carga de Ruptura (N) ^a	Área Bruta (mm ²) ^b	Resistência à Compressão (MPa)
CP1	452188,6	54591,7	8,3
CP2	489649,6	54513,4	9,0
CP3	493679,7	54195,6	9,1
CP4	576387,1	54283,7	10,6
CP5	482597,1	54653,8	8,8
CP6	576478,6	54752,5	10,5
Valor Médio	511830,1	54498,4	9,4
Desvio Padrão	52115,5	217,0	1,0
Coef. Variação (%)	10,2	0,4	10,2
Valor Característico - f_{bk} (MPa)			8,1

^aTaxa de carregamento de 0,05 MPa/s.

^bMedida na etapa de análise dimensional.

Fonte: Autor (2021)

Os Quadros 8.22 a 8.24 trazem os resultados das propriedades físicas e mecânicas para os blocos de concreto 24 MPa, segundo a ABNT NBR 12118:2013 e ABNT NBR 6136:2016.

Quadro 8.22 – Bloco 24 MPa: umidade relativa.

Corpo de Prova	Massa na Condição de Ensaio - m (g) ^a	Massa Seca - m1 (g) ^b	Massa Saturada - m2 (g) ^c	Umidade Relativa - Ur (%)	Mínimo Requerido (%)	Verificação
CP1	13600,0	13270,0	13917,5	51,0	20,0	Conforme!
CP2	13828,0	13478,5	14108,0	55,5	20,0	Conforme!
CP3	13402,5	13052,0	13702,0	53,9	20,0	Conforme!
Valor Médio	13610,2	13266,8	13909,2	53,5	20,0	Conforme!
Desvio Padrão	212,9	213,3	203,1	2,3		
Coef. Variação (%)	1,6	1,6	1,5	4,3		

^a Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição natural/de ensaio).

^b Tomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 1h) com variação máxima de 0,25% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^c Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.23 – Bloco 24 MPa: absorção de água e área líquida.

Corpo de Prova	Massa Seca - m1 (g) ^a	Massa Saturada - m2 (g) ^b	Massa Aparente - m3 (g) ^b	Índice de Absorção de Água - a (%) ^c	Limite para Absorção (%)	Verificação Absorção	Área Líquida - Alíq (mm ²)
CP1	13270,0	13917,5	8079,5	4,9	9,0	Conforme!	30719,9
CP2	13478,5	14108,0	8225,0	4,7	9,0	Conforme!	30956,7
CP3	13052,0	13702,0	7960,0	5,0	9,0	Conforme!	30214,8
Valor Médio	13266,8	13909,2	8088,2	4,8	8,0	Conforme!	30630,5
Desvio Padrão	213,3	203,1	132,7	0,2			379,0
Coef. Variação (%)	1,6	1,5	1,6	3,3			1,2

^a Tomada após duas pesagens seguidas (intervalo de 2h) com variação máxima de 0,5% de blocos secos em estufa (110 ± 5 °C).

^b Medida em balança convencional com resolução de pelo menos 10 g (blocos na condição saturado superfície seca).

^c massa específica da água considerada 1,00 g/cm³.

Fonte: Autor (2021)

Quadro 8.24 – Bloco 24 MPa: resistência à compressão.

Corpo de Prova	Carga de Ruptura (N) ^a	Área Bruta (mm ²) ^b	Resistência à Compressão (MPa)
CP1	1204340,3	54828,3	22,0
CP2	1086186,9	55100,8	19,7
CP3	1167703,5	54836,3	21,3
CP4	1115496,3	54844,7	20,3
CP5	1086919,6	54819,5	19,8
CP6	1125479,8	54802,3	20,5
Valor Médio	1131021,0	54872,0	20,6
Desvio Padrão	46793,3	113,0	0,9
Coef. Variação (%)	4,1	0,2	4,2
Valor Característico - f_{bk} (MPa)			19,2

^a Taxa de carregamento de 0,05 MPa/s.

^b Medida na etapa de análise dimensional.

Fonte: Autor (2021)

9. APÊNDICE B – PROPRIEDADES RESIDUAIS

ARGAMASSAS CONVENCIONAIS

ARGAMASSA CONVENCIONAL 5 MPa – AC 5

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa convencional 5 MPa são apresentados pela Tabela 9.1. Para cada grupo de resultados individuais exibem-se também valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.1 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 5.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 21,5 °C		Identificação: AC 5		
Umidade Relativa = 72 %		Data da moldagem: 22/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 130 dias		
RESULTADOS AC5 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	
CP1	5,64	CP4	3985	5,58
CP2	4,89	CP5	3954	4,82
CP3	4,69	CP6	3882	5,30
Média resistência à compressão (MPa)				
5,15				
Limite inferior RILEM ^e				
4,12				
Limite superior RILEM ^e				
6,18				
Desvio padrão compressão				
0,41				
Coef. Variação (%)				
7,92				
Média módulo de deformação secante (MPa)				
3940				
Limite inferior RILEM ^e				
3152				
Limite superior RILEM ^e				
4728				
Desvio padrão compressão				
53				
Coef. Variação (%)				
1,34				
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020				
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3				
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.				
d = obtida ao final do ensaio de módulo.				
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.				

Análise dimensional e massa da amostra AC 5 - T. Ambiente				
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
CP1	53,30	161,30	3,03	671,90
	53,30	161,30	3,03	
	53,40	161,30	3,02	
	53,30	161,30	3,02	
Valores médios	53,33	161,30	3,02	
Desvio padrão	0,06	0,00	0,00	
Coef. Variação (%)	0,11	0,00	0,11	
CP2	52,90	161,80	3,06	668,50
	53,20	162,10	3,05	
	53,30	161,90	3,04	
	53,20	162,10	3,05	
Valores médios	53,13	161,93	3,05	
Desvio padrão	0,21	0,15	0,01	
Coef. Variação (%)	0,39	0,09	0,35	
CP3	53,10	159,70	3,01	653,80
	52,90	159,70	3,02	
	53,10	159,70	3,01	
	53,10	159,70	3,01	
Valores médios	53,03	159,70	3,01	
Desvio padrão	0,12	0,00	0,01	
Coef. Variação (%)	0,22	0,00	0,22	
CP4	52,90	161,70	3,06	662,40
	52,90	161,70	3,06	
	53,10	161,60	3,04	
	53,10	161,60	3,04	
Valores médios	52,97	161,67	3,05	
Desvio padrão	0,12	0,06	0,01	
Coef. Variação (%)	0,22	0,04	0,25	
CP5	53,20	159,10	2,99	652,30
	53,00	159,10	3,00	
	53,50	159,10	2,97	
	53,20	159,10	2,99	
Valores médios	53,23	159,10	2,99	
Desvio padrão	0,25	0,00	0,01	
Coef. Variação (%)	0,47	0,00	0,47	
CP6	52,90	161,20	3,05	658,40
	53,00	161,00	3,04	
	53,20	161,20	3,03	
	53,20	161,20	3,03	
Valores médios	53,03	161,13	3,04	
Desvio padrão	0,15	0,12	0,01	
Coef. Variação (%)	0,29	0,07	0,28	
Médias gerais	53,12	160,81	3,03	661,22
Desvio padrão geral	0,19	1,07	0,02	7,89
Coef. Variação geral (%)	0,36	0,67	0,79	1,19

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para argamassa convencional 5 MPa aquecida até 200, 400, 600°C e a repetição dos 600°C são apresentados pela Tabela 9.2, Tabela 9.3, Tabela 9.4 e Tabela 9.5, respectivamente.

Tabela 9.2 – Resultados residuais AC 5 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 21,5 °C		Identificação: AC 5		
Umidade Relativa = 72 %		Data da moldagem: 22/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 131 dias		
RESULTADOS ACS - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	
CP1	6,36	CP4	3148	5,89
CP2	4,93	CP5	2529	5,09
CP3	5,38	CP6	3053	6,10
Média resistência à compressão (MPa)				5,62
Limite inferior RILEM ^e				4,50
Limite superior RILEM ^e				6,75
Desvio padrão compressão				0,58
Coef. Variação (%)				10,23
Média módulo de deformação secante (MPa)				2910
Limite inferior RILEM ^e				2328
Limite superior RILEM ^e				3492
Desvio padrão compressão				333
Coef. Variação (%)				11,46

Análise dimensional da amostra AC 5 - 200°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	53,10	163,30	3,08
	53,00	161,10	3,04
	53,20	163,40	3,07
Valores médios	53,10	162,60	3,06
Desvio padrão	0,10	1,30	0,02
Coef. Variação (%)	0,19	0,80	0,64
CP2	53,90	157,20	2,92
	53,80	157,20	2,92
	53,50	157,30	2,94
Valores médios	53,73	157,23	2,93
Desvio padrão	0,21	0,06	0,01
Coef. Variação (%)	0,39	0,04	0,42
CP3	52,80	162,30	3,07
	53,10	162,10	3,05
	53,40	162,30	3,04
Valores médios	53,10	162,23	3,06
Desvio padrão	0,30	0,12	0,02
Coef. Variação (%)	0,56	0,07	0,57
CP4	53,80	161,00	2,99
	53,90	161,10	2,99
	53,60	161,20	3,01
Valores médios	53,77	161,10	3,00
Desvio padrão	0,15	0,10	0,01
Coef. Variação (%)	0,28	0,06	0,33
CP5	52,70	161,10	3,06
	52,90	161,20	3,05
	53,50	161,30	3,01
Valores médios	53,03	161,20	3,04
Desvio padrão	0,42	0,10	0,02
Coef. Variação (%)	0,79	0,06	0,72
CP6	52,90	161,60	3,05
	53,20	161,40	3,03
	53,20	161,70	3,04
Valores médios	53,10	161,57	3,04
Desvio padrão	0,17	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,33	0,09	0,36
Médias gerais	53,31	160,99	3,02
Desvio padrão geral	0,39	1,87	0,05
Coef. Variação geral (%)	0,72	1,16	1,66

Propriedades físicas AC 5 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	673,20	650,00	23,2	3,4
CP2	649,50	640,10	9,4	1,4
CP3	668,90	648,30	20,6	3,1
CP4	674,10	649,80	24,3	3,6
CP5	661,80	649,90	11,9	1,8
CP6	662,50	645,60	16,9	2,6
Média	665,00	647,28	17,72	2,65
Desvio Padrão	9,19	3,90	6,09	0,88
Coef. Variação (%)	1,38	0,60	34,37	33,32

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.3 – Resultados residuais AC 5 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 5 - 400°C			
Temperatura = 23,3 °C		Identificação: AC 5			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 58 %		Data da moldagem: 22/01/2022						
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 132 dias			CP1			
RESULTADOS AC 5 - 400°C								
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d				
CP1	3,75	CP4	1304	3,59				
CP2	3,54	CP5	1512	4,13				
CP3	3,54	CP6	1168	3,44				
Média resistência à compressão (MPa)				3,67				
Limite inferior RILEM ^e				2,93				
Limite superior RILEM ^e				4,40				
Desvio padrão compressão				0,25				
Coef. Variação (%)				6,80				
Média módulo de deformação secante (MPa)				1328				
Limite inferior RILEM ^e				1062				
Limite superior RILEM ^e				1594				
Desvio padrão compressão				173				
Coef. Variação (%)				13,05				
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020								
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3								
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3.								
d = obtida ao final do ensaio de módulo.								
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.								
Propriedades físicas AC 5 - 400°C ^a					CP2			
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)	Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	671,40	637,30	34,1	5,1				
CP2	663,20	641,20	22,0	3,3	53,30	162,60	3,05	
CP3	662,40	639,50	22,9	3,5	53,00	162,90	3,07	
CP4	650,80	625,90	24,9	3,8	Valores médios			
CP5	668,10	639,70	28,4	4,3	53,13	162,77	3,06	
CP6	651,10	632,00	19,1	2,9	Desvio padrão	0,15	0,15	0,01
Média	661,17	635,93	25,23	3,81	Coef. Variação (%)	0,29	0,09	0,38
Desvio Padrão	8,57	5,88	5,33	0,77	CP2	53,00	161,90	3,05
Coef. Variação (%)	1,30	0,92	21,14	20,12	53,20	162,10	3,05	
a = ANTES e DEPOIS da queima.								
					53,40	162,40	3,04	
					Valores médios	53,20	162,13	3,05
					Desvio padrão	0,20	0,25	0,01
					Coef. Variação (%)	0,38	0,16	0,22
					CP3	53,60	160,00	2,99
					53,70	161,10	3,00	
					53,70	163,40	3,04	
					Valores médios	53,67	161,50	3,01
					Desvio padrão	0,06	1,73	0,03
					Coef. Variação (%)	0,11	1,07	1,00
					CP4	53,10	159,10	3,00
					53,10	159,00	2,99	
					53,40	159,40	2,99	
					Valores médios	53,20	159,17	2,99
					Desvio padrão	0,17	0,21	0,01
					Coef. Variação (%)	0,33	0,13	0,20
					CP5	53,30	160,20	3,01
					53,50	160,40	3,00	
					53,50	160,30	3,00	
					Valores médios	53,43	160,30	3,00
					Desvio padrão	0,12	0,10	0,00
					Coef. Variação (%)	0,22	0,06	0,17
					CP6	52,60	159,60	3,03
					52,80	159,50	3,02	
					53,10	159,50	3,00	
					Valores médios	52,83	159,53	3,02
					Desvio padrão	0,25	0,06	0,02
					Coef. Variação (%)	0,48	0,04	0,51
					Médias gerais	53,24	160,90	3,02
					Desvio padrão geral	0,30	1,50	0,03
					Coef. Variação geral (%)	0,57	0,93	0,97

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.4 – Resultados residuais AC 5 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23,4 °C		Identificação: AC 5		
Umidade Relativa = 49 %		Data da moldagem: 22/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 136 dias		
RESULTADOS AC5 - 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	1,28	CP4 ^e	-	1,63
CP2	1,21	CP5	-	-
CP3	1,09	CP6	-	-
Média resistência à compressão (MPa)				1,19
Limite inferior RILEM ^f				1,04
Limite superior RILEM ^f				1,56
Desvio padrão compressão				0,23
Coef. Variação (%)				19,51
Média módulo de deformação secante (MPa)				-
Limite inferior RILEM ^f				-
Limite superior RILEM ^f				-
Desvio padrão compressão				-
Coef. Variação (%)				-

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado na média amostral.
 f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas AC 5 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	659,40	631,2	28,2	4,3
CP2	633,00	603,7	29,3	4,6
CP3	686,80	643,7	43,1	6,3
CP4	660,30	630,7	29,6	4,5
Média	659,88	627,33	32,6	4,9
Desvio Padrão	21,97	16,86	7,06	0,92
Coef. Variação (%)	3,33	2,69	21,69	18,61

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra AC 5 - 600°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	53,20	160,00	3,01
	53,00	159,90	3,02
	53,00	159,60	3,01
Valores médios	53,07	159,83	3,01
Desvio padrão	0,12	0,21	0,00
Coef. Variação (%)	0,22	0,13	0,16
CP2	53,00	153,50	2,90
	53,20	153,60	2,89
	53,30	153,70	2,88
Valores médios	53,17	153,60	2,89
Desvio padrão	0,15	0,10	0,01
Coef. Variação (%)	0,29	0,07	0,22
CP3	53,80	163,30	3,04
	54,00	163,20	3,02
	53,70	163,20	3,04
Valores médios	53,83	163,23	3,03
Desvio padrão	0,15	0,06	0,01
Coef. Variação (%)	0,28	0,04	0,29
CP4	52,80	159,70	3,02
	52,80	159,50	3,02
	53,10	159,50	3,00
Valores médios	52,90	159,57	3,02
Desvio padrão	0,17	0,12	0,01
Coef. Variação (%)	0,33	0,07	0,37
Médias gerais	53,24	159,06	2,99
Desvio padrão geral	0,39	3,62	0,06
Coef. Variação geral (%)	0,74	2,28	2,02

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.5 – Resultados residuais AC 5 após repetição 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 22,1 a 23,4°C		Identificação: AC 5		
Umidade Relativa = 49 a 67 %		Data da moldagem: 22/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 136 e 137 dias (repetição)		
RESULTADOS AC5 - 600°C COM REPETIÇÃO				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	1,28	CP4	-	1,63
CP2	1,21	CP7 ^f	195	2,11
CP3 ^e	1,09	CP8 ^f	183	2,27
CP5 ^e	1,04			
CP6	1,34			
Média resistência à compressão (MPa)				1,36
Limite inferior RILEM ^g				1,20
Limite superior RILEM ^g				1,79
Desvio padrão compressão				0,18
Coef. Variação (%)				13,51
Média módulo de deformação secante (MPa)				189
Limite inferior RILEM ^g				151
Limite superior RILEM ^g				227
Desvio padrão compressão				8
Coef. Variação (%)				4,49

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado na média amostral.
 f = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado na média amostral.
 g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas AC 5 - Repetição 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP5	662,90	632,0	30,9	4,7
CP6	661,10	635,6	25,5	3,9
CP7	659,30	625,3	34,0	5,2
CP8	666,50	631,6	34,9	5,2
Média	662,45	631,13	31,3	4,7
Desvio Padrão	3,07	4,28	4,24	0,63
Coef. Variação (%)	0,46	0,68	13,55	13,40

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra AC 5 - Repetição 600°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP5	52,50	160,60	3,06
	52,80	160,30	3,04
	53,40	160,40	3,00
Valores médios	52,90	160,43	3,03
Desvio padrão	0,46	0,15	0,03
Coef. Variação (%)	0,87	0,10	0,92
CP6	52,90	160,90	3,04
	52,80	161,10	3,05
	53,40	161,00	3,01
Valores médios	53,03	161,00	3,04
Desvio padrão	0,32	0,10	0,02
Coef. Variação (%)	0,61	0,06	0,62
CP7	53,30	162,00	3,04
	53,30	162,00	3,04
	53,30	162,30	3,05
Valores médios	53,30	162,10	3,04
Desvio padrão	0,00	0,17	0,00
Coef. Variação (%)	0,00	0,11	0,11
CP8	53,90	161,30	2,99
	53,90	161,10	2,99
	53,80	161,30	3,00
Valores médios	53,87	161,23	2,99
Desvio padrão	0,06	0,12	0,00
Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,16
Médias gerais	53,28	161,19	3,03
Desvio padrão geral	0,46	0,64	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,86	0,40	0,81

Fonte: Autor (2022)

ARGAMASSA CONVENCIONAL 10 MPa – AC 10

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa convencional 10 MPa são exibidos pela Tabela 9.6. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se também valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.6 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 10.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 22,6 °C		Identificação: AC 10		
Umidade Relativa = 59 %		Data da moldagem: 23/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 149 dias		
RESULTADOS AC10 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	9,42	CP4	4706	10,17
CP2	9,20	CP5	4796	9,95
CP3	9,33	CP6	5307	9,14
Média resistência à compressão (MPa)		9,53		
Limite inferior RILEM ^e		7,63		
Limite superior RILEM ^e		11,44		
Desvio padrão compressão		0,42		
Coef. Variação (%)		4,45		
Média módulo de deformação secante (MPa)		4936		
Limite inferior RILEM ^e		3949		
Limite superior RILEM ^e		5924		
Desvio padrão compressão		324		
Coef. Variação (%)		6,57		

Análise dimensional e massa da amostra AC 10 - T. Ambiente					
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)	
CP1	53,60	158,30	2,95	672,20	
	53,70	158,20	2,95		
	53,50	158,30	2,96		
Valores médios	53,60	158,27	2,95		
Desvio padrão	0,10	0,06	0,01		
Coef. Variação (%)	0,19	0,04	0,22		
CP2	52,90	160,90	3,04	674,40	
	53,20	160,50	3,02		
	53,20	160,90	3,02		
	Valores médios	53,10	160,77		3,03
Desvio padrão	0,17	0,23	0,01		
Coef. Variação (%)	0,33	0,14	0,42		
CP3	53,00	161,10	3,04	670,00	
	53,10	161,00	3,03		
	53,00	161,00	3,04		
	Valores médios	53,03	161,03		3,04
Desvio padrão	0,06	0,06	0,00		
Coef. Variação (%)	0,11	0,04	0,13		
CP4	53,20	160,50	3,02	674,40	
	53,10	160,60	3,02		
	53,20	160,50	3,02		
	Valores médios	53,17	160,53		3,02
Desvio padrão	0,06	0,06	0,00		
Coef. Variação (%)	0,11	0,04	0,14		
CP5	53,40	159,10	2,98	669,10	
	53,20	158,90	2,99		
	53,20	159,00	2,99		
	Valores médios	53,27	159,00		2,98
Desvio padrão	0,12	0,10	0,00		
Coef. Variação (%)	0,22	0,06	0,17		
CP6	52,90	159,70	3,02	668,30	
	53,00	160,20	3,02		
	53,00	160,30	3,02		
	Valores médios	52,97	160,07		3,02
Desvio padrão	0,06	0,32	0,00		
Coef. Variação (%)	0,11	0,20	0,09		
Médias gerais		53,19	159,94	3,01	671,40
Desvio padrão geral		0,23	1,03	0,03	2,66
Coef. Variação geral (%)		0,43	0,65	1,02	0,40

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para argamassa convencional 10 MPa aquecida até 200, 400, 600 e 800°C são expostos pela Tabela 9.7, Tabela 9.8, Tabela 9.9 e Tabela 9.10, respectivamente.

