

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

Wallison Angelim Medeiros

**COMPORTAMENTO DE BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO COM
DIFERENTES AGREGADOS SOB ALTAS TEMPERATURAS**

São Carlos
2022

Wallison Angelim Medeiros

**COMPORTAMENTO DE BLOCOS ESTRUTURAIS DE CONCRETO COM
DIFERENTES AGREGADOS SOB ALTAS TEMPERATURAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, para obtenção do título de Doutor em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas e Geotecnia.

Orientador: Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian

Coorientador: Prof. Dr. Armando Lopes Moreno Jr.

Financiamento: FAPESP - N° Projeto: 2018/19748-9

São Carlos
2022



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 Wallison Angelim Medeiros, realizada em 24/10/2022.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian (UFSCar)

Prof. Dr. Paulo José Brandão Barbosa Lourenço (UMinho)

Prof. Dr. Bernardo Fonseca Tutikian (UNISINOS)

Prof. Dr. Gihad Mohamad (UFSM)

Prof. Dr. Jorge Munaiar Neto (EESC/USP)

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

AGRADECIMENTO

Certamente, Deus esteve presente em muitos momentos ao longo de minha vida e posso afirmar, seguramente, que Ele me ajudou muito nessa jornada do doutoramento. Obrigado Pai, por toda a ajuda infalível e superação dos obstáculos.

Agradeço aos meus pais Adilson e Irene que se doaram para fornecer a maior oportunidade que tenho na vida: a de estudar. Reconheço que meus pais dedicaram as suas vidas em prol da felicidade de seus filhos e, portanto, espero do fundo do meu coração, que a realização do doutoramento sirva como parte da recompensa pelo esforço irrefutável deles. Amo vocês!

Agradeço às minhas irmãs Ceciane e Gardênia, minhas companheiras e melhores amigas, pessoas que mais me encorajam em busca de conhecimento. Ceci e Dene, muito obrigado!

Agradeço ao meu filho Levi e minha sobrinha Malu, minhas fontes inesgotáveis de força de vontade, muito obrigado!

À Cynara Pádua, pela paciência e companheirismo nessa jornada acadêmica. Muito obrigado!

Agradeço muito ao meu orientador, o Prof. Dr. Guilherme Aris Parsekian pela confiança e, principalmente, pela oportunidade fornecida em desenvolver uma pesquisa de tal amplitude e responsabilidade. O Prof. Guilherme me orienta desde o mestrado e além de amigo é um dos maiores responsáveis pela minha realização profissional. Não medindo esforços para ajudar no que for preciso. Lembro com muito carinho, da “hospedagem” em sua própria casa para discutirmos sobre a pesquisa no fim de semana e noites adentro. MUITÍSSIMO obrigado!

Agradeço ao meu coorientador, Prof. Armando Lopes Moreno Jr. que acreditou desde o começo no sucesso da pesquisa, me acolheu na Unicamp e esteve sempre ao meu lado, ajudando em tudo aquilo que foi necessário. Foram várias horas de conversa e direcionamentos sem os quais não conseguiria concluir esse trabalho. MUITÍSSIMO obrigado!

Ao Grupo de Pesquisa de Alvenaria Estrutural em Situação de Incêndio, pelas reuniões semanais de *brainstorming*, em especial ao amigo e parceiro de pesquisa Cleber Fernandes, foram vários os encontros semanais com troca de ideias que sempre ultrapassam o tempo previsto. Muito obrigado!

Agradeço ao José Roberto e Ricardo, técnicos dos Laboratórios de Materiais e Componente (LMC) e Sistemas Estruturais (LSE), na UFSCar, que apoiaram toda a caracterização dos materiais não medindo esforços para ajudar. Muito obrigado e Zé, você é o cara!

Ao Eng. Dr. Luciano Passos e ao técnico José Luís, dos Laboratórios de Estruturas (LES) e Materiais de Construção (LMC), na Unicamp, pela ajuda fundamental na fase experimental desse doutoramento. Muito obrigado!

Ao Eng. Luciano Lima, da empresa Glasser, pela doação dos blocos analisados nessa pesquisa e por ser sempre solícito na disponibilização de dados e informações sobre a fabricação dos blocos de concreto. Muito obrigado!

Ao Prof. Dr. Rogério Pinto, do Laboratório de Mecânica da Rocha (EESC), pelo preparo das amostras de blocos necessárias para a execução de ensaios. Muito obrigado!

Ao Prof. Dr. Cristian Maluk, da Universidade de Queensland, pela realização dos ensaios de *Hot Disk*, fundamentais para obtenção das propriedades térmicas dos materiais. Muito obrigado!