Tabela 9.7 – Resultados residuais AC 10 após repetição 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 10 - 200°C			
Temperatura = 22,8 °C		Identificação: AC 10			Corpo de Prova			
Umidade Relativa = 59 %		Data da moldagem: 23/01/2022			Diâmetro - D (mm)			
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 149 dias			Altura - A (mm)			
					Relação A/D			
RESULTADOS AC10 - 200°C								
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d			
CP1	9,63	CP4	3853	9,68				
CP2	10,44	CP5	3639	8,44				
CP3	10,53	CP6	3248	9,81				
Média resistência à compressão (MPa)				9,76				
Limite inferior RILEM ^e				7,81				
Limite superior RILEM ^e				11,71				
Desvio padrão compressão				0,75				
Coef. Variação (%)				7,70				
Média módulo de deformação secante (MPa)				3580				
Limite inferior RILEM ^e				2864				
Limite superior RILEM ^e				4296				
Desvio padrão compressão				307				
Coef. Variação (%)				8,57				
^a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020 ^b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3 ^c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5. ^d = obtida ao final do ensaio de módulo. ^e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.								
Propriedades físicas AC 10 - 200°C ^a								
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)				
CP1	666,80	653,6	13,2	2,0				
CP2	666,70	653,7	13,0	1,9				
CP3	670,40	656,8	13,6	2,0				
CP4	677,90	659,4	18,5	2,7				
CP5	665,10	649,1	16,0	2,4				
CP6	665,10	649,90	15,2	2,3				
Média	668,67	653,75	14,92	2,23				
Desvio Padrão	4,92	3,94	2,12	0,30				
Coef. Variação (%)	0,74	0,60	14,20	13,67				
^a = ANTES e DEPOIS da queima.								
Valores médios		53,17		160,23		3,01		
Desvio padrão		0,15		0,15		0,01		
Coef. Variação (%)		0,29		0,10		0,38		
CP2								
		53,20		158,70		2,98		
		53,30		158,90		2,98		
		53,20		158,70		2,98		
Valores médios		53,23		158,77		2,98		
Desvio padrão		0,06		0,12		0,00		
Coef. Variação (%)		0,11		0,07		0,04		
CP3								
		53,10		160,80		3,03		
		53,10		161,30		3,04		
		53,40		161,20		3,02		
Valores médios		53,20		161,10		3,03		
Desvio padrão		0,17		0,26		0,01		
Coef. Variação (%)		0,33		0,16		0,31		
CP4								
		52,80		160,80		3,05		
		52,90		160,50		3,03		
		53,40		160,20		3,00		
Valores médios		53,03		160,50		3,03		
Desvio padrão		0,32		0,30		0,02		
Coef. Variação (%)		0,61		0,19		0,78		
CP5								
		53,60		161,20		3,01		
		52,90		161,20		3,05		
		52,80		161,00		3,05		
Valores médios		53,10		161,13		3,03		
Desvio padrão		0,44		0,12		0,02		
Coef. Variação (%)		0,82		0,07		0,78		
CP6								
		52,80		159,80		3,03		
		52,90		159,60		3,02		
		53,10		159,50		3,00		
Valores médios		52,93		159,63		3,02		
Desvio padrão		0,15		0,15		0,01		
Coef. Variação (%)		0,29		0,10		0,38		
Médias gerais		53,11		160,23		3,02		
Desvio padrão geral		0,23		0,87		0,02		
Coef. Variação geral (%)		0,44		0,54		0,73		

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.8 – Resultados residuais AC 10 após repetição 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 10 - 400°C			
Temperatura = 23,4 °C		Identificação: AC 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 48 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CP1	53,00	160,50	3,03
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 150 dias				52,90	160,60	3,04
RESULTADOS AC10 - 400°C					53,30	160,50	3,01	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	53,07	160,53	3,03
CP1	6,62	CP4	2534	7,33	Desvio padrão	0,21	0,06	0,01
CP2	6,13	CP5	2314	7,21	Coef. Variação (%)	0,39	0,04	0,42
CP3	6,89	CP6	2133	6,92	CP2	53,20	159,10	2,99
Média resistência à compressão (MPa)				6,85		53,20	159,20	2,99
Limite inferior RILEM ^e				5,48	Valores médios	53,20	159,17	2,99
Limite superior RILEM ^e				8,22	Desvio padrão	0,00	0,06	0,00
Desvio padrão compressão				0,44	Coef. Variação (%)	0,00	0,04	0,04
Coef. Variação (%)				6,36	CP3	53,20	159,80	3,00
Média módulo de deformação secante (MPa)				2327		53,10	159,80	3,01
Limite inferior RILEM ^e				1862	53,10	160,00	3,01	
Limite superior RILEM ^e				2792	Valores médios	53,13	159,87	3,01
Desvio padrão compressão				201	Desvio padrão	0,06	0,12	0,00
Coef. Variação (%)				8,63	Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,16

Propriedades físicas AC 10 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	668,20	642,4	25,8	3,9
CP2	664,30	637,0	27,3	4,1
CP3	670,90	641,3	29,6	4,4
CP4	668,00	642,3	25,7	3,8
CP5	678,70	647,7	31,0	4,6
CP6	682,40	653,30	29,1	4,3
Média	672,08	644,00	28,08	4,18
Desvio Padrão	6,98	5,69	2,16	0,29
Coef. Variação (%)	1,04	0,88	7,69	7,01

Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP5	52,60	161,40	3,07
	53,10	161,40	3,04
CP6	53,40	161,60	3,03
	53,20	159,90	3,01
Valores médios	53,03	161,47	3,04
Desvio padrão	0,40	0,12	0,02
Coef. Variação (%)	0,76	0,07	0,71
CP6	53,70	160,10	2,98
	53,50	159,50	2,98
Valores médios	53,47	159,83	2,99
Desvio padrão	0,25	0,31	0,01
Coef. Variação (%)	0,47	0,19	0,47
Médias gerais	53,16	160,06	3,01
Desvio padrão geral	0,25	0,79	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,47	0,49	0,74

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.9 – Resultados residuais AC 10 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 10 - 600°C				
Temperatura = 24,2 °C		Identificação: AC 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 35 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CP1	53,70	160,00	2,98	
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 151 dias				53,90	159,70	2,96	
						53,70	159,90	2,98	
RESULTADOS AC10 - 600°C					Valores médios	53,77	159,87	2,97	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Desvio padrão	0,12		0,15	0,01
					Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d			0,10	0,31
CP1	2,87	CP4	340		3,83				
CP2 ^f	2,65	CP5	411		3,49				
CP3	3,79	CP6	456		3,49				
Média resistência à compressão (MPa)					3,49				
Limite inferior RILEM ^e					2,68				
Limite superior RILEM ^e					4,02				
Desvio padrão compressão					0,38				
Coef. Variação (%)					10,96				
Média módulo de deformação secante (MPa)					402				
Limite inferior RILEM ^e					322				
Limite superior RILEM ^e					483				
Desvio padrão compressão					58				
Coef. Variação (%)					14,54				
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020									
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3									
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.									
d = obtida ao final do ensaio de módulo.									
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.									
f = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado na média amostral.									
Propriedades físicas AC 10 - 600°C ^a									
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)					
CP1	679,00	632,8	46,2	6,8					
CP2	667,20	631,4	35,8	5,4					
CP3	677,40	643,4	34,0	5,0					
CP4	656,60	625,2	31,4	4,8					
CP5	679,10	644,8	34,3	5,1					
CP6	676,00	641,00	35,0	5,2					
Média	672,55	636,43	36,12	5,37					
Desvio Padrão	8,98	7,80	5,16	0,73					
Coef. Variação (%)	1,33	1,23	14,28	13,60					
a= ANTES e DEPOIS da queima.									
Análise dimensional da amostra AC 10 - 600°C									
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D						
CP1	53,70	160,00	2,98						
	53,90	159,70	2,96						
	53,70	159,90	2,98						
Valores médios	53,77	159,87	2,97						
Desvio padrão	0,12		0,15	0,01					
Coef. Variação (%)	0,21		0,10	0,31					
CP2	52,80	160,20	3,03						
	53,40	160,20	3,00						
	52,90	160,00	3,02						
Valores médios	53,03	160,13	3,02						
Desvio padrão	0,32		0,12	0,02					
Coef. Variação (%)	0,61		0,07	0,58					
CP3	53,50	160,50	3,00						
	53,70	161,10	3,00						
	53,70	160,70	2,99						
Valores médios	53,63	160,77	3,00						
Desvio padrão	0,12		0,31	0,00					
Coef. Variação (%)	0,22		0,19	0,14					
CP4	53,10	157,10	2,96						
	53,20	157,40	2,96						
	53,20	157,50	2,96						
Valores médios	53,17	157,33	2,96						
Desvio padrão	0,06		0,21	0,00					
Coef. Variação (%)	0,11		0,13	0,04					
CP5	54,00	160,00	2,96						
	53,80	160,00	2,97						
	53,30	160,20	3,01						
Valores médios	53,70	160,07	2,98						
Desvio padrão	0,36		0,12	0,02					
Coef. Variação (%)	0,67		0,07	0,74					
CP6	53,50	160,00	2,99						
	53,60	160,40	2,99						
	53,60	160,20	2,99						
Valores médios	53,57	160,20	2,99						
Desvio padrão	0,06		0,20	0,00					
Coef. Variação (%)	0,11		0,12	0,06					
Médias gerais	53,48	159,73	2,99						
Desvio padrão geral	0,34		1,15	0,02					
Coef. Variação geral (%)	0,63		0,72	0,74					

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.10 – Resultados residuais AC 10 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 10 - 800°C			
Temperatura = 23,8 °C		Identificação: AC 10			Corpo de Prova			
Umidade Relativa = 49 %		Data da moldagem: 23/01/2022			Diâmetro - D (mm)			
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 157 dias			Altura - A (mm)			
					Relação A/D			
RESULTADOS AC10 - 800°C								
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d				
CP1	1,40	CP4	159	1,44				
CP2	1,38	CP5	148	1,50				
CP3	1,14	CP6	150	1,40				
Média resistência à compressão (MPa)				1,38				
Limite inferior RILEM ^e				1,10				
Limite superior RILEM ^e				1,65				
Desvio padrão compressão				0,12				
Coef. Variação (%)				9,01				
Média módulo de deformação secante (MPa)				152				
Limite inferior RILEM ^e				122				
Limite superior RILEM ^e				183				
Desvio padrão compressão				6				
Coef. Variação (%)				3,85				
<small>a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5. d = obtida ao final do ensaio de módulo. e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.</small>								
Propriedades físicas AC 10 - 800°C ^a								
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)				
CP1	670,20	613,5	56,7	8,5				
CP2	672,20	620,9	51,3	7,6				
CP3	677,70	614,1	63,6	9,4				
CP4	684,80	623,1	61,7	9,0				
CP5	684,30	630,8	53,5	7,8				
CP6	671,90	615,40	56,5	8,4				
Média	676,85	619,63	57,22	8,45				
Desvio Padrão	6,48	6,70	4,70	0,67				
Coef. Variação (%)	0,96	1,08	8,21	7,95				
<small>a= ANTES e DEPOIS da queima.</small>								
					Valores médios 53,13 160,70 3,03			
					Desvio padrão 0,06 0,06 0,00			
					Coef. Variação (%) 0,11 0,04 0,13			
					CP2			
					54,10 158,60 2,93			
					54,10 158,80 2,94			
					54,60 158,50 2,90			
					Valores médios 54,27 158,63 2,92			
					Desvio padrão 0,29 0,15 0,02			
					Coef. Variação (%) 0,53 0,10 0,61			
					CP3			
					53,00 161,30 3,04			
					53,20 161,10 3,03			
					53,20 161,00 3,03			
					Valores médios 53,13 161,13 3,03			
					Desvio padrão 0,12 0,15 0,01			
					Coef. Variação (%) 0,22 0,09 0,31			
					CP4			
					53,60 161,00 3,00			
					53,60 161,30 3,01			
					53,20 161,10 3,03			
					Valores médios 53,47 161,13 3,01			
					Desvio padrão 0,23 0,15 0,01			
					Coef. Variação (%) 0,43 0,09 0,43			
					CP5			
					53,30 160,10 3,00			
					52,50 160,20 3,05			
					53,80 160,20 2,98			
					Valores médios 53,20 160,17 3,01			
					Desvio padrão 0,66 0,06 0,04			
					Coef. Variação (%) 1,23 0,04 1,24			
					CP6			
					54,10 158,90 2,94			
					53,90 159,20 2,95			
					53,70 159,20 2,96			
					Valores médios 53,90 159,10 2,95			
					Desvio padrão 0,20 0,17 0,01			
					Coef. Variação (%) 0,37 0,11 0,47			
					Médias gerais 53,52 160,15 2,99			
					Desvio padrão geral 0,52 1,01 0,04			
					Coef. Variação geral (%) 0,97 0,63 1,50			

Fonte: Autor (2022)

ARGAMASSA CONVENCIONAL 20 MPa – AC 20

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa convencional 20 MPa são expostos na Tabela 9.11. Para cada grupo de resultados individuais exibem-se também valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.11 – Resultados de referência para propriedades residuais AC 20.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional e massa da amostra AC 20 - T. Ambiente						
Temperatura = 22,9 °C		Identificação: AC 20			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)		
Umidade Relativa = 48 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CP1	53,20	160,90	3,02	703,80		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 157 dias				53,10	160,70	3,03			
RESULTADOS AC 20 - T. Ambiente						53,10	160,60	3,02			
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios		53,13	160,73		3,03	
					Desvio padrão		0,06	0,15		0,00	
					Coef. Variação (%)		0,11	0,10		0,04	
CP1		17,24	CP4	8418	18,44	CP2	53,50	160,90	3,01	709,80	
CP2		16,14	CP5	8324	18,23		53,50	161,20	3,01		
CP3		17,85	CP6	8297	15,79		53,50	160,80	3,01		
					Valores médios		53,50	160,97	3,01		
					Desvio padrão		0,00	0,21	0,00		
					Coef. Variação (%)		0,00	0,13	0,13		
		Média resistência à compressão (MPa)		17,28	CP3	53,90	161,80	3,00	736,80		
		Limite inferior RILEM ^e		13,83		53,80	162,00	3,01			
		Limite superior RILEM ^e		20,74		53,60	161,90	3,02			
		Desvio padrão compressão		1,10		Valores médios		53,77		161,90	3,01
		Coef. Variação (%)		6,39		Desvio padrão		0,15		0,10	0,01
		Média módulo de deformação secante (MPa)		8346	Coef. Variação (%)		0,28	0,06		0,31	
		Limite inferior RILEM ^e		6677	CP4	52,90	159,50	3,02	728,80		
		Limite superior RILEM ^e		10016		53,10	159,50	3,00			
		Desvio padrão compressão		64		53,20	159,30	2,99			
		Coef. Variação (%)		0,76		Valores médios		53,07		159,43	3,00
						Desvio padrão		0,15		0,12	0,01
					Coef. Variação (%)		0,29	0,07		0,35	
					CP5	53,90	160,70	2,98	707,80		
						53,90	160,60	2,98			
						53,40	160,50	3,01			
					Valores médios		53,73	160,60		2,99	
					Desvio padrão		0,29	0,10		0,01	
					Coef. Variação (%)		0,54	0,06		0,49	
					CP6	53,60	163,20	3,04	722,80		
						53,50	162,90	3,04			
						53,50	163,10	3,05			
						Valores médios		53,53		163,07	3,05
						Desvio padrão		0,06		0,15	0,00
					Coef. Variação (%)		0,11	0,09		0,07	
					Médias gerais		53,46	161,12	3,01	718,30	
					Desvio padrão geral		0,31	1,17	0,02	13,16	
					Coef. Variação geral (%)		0,57	0,73	0,65	1,83	

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para argamassa convencional 20 MPa aquecida até 200, 400, 600 e 800°C estão na Tabela 9.12, Tabela 9.13, Tabela 9.14 e Tabela 9.15, respectivamente.

Tabela 9.12 – Resultados residuais AC 20 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 20 - 200°C			
Temperatura = 23 °C		Identificação: AC 20			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 41 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CP1	54,00	160,90	2,98
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 158 dias				54,00	160,90	2,98
						53,80	160,90	2,99
RESULTADOS AC20 - 200°C					Valores médios	53,93	160,90	2,98
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão			
CP1	16,69	CP4	6495	17,05	0,12			
CP2	17,41	CP5	6962	17,25	Coef. Variação (%)			
CP3	16,91	CP6	6273	17,40	0,21			
Média resistência à compressão (MPa)					17,12			
Limite inferior RILEM ^e					13,69			
Limite superior RILEM ^e					20,54			
Desvio padrão compressão					0,28			
Coef. Variação (%)					1,66			
Média módulo de deformação secante (MPa)					6577			
Limite inferior RILEM ^e					5261			
Limite superior RILEM ^e					7892			
Desvio padrão compressão					352			
Coef. Variação (%)					5,35			
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020								
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3								
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.								
d = obtida ao final do ensaio de módulo.								
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.								
Propriedades físicas AC 20 - 200°C ^a								
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)				
CP1	715,80		715,8	100,0	CP5	53,50	162,00	3,03
CP2	713,80	670,7	43,1	6,0		53,30	161,60	3,03
CP3	723,80	665,2	58,6	8,1		53,70	161,70	3,01
CP4	730,80	674,4	56,4	7,7	Valores médios			
CP5	712,80	685,4	27,4	3,8	53,50			
CP6	732,80	677,40	55,4	7,6	Desvio padrão			
Média	721,63	674,62	159,45	22,21	0,20			
Desvio Padrão	8,80	7,55	272,81	38,14	Coef. Variação (%)			
Coef. Variação (%)	1,22	1,12	171,09	171,74	0,37			
a= ANTES e DEPOIS da queima.								
					Médias gerais			
					53,32			
					Desvio padrão geral			
					0,37			
					Coef. Variação geral (%)			
					0,69			

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.13 – Resultados residuais AC 20 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23,5 °C		Identificação: AC 20		
Umidade Relativa = 41 %		Data da moldagem: 23/01/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 159 dias		
RESULTADOS AC20 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	11,46	CP4	3306	11,27
CP2	11,67	CP5	3952	12,24
CP3	12,40	CP6	3706	11,83
Média resistência à compressão (MPa)				11,81
Limite inferior RILEM ^e				9,45
Limite superior RILEM ^e				14,17
Desvio padrão compressão				0,44
Coef. Variação (%)				3,72
Média módulo de deformação secante (MPa)				3655
Limite inferior RILEM ^e				2924
Limite superior RILEM ^e				4386
Desvio padrão compressão				326
Coef. Variação (%)				8,92

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas AC 20 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	717,80	665,6	52,2	7,3
CP2	706,80	670,2	36,6	5,2
CP3	740,80	680,2	60,6	8,2
CP4	729,80	665,6	64,2	8,8
CP5	738,80	672,0	66,8	9,0
CP6	724,80	671,50	53,3	7,4
Média	726,47	670,85	55,62	7,64
Desvio Padrão	12,91	5,38	10,97	1,41
Coef. Variação (%)	1,78	0,80	19,73	18,40

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra AC 20 - 400°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	53,00	160,70	3,03
	53,30	160,70	3,02
	53,30	160,90	3,02
Valores médios	53,20	160,77	3,02
Desvio padrão	0,17	0,12	0,01
Coef. Variação (%)	0,33	0,07	0,30
CP2	53,30	160,30	3,01
	53,30	160,40	3,01
	53,40	160,60	3,01
Valores médios	53,33	160,43	3,01
Desvio padrão	0,06	0,15	0,00
Coef. Variação (%)	0,11	0,10	0,04
CP3	54,00	162,10	3,00
	54,00	161,70	2,99
	53,90	162,30	3,01
Valores médios	53,97	162,03	3,00
Desvio padrão	0,06	0,31	0,01
Coef. Variação (%)	0,11	0,19	0,28
CP4	53,10	161,40	3,04
	53,00	161,10	3,04
	53,00	161,20	3,04
Valores médios	53,03	161,23	3,04
Desvio padrão	0,06	0,15	0,00
Coef. Variação (%)	0,11	0,09	0,04
CP5	53,20	160,20	3,01
	53,30	160,50	3,01
	53,20	160,70	3,02
Valores médios	53,23	160,47	3,01
Desvio padrão	0,06	0,25	0,01
Coef. Variação (%)	0,11	0,16	0,18
CP6	53,80	160,40	2,98
	53,80	160,60	2,99
	53,50	160,10	2,99
Valores médios	53,70	160,37	2,99
Desvio padrão	0,17	0,25	0,01
Coef. Variação (%)	0,32	0,16	0,19
Médias gerais	53,41	160,88	3,01
Desvio padrão geral	0,34	0,64	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,64	0,39	0,59

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.14 – Resultados residuais AC 20 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 20 - 600°C				
Temperatura = 23,4 °C		Identificação: AC 20			Corpo de Prova		Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/I
Umidade Relativa = 34 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CPI		53,10	160,80	3,03
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 163 dias					52,90	161,00	3,04
						53,10	160,70	3,03	
RESULTADOS AC20 - 600°C					Valores médios		53,03	160,83	3,03
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d		Desvio padrão		0,12	0,15
CP1	6,75	CP4	953	7,13		Coef. Variação (%)		0,22	0,09
CP2	6,79	CP5	905	7,70					
CP3	7,77	CP6	852	6,62					
Média resistência à compressão (MPa)				7,13					
Limite inferior RILEM ^e				5,70					
Limite superior RILEM ^e				8,56					
Desvio padrão compressão				0,50					
Coef. Variação (%)				7,02					
Média módulo de deformação secante (MPa)				903					
Limite inferior RILEM ^e				723					
Limite superior RILEM ^e				1084					
Desvio padrão compressão				51					
Coef. Variação (%)				5,59					
CP1		CP4		7,13		CP2		3,05	
CP2		CP5		7,70		CP3		3,04	
CP3		CP6		6,62		CP4		3,05	
						CP5		2,98	
						CP6		3,02	
						Médias gerais		3,03	
						Desvio padrão geral		0,03	
						Coef. Variação geral (%)		0,87	

Propriedades físicas AC 20 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	705,80	661,8	44,0	6,2
CP2	735,80	656,5	79,3	10,8
CP3	721,80	671,7	50,1	6,9
CP4	714,80	660,1	54,7	7,7
CP5	734,80	661,1	73,7	10,0
CP6	720,80	656,40	64,4	8,9
Média	722,30	661,27	61,03	8,43
Desvio Padrão	11,57	5,60	13,82	1,79
Coef. Variação (%)	1,60	0,85	22,65	21,20

Análise dimensional da amostra AC 20 - 600°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/I
CPI	53,10	160,80	3,03
	52,90	161,00	3,04
	53,10	160,70	3,03
Valores médios	53,03	160,83	3,03
Desvio padrão		0,12	0,15
Coef. Variação (%)		0,22	0,09
CP2	53,00	161,50	3,05
	53,00	161,00	3,04
	53,20	161,20	3,03
Valores médios	53,07	161,23	3,04
Desvio padrão		0,12	0,25
Coef. Variação (%)		0,22	0,16
CP3	53,50	162,90	3,04
	53,50	162,30	3,03
	53,30	162,50	3,05
Valores médios	53,43	162,57	3,04
Desvio padrão		0,12	0,31
Coef. Variação (%)		0,22	0,19
CP4	52,90	161,90	3,06
	52,90	161,90	3,06
	53,10	161,90	3,05
Valores médios	52,97	161,90	3,06
Desvio padrão		0,12	0,00
Coef. Variação (%)		0,22	0,00
CP5	53,20	158,60	2,98
	53,30	159,10	2,98
	53,50	158,80	2,97
Valores médios	53,33	158,83	2,98
Desvio padrão		0,15	0,25
Coef. Variação (%)		0,29	0,16
CP6	53,30	160,90	3,02
	53,20	160,90	3,02
	53,20	161,00	3,03
Valores médios	53,23	160,93	3,02
Desvio padrão		0,06	0,06
Coef. Variação (%)		0,11	0,04
Médias gerais		53,18	161,05
Desvio padrão geral		0,20	1,20
Coef. Variação geral (%)		0,37	0,75

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.15 – Resultados residuais AC 20 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AC 20 - 800°C			
Temperatura = 23,4 °C		Identificação: AC 20			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 37 %		Data da moldagem: 23/01/2022			CP1	53,20	157,50	2,96
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MP/s		Idade de teste: 164 dias				53,30	157,70	2,96
						53,10	157,80	2,97
RESULTADOS AC20 - 800°C					Valores médios	53,20	157,67	2,96
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,10	0,15	0,01
	CP1	3,26	CP4		421	3,02	Coef. Variação (%)	0,19
CP2	3,17	CP5	360	2,75	CP2	53,20	160,60	3,02
CP3	2,71	CP6	419	2,97		53,30	161,30	3,03
						53,20	160,70	3,02
					Valores médios	53,23	160,87	3,02
					Desvio padrão	0,06	0,38	0,00
					Coef. Variação (%)	0,11	0,24	0,13
					CP3	53,70	160,10	2,99
					Desvio padrão	0,06	0,49	0,01
					Coef. Variação (%)	0,11	0,31	0,38
					Valores médios	53,63	160,33	2,99
					Desvio padrão	0,06	0,49	0,01
					Coef. Variação (%)	0,11	0,31	0,38
					CP4	53,10	162,20	3,05
					Desvio padrão	0,06	0,49	0,01
					Coef. Variação (%)	0,11	0,31	0,38
					Valores médios	53,20	162,30	3,05
					Desvio padrão	0,10	0,17	0,01
					Coef. Variação (%)	0,19	0,11	0,22
					CP5	53,00	161,10	3,04
					Desvio padrão	0,12	0,23	0,01
					Coef. Variação (%)	0,22	0,14	0,32
					Valores médios	52,93	160,97	3,04
					Desvio padrão	0,12	0,23	0,01
					Coef. Variação (%)	0,22	0,14	0,32
					CP6	54,10	161,20	2,98
					Desvio padrão	0,10	0,06	0,01
					Coef. Variação (%)	0,19	0,04	0,19
					Valores médios	54,00	161,23	2,99
					Desvio padrão	0,10	0,06	0,01
					Coef. Variação (%)	0,19	0,04	0,19
					Médias gerais	53,37	160,56	3,01
					Desvio padrão geral	0,37	1,48	0,03
					Coef. Variação geral (%)	0,69	0,92	1,09

Propriedades físicas AC20 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	711,80	632,5	79,3	11,1
CP2	725,80	640,1	85,7	11,8
CP3	733,80	644,0	89,8	12,2
CP4	718,80	645,2	73,6	10,2
CP5	737,80	643,1	94,7	12,8
CP6	731,80	646,70	85,1	11,6
Média	726,63	641,93	84,70	11,65
Desvio Padrão	9,85	5,13	7,48	0,90
Coef. Variação (%)	1,36	0,80	8,83	7,70

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

ARGAMASSAS INDUSTRIALIZADAS

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 5 MPa – AI 5

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa industrializada 5 MPa são exibidos pela Tabela 9.16. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.16 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 5.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional e massa da amostra AI 5 - T. Ambiente					
Temperatura = 23,9 °C		Identificação: AI 5			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)	
Umidade Relativa = 62 %		Data da moldagem: 15/12/2021			CP1	53,20	163,20	3,07	678,00	
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 147 dias				53,30	163,20	3,06		
RESULTADOS AI5 - T. Ambiente						53,10	163,10	3,07		
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	53,20	163,17	3,07		
CP1	3,99	CP4	3794	4,01	Desvio padrão	0,10	0,06	0,00		
CP2	3,99	CP5	3927	3,87	Coef. Variação (%)	0,19	0,04	0,16		
CP3	3,94	CP6	3812	4,09	CP2	53,60	161,20	3,01	680,10	
Média resistência à compressão (MPa)						Valores médios	53,43	161,17		3,02
Limite inferior RILEM ^e						Desvio padrão	0,15	0,06		0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,29	0,04	0,28		
Desvio padrão compressão					CP3	53,70	160,20	2,98	678,90	
Coef. Variação (%)						Valores médios	53,67	160,10		2,98
Média módulo de deformação secante (MPa)						Desvio padrão	0,06	0,10		0,00
Limite inferior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,11	0,06	0,12		
Limite superior RILEM ^e					CP4	53,20	160,60	3,02	668,10	
Desvio padrão compressão						Valores médios	53,17	160,60		3,02
Coef. Variação (%)						Desvio padrão	0,06	0,00		0,00
Média módulo de deformação secante (MPa)					Coef. Variação (%)	0,11	0,00	0,11		
Limite inferior RILEM ^e					CP5	53,80	161,30	3,00	678,10	
Limite superior RILEM ^e						Valores médios	53,73	161,20		3,00
Desvio padrão compressão						Desvio padrão	0,12	0,10		0,00
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,21	0,06	0,16		
Média módulo de deformação secante (MPa)					CP6	53,90	162,10	3,01	686,20	
Limite inferior RILEM ^e						Valores médios	53,87	162,17		3,01
Limite superior RILEM ^e						Desvio padrão	0,06	0,12		0,01
Desvio padrão compressão					Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,18		
Coef. Variação (%)					Médias gerais	53,51	161,40	3,02	678,23	
Média módulo de deformação secante (MPa)					Desvio padrão geral	0,28	1,04	0,03	5,83	
Limite inferior RILEM ^e					Coef. Variação geral (%)	0,53	0,65	0,89	0,86	
Limite superior RILEM ^e										

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR1688-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) da argamassa industrializada 5 MPa aquecida até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.17, Tabela 9.18, Tabela 9.19 e Tabela 9.20, respectivamente.

Tabela 9.17 – Resultados residuais AI 5 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23,7 °C		Identificação: AI 5		
Umidade Relativa = 60 %		Data da moldagem: 15/12/2021		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 148 dias		
RESULTADOS AI5 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d
	CP1	3,88	CP4	2939
CP2	3,67	CP5	3125	3,66
CP3	3,68	CP6	-	-
Média resistência à compressão (MPa)				3,76
Limite inferior RILEM ^e				3,00
Limite superior RILEM ^e				4,51
Desvio padrão compressão				0,12
Coef. Variação (%)				3,09
Média módulo de deformação secante (MPa)				3032
Limite inferior RILEM ^e				2426
Limite superior RILEM ^e				3638
Desvio padrão compressão				132
Coef. Variação (%)				4,34

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas AI 5 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	672,10	-	-	-
CP2	679,30	-	-	-
CP3	679,20	-	-	-
CP4	672,20	-	-	-
CP5	677,40	-	-	-
CP6	674,90	-	-	-
Média	675,85	-	-	-
Desvio Padrão	3,28	-	-	-
Coef. Variação (%)	0,49	-	-	-

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra AI 5 - 200°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	53,30	160,90	3,02
	53,40	160,60	3,01
	53,30	160,60	3,01
Valores médios	53,33	160,70	3,01
Desvio padrão	0,06	0,17	0,01
Coef. Variação (%)	0,11	0,11	0,19
CP2	53,10	161,80	3,05
	53,00	161,90	3,05
	53,20	161,20	3,03
Valores médios	53,10	161,63	3,04
Desvio padrão	0,10	0,38	0,01
Coef. Variação (%)	0,19	0,23	0,41
CP3	53,30	162,80	3,05
	53,30	162,90	3,06
	53,20	162,80	3,06
Valores médios	53,27	162,83	3,06
Desvio padrão	0,06	0,06	0,00
Coef. Variação (%)	0,11	0,04	0,10
CP4	53,00	161,50	3,05
	53,10	161,50	3,04
	53,00	161,70	3,05
Valores médios	53,03	161,57	3,05
Desvio padrão	0,06	0,12	0,00
Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,16
CP5	53,30	162,30	3,05
	53,20	162,30	3,05
	53,00	162,20	3,06
Valores médios	53,17	162,27	3,05
Desvio padrão	0,15	0,06	0,01
Coef. Variação (%)	0,29	0,04	0,25
CP6	53,10	162,50	3,06
	53,20	162,60	3,06
	53,30	162,30	3,05
Valores médios	53,20	162,47	3,05
Desvio padrão	0,10	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,19	0,09	0,26
Médias gerais	53,18	161,91	3,04
Desvio padrão geral	0,13	0,74	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,24	0,46	0,54

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.18 – Resultados residuais AI 5 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 17,6 °C		Identificação: AI 5		
Umidade Relativa = 46 %		Data da moldagem: 15/12/2021		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 155 dias		
RESULTADOS AI5 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d
	CP1	3,41	CP4	1787
CP2	3,64	CP5	1770	3,39
CP3	3,27	CP6	1660	3,30
Média resistência à compressão (MPa)				3,48
Limite inferior RILEM ^e				2,79
Limite superior RILEM ^e				4,18
Desvio padrão compressão				0,24
Coef. Variação (%)				6,88
Média módulo de deformação secante (MPa)				1739
Limite inferior RILEM ^e				1391
Limite superior RILEM ^e				2087
Desvio padrão compressão				69
Coef. Variação (%)				3,96

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas AI 5 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	686,20	-	-	-
CP4	670,30	-	-	-
CP5	682,40	-	-	-
CP6	665,60	-	-	-
Média	676,13	-	-	-
Desvio Padrão	9,76	-	-	-
Coef. Variação (%)	1,44	-	-	-

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra AI 5 - 400°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	53,30	163,30	3,06
	53,00	163,20	3,08
	52,90	163,00	3,08
Valores médios	53,07	163,17	3,07
Desvio padrão	0,21	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,39	0,09	0,31
CP4	53,20	160,50	3,02
	53,00	160,70	3,03
	52,90	160,60	3,04
Valores médios	53,03	160,60	3,03
Desvio padrão	0,15	0,10	0,01
Coef. Variação (%)	0,29	0,06	0,33
CP5	53,10	162,70	3,06
	53,20	162,70	3,06
	53,00	162,90	3,07
Valores médios	53,10	162,77	3,07
Desvio padrão	0,10	0,12	0,01
Coef. Variação (%)	0,19	0,07	0,25
CP6	53,20	161,30	3,03
	53,40	161,20	3,02
	53,30	161,00	3,02
Valores médios	53,30	161,17	3,02
Desvio padrão	0,10	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,19	0,09	0,24
Médias gerais	53,13	161,93	3,05
Desvio padrão geral	0,17	1,12	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,31	0,69	0,80

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.19 – Resultados residuais AI 5 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 5 - 600°C			
Temperatura = 21,6 °C		Identificação: AI 5			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 30 %		Data da moldagem: 15/12/2021			CP1	52,70	162,30	3,08
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 153 dias				52,80	162,10	3,07
						53,10	162,40	3,06
RESULTADOS AI5 - 600°C					Valores médios	52,87	162,27	3,07
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d		Desvio padrão	0,21	0,15	0,01
CP1	2,72	CP4	617	2,49	Coef. Variação (%)	0,39	0,09	0,35
CP2	2,90	CP5	638	3,03	CP2	53,90	162,80	3,02
CP3	2,49	CP6	656	2,86		53,70	162,60	3,03
						53,50	162,90	3,04
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	53,70	162,77	3,03
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,20	0,15	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,37	0,09	0,41
Desvio padrão compressão					CP3	53,10	160,30	3,02
Coef. Variação (%)						53,30	160,10	3,00
						53,50	160,30	3,00
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	53,30	160,23	3,01
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,20	0,12	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,38	0,07	0,38
Desvio padrão compressão					CP4	54,00	162,90	3,02
Coef. Variação (%)						54,00	163,10	3,02
						53,60	162,90	3,04
Propriedades físicas AI 5 - 600°C ^a					Valores médios	53,87	162,97	3,03
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)	Desvio padrão	0,23	0,12	0,01
CP1	671,60	-	-	-	Coef. Variação (%)	0,43	0,07	0,40
CP2	689,40	-	-	-	CP5	52,60	161,00	3,06
CP3	674,40	-	-	-		52,70	160,90	3,05
CP4	683,10	-	-	-		53,00	160,90	3,04
CP5	682,90	-	-	-	Valores médios	52,77	160,93	3,05
CP6	686,00	-	-	-	Desvio padrão	0,21	0,06	0,01
Média	681,23	-	-	-	Coef. Variação (%)	0,39	0,04	0,42
Desvio Padrão	6,86	-	-	-	CP6	53,20	163,10	3,07
Coef. Variação (%)	1,01	-	-	-		53,30	163,00	3,06
						53,20	163,30	3,07
					Valores médios	53,23	163,13	3,06
					Desvio padrão	0,06	0,15	0,01
					Coef. Variação (%)	0,11	0,09	0,19
					Médias gerais	53,29	162,05	3,04
					Desvio padrão geral	0,44	1,13	0,02
					Coef. Variação geral (%)	0,83	0,70	0,82

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.20 – Resultados residuais AI 5 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 5 - 800°C			
Temperatura = 19,0 °C		Identificação: AI 5			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 36 %		Data da moldagem: 15/12/2021						
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 154 dias			CP1			
RESULTADOS AI5 - 800°C								
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d				
CP1	0,71	CP4	133	0,69				
CP2	0,68	CP5	126	0,57				
CP3	0,72	CP6	139	0,53				
Média resistência à compressão (MPa)				0,65				
Limite inferior RILEM ^e				0,52				
Limite superior RILEM ^e				0,78				
Desvio padrão compressão				0,08				
Coef. Variação (%)				12,37				
Média módulo de deformação secante (MPa)				133				
Limite inferior RILEM ^e				106				
Limite superior RILEM ^e				159				
Desvio padrão compressão				7				
Coef. Variação (%)				4,90				
<p>a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020</p> <p>b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3</p> <p>c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.</p> <p>d = obtida ao final do ensaio de módulo.</p> <p>e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.</p>								
Propriedades físicas AI 5 0 800°C^a								
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)				
CP1	681,80	-	-	-				
CP2	628,50	-	-	-				
CP3	675,50	-	-	-				
CP4	681,80	-	-	-				
CP5	685,60	-	-	-				
CP6	665,30	-	-	-				
Média	669,75	-	-	-				
Desvio Padrão	21,43	-	-	-				
Coef. Variação (%)	3,20	-	-	-				
<p>a= ANTES e DEPOIS da queima.</p>								
					CP2			
					53,00			
					151,20			
					2,85			
					53,00			
					151,10			
					2,85			
					Valores médios			
					53,03			
					151,13			
					2,85			
					Desvio padrão			
					0,06			
					Coef. Variação (%)			
					0,11			
					0,04			
					0,13			
					CP3			
					52,80			
					161,10			
					3,05			
					52,80			
					160,20			
					3,03			
					52,80			
					161,20			
					3,05			
					Valores médios			
					52,80			
					160,83			
					3,05			
					Desvio padrão			
					0,00			
					0,55			
					0,01			
					Coef. Variação (%)			
					0,00			
					0,34			
					0,34			
					CP4			
					53,00			
					164,30			
					3,10			
					53,00			
					164,10			
					3,10			
					53,10			
					163,70			
					3,08			
					Valores médios			
					53,03			
					164,03			
					3,09			
					Desvio padrão			
					0,06			
					0,31			
					0,01			
					Coef. Variação (%)			
					0,11			
					0,19			
					0,29			
					CP5			
					53,30			
					161,90			
					3,04			
					53,40			
					162,00			
					3,03			
					53,30			
					161,90			
					3,04			
					Valores médios			
					53,33			
					161,93			
					3,04			
					Desvio padrão			
					0,06			
					0,06			
					0,00			
					Coef. Variação (%)			
					0,11			
					0,04			
					0,07			
					CP6			
					52,90			
					159,80			
					3,02			
					52,80			
					160,20			
					3,03			
					52,80			
					159,90			
					3,03			
					Valores médios			
					52,83			
					159,97			
					3,03			
					Desvio padrão			
					0,06			
					0,21			
					0,01			
					Coef. Variação (%)			
					0,11			
					0,13			
					0,22			
					Médias gerais			
					53,03			
					160,26			
					3,02			
					Desvio padrão geral			
					0,19			
					4,46			
					0,08			
					Coef. Variação geral (%)			
					0,37			
					2,78			
					2,74			

Fonte: Autor (2022)

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 10 MPa – AI 10

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa industrializada 10 MPa são expostos na Tabela 9.21. Para cada grupo de resultados individuais exibe-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.21 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 10.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 16,7 °C		Identificação: AI 10		
Umidade Relativa = 49 %		Data da moldagem: 14/12/2021		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 156 dias		
RESULTADOS AI10 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	12,12	CP4	5643	13,88
CP2	13,36	CP5	7186	13,29
CP3	14,10	CP6	6662	13,74
Média resistência à compressão (MPa)		13,42		
Limite inferior RILEM ^e		10,73		
Limite superior RILEM ^e		16,10		
Desvio padrão compressão		0,71		
Coef. Variação (%)		5,26		
Média módulo de deformação secante (MPa)		6497		
Limite inferior RILEM ^e		5198		
Limite superior RILEM ^e		7796		
Desvio padrão compressão		785		
Coef. Variação (%)		12,08		

Análise dimensional e massa da amostra AI 10 - T. Ambiente				
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
CP1	53,10	161,70	3,05	693,70
	53,40	161,50	3,02	
	53,30	161,50	3,03	
Valores médios	53,27	161,57	3,03	
Desvio padrão	0,15	0,12	0,01	
Coef. Variação (%)	0,29	0,07	0,36	
CP2	53,40	161,90	3,03	695,20
	53,30	161,80	3,04	
	53,20	161,70	3,04	
Valores médios	53,30	161,80	3,04	
Desvio padrão	0,10	0,10	0,00	
Coef. Variação (%)	0,19	0,06	0,13	
CP3	52,90	162,40	3,07	698,60
	52,80	162,40	3,08	
	53,30	162,70	3,05	
Valores médios	53,00	162,50	3,07	
Desvio padrão	0,26	0,17	0,01	
Coef. Variação (%)	0,50	0,11	0,39	
CP4	53,70	160,60	2,99	697,20
	53,70	160,70	2,99	
	53,40	160,60	3,01	
Valores médios	53,60	160,63	3,00	
Desvio padrão	0,17	0,06	0,01	
Coef. Variação (%)	0,32	0,04	0,31	
CP5	53,90	161,80	3,00	704,00
	53,80	161,80	3,01	
	53,80	161,60	3,00	
Valores médios	53,83	161,73	3,00	
Desvio padrão	0,06	0,12	0,00	
Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,09	
CP6	52,90	162,10	3,06	693,80
	53,30	161,90	3,04	
	53,30	161,80	3,04	
Valores médios	53,17	161,93	3,05	
Desvio padrão	0,23	0,15	0,02	
Coef. Variação (%)	0,43	0,09	0,53	
Médias gerais	53,36	161,69	3,03	697,08
Desvio padrão geral	0,32	0,58	0,03	3,90
Coef. Variação geral (%)	0,60	0,36	0,85	0,56

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) da argamassa industrializada 10 MPa aquecida até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela, Tabela 9.22, Tabela 9.23, Tabela 9.24 e Tabela 9.25.