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos (PPGECiv-UFSCar), pela oportunidade e ensinamentos, local no qual tive a oportunidade de conhecer excelentes professores e fazer muitos amigos e colegas de profissão. Muito obrigado!

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida. Muito obrigado!

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Processo N.º.: 2018/19748-9, pela bolsa concedida e apoio financeiro fundamentais para o sucesso desse trabalho. Muito obrigado!

A todos que direta ou indiretamente contribuíram com essa conquista. Muito obrigado!

RESUMO

MEDEIROS, Wallison Angelim. *Comportamento de blocos estruturais de concreto com diferentes agregados sob altas temperaturas*. Tese de Doutorado em Engenharia Civil – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2022.

O presente trabalho tem como objetivo a avaliação, em laboratório, de blocos de concreto estruturais submetidos a altas temperaturas de forma a contribuir com relevantes informações para projeto de alvenaria estrutural em situação de incêndio. Uma vez que o Brasil ainda não possui norma nacional para projeto de alvenaria em situação de incêndio, foi realizado um primeiro estudo, aplicando normas internacionais para o contexto brasileiro. Entretanto, essa abordagem deve ser realizada com cautela, visto que existem diferenças significativas dos materiais e procedimentos na construção civil de cada país. No segundo estudo, sabendo que o material presente nos blocos de concreto vazados possui, devido sua geometria e processo de fabricação, propriedades intrínsecas que os diferem do material concreto moldado úmido, é desenvolvida, a partir de então, metodologia para avaliação e obtenção, em laboratório, da resistência mecânica de blocos de concreto sob elevadas temperaturas de forma mais adequada. Em seguida, em um terceiro estudo, as propriedades térmicas e físicas do concreto seco vibroprensado, constituído por diferentes tipos de agregado graúdo (basalto, calcário e gnaíse) e de três classe de resistência de blocos distintos (6, 12 e 24 MPa), são investigadas e analisadas; comparando e avaliando as semelhanças e diferenças com o concreto moldado úmido. As particularidades do concreto seco empregado na fabricação de blocos de alvenaria demonstraram em algumas análises diferenças significativas devidos suas peculiaridades quanto a porosidade, umidade, densidade etc. A partir da metodologia adequadamente desenvolvida para avaliar blocos de concreto vazado, foi realizado um quarto estudo para avaliar a influência que o tipo de agregado graúdo e a classe de resistência dos blocos, pós-aquecimento, exercem na resistência mecânica residual. Observou-se que o comportamento mecânico dos blocos vazados de concreto difere-se, em certo grau, do comportamento mecânico residual encontrado em literatura para o concreto moldado úmido. Blocos de concreto vazados, tendem a manter a resistência à compressão da temperatura ambiente até maiores temperaturas, 300°C para agregado silicosos e 400°C para agregado do tipo calcário. Com os parâmetros obtidos nas fases anteriores do estudo, que serviram como ponto de partida na abordagem de modelos térmicos, no quinto estudo, foi possível determinar isotermas dos blocos de concreto

por modelos numéricos calibrados a partir de resultados experimentais. Desta forma, uma abordagem numérica para verificar de forma simplificada a resistência de blocos de concreto em situação de incêndio por método analítico é apresentada. Os dados e análises relatados sobre metodologia, propriedades térmicas e mecânicas residuais de blocos de concreto vazados produzidos a partir de uma mistura de concreto de consistência muito seca, vibro-prensados e com agregados de peso normal, são novos e inéditos de forma a possibilitar a compreensão do comportamento dos blocos brasileiros e orientar pesquisas futuras.

Palavras-chave: elevadas temperaturas. alvenaria estrutural. blocos de concreto. análise experimental. abordagem numérica.

ABSTRACT

MEDEIROS, Wallison Angelim *Behavior of structural concrete blocks with different aggregates under high temperatures*. PhD Thesis in Civil Engineering – Federal University of São Carlos, São Carlos, 2022.