Tabela 9.22 – Resultados residuais AI 10 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 10 - 200°C			
Temperatura = 18,7 °C		Identificação: AI 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 45 %		Data da moldagem: 14/12/2021			CP1	52,90	162,40	3,07
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 157 dias				53,20	162,50	3,05
RESULTADOS AI10 - 200°C					53,20	162,40	3,05	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^a	Valores médios	53,10	162,43	3,06
CP1	13,09	CP4	6112	15,09	Desvio padrão	0,17	0,06	0,01
CP2	13,33	CP5	6065	14,43	Coef. Variação (%)	0,33	0,04	0,31
CP3	13,61	CP6	5672	13,70	CP2	53,00	161,80	3,05
Média resistência à compressão (MPa)				13,87		53,20	162,20	3,05
Limite inferior RILEM ^e				11,10	53,90	162,00	3,01	
Limite superior RILEM ^e				16,65	Valores médios	53,37	162,00	3,04
Desvio padrão compressão				0,75	Desvio padrão	0,47	0,20	0,03
Coef. Variação (%)				5,38	Coef. Variação (%)	0,89	0,12	0,86
Média módulo de deformação secante (MPa)				5950	CP3	53,80	160,90	2,99
Limite inferior RILEM ^e				4760		53,90	160,90	2,99
Limite superior RILEM ^e				7140	53,80	160,90	2,99	
Desvio padrão compressão				242	Valores médios	53,83	160,90	2,99
Coef. Variação (%)				4,06	Desvio padrão	0,06	0,00	0,00
					Coef. Variação (%)	0,11	0,00	0,11
					CP4	53,60	162,50	3,03
						53,90	162,70	3,02
					53,90	162,60	3,02	
					Valores médios	53,80	162,60	3,02
					Desvio padrão	0,17	0,10	0,01
					Coef. Variação (%)	0,32	0,06	0,27
					CP5	52,90	161,00	3,04
						52,80	160,80	3,05
					53,10	161,10	3,03	
					Valores médios	52,93	160,97	3,04
					Desvio padrão	0,15	0,15	0,01
					Coef. Variação (%)	0,29	0,09	0,20
					CP6	53,50	161,00	3,01
						53,80	161,20	3,00
					53,50	161,00	3,01	
					Valores médios	53,60	161,07	3,00
					Desvio padrão	0,17	0,12	0,01
					Coef. Variação (%)	0,32	0,07	0,25
					Médias gerais	53,44	161,66	3,03
					Desvio padrão geral	0,40	0,74	0,03
					Coef. Variação geral (%)	0,75	0,46	0,86

Propriedades físicas AI 10 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	693,00	677,6	15,4	2,2
CP2	691,10	675,8	15,3	2,2
CP3	697,10	682,0	15,1	2,2
CP4	707,30	690,0	17,3	2,4
CP5	690,30	676,7	13,6	2,0
CP6	698,00	682,80	15,2	2,2
Média	696,13	680,82	15,32	2,20
Desvio Padrão	6,30	5,33	1,18	0,15
Coef. Variação (%)	0,90	0,78	7,70	6,91

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.23 – Resultados residuais AI 10 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 10 - 400°C			
Temperatura = 22,6 °C		Identificação: AI 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 39 %		Data da moldagem: 14/12/2021			CP1	53,00	161,50	3,05
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 161 dias				52,90	161,50	3,05
						53,20	161,60	3,04
RESULTADOS AI10 - 400°C					Valores médios	53,03	161,53	3,05
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,15	0,06	0,01
	CP1	10,70	CP4		3297	10,34	CP2	53,10
CP2	11,36	CP5	3645	9,44	CP3	53,00	160,70	3,03
CP3	12,52	CP6	3836	11,83	Valores médios	53,13	160,70	3,02
Média resistência à compressão (MPa)				11,03	Desvio padrão	0,15	0,23	0,01
Limite inferior RILEM ^e				8,83	Coef. Variação (%)	0,29	0,14	0,34
Limite superior RILEM ^e				13,24	CP4	53,70	161,00	3,00
Desvio padrão compressão				1,10	53,50	161,00	3,01	
Coef. Variação (%)				10,00	53,10	161,10	3,03	
Média módulo de deformação secante (MPa)				3593	Valores médios	53,43	161,03	3,01
Limite inferior RILEM ^e				2874	Desvio padrão	0,31	0,06	0,02
Limite superior RILEM ^e				4311	Coef. Variação (%)	0,57	0,04	0,61
Desvio padrão compressão				273	CP5	54,10	161,90	2,99
Coef. Variação (%)				7,61	53,80	162,10	3,01	
					53,60	162,00	3,02	
					Valores médios	53,83	162,00	3,01
					Desvio padrão	0,25	0,10	0,02
					Coef. Variação (%)	0,47	0,06	0,51
					CP6	53,30	163,10	3,06
					53,20	162,90	3,06	
					53,30	162,70	3,05	
					Valores médios	53,27	162,90	3,06
					Desvio padrão	0,06	0,20	0,01
					Coef. Variação (%)	0,11	0,12	0,16
					Médias gerais	53,41	161,73	3,03
					Desvio padrão geral	0,35	0,72	0,02
					Coef. Variação geral (%)	0,66	0,45	0,70

Propriedades físicas AI 10 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	688,70	670,6	18,1	2,6
CP2	688,20	669,4	18,8	2,7
CP3	697,90	679,5	18,4	2,6
CP4	703,90	685,2	18,7	2,7
CP5	700,30	679,5	20,8	3,0
CP6	692,30	673,40	18,9	2,7
Média	695,22	676,27	18,95	2,73
Desvio Padrão	6,46	6,14	0,95	0,13
Coef. Variação (%)	0,93	0,91	5,03	4,70

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

== ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.24 – Resultados residuais AI 10 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 10 - 600°C						
Temperatura = 24,2 °C		Identificação: AI 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D			
Umidade Relativa = 33 %		Data da moldagem: 14/12/2021			CP1	53,70	161,10	3,00			
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 162 dias				53,60	160,90	3,00			
						53,60	161,10	3,01			
RESULTADOS AI10 - 600°C								Valores médios	53,63	161,03	3,00
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d		Desvio padrão		0,06	0,12	0,00	
CP1	9,29	CP4	1540	8,46		Coef. Variação (%)		0,11	0,07	0,09	
CP2	8,95	CP5	1527	8,44		CP2	53,20	161,90	3,04		
CP3	8,31	CP6	1557	8,73			53,30	161,40	3,03		
							53,20	161,80	3,04		
Média resistência à compressão (MPa)				8,70		Valores médios	53,23	161,70	3,04		
Limite inferior RILEM ^e				6,96		Desvio padrão		0,06	0,26	0,01	
Limite superior RILEM ^e				10,44		Coef. Variação (%)		0,11	0,16	0,27	
Desvio padrão compressão				0,37		CP3	53,50	162,40	3,04		
Coef. Variação (%)				4,27			53,50	161,80	3,02		
							53,00	161,90	3,05		
Média módulo de deformação secante (MPa)				1541		Valores médios	53,33	162,03	3,04		
Limite inferior RILEM ^e				1233		Desvio padrão		0,29	0,32	0,02	
Limite superior RILEM ^e				1850		Coef. Variação (%)		0,54	0,20	0,51	
Desvio padrão compressão				15		CP4	53,60	163,70	3,05		
Coef. Variação (%)				0,98			53,90	163,70	3,04		
							54,00	164,00	3,04		
Propriedades físicas AI 10 - 600°C ^a								Valores médios	53,83	163,80	3,04
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)	Desvio padrão		0,21	0,17	0,01		
CP1	701,10	672,00	29,1	4,2	Coef. Variação (%)		0,39	0,11	0,32		
CP2	694,00	665,80	28,2	4,1	CP5	53,00	161,30	3,04			
CP3	692,50	664,50	28,0	4,0		53,20	161,00	3,03			
CP4	708,50	680,90	27,6	3,9		53,00	161,40	3,05			
CP5	690,90	662,30	28,6	4,1	Valores médios	53,07	161,23	3,04			
CP6	693,00	665,40	27,6	4,0	Desvio padrão		0,12	0,21	0,01		
Média	696,67	668,48	28,18	4,05	Coef. Variação (%)		0,22	0,13	0,34		
Desvio Padrão	6,79	6,89	0,59	0,10	CP6	53,20	161,30	3,03			
Coef. Variação (%)	0,98	1,03	2,09	2,39		53,10	161,20	3,04			
						53,20	161,30	3,03			
Médias gerais								53,17	161,27	3,03	
Desvio padrão geral								0,06	0,06	0,00	
Coef. Variação (%)								0,11	0,04	0,07	
Médias gerais								53,38	161,84	3,03	
Desvio padrão geral								0,31	0,98	0,02	
Coef. Variação geral (%)								0,58	0,60	0,53	

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.25 – Resultados residuais AI 10 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 10 - 800°C					
Temperatura = 23,3°C		Identificação: AI 10			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D		
Umidade Relativa = 40 %		Data da moldagem: 14/12/2021			CP1	53,20	161,60	3,04		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 163 dias				53,30	162,00	3,03		
RESULTADOS AI10 - 800°C								53,30	161,50	3,03
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	53,33	161,70	3,03		
CP1	2,40	CP4	379	2,12	Desvio padrão	0,15	0,26	0,01		
CP2	2,51	CP5	411	2,28	Coef. Variação (%)	0,29	0,16	0,17		
CP3	2,26	CP6	387	2,30	CP2	53,20	161,20	3,03		
Média resistência à compressão (MPa)				2,31		53,30	161,60	3,03		
Limite inferior RILEM ^e				1,85	53,10	161,30	3,04			
Limite superior RILEM ^e				2,77	Valores médios	53,20	161,37	3,03		
Desvio padrão compressão				0,13	Desvio padrão	0,10	0,21	0,00		
Coef. Variação (%)				5,83	Coef. Variação (%)	0,19	0,13	0,13		
Média módulo de deformação secante (MPa)				392	CP3	53,00	161,90	3,05		
Limite inferior RILEM ^e				314		53,10	161,80	3,05		
Limite superior RILEM ^e				471	53,90	162,00	3,01			
Desvio padrão compressão				17	Valores médios	53,33	161,90	3,04		
Coef. Variação (%)				4,24	Desvio padrão	0,49	0,10	0,03		
					Coef. Variação (%)	0,92	0,06	0,87		
					CP4	53,00	163,60	3,09		
						53,00	163,60	3,09		
					53,30	163,30	3,06			
					Valores médios	53,10	163,50	3,08		
					Desvio padrão	0,17	0,17	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,33	0,11	0,43		
					CP5	53,40	163,40	3,06		
						53,80	163,30	3,04		
					53,70	163,60	3,05			
					Valores médios	53,63	163,43	3,05		
					Desvio padrão	0,21	0,15	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,39	0,09	0,40		
					CP6	53,70	162,00	3,02		
						53,70	162,20	3,02		
					53,70	162,40	3,02			
					Valores médios	53,70	162,20	3,02		
					Desvio padrão	0,00	0,20	0,00		
					Coef. Variação (%)	0,00	0,12	0,12		
					Médias gerais	53,38	162,35	3,04		
					Desvio padrão geral	0,30	0,87	0,02		
					Coef. Variação geral (%)	0,56	0,53	0,73		

Propriedades físicas AI 10 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	697,30	619,2	78,1	11,2
CP2	695,70	620,6	75,1	10,8
CP3	693,00	617,8	75,2	10,9
CP4	703,60	627,2	76,4	10,9
CP5	709,50	634,5	75,0	10,6
CP6	704,50	630,30	74,2	10,5
Média	700,60	624,93	75,67	10,80
Desvio Padrão	6,26	6,75	1,39	0,24
Coef. Variação (%)	0,89	1,08	1,83	2,23

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

ARGAMASSA INDUSTRIALIZADA 20 MPa – AI 20

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) da argamassa industrializada 20 MPa são exibidos na Tabela 9.26. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.26 – Resultados de referência para propriedades residuais AI 20.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 20,8 °C		Identificação: AI 20		
Umidade Relativa = 54 %		Data da moldagem: 17/12/2021		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 161 dias		
RESULTADOS AI20 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	22,94	CP4	10246	22,52
CP2	22,42	CP5	10553	22,38
CP3	22,06	CP6	10256	22,98
Média resistência à compressão (MPa)		22,55		
Limite inferior RILEM ^e		18,04		
Limite superior RILEM ^e		27,06		
Desvio padrão compressão		0,35		
Coef. Variação (%)		1,57		
Média módulo de deformação secante (MPa)		10352		
Limite inferior RILEM ^e		8281		
Limite superior RILEM ^e		12422		
Desvio padrão compressão		174		
Coef. Variação (%)		1,69		
<small>a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5. d = obtida ao final do ensaio de módulo. e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.</small>				
Análise dimensional da amostra AI 20 - T. Ambiente				
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
CP1	52,80	160,10	3,03	729,30
	53,00	160,30	3,02	
	53,40	160,60	3,01	
Valores médios	53,07	160,33	3,02	
Desvio padrão	0,31	0,25	0,01	
Coef. Variação (%)	0,58	0,16	0,42	
CP2	53,40	161,50	3,02	737,60
	53,30	161,80	3,04	
	53,40	161,30	3,02	
Valores médios	53,37	161,53	3,03	
Desvio padrão	0,06	0,25	0,01	
Coef. Variação (%)	0,11	0,16	0,26	
CP3	52,90	160,70	3,04	729,80
	53,20	160,80	3,02	
	52,90	160,70	3,04	
Valores médios	53,00	160,73	3,03	
Desvio padrão	0,17	0,06	0,01	
Coef. Variação (%)	0,33	0,04	0,29	
CP4	53,70	162,10	3,02	742,80
	53,90	161,70	3,00	
	53,90	161,80	3,00	
Valores médios	53,83	161,87	3,01	
Desvio padrão	0,12	0,21	0,01	
Coef. Variação (%)	0,21	0,13	0,34	
CP5	53,20	159,20	2,99	736,10
	53,40	159,20	2,98	
	53,20	159,20	2,99	
Valores médios	53,27	159,20	2,99	
Desvio padrão	0,12	0,00	0,01	
Coef. Variação (%)	0,22	0,00	0,22	
CP6	52,60	158,20	3,01	729,70
	52,80	158,00	2,99	
	53,40	158,30	2,96	
Valores médios	52,93	158,17	2,99	
Desvio padrão	0,42	0,15	0,02	
Coef. Variação (%)	0,79	0,10	0,73	
Médias gerais	53,24	160,31	3,01	734,22
Desvio padrão geral	0,37	1,33	0,02	5,53
Coef. Variação geral (%)	0,69	0,83	0,70	0,75

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) da argamassa industrializada 10 MPa aquecida até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.27, Tabela 9.28, Tabela 9.29 e Tabela 9.30, respectivamente.

Tabela 9.27 – Resultados residuais AI 20 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 20 - 200°C					
Temperatura = 21,6 °C		Identificação: AI 20			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D		
Umidade Relativa = 53 %		Data da moldagem: 17/12/2021			CP1	53,00	160,00	3,02		
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 161 dias				52,80	159,80	3,03		
RESULTADOS AI20 - 200°C								53,00	159,90	3,02
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios					
	CP1	23,89	CP4		8409	52,93	159,90	3,02		
CP2	23,70	CP5	8094	22,97	Desvio padrão	0,12	0,10	0,01		
CP3	24,12	CP6	8281	24,83	Coef. Variação (%)	0,22	0,06	0,17		
Média resistência à compressão (MPa)				24,01	CP2	52,80	160,60	3,04		
Limite inferior RILEM ^e				19,21		53,20	160,80	3,02		
Limite superior RILEM ^e				28,81	53,40	160,90	3,01			
Desvio padrão compressão				0,65	Valores médios					
Coef. Variação (%)				2,72	53,13	160,77	3,03			
Média módulo de deformação secante (MPa)				8261	Desvio padrão	0,31	0,15	0,01		
Limite inferior RILEM ^e				6609	Coef. Variação (%)	0,57	0,10	0,48		
Limite superior RILEM ^e				9914	CP3	53,50	159,00	2,97		
Desvio padrão compressão				158		53,50	158,90	2,97		
Coef. Variação (%)				1,92	53,20	158,70	2,98			
					Valores médios					
					53,40	158,87	2,98			
					Desvio padrão	0,17	0,15	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,32	0,10	0,24		
					CP4	53,00	161,40	3,05		
						53,10	161,20	3,04		
					53,10	161,20	3,04			
					Valores médios					
					53,07	161,27	3,04			
					Desvio padrão	0,06	0,12	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,18		
					CP5	52,80	159,60	3,02		
						52,70	159,70	3,03		
					53,20	160,00	3,01			
					Valores médios					
					52,90	159,77	3,02			
					Desvio padrão	0,26	0,21	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,50	0,13	0,39		
					CP6	52,70	159,70	3,03		
						52,80	159,90	3,03		
					53,20	159,80	3,00			
					Valores médios					
					52,90	159,80	3,02			
					Desvio padrão	0,26	0,10	0,01		
					Coef. Variação (%)	0,50	0,06	0,49		
					Médias gerais					
					53,06	160,06	3,02			
					Desvio padrão geral	0,26	0,80	0,02		
					Coef. Variação geral (%)	0,48	0,50	0,74		

Propriedades físicas AI 20 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	727,50	699,2	28,3	3,9
CP2	730,20	702,9	27,3	3,7
CP3	727,50	700,1	27,4	3,8
CP4	731,80	703,7	28,1	3,8
CP5	725,70	699,1	26,6	3,7
CP6	734,90	707,40	27,5	3,7
Média	729,60	702,07	27,53	3,77
Desvio Padrão	3,39	3,25	0,61	0,08
Coef. Variação (%)	0,46	0,46	2,21	2,12

^a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.28 – Resultados residuais AI 20 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		Análise dimensional da amostra AI 20 - 400°C						
Temperatura = 24,4 °C		Identificação: AI 20		Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D			
Umidade Relativa = 51 %		Data da moldagem: 17/12/2021		CP1	52,90	159,00	3,01			
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 164 dias			53,10	158,80	2,99			
RESULTADOS AI20 - 400°C					53,20	158,60	2,98			
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d						
	CP1	17,65	CP4	5121	18,12					
CP2	19,13	CP5	4964	18,12						
CP3	16,23	CP6	4961	17,52						
Média resistência à compressão (MPa)				17,79						
Limite inferior RILEM ^e				14,23						
Limite superior RILEM ^e				21,35						
Desvio padrão compressão				0,95						
Coef. Variação (%)				5,36						
Média módulo de deformação secante (MPa)				5015						
Limite inferior RILEM ^e				4012						
Limite superior RILEM ^e				6018						
Desvio padrão compressão				92						
Coef. Variação (%)				1,82						
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020				CP1				52,90	160,10	3,03
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3				CP2				53,00	160,10	3,02
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.				CP3				53,40	160,10	3,00
d = obtida ao final do ensaio de módulo.				Valores médios				53,10	160,10	3,02
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.				Desvio padrão				0,26	0,00	0,01
				Coef. Variação (%)				0,50	0,00	0,50
				CP4				53,80	160,30	2,98
				CP5				53,80	160,00	2,97
				CP6				53,40	160,00	3,00
				Valores médios				53,67	160,10	2,98
				Desvio padrão				0,23	0,17	0,01
				Coef. Variação (%)				0,43	0,11	0,39
				CP5				53,50	159,00	2,97
				CP6				53,50	158,90	2,97
				CP6				53,20	158,70	2,98
				Valores médios				53,40	158,87	2,98
				Desvio padrão				0,17	0,15	0,01
				Coef. Variação (%)				0,32	0,10	0,24
				Médias gerais				53,23	160,12	3,01
				Desvio padrão geral				0,29	1,11	0,03
				Coef. Variação geral (%)				0,54	0,69	0,97

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.29 – Resultados residuais AI 20 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		Análise dimensional da amostra AI 20 - 600°C				
Temperatura = 22,7 °C		Identificação: AI 20		Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 64 %		Data da moldagem: 17/12/2021		CP1	52,70	159,90	3,03	
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 165 dias			52,70	159,90	3,03	
RESULTADOS AI20 - 600°C					53,10	159,90	3,01	
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d				
CP1	8,63	CP4	1057	8,60				
CP2	8,19	CP5	1180	9,67				
CP3	8,80	CP6	1171	9,24				
Média resistência à compressão (MPa)				8,85				
Limite inferior RILEM ^e				7,08				
Limite superior RILEM ^e				10,62				
Desvio padrão compressão				0,52				
Coef. Variação (%)				5,90				
Média módulo de deformação secante (MPa)				1136				
Limite inferior RILEM ^e				909				
Limite superior RILEM ^e				1363				
Desvio padrão compressão				69				
Coef. Variação (%)				6,04				
					52,90	160,50	3,03	
					53,00	160,70	3,03	
					53,00	160,50	3,03	
					52,97	160,57	3,03	
					Desvio padrão	0,06	0,12	0,00
					Coef. Variação (%)	0,11	0,07	0,10
					CP3	53,20	159,70	3,00
						53,00	159,80	3,02
						53,10	159,80	3,01
					53,10	159,77	3,01	
					Desvio padrão	0,10	0,06	0,01
					Coef. Variação (%)	0,19	0,04	0,22
					CP4	53,20	161,50	3,04
						53,30	161,70	3,03
						53,20	161,80	3,04
					53,23	161,67	3,04	
					Desvio padrão	0,06	0,15	0,00
					Coef. Variação (%)	0,11	0,09	0,13
					CP5	52,90	160,00	3,02
						53,00	159,70	3,01
						53,30	159,70	3,00
					53,07	159,80	3,01	
					Desvio padrão	0,21	0,17	0,01
					Coef. Variação (%)	0,39	0,11	0,47
					CP6	53,50	161,80	3,02
						53,50	161,80	3,02
						53,60	161,80	3,02
					53,53	161,80	3,02	
					Desvio padrão	0,06	0,00	0,00
					Coef. Variação (%)	0,11	0,00	0,11
					Médias gerais	53,12	160,58	3,02
					Desvio padrão geral	0,26	0,89	0,01
					Coef. Variação geral (%)	0,48	0,55	0,42

Propriedades físicas AI 20 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	735,50	688,10	47,4	6,4
CP2	724,10	682,00	42,1	5,8
CP3	721,80	678,50	43,3	6,0
CP4	731,60	686,50	45,1	6,2
CP5	728,40	684,10	44,3	6,1
CP6	744,10	696,80	47,3	6,4
Média	730,92	686,00	44,92	6,14
Desvio Padrão	8,14	6,28	2,14	0,23
Coef. Variação (%)	1,11	0,92	4,76	3,78

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.30 – Resultados residuais AI 20 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra AI 20 - 800°C			
Temperatura = 22,6 °C		Identificação: AI 20			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 69 %		Data da moldagem: 17/12/2021			CP1	53,40	160,80	3,01
Taxa de carregamento ^a = 0,20 MPa/s		Idade de teste: 166 dias				53,40	160,90	3,01
						53,30	160,90	3,02
RESULTADOS AI20 - 800°C					Valores médios	53,37	160,87	3,01
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Tensão de ruptura no ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,06	0,06	0,00
	CP1 ^f	2,58	CP4	393	3,32	Coef. Variação (%)	0,11	0,04
CP2	3,41	CP5	421	3,81	CP2	54,10	159,60	2,95
CP3	2,96	CP6	397	3,76		53,90	159,70	2,96
						53,60	159,70	2,98
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	53,87	159,67	2,96
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,25	0,06	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,47	0,04	0,50
Desvio padrão compressão					CP3	53,90	162,20	3,01
Coef. Variação (%)						53,90	161,80	3,00
						53,60	162,20	3,03
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	53,80	162,07	3,01
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,17	0,23	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,32	0,14	0,41
Desvio padrão compressão					CP4	53,10	160,50	3,02
Coef. Variação (%)						53,20	160,60	3,02
						53,20	160,30	3,01
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	53,17	160,47	3,02
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,06	0,15	0,00
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,11	0,10	0,16
Desvio padrão compressão					CP5	52,90	159,90	3,02
Coef. Variação (%)						52,70	160,10	3,04
						52,80	160,50	3,04
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	52,80	160,17	3,03
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,10	0,31	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,19	0,19	0,31
Desvio padrão compressão					CP6	53,90	159,30	2,96
Coef. Variação (%)						53,90	159,40	2,96
						53,80	159,40	2,96
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	53,87	159,37	2,96
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,06	0,06	0,00
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,11	0,04	0,13
Desvio padrão compressão					Médias gerais	53,48	160,43	3,00
Coef. Variação (%)					Desvio padrão geral	0,43	0,92	0,03
					Coef. Variação geral (%)	0,81	0,57	1,01

Propriedades físicas AI 20 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	722,70	661,8	60,9	8,4
CP2	732,40	670,2	62,2	8,5
CP3	738,50	675,9	62,6	8,5
CP4	725,50	662,8	62,7	8,6
CP5	729,70	667,9	61,8	8,5
CP6	732,50	669,60	62,9	8,6
Média	730,22	668,03	62,18	8,52
Desvio Padrão	5,61	5,20	0,74	0,08
Coef. Variação (%)	0,77	0,78	1,19	0,96

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.
f = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado na média amostral.

Fonte: Autor (2022)

GRAUTES

GRAUTE 15 MPa – G 15

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para o graute de 15 MPa são exibidos na Tabela 9.31. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.31 – Resultados de referência para propriedades residuais G 15.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional e massa da amostra G15 - T. Ambiente				
Temperatura = 24 °C		Identificação: G 15			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
Umidade Relativa = 40 %		Data da moldagem: 13/04/2022			CP1	100,50	295,30	2,94	5105,00
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 91 dias				100,20	294,80	2,94	
RESULTADOS G15 - T. Ambiente					100,70	295,80	2,94	Valores médios	
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,25	0,50		
CP1	22,82	CP4	12231	23,39	Coef. Variação (%)	0,25	0,17	0,08	
CP2	25,07	CP5	12098	24,83	CP2	100,40	294,40	2,93	5090,00
CP3	25,08	CP6	12655	24,76		100,20	294,70	2,94	
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	100,30	294,43	2,94	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,10	0,25	0,00	
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,10	0,09	0,17	
Desvio padrão compressão					CP3	100,00	294,40	2,94	5075,00
Coef. Variação (%)						101,00	293,40	2,90	
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	100,33	293,97	2,93	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,58	0,51	0,02	
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,58	0,17	0,74	
Desvio padrão compressão					CP4	99,60	294,20	2,95	5125,00
Coef. Variação (%)						100,20	294,40	2,94	
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	99,83	294,20	2,95	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,32	0,20	0,01	
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,32	0,07	0,27	
Desvio padrão compressão					CP5	100,70	294,20	2,92	5050,00
Coef. Variação (%)						100,50	293,80	2,92	
Módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	100,60	293,83	2,92	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,10	0,35	0,00	
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,10	0,12	0,10	
Desvio padrão compressão					CP6	99,80	293,60	2,94	5085,00
Coef. Variação (%)						100,40	293,50	2,92	
Módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	100,07	293,30	2,93	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,31	0,44	0,01	
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,31	0,15	0,33	
Desvio padrão compressão					Médias gerais	100,27	294,17	2,93	5088,33
Coef. Variação (%)					Desvio padrão geral	0,37	0,71	0,01	25,63
					Coef. Variação geral (%)	0,37	0,24	0,42	0,50

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para o graute de 15 MPa aquecido até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.32, Tabela 9.33, Tabela 9.34 e Tabela 9.35, respectivamente.

Tabela 9.32 – Resultados residuais G 15 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 15 - 200°C					
Temperatura = 23,6 °C		Identificação: G 15			Corpo de Prova		Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 44 %		Data da moldagem: 13/04/2022			CP1		100,20	294,20	2,94	
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 91 dias					100,40	293,80	2,93	
							100,40	293,80	2,93	
RESULTADOS G15 - 200°C					Valores médios		100,33	293,93	2,93	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Desvio padrão		0,12	0,23	0,01	
		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d			Coef. Variação (%)		0,12	0,08	0,19	
CP1	19,83	CP4	8602	19,36	CP2		100,50	294,20	2,93	
CP2	21,20	CP5	9120	21,07			100,10	294,30	2,94	
CP3	20,95	CP6	8572	19,17			100,00	294,70	2,95	
Média resistência à compressão (MPa)					20,27	Valores médios		100,20	294,40	2,94
Limite inferior RILEM ^e					16,21	Desvio padrão		0,26	0,26	0,01
Limite superior RILEM ^e					24,32	Coef. Variação (%)		0,26	0,09	0,34
Desvio padrão compressão					0,92	CP3		99,30	294,60	2,97
Coef. Variação (%)					4,53			100,00	294,40	2,94
Média módulo de deformação secante (MPa)					8765	Valores médios		99,50	294,57	2,96
Limite inferior RILEM ^e					7012	Desvio padrão		0,44	0,15	0,01
Limite superior RILEM ^e					10518	Coef. Variação (%)		0,44	0,05	0,49
Desvio padrão compressão					308	CP4		100,20	294,20	2,94
Coef. Variação (%)					3,52			100,50	294,40	2,93
						Valores médios		100,20	294,47	2,94
						Desvio padrão		0,30	0,31	0,01
						Coef. Variação (%)		0,30	0,10	0,38
						CP5		100,10	295,80	2,96
								100,80	295,50	2,93
								101,00	295,10	2,92
						Valores médios		100,63	295,47	2,94
						Desvio padrão		0,47	0,35	0,02
						Coef. Variação (%)		0,47	0,12	0,58
						CP6		100,00	294,80	2,95
								100,20	294,80	2,94
								99,40	295,00	2,97
						Valores médios		99,87	294,87	2,95
						Desvio padrão		0,42	0,12	0,01
						Coef. Variação (%)		0,42	0,04	0,46
						Médias gerais		100,12	294,62	2,94
						Desvio padrão geral		0,47	0,53	0,02
						Coef. Variação geral (%)		0,47	0,18	0,51

Propriedades físicas G 15 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5125,00	4965	160,0	3,1
CP2	5095,00	4935	160,0	3,1
CP3	5085,00	4910	175,0	3,4
CP4	5125,00	4970	155,0	3,0
CP5	5120,00	4950,0	170,0	3,3
CP6	5130,00	4965,00	165,0	3,2
Média	5113,33	4949,17	164,17	3,21
Desvio Padrão	18,62	23,11	7,36	0,15
Coef. Variação (%)	0,36	0,47	4,48	4,68

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.33 – Resultados residuais G 15 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 15 - 400°C			
Temperatura = 24,1 °C		Identificação: G 15			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 52 %		Data da moldagem: 13/04/2022			CP1	98,80	295,50	2,99
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 92 dias				99,40	295,00	2,97
						99,60	294,70	2,96
RESULTADOS G15 - 400°C					Valores médios	99,27	295,07	2,97
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão			
					0,42			
CP1	15,95	CP4	5144	15,67	Coef. Variação (%)			
CP2	13,54	CP5	4814	14,67	0,42			
CP3	16,07	CP6	5116	14,97	0,14			
Média resistência à compressão (MPa)					15,15	100,00		
Limite inferior RILEM ^e					12,12	294,80		
Limite superior RILEM ^e					18,18	294,90		
Desvio padrão compressão					0,96	294,30		
Coef. Variação (%)					6,33	2,95		
Média módulo de deformação secante (MPa)					5025	Valores médios		
Limite inferior RILEM ^e					4020	99,77		
Limite superior RILEM ^e					6030	294,67		
Desvio padrão compressão					183	2,95		
Coef. Variação (%)					3,64	Desvio padrão		
						0,40		
						Coef. Variação (%)		
						0,41		
						0,11		
						0,30		
						100,00		
						293,30		
						2,93		
						100,40		
						293,30		
						2,92		
						100,20		
						294,00		
						2,93		
						Valores médios		
						100,20		
						293,53		
						2,93		
						Desvio padrão		
						0,20		
						0,40		
						0,01		
						Coef. Variação (%)		
						0,20		
						0,14		
						0,24		
						100,50		
						293,80		
						2,92		
						100,70		
						294,40		
						2,92		
						99,90		
						294,60		
						2,95		
						Valores médios		
						100,37		
						294,27		
						2,93		
						Desvio padrão		
						0,42		
						0,42		
						0,01		
						Coef. Variação (%)		
						0,41		
						0,14		
						0,50		
						99,40		
						294,00		
						2,96		
						100,00		
						294,00		
						2,94		
						99,80		
						294,60		
						2,95		
						Valores médios		
						99,73		
						294,20		
						2,95		
						Desvio padrão		
						0,31		
						0,35		
						0,01		
						Coef. Variação (%)		
						0,31		
						0,12		
						0,31		
						100,80		
						295,30		
						2,93		
						100,70		
						295,60		
						2,94		
						99,70		
						294,80		
						2,96		
						Valores médios		
						100,40		
						295,23		
						2,94		
						Desvio padrão		
						0,61		
						0,40		
						0,01		
						Coef. Variação (%)		
						0,61		
						0,14		
						0,49		
						Médias gerais		
						99,96		
						294,49		
						2,95		
						Desvio padrão geral		
						0,54		
						0,67		
						0,02		
						Coef. Variação geral (%)		
						0,54		
						0,23		
						0,62		

Propriedades físicas G 15 - 400°C *				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5060,00	4860	200,0	4,0
CP2	5100,00	4900	200,0	3,9
CP3	5100,00	4890	210,0	4,1
CP4	-	4890	-	-
CP5	5105,00	4905,0	200,0	3,9
CP6	5110,00	4895,00	215,0	4,2
Média	5095,00	4890,00	205,00	4,02
Desvio Padrão	20,00	15,81	7,07	0,13
Coef. Variação (%)	0,39	0,32	3,45	3,27

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a = ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.34 – Resultados residuais G 15 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 15 - 600°C			
Temperatura = 24,4 °C		Identificação: G 15			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 41 %		Data da moldagem: 13/04/2022			CP1	100,00	294,80	2,95
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 93 dias				99,90	295,00	2,95
						99,70	294,10	2,95
RESULTADOS G15 - 600°C					Valores médios	99,87	294,63	2,95
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão			
CP1	9,82	CP4	1628	8,69	0,15			
CP2	9,19	CP5	1627	10,48	Coef. Variação (%)			
CP3	9,70	CP6	1587	9,05	0,15			
Média resistência à compressão (MPa)					9,49			
Limite inferior RILEM ^e					7,59			
Limite superior RILEM ^e					11,38			
Desvio padrão compressão					0,64			
Coef. Variação (%)					6,74			
Média módulo de deformação secante (MPa)					1614			
Limite inferior RILEM ^e					1291			
Limite superior RILEM ^e					1937			
Desvio padrão compressão					23			
Coef. Variação (%)					1,45			
a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020								
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3								
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.								
d = obtida ao final do ensaio de módulo.								
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.								
Propriedades físicas G 15 - 600°C ^a								
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)				
CP1	5115,00	4850,00	265,0	5,2	CP5	100,00	292,80	2,93
CP2	5160,00	4890,00	270,0	5,2		100,40	292,70	2,92
CP3	5080,00	4810,00	270,0	5,3		100,00	292,70	2,93
CP4	5105,00	4845,00	260,0	5,1	Valores médios	100,13	292,73	2,92
CP5	5085,00	4820,00	265,0	5,2	Desvio padrão			
CP6	5160,00	4900,00	260,0	5,0	0,23			
Média	5117,50	4852,50	265,00	5,18	CP6	100,00	295,40	2,95
Desvio Padrão	35,32	36,30	4,47	0,10		100,20	295,20	2,95
Coef. Variação (%)	0,69	0,75	1,69	1,92		99,70	295,30	2,96
a= ANTES e DEPOIS da queima.					Valores médios	99,97	295,30	2,95
					Desvio padrão			
					0,25			
					Coef. Variação (%)			
					0,25			
					Médias gerais			
					100,03			
					294,14			
					2,94			
					Desvio padrão geral			
					0,53			
					Coef. Variação geral (%)			
					0,53			

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.35 – Resultados residuais G 15 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 15 - 800°C			
Temperatura = 24,2 °C		Identificação: G 15			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 43 %		Data da moldagem: 13/04/2022			CP1	99,10	293,10	2,96
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 94 dias				99,40	292,80	2,95
						98,50	293,00	2,97
RESULTADOS G15 - 800°C					Valores médios	99,00	292,97	2,96
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,46	0,15	0,01
					Coef. Variação (%)	0,46	0,05	0,49
CP1	4,12	CP4	713	4,03	CP2	99,20	294,40	2,97
CP2	4,15	CP5	737	4,53		99,40	294,50	2,96
CP3	4,11	CP6	677	3,77		98,60	293,80	2,98
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	99,07	294,23	2,97
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,42	0,38	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,42	0,13	0,29
Desvio padrão compressão					CP3	100,00	295,40	2,95
Coef. Variação (%)						100,40	295,20	2,94
						100,20	294,90	2,94
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	100,20	295,17	2,95
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão	0,20	0,25	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)	0,20	0,09	0,25
Desvio padrão compressão					CP4	100,30	291,50	2,91
Coef. Variação (%)						100,80	291,50	2,89
						99,40	291,90	2,94
					Valores médios	100,17	291,63	2,91
					Desvio padrão	0,71	0,23	0,02
					Coef. Variação (%)	0,71	0,08	0,78
					CP5	99,40	294,00	2,96
						100,10	294,50	2,94
						99,70	294,00	2,95
					Valores médios	99,73	294,17	2,95
					Desvio padrão	0,35	0,29	0,01
					Coef. Variação (%)	0,35	0,10	0,27
					CP6	99,30	295,00	2,97
						99,50	294,50	2,96
						99,10	294,20	2,97
					Valores médios	99,30	294,57	2,97
					Desvio padrão	0,20	0,40	0,01
					Coef. Variação (%)	0,20	0,14	0,20
					Médias gerais	99,58	293,79	2,95
					Desvio padrão geral	0,62	1,23	0,02
					Coef. Variação geral (%)	0,62	0,42	0,77

Propriedades físicas G15 - 800°C. ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5070,00	4745	325,0	6,4
CP2	5080,00	4750	330,0	6,5
CP3	5115,00	4770	345,0	6,7
CP4	5075,00	4740	335,0	6,6
CP5	5125,00	4790,0	335,0	6,5
CP6	5060,00	4745,00	315,0	6,2
Média	5087,50	4756,67	330,83	6,50
Desvio Padrão	26,22	19,41	10,21	0,18
Coef. Variação (%)	0,52	0,41	3,08	2,71

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

GRAUTE 25 MPa – G 25

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para o graute de 25 MPa são expostos pela Tabela 9.36. Para cada grupo de resultados individuais exibem-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.36 – Resultados de referência para propriedades residuais G 25.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,7 °C		Identificação: G 25		
Umidade Relativa = 41 %		Data da moldagem: 20/04/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 91 dias		
RESULTADOS G25 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	30,50	CP4	13893	29,61
CP2	29,19	CP5	14628	29,50
CP3	30,58	CP6	14582	31,05
Média resistência à compressão (MPa)		30,07		
Limite inferior RILEM ^e		24,06		
Limite superior RILEM ^e		36,09		
Desvio padrão compressão		0,74		
Coef. Variação (%)		2,46		
Média módulo de deformação secante (MPa)		14368		
Limite inferior RILEM ^e		11494		
Limite superior RILEM ^e		17241		
Desvio padrão compressão		412		
Coef. Variação (%)		2,87		
Análise dimensional e massa da amostra G 25 - T. Ambiente				
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
CP1	99,40	295,40	2,97	5190,00
	100,60	295,00	2,93	
	100,80	294,60	2,92	
Valores médios	100,27	295,00	2,94	
Desvio padrão	0,76	0,40	0,03	
Coef. Variação (%)	0,76	0,14	0,89	
CP2	99,80	293,20	2,94	5185,00
	100,50	293,40	2,92	
	100,10	294,00	2,94	
Valores médios	100,13	293,53	2,93	
Desvio padrão	0,35	0,42	0,01	
Coef. Variação (%)	0,35	0,14	0,36	
CP3	99,30	293,40	2,95	5150,00
	100,00	293,40	2,93	
	99,80	293,50	2,94	
Valores médios	99,70	293,43	2,94	
Desvio padrão	0,36	0,06	0,01	
Coef. Variação (%)	0,36	0,02	0,36	
CP4	99,70	294,10	2,95	5195,00
	100,20	293,50	2,93	
	99,20	293,40	2,96	
Valores médios	99,70	293,67	2,95	
Desvio padrão	0,50	0,38	0,01	
Coef. Variação (%)	0,50	0,13	0,50	
CP5	100,20	294,60	2,94	5185,00
	100,20	294,40	2,94	
	99,40	294,50	2,96	
Valores médios	99,93	294,50	2,95	
Desvio padrão	0,46	0,10	0,01	
Coef. Variação (%)	0,46	0,03	0,46	
CP6	99,30	293,40	2,95	5205,00
	100,40	293,30	2,92	
	100,40	294,00	2,93	
Valores médios	100,03	293,57	2,93	
Desvio padrão	0,64	0,38	0,02	
Coef. Variação (%)	0,63	0,13	0,60	
Médias gerais	99,96	293,95	2,94	5185,00
Desvio padrão geral	0,50	0,66	0,01	18,71
Coef. Variação geral (%)	0,50	0,23	0,51	0,36

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para o graute de 25 MPa aquecido até 200, 400, 600 e 800°C estão na Tabela 9.37, Tabela 9.38, Tabela 9.39 e Tabela 9.40, respectivamente.