The present work aims to investigate, in laboratory, of structural concrete blocks submitted to high temperatures to contribute with relevant information for the design of structural masonry in a fire situation. Since Brazil still does not have a national standard for masonry design in a fire situation, a first study was carried out, applying international standards for the Brazilian context. However, this approach must be carried out with caution, as there are significant differences in materials and procedures in civil construction in each country. In the second study, knowing that the material present in the hollow concrete blocks has, due to its geometry and manufacturing process, intrinsic properties that differ from the wet cast concrete material, a methodology is developed to evaluate and obtain, in laboratory, of the mechanical resistance of concrete blocks under high temperatures in a more adequate way. Then, in a third study, the thermal and physical properties of dry vibrated concrete, consisting of different types of coarse aggregate (basalt, limestone, and gneiss) and three different strength classes of blocks (6, 12 and 24 MPa) are investigated; comparing and evaluating the similarities and differences with wet cast concrete. The particularities of dry concrete used in the manufacture of masonry blocks showed significant differences in some analyzes due to their peculiarities in terms of porosity, humidity, density, etc. Based on the methodology properly developed to evaluate hollow concrete blocks, a fourth study was carried out to evaluate the influence that the type of coarse aggregate and the resistance class of the blocks, after heating, exert on the residual mechanical strength. It was observed that the mechanical behavior of hollow concrete blocks differs, to a certain degree, from the residual mechanical behavior found in the literature for wet cast concrete. Hollow concrete blocks tend to maintain compressive strength from room temperature to higher temperatures, 300°C for siliceous aggregates and 400°C for limestone aggregates. With the parameters obtained in the previous phases of the study, which served as a starting point in the approach of thermal models, in the fifth study, it was possible to determine isotherms of the concrete blocks by numerical models calibrated from experimental results. In this way, a numerical approach to verify in a simplified way the resistance of concrete blocks in fire situation by analytical method is presented. The data and analyzes reported on

methodology, residual thermal and mechanical properties of hollow concrete blocks produced from a concrete mixture of very dry consistency, vibro-pressed and with normal weight aggregates, are new and unprecedented to enable the understanding of the behavior of Brazilian blocks and guide future research.

Keywords: high temperatures. structural masonry. concrete blocks. experimental analysis. numerical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1– (a) Edifício típico em alvenaria estrutural; (b) Edifício alto em alvenaria estrutural	17
Figura 1.2 – Vista aérea do Museu Nacional do Rio de Janeiro após incêndio	18
Figura 1.3 – Fluxograma da tese	24
Figura 2.1 – Padrão de deformação e fissuras em paredes de alvenaria (a) carregada axialmente e (b) não carregada.....	29
Figura 2.2 – Alvenaria danificada pelo fogo exibindo coloração vermelha da argamassa.	30
Figura 2.3 – Deformação da parede em instantes diferentes.....	32
Figura 2.4 – Como utilizar o ábaco de adequabilidade estrutural.	41
Figura 2.5 – Seção transversal de parede de separação com isotermas.....	44
Figura 2.6 – Distribuição em uma seção de alvenaria e a temperatura na qual a alvenaria se torna ineficaz	44
Figura 2.7 – Planta baixa e corte esquemático do edifício analisado.....	46
Figura 2.8 – Blocos estruturais brasileiros utilizados em prédios de alvenaria estrutural.....	47
Figura 3.1 - Bloco de concreto vazado	63
Figura 3.2 – Diferentes curvas-incêndio padrão internacional.....	67
Figura 3.3 – Corpo-de-prova cilíndrico mostrando a localização dos três pontos de medição de temperatura	69
Figura 3.4 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação A).....	71
Figura 3.5 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação B)	72
Figura 3.6 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação C)	73
Figura 3.7 - Forno elétrico – Laboratório de Estruturas e Construção Civil (UNICAMP).....	74
Figura 3.8 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação A com taxa de 4°C/min	76
Figura 3.9 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação B com taxa de 4°C/min	78
Figura 3.10 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação B com taxa de 1°C/min	80

Figura 3.11 - Temperaturas dos pontos de medição na Instrumentação C com taxa de 4°C/min	83
Figura 4.1 – Calor específico do concreto.....	102
Figura 4.2 – Densidade do concreto	102
Figura 4.3 – Coeficiente de expansão térmica de agregados e concretos.....	103
Figura 4.4 – Valores de cálculo de blocos de silicato de cálcio de propriedades de material dependentes da temperatura com uma faixa de densidade de 1.600–2.000 kg/m ³	104
Figura 4.5 – Agregados selecionados para a fabricação dos blocos.....	106
Figura 4.6 – Agregados analisados macroscopicamente: (a) gnaisse, (b) calcário e (c) basalto.	107
Figura 4.7 – Espectrômetro de FRX.....	108
Figura 4.8 – Espectrometria de FRX - gnaisse.....	109
Figura 4.9 – Espectrometria de FRX - basalto	109
Figura 4.10 – Espectrometria de FRX - calcário	109
Figura 4.11 – Espectrometria de FRX - areia.....	109
Figura 4.12 – Espectrômetro de DRX	110
Figura 4.13 – Espectrômetro de DRX - Areia	110
Figura 4.14 – Espectrômetro de DRX - Gnaisse	111
Figura 4.15 – Espectrômetro de DRX - Basalto.....	111
Figura 4.16 – Espectrômetro de DRX - Calcário	112
Figura 4.17 – Termogravimetria dos agregados.....	113
Figura 4.18 – Agregados graúdos e miúdos utilizados na fabricação dos blocos.	114
Figura 4.19 – Vibro prensadora utilizada na fabricação dos blocos.....	115
Figura 4.20 – Análise dimensional.....	116
Figura 4.21 – Blocos em estufa	116
Figura 4.22 – Blocos submersos.....	116
Figura 4.23 – Parâmetros variados para determinação das propriedades térmicas	117
Figura 4.24 – Extração das amostras	118
Figura 4.25 – Amostras para ensaio pelo método TPS.....	118
Figura 4.26 – Calor específico.....	120
Figura 4.27 – Teor de umidade.....	120
Figura 4.28 – Condutividade térmica	121
Figura 4.29 – Porosidade Aparente	122

Figura 4.30 – Difusividade térmica	122
Figura 4.31 – Densidade	123
Figura 4.32 – Densidade versus temperatura.....	124
Figura 4.33 – (a) Seção transversal de parede do bloco; (b) Imagem ampliada.....	125
Figura 4.34 – Porosidade aparente <i>versus</i> temperatura	125
Figura 5.1 – Efeito da temperatura na resistência à compressão de dois concretos leves sendo um com areia natural.	130
Figura 5.2 – Impacto da temperatura na resistência à compressão dos corpos-de-prova.....	131
Figura 5.3 – (a) relação resistência-temperatura para concretos com agregados de carbonato. (b) relação resistência-temperatura para concretos com agregados siliciosos.....	132
Figura 5.4 – Módulo de elasticidade de concreto leve com xisto expandido em elevadas temperaturas.....	133
Figura 5.5 – Módulo de elasticidade do concreto com diferentes agregados em elevadas temperaturas.....	134
Figura 5.6 – Redução do Módulo de elasticidade para diferentes agregados com a temperatura.	135
Figura 5.7 – Relação de ensaios	137
Figura 5.8 – Disposição dos blocos para aquecimento no forno	137
Figura 5.9 – Ensaio para determinação da resistência e módulo de elasticidade residual	138
Figura 5.10 – Resistência residual dos blocos de 6MPa	139
Figura 5.11 – Resistência residual dos blocos de 12MPa	139
Figura 5.12 – Resistência residual dos blocos de 24MPa	139
Figura 5.13 – Resistência residual dos blocos de com agregado silicioso	142
Figura 5.14 – Resistência residual dos blocos de calcário	143
Figura 5.15 – Resistência residual dos blocos de gnaíse	143
Figura 5.16 – Resistência residual dos blocos de basalto.....	143
Figura 5.17 – Resistência residual de blocos e concreto com agregados calcários.....	147
Figura 5.18 – Resistência residual de blocos e concreto com agregados siliciosos	147
Figura 5.19 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados calcários.....	149
Figura 5.20 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados gnaíse	149
Figura 5.21 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados basalto.....	150