Tabela 9.37 – Resultados residuais G 25 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 21,8 °C		Identificação: G 25		
Umidade Relativa = 32 %		Data da moldagem: 20/04/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 93 dias		
RESULTADOS G25 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	25,97	CP4	11137	26,52
CP2	28,90	CP5	10756	24,79
CP3	25,83	CP6	10532	26,15
Média resistência à compressão (MPa)				26,36
Limite inferior RILEM ^e				21,08
Limite superior RILEM ^e				31,63
Desvio padrão compressão				1,37
Coef. Variação (%)				5,21
Média módulo de deformação secante (MPa)				10808
Limite inferior RILEM ^e				8647
Limite superior RILEM ^e				12970
Desvio padrão compressão				306
Coef. Variação (%)				2,83

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas G 25 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5200,00	4990	210,0	4,0
CP2	5115,00	4915	200,0	3,9
CP3	5145,00	4955	190,0	3,7
CP4	5185,00	4985	200,0	3,9
CP5	5195,00	4990	205,0	3,9
CP6	5200,00	5000,00	200,0	3,8
Média	5173,33	4972,50	200,83	3,88
Desvio Padrão	35,31	32,05	6,65	0,12
Coef. Variação (%)	0,68	0,64	3,31	2,98

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Análise dimensional da amostra G 25 - 200°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	99,60	293,90	2,95
	100,40	294,00	2,93
	100,40	294,70	2,94
Valores médios	100,13	294,20	2,94
Desvio padrão	0,46	0,44	0,01
Coef. Variação (%)	0,46	0,15	0,39
CP2	99,10	293,50	2,96
	99,30	294,20	2,96
	98,30	294,00	2,99
Valores médios	98,90	293,90	2,97
Desvio padrão	0,53	0,36	0,02
Coef. Variação (%)	0,54	0,12	0,56
CP3	100,00	290,50	2,91
	100,40	290,40	2,89
	100,00	291,00	2,91
Valores médios	100,13	290,63	2,90
Desvio padrão	0,23	0,32	0,01
Coef. Variação (%)	0,23	0,11	0,31
CP4	100,00	293,40	2,93
	100,10	293,60	2,93
	99,30	294,20	2,96
Valores médios	99,80	293,73	2,94
Desvio padrão	0,44	0,42	0,02
Coef. Variação (%)	0,44	0,14	0,57
CP5	99,80	294,10	2,95
	100,30	294,00	2,93
	100,00	293,60	2,94
Valores médios	100,03	293,90	2,94
Desvio padrão	0,25	0,26	0,01
Coef. Variação (%)	0,25	0,09	0,27
CP6	99,90	294,80	2,95
	100,50	295,00	2,94
	100,30	294,40	2,94
Valores médios	100,23	294,73	2,94
Desvio padrão	0,31	0,31	0,01
Coef. Variação (%)	0,30	0,10	0,31
Médias gerais	99,87	293,52	2,94
Desvio padrão geral	0,57	1,40	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,57	0,48	0,79

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.38 – Resultados residuais G 25 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 25 - 400°C				
Temperatura = 24,3 °C		Identificação: G 25			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 48 %		Data da moldagem: 20/04/2022			CP1	99,20	294,80	2,97	
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 92 dias				100,30	295,10	2,94	
						100,20	295,00	2,94	
RESULTADOS G25 - 400°C					Valores médios	99,90	294,97	2,95	
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Desvio padrão	0,61	0,15	0,02	
	CP1	19,82	CP4		6205	23,04	Coef. Variação (%)	0,61	0,05
CP2	20,07	CP5	6328	21,00	CP2	99,10	293,20	2,96	
CP3	19,17	CP6	6292	20,78		99,50	292,70	2,94	
						99,00	292,80	2,96	
Média resistência à compressão (MPa)					20,65	Valores médios	99,20	292,90	2,95
Limite inferior RILEM ^e					16,52	Desvio padrão	0,26	0,26	0,01
Limite superior RILEM ^e					24,78	Coef. Variação (%)	0,27	0,09	0,32
Desvio padrão compressão					1,35	CP3	98,50	294,40	2,99
Coef. Variação (%)					6,52		99,30	294,50	2,97
							99,30	294,90	2,97
Média módulo de deformação secante (MPa)					6275	Valores médios	99,03	294,60	2,97
Limite inferior RILEM ^e					5020	Desvio padrão	0,46	0,26	0,01
Limite superior RILEM ^e					7530	Coef. Variação (%)	0,47	0,09	0,41
Desvio padrão compressão					63	CP4	99,90	293,80	2,94
Coef. Variação (%)					1,01		100,60	293,50	2,92
							100,40	293,40	2,92
						Valores médios	100,30	293,57	2,93
						Desvio padrão	0,36	0,21	0,01
						Coef. Variação (%)	0,36	0,07	0,42
						CP5	98,80	292,00	2,96
							99,70	292,00	2,93
							99,60	292,20	2,93
						Valores médios	99,37	292,07	2,94
						Desvio padrão	0,49	0,12	0,01
						Coef. Variação (%)	0,50	0,04	0,48
						CP6	99,90	292,50	2,93
							100,20	293,00	2,92
							100,20	293,20	2,93
						Valores médios	100,10	292,90	2,93
						Desvio padrão	0,17	0,36	0,00
						Coef. Variação (%)	0,17	0,12	0,06
						Médias gerais	99,65	293,50	2,95
						Desvio padrão geral	0,60	1,06	0,02
						Coef. Variação geral (%)	0,60	0,36	0,68

Propriedades físicas G 25 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5200,00	4940	260,0	5,0
CP2	5110,00	4855	255,0	5,0
CP3	5155,00	4885	270,0	5,2
CP4	5180,00	4925	255,0	4,9
CP5	5140,00	4895	245,0	4,8
CP6	5145,00	4910	235,0	4,6
Média	5155,00	4901,67	253,33	4,91
Desvio Padrão	31,62	30,28	12,11	0,23
Coef. Variação (%)	0,61	0,62	4,78	4,64

a= taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.39 – Resultados residuais G 25 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 25 - 600°C				
Temperatura = 24,8 °C		Identificação: G 25			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 40 %		Data da moldagem: 20/04/2022			CP1	100,00	294,70	2,95	
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 91 dias				100,30	294,20	2,93	
RESULTADOS G25 - 600°C						99,80	294,10	2,95	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	100,03	294,33	2,94	
CP1	12,13	CP4	1974	12,27	Desvio padrão	0,25	0,32	0,01	
CP2	12,47	CP5	1752	10,79	Coef. Variação (%)	0,25	0,11	0,27	
CP3	12,03	CP6	1849	11,78	CP2	99,30	294,00	2,96	
Média resistência à compressão (MPa)						11,91	99,77	293,77	2,94
Limite inferior RILEM ^e						9,53	Desvio padrão	0,40	0,25
Limite superior RILEM ^e					14,29	Coef. Variação (%)	0,41	0,09	
Desvio padrão compressão					0,60	CP3	99,30	294,60	2,97
Coef. Variação (%)					5,02		100,50	294,20	2,93
Média módulo de deformação secante (MPa)					1858		101,20	294,00	2,91
Limite inferior RILEM ^e					1487	Valores médios	100,33	294,27	2,93
Limite superior RILEM ^e					2230	Desvio padrão	0,96	0,31	0,03
Desvio padrão compressão					111	Coef. Variação (%)	0,96	0,10	1,06
Coef. Variação (%)					5,99	CP4	99,40	294,00	2,96
							100,10	293,90	2,94
							99,70	293,80	2,95
						Valores médios	99,73	293,90	2,95
						Desvio padrão	0,35	0,10	0,01
						Coef. Variação (%)	0,35	0,03	0,37
						CP5	99,70	294,70	2,96
							100,10	294,90	2,95
							99,60	295,30	2,96
						Valores médios	99,80	294,97	2,96
						Desvio padrão	0,26	0,31	0,01
						Coef. Variação (%)	0,27	0,10	0,32
						CP6	99,90	291,70	2,92
							100,20	291,60	2,91
							99,70	291,60	2,92
						Valores médios	99,93	291,63	2,92
						Desvio padrão	0,25	0,06	0,01
						Coef. Variação (%)	0,25	0,02	0,25
						Médias gerais	99,93	293,81	2,94
						Desvio padrão geral	0,46	1,10	0,02
						Coef. Variação geral (%)	0,46	0,37	0,61

Propriedades físicas G 25 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5210,00	4880,00	330,0	6,3
CP2	5175,00	4840,00	335,0	6,5
CP3	5205,00	4895,00	310,0	6,0
CP4	5195,00	4870,00	325,0	6,3
CP5	5190,00	4875,00	315,0	6,1
CP6	5155,00	4845,00	310,0	6,0
Média	5188,33	4867,50	320,83	6,18
Desvio Padrão	20,41	21,15	10,68	0,20
Coef. Variação (%)	0,39	0,43	3,33	3,28

^a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.40 – Resultados residuais G 25 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 25,3 °C		Identificação: G 25		
Umidade Relativa = 44 %		Data da moldagem: 20/04/2022		
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 90 dias		
RESULTADOS G25 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	4,89	CP4	845	4,96
CP2	5,40	CP5	898	5,58
CP3	5,09	CP6	887	5,17
Média resistência à compressão (MPa)				5,18
Limite inferior RILEM ^e				4,15
Limite superior RILEM ^e				6,22
Desvio padrão compressão				0,27
Coef. Variação (%)				5,15
Média módulo de deformação secante (MPa)				877
Limite inferior RILEM ^e				701
Limite superior RILEM ^e				1052
Desvio padrão compressão				28
Coef. Variação (%)				3,19

Análise dimensional da amostra G 25 - 800°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	100,00	293,00	2,93
	100,30	292,80	2,92
	99,97	293,00	2,93
Valores médios	100,09	292,93	2,93
Desvio padrão	0,18	0,12	0,01
Coef. Variação (%)	0,18	0,04	0,22
CP2	99,10	294,20	2,97
	99,80	294,00	2,95
	99,70	293,90	2,95
Valores médios	99,53	294,03	2,95
Desvio padrão	0,38	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,38	0,05	0,43
CP3	99,10	293,60	2,96
	100,10	293,40	2,93
	100,30	293,40	2,93
Valores médios	99,83	293,47	2,94
Desvio padrão	0,64	0,12	0,02
Coef. Variação (%)	0,64	0,04	0,69
CP4	99,50	294,30	2,96
	100,30	294,00	2,93
	100,10	294,10	2,94
Valores médios	99,97	294,13	2,94
Desvio padrão	0,42	0,15	0,01
Coef. Variação (%)	0,42	0,05	0,47
CP5	99,60	292,90	2,94
	100,20	293,10	2,93
	99,90	293,80	2,94
Valores médios	99,90	293,27	2,94
Desvio padrão	0,30	0,47	0,01
Coef. Variação (%)	0,30	0,16	0,31
CP6	99,20	294,50	2,97
	100,00	294,40	2,94
	100,20	294,60	2,94
Valores médios	99,80	294,50	2,95
Desvio padrão	0,53	0,10	0,02
Coef. Variação (%)	0,53	0,03	0,53
Médias gerais	99,85	293,72	2,94
Desvio padrão geral	0,41	0,59	0,01
Coef. Variação geral (%)	0,41	0,20	0,51

Propriedades físicas G 25 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5150,00	4770	380,0	7,4
CP2	5170,00	4785	385,0	7,4
CP3	5200,00	4815	385,0	7,4
CP4	5175,00	4790	385,0	7,4
CP5	5165,00	4785,0	380,0	7,4
CP6	5180,00	4795,00	385,0	7,4
Média	5173,33	4790,00	383,33	7,41
Desvio Padrão	16,63	14,83	2,58	0,04
Coef. Variação (%)	0,32	0,31	0,67	0,49

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

GRAUTE 35 MPa – G 35

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para o graute de 35 MPa são exibidos na Tabela 9.41. Para cada grupo de resultados individuais exibem-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.41 – Resultados de referência para propriedades residuais G 35.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 35 - T. Ambiente				
Temperatura = 21 °C		Identificação: G 35			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	Massa (g)
Umidade Relativa = 50 %		Data da moldagem: 27/04/2022			CP1	99,40	294,00	2,96	5195,00
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 92 dias				100,40	293,80	2,93	
RESULTADOS G35 - T. Ambiente						100,90	293,40	2,91	
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	100,23	293,73	2,93	
	CP1	38,92	CP4		14851	Desvio padrão	0,76	0,31	
CP2	36,78	CP5	15641	37,63	Coef. Variação (%)	0,76	0,10	0,86	
CP3	39,80	CP6	14735	39,74	CP2	99,80	293,30	2,94	5160,00
Média resistência à compressão (MPa)						100,30	293,80	2,93	
Limite inferior RILEM ^e						100,20	294,20	2,94	
Limite superior RILEM ^e					Valores médios	100,10	293,77	2,93	
Desvio padrão compressão					Desvio padrão	0,26	0,45	0,00	
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,26	0,15	0,17	
Média módulo de deformação secante (MPa)					CP3	99,70	295,50	2,96	5185,00
Limite inferior RILEM ^e						100,20	294,90	2,94	
Limite superior RILEM ^e						100,00	295,20	2,95	
Desvio padrão compressão					Valores médios	99,97	295,20	2,95	
Coef. Variação (%)					Desvio padrão	0,25	0,30	0,01	
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,25	0,10	0,35	
Média módulo de deformação secante (MPa)					CP4	99,40	293,80	2,96	5150,00
Limite inferior RILEM ^e						100,00	294,20	2,94	
Limite superior RILEM ^e						99,90	293,60	2,94	
Desvio padrão compressão					Valores médios	99,77	293,87	2,95	
Coef. Variação (%)					Desvio padrão	0,32	0,31	0,01	
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,32	0,10	0,30	
Média resistência à compressão (MPa)					CP5	99,90	294,80	2,95	5190,00
Limite inferior RILEM ^e						100,30	294,50	2,94	
Limite superior RILEM ^e						100,00	294,50	2,95	
Desvio padrão compressão					Valores médios	100,07	294,60	2,94	
Coef. Variação (%)					Desvio padrão	0,21	0,17	0,01	
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,21	0,06	0,25	
Média módulo de deformação secante (MPa)					CP6	98,70	293,20	2,97	5100,00
Limite inferior RILEM ^e						99,40	293,60	2,95	
Limite superior RILEM ^e						99,30	294,20	2,96	
Desvio padrão compressão					Valores médios	99,13	293,67	2,96	
Coef. Variação (%)					Desvio padrão	0,38	0,50	0,01	
Coef. Variação (%)					Coef. Variação (%)	0,38	0,17	0,29	
Médias gerais					Valores médios	99,88	294,14	2,95	5163,33
Desvio padrão geral					Desvio padrão geral	0,51	0,66	0,02	35,73
Coef. Variação geral (%)					Coef. Variação geral (%)	0,51	0,22	0,52	0,69

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para o graute de 35 MPa aquecido até 200, 400, 600 e 800°C estão na Tabela 9.42, Tabela 9.43, Tabela 9.44 e Tabela 9.45, respectivamente.

Tabela 9.42 – Resultados residuais G 35 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 35 - 200°C			
Temperatura = 21,4 °C		Identificação: G 35			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 44 %		Data da moldagem: 27/04/2022			CP1	99,30	294,70	2,97
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 92 dias				100,50	294,70	2,93
RESULTADOS G35 - 200°C						100,90	295,10	2,92
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios	100,23	294,83	2,94
CP1	35,88	CP4	12508	34,73	Desvio padrão	0,83	0,23	0,02
CP2	31,40	CP5	-	33,61	Coef. Variação (%)	0,83	0,08	0,78
CP3	35,51	CP6	11832	31,83	CP2	99,00	293,80	2,97
Média resistência à compressão (MPa)				33,83		100,10	294,30	2,94
Limite inferior RILEM ^e				27,06		99,80	294,90	2,95
Limite superior RILEM ^e				40,59	Valores médios	99,63	294,33	2,95
Desvio padrão compressão				1,89	Desvio padrão	0,57	0,55	0,01
Coef. Variação (%)				5,58	Coef. Variação (%)	0,57	0,19	0,47
Média módulo de deformação secante (MPa)				12170	CP3	99,30	290,70	2,93
Limite inferior RILEM ^e				9736		100,40	290,60	2,89
Limite superior RILEM ^e				14604		100,10	291,30	2,91
Desvio padrão compressão				478	Valores médios	99,93	290,87	2,91
Coef. Variação (%)				3,93	Desvio padrão	0,57	0,38	0,02
^a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020 ^b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3 ^c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5. ^d = obtida ao final do ensaio de módulo. ^e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.					CP4	99,40	296,50	2,98
						100,20	296,30	2,96
						100,20	296,20	2,96
					Valores médios	99,93	296,33	2,97
					Desvio padrão	0,46	0,15	0,02
					Coef. Variação (%)	0,46	0,05	0,51
					CP5	98,30	293,80	2,99
						99,30	294,40	2,96
						99,50	293,90	2,95
					Valores médios	99,03	294,03	2,97
					Desvio padrão	0,64	0,32	0,02
					Coef. Variação (%)	0,65	0,11	0,60
					CP6	99,20	294,60	2,97
						100,00	295,10	2,95
						100,20	295,40	2,95
					Valores médios	99,80	295,03	2,96
					Desvio padrão	0,53	0,40	0,01
					Coef. Variação (%)	0,53	0,14	0,40
					Médias gerais	99,76	294,24	2,95
					Desvio padrão geral	0,64	1,75	0,02
					Coef. Variação geral (%)	0,64	0,59	0,83

Propriedades físicas G 35 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5195	4955	240,0	4,6
CP2	5175	4945	230,0	4,4
CP3	5145	4920	225,0	4,4
CP4	5245	5010	235,0	4,5
CP5	5140	4910	230,0	4,5
CP6	5180	4950	230,0	4,4
Média	5180,00	4948,33	231,67	4,47
Desvio Padrão	38,21	35,02	5,16	0,08
Coef. Variação (%)	0,74	0,71	2,23	1,83

^a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.43 – Resultados residuais G 35 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 35 - 400°C			
Temperatura = 22,4 °C		Identificação: G 35			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 53 %		Data da moldagem: 27/04/2022			CP1	100,20	295,30	2,95
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 93 dias				100,70	294,90	2,93
RESULTADOS G35 - 400°C						100,30	294,80	2,94
Resistência à compressão (MPa) ^b	Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d	Valores médios			
	CP1	26,90	CP4		6966	25,86	100,40	295,00
CP2	25,73	CP5	7067	27,10	Desvio padrão	0,26	0,26	0,01
CP3	27,11	CP6	6865	26,40	Coef. Variação (%)	0,26	0,09	0,32
Média resistência à compressão (MPa)				26,52	CP2	99,60	295,10	2,96
Limite inferior RILEM ^e				21,21		99,70	295,00	2,96
Limite superior RILEM ^e				31,82		99,00	295,10	2,98
Desvio padrão compressão				0,62	Valores médios			
Coef. Variação (%)				2,53	99,43	295,07	2,97	
Média módulo de deformação secante (MPa)				6966	Desvio padrão	0,38	0,06	0,01
Limite inferior RILEM ^e				5573	Coef. Variação (%)	0,38	0,02	0,39
Limite superior RILEM ^e				8359	CP3	99,00	292,80	2,96
Desvio padrão compressão				101		99,30	293,00	2,95
Coef. Variação (%)				1,45		98,40	293,20	2,98
					Valores médios			
					98,90	293,00	2,96	
					Desvio padrão	0,46	0,20	0,02
					Coef. Variação (%)	0,46	0,07	0,51
					CP4	99,40	294,00	2,96
						100,30	294,20	2,93
						100,60	293,70	2,92
					Valores médios			
					100,10	293,97	2,94	
					Desvio padrão	0,62	0,25	0,02
					Coef. Variação (%)	0,62	0,09	0,66
					CP5	99,40	292,20	2,94
						100,30	291,90	2,91
						100,10	292,10	2,92
					Valores médios			
					99,93	292,07	2,92	
					Desvio padrão	0,47	0,15	0,02
					Coef. Variação (%)	0,47	0,05	0,52
					CP6	99,80	289,70	2,90
						100,00	290,40	2,90
						99,10	290,40	2,93
					Valores médios			
					99,63	290,17	2,91	
					Desvio padrão	0,47	0,40	0,02
					Coef. Variação (%)	0,47	0,14	0,54
					Médias gerais			
					99,73	293,21	2,94	
					Desvio padrão geral	0,63	1,79	0,02
					Coef. Variação geral (%)	0,63	0,61	0,81

Propriedades físicas G 35 - 400°C *				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5185	4860	325,0	6,3
CP2	5210	4895	315,0	6,0
CP3	5135	4825	310,0	6,0
CP4	5175	4860	315,0	6,1
CP5	5125	4805	320,0	6,2
CP6	5105	4790	315,0	6,2
Média	5155,83	4839,17	316,67	6,14
Desvio Padrão	40,30	39,42	5,16	0,10
Coef. Variação (%)	0,78	0,81	1,63	1,63

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.44 – Resultados residuais G 35 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G 35 - 600°C			
Temperatura = 22,7 °C		Identificação: G 35			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
Umidade Relativa = 36 %		Data da moldagem: 27/04/2022						
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 97 dias						
RESULTADOS G35 - 600°C								
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d				
CP1	15,88	CP4	2249		14,69			
CP2	15,25	CP5	2245	15,55				
CP3	15,27	CP6	2148	14,51				
Média resistência à compressão (MPa)				15,19				
Limite inferior RILEM ^e				12,15				
Limite superior RILEM ^e				18,23				
Desvio padrão compressão				0,51				
Coef. Variação (%)				3,39				
Média módulo de deformação secante (MPa)				2214				
Limite inferior RILEM ^e				1771				
Limite superior RILEM ^e				2657				
Desvio padrão compressão				57				
Coef. Variação (%)				2,58				

Propriedades físicas G 35 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5185	4795,00	390,0	7,5
CP2	5240	4835,00	405,0	7,7
CP3	5185	4795,00	390,0	7,5
CP4	5210	4810,00	400,0	7,7
CP5	5130	4735,00	395,0	7,7
CP6	5080	4675,00	405,0	8,0
Média	5171,67	4774,17	397,50	7,69
Desvio Padrão	57,68	58,69	6,89	0,17
Coef. Variação (%)	1,12	1,23	1,73	2,16

Análise dimensional da amostra G 35 - 600°C			
Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D
CP1	100,00	293,10	2,93
	100,50	293,10	2,92
	100,00	293,90	2,94
Valores médios	100,17	293,37	2,93
Desvio padrão	0,29	0,46	0,01
Coef. Variação (%)	0,29	0,16	0,39
CP2	100,10	296,40	2,96
	100,20	296,00	2,95
	99,70	296,00	2,97
Valores médios	100,00	296,13	2,96
Desvio padrão	0,26	0,23	0,01
Coef. Variação (%)	0,26	0,08	0,25
CP3	99,50	292,60	2,94
	100,50	292,50	2,91
	100,70	293,10	2,91
Valores médios	100,23	292,73	2,92
Desvio padrão	0,64	0,32	0,02
Coef. Variação (%)	0,64	0,11	0,60
CP4	99,70	294,40	2,95
	100,30	295,10	2,94
	100,10	295,00	2,95
Valores médios	100,03	294,83	2,95
Desvio padrão	0,31	0,38	0,01
Coef. Variação (%)	0,31	0,13	0,18
CP5	99,50	291,40	2,93
	100,20	292,00	2,91
	99,20	291,90	2,94
Valores médios	99,63	291,77	2,93
Desvio padrão	0,51	0,32	0,01
Coef. Variação (%)	0,52	0,11	0,48
CP6	98,90	292,60	2,96
	99,40	293,00	2,95
	99,00	293,40	2,96
Valores médios	99,10	293,00	2,96
Desvio padrão	0,26	0,40	0,01
Coef. Variação (%)	0,27	0,14	0,28
Médias gerais	99,86	293,64	2,94
Desvio padrão geral	0,53	1,51	0,02
Coef. Variação geral (%)	0,53	0,52	0,63

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
 b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
 c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
 d = obtida ao final do ensaio de módulo.
 e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.45 – Resultados residuais G 35 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado			Análise dimensional da amostra G35 - 800°C				
Temperatura = 22,7 °C		Identificação: G 35			Corpo de Prova	Diâmetro - D (mm)	Altura - A (mm)	Relação A/D	
Umidade Relativa = 31 %		Data da moldagem: 27/04/2022			CP1	99,80	294,10	2,95	
Taxa de carregamento ^a = 0,50 MPa/s		Idade de teste: 98 dias				100,10	294,60	2,94	
						99,60	294,70	2,96	
RESULTADOS G35 - 800°C					Valores médios	99,83	294,47	2,95	
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c			Desvio padrão		0,25	0,32	0,01
		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d			Coef. Variação (%)		0,25	0,11	0,28
CP1	6,60	CP4	1060	6,41	CP2	99,20	289,90	2,92	
CP2	6,51	CP5	1051	6,41		100,10	290,00	2,90	
CP3	6,67	CP6	1072	6,50		100,00	290,50	2,91	
Média resistência à compressão (MPa)					Valores médios	99,77	290,13	2,91	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão		0,49	0,32	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)		0,49	0,11	0,44
Desvio padrão compressão					CP3	99,70	295,00	2,96	
Coef. Variação (%)						100,50	295,10	2,94	
						100,20	295,40	2,95	
Média módulo de deformação secante (MPa)					Valores médios	100,13	295,17	2,95	
Limite inferior RILEM ^e					Desvio padrão		0,40	0,21	0,01
Limite superior RILEM ^e					Coef. Variação (%)		0,40	0,07	0,38
Desvio padrão compressão					CP4	99,60	293,20	2,94	
Coef. Variação (%)						100,20	293,20	2,93	
						100,00	293,40	2,93	
					Valores médios	99,93	293,27	2,93	
					Desvio padrão		0,31	0,12	0,01
					Coef. Variação (%)		0,31	0,04	0,30
					CP5	99,20	294,60	2,97	
						100,00	294,60	2,95	
						99,80	295,00	2,96	
					Valores médios	99,67	294,73	2,96	
					Desvio padrão		0,42	0,23	0,01
					Coef. Variação (%)		0,42	0,08	0,40
					CP6	99,20	294,30	2,97	
						100,20	294,10	2,94	
						100,30	294,20	2,93	
					Valores médios	99,90	294,20	2,95	
					Desvio padrão		0,61	0,10	0,02
					Coef. Variação (%)		0,61	0,03	0,64
					Médias gerais	99,87	293,66	2,94	
					Desvio padrão geral		0,39	1,74	0,02
					Coef. Variação geral (%)		0,39	0,59	0,66

Propriedades físicas G 35 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	5200	4735	465,0	8,9
CP2	5100	4625	475,0	9,3
CP3	5195	4710	485,0	9,3
CP4	5185	4710	475,0	9,2
CP5	5160	4680,0	480,0	9,3
CP6	5180	4705,00	475,0	9,2
Média	5170,00	4694,17	475,83	9,20
Desvio Padrão	37,01	38,13	6,65	0,15
Coef. Variação (%)	0,72	0,81	1,40	1,62

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020
b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3
c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.
d = obtida ao final do ensaio de módulo.
e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

PRISMAS**PRISMA B6 AC5**

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 6 MPa e argamassa convencional (com cal) de 5 MPa são exibidos na Tabela 9.46. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.46 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B6 AC5.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 20,7 °C		Identificação: B6 AC5		
Umidade Relativa = 47 %		Data da moldagem: 24/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 420 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AC5 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	7,72	CP4	9061	7,13
CP2 ^e	4,97	CP5	7664	6,24
CP3	7,58	CP6	7908	7,34
Média resistência à compressão (MPa)				7,20
Limite inferior RILEM ^f				5,46
Limite superior RILEM ^f				8,19
Desvio padrão compressão				0,58
Coef. Variação (%)				8,10
Média módulo de deformação secante (MPa)				8211
Limite inferior RILEM ^f				6569
Limite superior RILEM ^f				9853
Desvio padrão compressão				746
Coef. Variação (%)				9,09

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B6 AC5 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.47, Tabela 9.48, Tabela 9.49 e Tabela 9.50, respectivamente.

Tabela 9.47 – Resultados prismas B6 AC5 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23,9 °C		Identificação: B6 AC5		
Umidade Relativa = 53 %		Data da moldagem: 24/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 425 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AC5 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	6,63	CP4	6378	8,00
CP2	7,62	CP5	5097	7,28
CP3	6,95	CP6	6243	7,26
Média resistência à compressão (MPa)				7,29
Limite inferior RILEM ^e				5,83
Limite superior RILEM ^e				8,75
Desvio padrão compressão				0,48
Coef. Variação (%)				6,62
Média módulo de deformação secante (MPa)				5906
Limite inferior RILEM ^e				4725
Limite superior RILEM ^e				7087
Desvio padrão compressão				704
Coef. Variação (%)				11,92

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AC5 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25400	25200	200	0,79
CP2	25600	25400	200	0,78
CP3	25650	25450	200	0,78
Média	25550	25350	200	0,78
Desvio Padrão	132,29	132,29	0,00	0,00
Coef. Variação (%)	0,52	0,52	0,00	0,52

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.48 – Resultados prismas B6 AC5 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 22,6 °C		Identificação: B6 AC5		
Umidade Relativa = 69 %		Data da moldagem: 24/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 427 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AC5 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	9,12	CP4	4933	7,12
CP2	7,46	CP5	4602	-
CP3	7,91	CP6	4700	8,06
Média resistência à compressão (MPa)				7,93
Limite inferior RILEM ^e				6,35
Limite superior RILEM ^e				9,52
Desvio padrão compressão				0,76
Coef. Variação (%)				9,58
Média módulo de deformação secante (MPa)				4745
Limite inferior RILEM ^e				3796
Limite superior RILEM ^e				5694
Desvio padrão compressão				170
Coef. Variação (%)				3,58

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AC5 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25900	25550	350	1,35
CP2	25350	25050	300	1,18
CP3	25500	25200	300	1,18
Média	25583	25267	317	1,24
Desvio Padrão	284,31	256,58	28,87	0,10
Coef. Variação (%)	1,11	1,02	9,12	8,00

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.49 – Resultados prismas B6 AC5 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 26,2 °C		Identificação: B6 AC5		
Umidade Relativa = 49 %		Data da moldagem: 24/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 435 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AC5 - 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	4,77	CP4	1816	5,09
CP2	5,62	CP5	1813	5,30
CP3	5,36	CP6	1731	5,72
Média resistência à compressão (MPa)				5,31
Limite inferior RILEM ^e				4,25
Limite superior RILEM ^e				6,37
Desvio padrão compressão				0,35
Coef. Variação (%)				6,56
Média módulo de deformação secante (MPa)				1787
Limite inferior RILEM ^e				1429
Limite superior RILEM ^e				2144
Desvio padrão compressão				48
Coef. Variação (%)				2,70

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AC5 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25650	25150	500	1,95
CP2	25600	25100	500	1,95
CP3	25350	24950	400	1,58
Média	25533	25067	467	1,83
Desvio Padrão	160,73	104,08	57,74	0,22
Coef. Variação (%)	0,63	0,42	12,37	11,80

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.50 – Resultados prismas B6 AC5 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23 °C		Identificação: B6 AC5		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 24/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 438 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AC5 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	2,03	CP4	486	1,77
CP2	1,68	CP5	489	1,75
CP3	1,53	CP6	437	1,47
Média resistência à compressão (MPa)				1,71
Limite inferior RILEM ^e				1,37
Limite superior RILEM ^e				2,05
Desvio padrão compressão				0,20
Coef. Variação (%)				11,76
Média módulo de deformação secante (MPa)				471
Limite inferior RILEM ^e				377
Limite superior RILEM ^e				565
Desvio padrão compressão				29
Coef. Variação (%)				6,20

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AC5 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25500	24600	900	3,53
CP2	25650	24700	950	3,70
CP3	25350	24450	900	3,55
Média	25500	24583	917	3,59
Desvio Padrão	150,00	125,83	28,87	0,10
Coef. Variação (%)	0,59	0,51	3,15	2,65

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

PRISMA B6 AI5

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 6 MPa e argamassa industrializada de 5 MPa constam na Tabela 9.51. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.51 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B6 AI5.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 25,1 °C		Identificação: B6 AI5		
Umidade Relativa = 51 %		Data da moldagem: 02/12/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 157 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AI5 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	6,28	CP4	9480	7,27
CP2	6,73	CP5	9014	6,93
CP3	7,03	CP6	7314	5,67
Média resistência à compressão (MPa)				6,65
Limite inferior RILEM ^e				5,32
Limite superior RILEM ^e				7,98
Desvio padrão compressão				0,59
Coef. Variação (%)				8,82
Média módulo de deformação secante (MPa)				8603
Limite inferior RILEM ^e				6882
Limite superior RILEM ^e				10323
Desvio padrão compressão				1140
Coef. Variação (%)				13,25

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B6 AI5 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.52, Tabela 9.53, Tabela 9.54 e Tabela 9.55, respectivamente.

Tabela 9.52 – Resultados prismas B6 AI5 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,9 °C		Identificação: B6 AI5		
Umidade Relativa = 44 %		Data da moldagem: 02/12/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 160 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AI5 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	7,43	CP4	7684	6,44
CP2	8,96	CP5	8560	8,15
CP3 ^e	6,00	CP6	6559	8,62
Média resistência à compressão (MPa)				7,92
Limite inferior RILEM ^f				6,08
Limite superior RILEM ^f				9,12
Desvio padrão compressão				1,01
Coef. Variação (%)				12,70
Média módulo de deformação secante (MPa)				7601
Limite inferior RILEM ^f				6081
Limite superior RILEM ^f				9121
Desvio padrão compressão				1003
Coef. Variação (%)				13,20

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerados no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AI5 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25750	25550	200	0,78
CP2	25900	25700	200	0,77
CP3	25200	24950	250	0,99
Média	25617	25400	217	0,85
Desvio Padrão	368,56	396,86	28,87	0,13
Coef. Variação (%)	1,44	1,56	13,32	14,84

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.53 – Resultados prismas B6 AI5 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 23 °C		Identificação: B6 AI5		
Umidade Relativa = 46 %		Data da moldagem: 02/12/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 161 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AI5 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	6,06	CP4	3949	6,05
CP2	6,21	CP5	5146	6,25
CP3 ^e	7,61	CP6	3910	5,16
Média resistência à compressão (MPa)				5,95
Limite inferior RILEM ^f				4,98
Limite superior RILEM ^f				7,47
Desvio padrão compressão				0,45
Coef. Variação (%)				7,57
Média módulo de deformação secante (MPa)				4335
Limite inferior RILEM ^f				3468
Limite superior RILEM ^f				5202
Desvio padrão compressão				703
Coef. Variação (%)				16,21

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerados no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AI5 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25750	25450	300	1,17
CP2	25500	25150	350	1,37
CP3	25900	25550	350	1,35
Média	25717	25383	333	1,30
Desvio Padrão	202,07	208,17	28,87	0,11
Coef. Variação (%)	0,79	0,82	8,66	8,81

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.54 – Resultados prismas B6 AI5 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 25 °C		Identificação: B6 AI5		
Umidade Relativa = 57 %		Data da moldagem: 02/12/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 159 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AI5 - 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	5,47	CP4	2035	5,58
CP2	4,50	CP5	1788	4,16
CP3	5,05	CP6	1988	5,44
Média resistência à compressão (MPa)				5,03
Limite inferior RILEM ^e				4,03
Limite superior RILEM ^e				6,04
Desvio padrão compressão				0,58
Coef. Variação (%)				11,61
Média módulo de deformação secante (MPa)				1937
Limite inferior RILEM ^e				1550
Limite superior RILEM ^e				2324
Desvio padrão compressão				131
Coef. Variação (%)				6,77

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AI5 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25400	24850	550	2,17
CP2	25200	24650	550	2,18
CP3	25050	24500	550	2,20
Média	25217	24667	550	2,18
Desvio Padrão	175,59	175,59	0,00	0,02
Coef. Variação (%)	0,70	0,71	0,00	0,70

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.55 – Resultados prismas B6 AI5 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 22,5 °C		Identificação: B6 AI5		
Umidade Relativa = 30 %		Data da moldagem: 02/12/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 164 dias		
RESULTADOS - Prisma B6 AI5 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	1,42	CP4 ^f	483	1,075
CP2	1,22	CP5	491	1,31
CP3 ^e	1,69	CP6	386	1,39
Média resistência à compressão (MPa)				1,34
Limite inferior RILEM ^g				1,08
Limite superior RILEM ^g				1,62
Desvio padrão compressão				0,09
Coef. Variação (%)				6,63
Média módulo de deformação secante (MPa)				453
Limite inferior RILEM ^g				363
Limite superior RILEM ^g				544
Desvio padrão compressão				58
Coef. Variação (%)				12,89

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valores de ruptura excedendo o limite superior. Não considerados no cálculo da média amostral.

f = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B6 AI5 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25300	24200	1100	4,35
CP2	25700	24500	1200	4,67
CP3	25700	24500	1200	4,67
Média	25567	24400	1167	4,56
Desvio Padrão	230,94	173,21	57,74	0,19
Coef. Variação (%)	0,90	0,71	4,95	4,07

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

PRISMA B12 AC10

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 12 MPa e argamassa convencional (com cal) de 10 MPa são expostos na Tabela 9.56. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.56 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B12 AC10.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27,5 °C		Identificação: B12 AC10		
Umidade Relativa = 53 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 376 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AC10 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	10,90	CP4	10761	9,73
CP2	9,86	CP5	11886	10,11
CP3	7,94	CP6	9995	10,85
Média resistência à compressão (MPa)				9,90
Limite inferior RILEM ^e				7,92
Limite superior RILEM ^e				11,88
Desvio padrão compressão				1,08
Coef. Variação (%)				10,90
Média módulo de deformação secante (MPa)				10881
Limite inferior RILEM ^e				8705
Limite superior RILEM ^e				13057
Desvio padrão compressão				951
Coef. Variação (%)				8,74

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B12 AC10 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.57, Tabela 9.58, Tabela 9.59 e Tabela 9.60, respectivamente.

Tabela 9.57 – Resultados prismas B12 AC10 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27 °C		Identificação: B12 AC10		
Umidade Relativa = 56 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 377 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AC10 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	13,44	CP4	9025	11,55
CP2	12,17	CP5	8213	11,62
CP3	10,79	CP6	9319	10,66
Média resistência à compressão (MPa)				11,70
Limite inferior RILEM ^e				9,36
Limite superior RILEM ^e				14,04
Desvio padrão compressão				1,02
Coef. Variação (%)				8,69
Média módulo de deformação secante (MPa)				8852
Limite inferior RILEM ^e				7082
Limite superior RILEM ^e				10623
Desvio padrão compressão				573
Coef. Variação (%)				6,47

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AC10 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26300	25750	550	2,09
CP2	26350	25850	500	1,90
CP3	25600	25050	550	2,15
Média	26083	25550	533	2,05
Desvio Padrão	419,32	435,89	28,87	0,13
Coef. Variação (%)	1,61	1,71	5,41	6,43

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.58 – Resultados prismas B12 AC10 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27 °C		Identificação: B12 AC10		
Umidade Relativa = 56 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 380 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AC10 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	8,58	CP4	6946	9,00
CP2	10,21	CP5	6027	10,01
CP3 ^e	11,72	CP6	6770	8,27
Média resistência à compressão (MPa)				9,21
Limite inferior RILEM ^f				7,71
Limite superior RILEM ^f				11,56
Desvio padrão compressão				0,86
Coef. Variação (%)				9,38
Média módulo de deformação secante (MPa)				6581
Limite inferior RILEM ^f				5265
Limite superior RILEM ^f				7897
Desvio padrão compressão				488
Coef. Variação (%)				7,41

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AC10 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26150	25450	700	2,68
CP2	26600	25900	700	2,63
CP3 ^b	26100	25650	450	1,72
Média	26283	25667	617	2,34
Desvio Padrão	275,38	225,46	144,34	0,54
Coef. Variação (%)	1,05	0,88	23,41	22,93

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.59 – Resultados prismas B12 AC10 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27 °C		Identificação: B12 AC10		
Umidade Relativa = 56 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 383 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AC10 - 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	7,76	CP4	2955	7,49
CP2	6,31	CP5	2462	7,27
CP3	7,94	CP6 ^e	2089	5,57
Média resistência à compressão (MPa)				7,35
Limite inferior RILEM ^f				5,64
Limite superior RILEM ^f				8,47
Desvio padrão compressão				0,91
Coef. Variação (%)				12,42
Média módulo de deformação secante (MPa)				2502
Limite inferior RILEM ^f				2002
Limite superior RILEM ^f				3002
Desvio padrão compressão				434
Coef. Variação (%)				17,36

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AC10 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26250	25400	850	3,24
CP2	26250	25550	700	2,67
CP3 ^b	25800	25000	800	3,10
Média	26100	25317	783	3,00
Desvio Padrão	259,81	284,31	76,38	0,30
Coef. Variação (%)	1,00	1,12	9,75	9,94

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.60 – Resultados prismas B12 AC10 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,6 °C		Identificação: B12 AC10		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 376 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AC10 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	2,08	CP4	664	2,17
CP2	2,28	CP5	661	2,16
CP3	2,42	CP6	604	1,86
Média resistência à compressão (MPa)				2,16
Limite inferior RILEM ^e				1,73
Limite superior RILEM ^e				2,59
Desvio padrão compressão				0,19
Coef. Variação (%)				8,78
Média módulo de deformação secante (MPa)				643
Limite inferior RILEM ^e				514
Limite superior RILEM ^e				772
Desvio padrão compressão				34
Coef. Variação (%)				5,26

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AC10 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26150	24750	1400	5,35
CP2	26150	24700	1450	5,54
CP3 ^b	25800	24450	1350	5,23
Média	26033	24633	1400	5,38
Desvio Padrão	202,07	160,73	50,00	0,16
Coef. Variação (%)	0,78	0,65	3,57	2,93

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

PRISMA B12 A110

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 12 MPa e argamassa industrializada de 10 MPa constam na Tabela 9.61. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.61 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B12 AI10.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27,3 °C		Identificação: B12 AI10		
Umidade Relativa = 37 %		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 407 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AI10 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	8,95	CP4	11418	11,12
CP2	7,91	CP5	10359	9,55
CP3	-	CP6	11686	9,53
Média resistência à compressão (MPa)				9,41
Limite inferior RILEM ^e				7,53
Limite superior RILEM ^e				11,30
Desvio padrão compressão				1,16
Coef. Variação (%)				12,37
Média módulo de deformação secante (MPa)				11154
Limite inferior RILEM ^e				8923
Limite superior RILEM ^e				13385
Desvio padrão compressão				702
Coef. Variação (%)				6,29

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B12 AI10 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.62, Tabela 9.63, Tabela 9.64 e Tabela 9.65, respectivamente.

Tabela 9.62 – Resultados prismas B12 AI10 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,7 °C		Identificação: B12 AI10		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 406 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AI10 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1 ^e	6,50	CP4	10096	11,38
CP2	11,99	CP5	10328	12,13
CP3	-	CP6	10301	12,08
Média resistência à compressão (MPa)				11,90
Limite inferior RILEM ^f				8,65
Limite superior RILEM ^f				12,98
Desvio padrão compressão				0,35
Coef. Variação (%)				2,95
Média módulo de deformação secante (MPa)				10315
Limite inferior RILEM ^f				8193
Limite superior RILEM ^f				12290
Desvio padrão compressão				19
Coef. Variação (%)				0,19

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de módulo aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AI10 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25950	25700	250	0,96
CP2	25550	25250	300	1,17
CP3	-	-	-	-
Média	25750	25475	275	1,07
Desvio Padrão	282,84	318,20	35,36	0,15
Coef. Variação (%)	1,10	1,25	12,86	13,95

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.63 – Resultados prismas B12 AI10 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,7 °C		Identificação: B12 AI10		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 415 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AI10 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	10,64	CP4	7330	9,72
CP2	10,98	CP5	6105	8,33
CP3	-	CP6	8293	11,07
Média resistência à compressão (MPa)		10,15		
Limite inferior RILEM ^e		8,12		
Limite superior RILEM ^e		12,18		
Desvio padrão compressão		1,15		
Coef. Variação (%)		11,31		
Média módulo de deformação secante (MPa)		7243		
Limite inferior RILEM ^e		5794		
Limite superior RILEM ^e		8691		
Desvio padrão compressão		1097		
Coef. Variação (%)		15,14		

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AI10 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	25900	25550	350	1,35
CP2	25950	25650	300	1,16
CP3	-	-	-	-
Média	25925	25600	325	1,25
Desvio Padrão	35,36	70,71	35,36	0,14
Coef. Variação (%)	0,14	0,28	10,88	11,01

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.64 – Resultados prismas B12 AI10 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,7 °C		Identificação: B12 AI10		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 419 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AI10 - Repetição Módulo 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	-	CP4	2463	7,19
CP2	-	CP5	2128	9,18
CP3	-	CP6	1736	7,51
Média resistência à compressão (MPa)				7,96
Limite inferior RILEM ^e				6,37
Limite superior RILEM ^e				9,55
Desvio padrão compressão				1,07
Coef. Variação (%)				13,41
Média módulo de deformação secante (MPa)				2109
Limite inferior RILEM ^e				1687
Limite superior RILEM ^e				2531
Desvio padrão compressão				364
Coef. Variação (%)				17,25

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AI10 - Repetição 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26150	25600	550	2,10
CP2	26150	25600	550	2,10
CP3	26150	25600	550	2,10
Média	26150	25600	550	2,10
Desvio Padrão	0,00	0,00	0,00	0,00
Coef. Variação (%)	0,00	0,00	0,00	0,00

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.65 – Resultados prismas B12 AI10 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,7 °C		Identificação: B12 AI10		
Umidade Relativa = 61 %		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 398 dias		
RESULTADOS - Prisma B12 AI10 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	1,65	CP4 ^e	360	2,02
CP2 ^f	1,25	CP5	450	1,77
CP3	1,56	CP6	490	1,34
Média resistência à compressão (MPa)				1,58
Limite inferior RILEM ^g				1,28
Limite superior RILEM ^g				1,92
Desvio padrão compressão				0,18
Coef. Variação (%)				11,48
Média módulo de deformação secante (MPa)				433
Limite inferior RILEM ^g				347
Limite superior RILEM ^g				520
Desvio padrão compressão				67
Coef. Variação (%)				15,37

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B12 AI10 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	26150	24750	1400	5,35
CP2	25550	24050	1500	5,87
CP3	25800	24400	1400	5,43
Média	25833	24400	1433	5,55
Desvio Padrão	301,39	350,00	57,74	0,28
Coef. Variação (%)	1,17	1,43	4,03	5,04

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)**PRISMA B24 AC20**

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 24 MPa e argamassa convencional (com cal) de 20 MPa são expostos na Tabela 9.66. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.66 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B24 AC20.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 26,5 °C		Identificação: B24 AC20		
Umidade Relativa = 55 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 334 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AC20 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	18,25	CP4	16374	17,50
CP2	19,12	CP5	15636	17,86
CP3	19,50	CP6	16490	17,28
Média resistência à compressão (MPa)				18,25
Limite inferior RILEM ^e				14,60
Limite superior RILEM ^e				21,90
Desvio padrão compressão				0,89
Coef. Variação (%)				4,88
Média módulo de deformação secante (MPa)				16167
Limite inferior RILEM ^e				12933
Limite superior RILEM ^e				19400
Desvio padrão compressão				463
Coef. Variação (%)				2,87

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B12 AC10 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.67, Tabela 9.68, Tabela 9.69 e Tabela 9.70, respectivamente.

Tabela 9.67 – Resultados prismas B24 AC20 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 26 °C		Identificação: B24 AC20		
Umidade Relativa = 55 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 336 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AC20 - 200 °C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1 ^e	22,51	CP4	14140	15,77
CP2 ^e	25,55	CP5	11965	15,71
CP3	16,24	CP6 ^f	13893	9,84
Média resistência à compressão (MPa)				15,90
Limite inferior RILEM ^g				14,08
Limite superior RILEM ^g				21,12
Desvio padrão compressão				0,29
Coef. Variação (%)				1,82
Média módulo de deformação secante (MPa)				13333
Limite inferior RILEM ^g				10666
Limite superior RILEM ^g				15999
Desvio padrão compressão				1191
Coef. Variação (%)				8,93

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valores de ruptura excedendo o limite superior. Não considerados no cálculo da média amostral.

f = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AC20 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	-	28000	-	-
CP2	-	27900	-	-
CP3	-	28000	-	-
Média	-	27967	-	-
Desvio Padrão	-	57,74	-	-
Coef. Variação (%)	-	0,21	-	-

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.68 – Resultados prismas B24 AC20 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 27,9 °C		Identificação: B24 AC20		
Umidade Relativa = 50 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 338 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AC20 - 400 °C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	15,33	CP4	8729	17,35
CP2	14,59	CP5	9073	17,22
CP3	16,48	CP6	9205	16,44
Média resistência à compressão (MPa)				16,23
Limite inferior RILEM ^e				12,99
Limite superior RILEM ^e				19,48
Desvio padrão compressão				1,08
Coef. Variação (%)				6,65
Média módulo de deformação secante (MPa)				9002
Limite inferior RILEM ^e				7202
Limite superior RILEM ^e				10803
Desvio padrão compressão				246
Coef. Variação (%)				2,73

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AC20 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28950	27700	1250	4,32
CP2	28900	27750	1150	3,98
CP3	28700	27600	1100	3,83
Média	28850	27683	1167	4,04
Desvio Padrão	132,29	76,38	76,38	0,25
Coef. Variação (%)	0,46	0,28	6,55	6,15

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.69 – Resultados prismas B24 AC20 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 26,6 °C		Identificação: B24 AC20		
Umidade Relativa = 58 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = Que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 342 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AC20 - 600 °C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	15,11	CP4 ^e	3195	12,61
CP2	15,70	CP5	4174	16,12
CP3	16,51	CP6	4720	14,03
Média resistência à compressão (MPa)				15,01
Limite inferior RILEM ^f				12,01
Limite superior RILEM ^f				18,02
Desvio padrão compressão				1,46
Coef. Variação (%)				9,73
Média módulo de deformação secante (MPa)				4447
Limite inferior RILEM ^f				3224
Limite superior RILEM ^f				4836
Desvio padrão compressão				386
Coef. Variação (%)				8,68

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de módulo aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AC20 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28900	27400	1500	5,19
CP2	28500	27150	1350	4,74
CP3	28450	27150	1300	4,57
Média	28617	27233	1383	4,83
Desvio Padrão	246,64	144,34	104,08	0,32
Coef. Variação (%)	0,86	0,53	7,52	6,65

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.70 – Resultados prismas B24 AC20 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 25,2 °C		Identificação: B24 AC20		
Umidade Relativa = 69 %		Data da moldagem: 23/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = Que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 344 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AC20 - 800 °C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	8,21	CP4	1690	6,30
CP2	6,57	CP5	1714	8,27
CP3	7,25	CP6	1922	7,95
Média resistência à compressão (MPa)				7,43
Limite inferior RILEM ^e				5,94
Limite superior RILEM ^e				8,91
Desvio padrão compressão				0,85
Coef. Variação (%)				11,48
Média módulo de deformação secante (MPa)				1775
Limite inferior RILEM ^e				1420
Limite superior RILEM ^e				2130
Desvio padrão compressão				128
Coef. Variação (%)				7,19

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AC20 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28950	27250	1700	5,87
CP2	28700	26900	1800	6,27
CP3	28750	27000	1750	6,09
Média	28800	27050	1750	6,08
Desvio Padrão	132,29	180,28	50,00	0,20
Coef. Variação (%)	0,46	0,67	2,86	3,29

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

PRISMA B24 AI20

Os resultados de referência (obtidos em temperatura ambiente) para os prismas compostos por blocos 24 MPa e argamassa industrializada de 20 MPa constam na Tabela 9.71. Para cada grupo de resultados individuais apresentam-se os valores de desvio padrão e coeficiente de variação.

Tabela 9.71 – Resultados de referência para propriedades residuais dos prismas B24 AI20.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = não registrado		Identificação: B24 AI20		
Umidade Relativa = não registrado		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min. (ABNT NBR 16868-3:2020)		Idade de teste: 356 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AI20 - T. Ambiente				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	18,02	CP4 ^e	20813	14,36
CP2	22,54	CP5	19231	21,36
CP3	23,67	CP Extra ^f	17394	26,21
Média resistência à compressão (MPa)				21,40
Limite inferior RILEM ^g				16,82
Limite superior RILEM ^g				25,23
Desvio padrão compressão				2,44
Coef. Variação (%)				11,41
Média módulo de deformação secante (MPa)				19146
Limite inferior RILEM ^g				15317
Limite superior RILEM ^g				22975
Desvio padrão compressão				1711
Coef. Variação (%)				8,94

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Fonte: Autor (2022)

Os resultados residuais (obtidos após queima e resfriamento) para os prismas B24 AI20 aquecidos até 200, 400, 600 e 800°C são apresentados pela Tabela 9.72, Tabela 9.73, Tabela 9.74 e Tabela 9.75, respectivamente.

Tabela 9.72 – Resultados prismas B24 AI20 após 200°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura= 25,9 °C		Identificação: B24 AI20		
Umidade Relativa = 69%		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 371 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AI20 - 200°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	21,60	CP4 ^e	16241	26,75
CP2	19,96	CP5	15028	17,68
CP3	20,47	CP6	15413	21,23
Média resistência à compressão (MPa)				20,19
Limite inferior RILEM ^e				17,02
Limite superior RILEM ^e				25,54
Desvio padrão compressão				1,54
Coef. Variação (%)				7,64
Média módulo de deformação secante (MPa)				15561
Limite inferior RILEM ^e				12449
Limite superior RILEM ^e				18673
Desvio padrão compressão				620
Coef. Variação (%)				3,98

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AI20 - 200°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28650	27800	850	2,97
CP2	28900	28100	800	2,77
CP3	28950	28150	800	2,76
Média	28833	28017	817	2,83
Desvio Padrão	160,73	189,30	28,87	0,12
Coef. Variação (%)	0,56	0,68	3,53	4,10

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.73 – Resultados prismas B24 AI20 após 400°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 24,3°C		Identificação: B24 AI20		
Umidade Relativa = 72%		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 357 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AI20 - 400°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	18,23	CP4	9920	18,57
CP2 ^e	24,57	CP5	8740	16,62
CP3	18,72	CP6	9359	18,83
Média resistência à compressão (MPa)				18,19
Limite inferior RILEM ^e				15,40
Limite superior RILEM ^e				23,10
Desvio padrão compressão				0,91
Coef. Variação (%)				4,98
Média módulo de deformação secante (MPa)				9340
Limite inferior RILEM ^e				7472
Limite superior RILEM ^e				11208
Desvio padrão compressão				590
Coef. Variação (%)				6,32

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AI20 - 400°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28400	27350	1050	3,70
CP2	28600	27350	1250	4,37
CP3	29050	27750	1300	4,48
Média	28683	27483	1200	4,18
Desvio Padrão	332,92	230,94	132,29	0,42
Coef. Variação (%)	1,16	0,84	11,02	10,10

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.74 – Resultados prismas B24 AI20 após 600°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 26,2°C		Identificação: B24 AI20		
Umidade Relativa = 60%		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = Que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 367 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AI20 - 600°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	14,96	CP4	3143	13,40
CP2	15,41	CP5 ^e	3452	8,04
CP3	15,07	CP6 ^f	4771	15,14
Média resistência à compressão (MPa)				14,80
Limite inferior RILEM ^g				10,94
Limite superior RILEM ^g				16,41
Desvio padrão compressão				0,80
Coef. Variação (%)				5,39
Média módulo de deformação secante (MPa)				3298
Limite inferior RILEM ^g				3031
Limite superior RILEM ^g				4546
Desvio padrão compressão				218
Coef. Variação (%)				6,63

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura excedendo o limite superior. Não considerados no cálculo da média amostral.

f = Valor de módulo excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AI20 - 600°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28800	27250	1550	5,38
CP2	29000	27450	1550	5,34
CP3	28750	27150	1600	5,57
Média	28850	27283	1567	5,43
Desvio Padrão	132,29	152,75	28,87	0,12
Coef. Variação (%)	0,46	0,56	1,84	2,17

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)

Tabela 9.75 – Resultados prismas B24 AI20 após 800°C.

Ensaio		Material avaliado		
Temperatura = 28,1°C		Identificação: B24 AI20		
Umidade Relativa = 52%		Data da moldagem: 22/02/2022		
Taxa de carregamento ^a = Que garanta ruptura entre 1 e 2 min.		Idade de teste: 374 dias		
RESULTADOS - Prisma B24 AI20 - 800°C				
Resistência à compressão (MPa) ^b		Módulo de deformação secante (MPa) ^c		Resistência após ensaio de módulo (MPa) ^d
CP1	7,36	CP4	1756	6,12
CP2 ^e	4,96	CP5	1514	5,82
CP3 ^f	7,49	CP6	1687	5,52
Média resistência à compressão (MPa)				6,20
Limite inferior RILEM ^g				4,97
Limite superior RILEM ^g				7,45
Desvio padrão compressão				0,81
Coef. Variação (%)				12,99
Média módulo de deformação secante (MPa)				1652
Limite inferior RILEM ^g				1322
Limite superior RILEM ^g				1983
Desvio padrão compressão				125
Coef. Variação (%)				7,55

a = taxa de carregamento proposta pela ABNT NBR16868-3:2020

b = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-3

c = procedimento adaptado da RILEM TC 200 HTC:2007 e RILEM TC 129 MHT-5.

d = obtida ao final do ensaio de módulo.

e = Valor de ruptura aquém do limite inferior. Não considerado no cálculo da média amostral.

f = Valor de módulo excedendo o limite superior. Não considerado no cálculo da média amostral.

g = Limites inferior e superior iguais a 0,8 e 1,2 vezes o valor médio, respectivamente.

Propriedades físicas Prisma B24 AI20 - 800°C ^a				
Corpo de prova	Massa ANTES (g)	Massa DEPOIS (g)	Perda de Massa (g)	Perda de Massa (%)
CP1	28700	26750	1950	6,79
CP2	29250	27200	2050	7,01
CP3	28700	26700	2000	6,97
Média	28883	26883	2000	6,92
Desvio Padrão	317,54	275,38	50,00	0,11
Coef. Variação (%)	1,10	1,02	2,50	1,64

a= ANTES e DEPOIS da queima.

Fonte: Autor (2022)