Figura 5.22 – Proposta de curva residual para blocos de concreto.....	151
Figura 5.23 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado basalto.....	151
Figura 5.24 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado gnaisse	152
Figura 5.25 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado calcário.....	152
Figura 6.1 – Diagrama de distribuição de temperaturas obtidos no processo de simulação. .	156
Figura 6.2 – Blocos com diferentes taxas de vazios (ϕ).....	157
Figura 6.3 – Ilustração de áreas da alvenaria em temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficazes (acima de θ_2)	159
Figura 6.4 – Geometria e malha do bloco de concreto vazada analisado.....	160
Figura 6.9 – Faces de exposição ao incêndio-padrão (a) uma face (b) duas faces.....	162
Figura 6.6 – Isotermas para exposição ao incêndio-padrão em duas faces	167
Figura 6.7 – Isotermas para exposição ao incêndio-padrão em um lado.....	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Espessura equivalente mínima (T_{ea}) da parede em função do tempo de resistência ao fogo (em mm)	36
Tabela 2.2 – Fator multiplicador da espessura de revestimentos aplicados no lado não exposto ao fogo	36
Tabela 2.3 – Tempo atribuído aos materiais de revestimento na face exposta ao fogo	38
Tabela 2.4 – Índice de esbeltez máximo para a adequabilidade estrutural.....	39
Tabela 2.5 – Espessura mínima de paredes considerando o isolamento térmico (mm)	40
Tabela 2.6 – Espessura mínima de paredes carregadas de blocos de concreto (critério REI)..	42
Tabela 2.7 – Tabelas utilizadas no estudo de caso com as espessuras mínimas para cada critério de verificação.....	51
Tabela 3.1 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 4°C/min	75
Tabela 3.2 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 2°C/min	75
Tabela 3.3 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 1°C/min	76
Tabela 3.4 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação B com taxa de 4°C/min.....	78
Tabela 3.5 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação B com taxa de 2°C/min.....	79
Tabela 3.6 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 1°C/min	80
Tabela 3.7 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 4°C/min.....	81
Tabela 3.8 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 2°C/min.....	82
Tabela 3.9 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 1°C/min.....	82
Tabela 4.1 – Valores típicos de coeficiente de dilatação (agregado e concreto), massa específica, condutividade e difusividade térmica	100
Tabela 4.2 – Mistura utilizada na fabricação dos blocos.....	115
Tabela 5.1 – ANOVA blocos de 6 MPa	140
Tabela 5.2 – ANOVA blocos de 12 MPa	141
Tabela 5.3 – ANOVA blocos de 24 MPa	141
Tabela 5.4 – ANOVA blocos de com agregado calcário	145
Tabela 5.5 – ANOVA blocos de com agregado gnaisse	145
Tabela 5.6 – ANOVA blocos de com agregado basalto.....	146
Tabela 6.1 – Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 de acordo com o material.....	159
Tabela 6.2 – Densidade para diferentes blocos \times temperaturas	161
Tabela 6.3 – Condutividade térmica para diferentes blocos \times temperaturas.....	161
Tabela 6.4 – Calor específico para diferentes blocos \times temperaturas	162

Tabela 6.5 – Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 para blocos de concreto vazado	163
Tabela 6.6 – Dados do relatório de ensaio parede submetida a incêndio-padrão.....	164
Tabela 6.7– Temperaturas obtida nos pontos de medição, na modelagem e a diferença.....	166
Tabela 6.8 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T30 - fogo em ambos).....	169
Tabela 6.9 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T60 - fogo em ambos).....	169
Tabela 6.10 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T90 - fogo em ambos).....	170
Tabela 6.11 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T30 - fogo um lado)	170
Tabela 6.12 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T60 - fogo um lado)	171
Tabela 6.13 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T90 - fogo um lado)	171
Tabela 6.14 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 1A).....	173
Tabela 6.15 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 1B).....	174
Tabela 6.16 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 2A).....	175
Tabela 6.17 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 2B).....	175
Tabela 6.18 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 3A).....	176
Tabela 6.19 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 3B).....	176
Tabela 6.20 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (carregamento de ensaio).....	178

LISTA DE ABREVIATURAS, SÍMBOLOS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CBPM	Corpo de Bombeiros da Polícia Militar
ELU	Estado Limite-Último
EN	Normas Europeia
MEF	Método dos Elementos Finitos
NBR	Norma Brasileira
SCI	Segurança Contra Incêndio

* Demais abreviaturas, siglas e símbolos são apresentados e explicados no próprio texto.

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	16
1.2	OBJETIVOS.....	20
1.2.1	Geral	20
1.2.2	Específicos	20
1.3	JUSTIFICATIVA.....	20
1.4	METODOLOGIA GERAL.....	21
1.5	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	22
2.	ANÁLISE CRÍTICA DO USO DE CÓDIGOS E NORMAS ESTRANGEIRAS PARA PROJETO DE ALVENARIA ESTRUTURAL BRASILEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO	25
2.1	APRENDENDO COM INCÊNDIOS.....	25
2.2	ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO.....	27
2.3	RECOMENDAÇÕES DE PROJETO CONFORME DIFERENTES CÓDIGOS E NORMAS.....	34
2.3.1	Código Americano (ACI/TMS 216.1: 2014)	35
2.3.2	Norma Australiana (AS 3700: 2018)	38
2.3.3	Eurocode 6 (EN 1996-1-2: 2005)	41
2.4	APLICABILIDADE DOS CÓDIGOS INTERNACIONAIS À REALIDADE BRASILEIRA.....	45
2.4.1	Estudo de caso	45
2.5	PESQUISAS NECESSÁRIAS PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA NORMA BRASILEIRA.....	54
3.	METODOLOGIA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BLOCOS DE CONCRETO A ALTAS TEMPERATURAS	57
3.1	REFERENCIAL TEÓRICO.....	57
3.1.1	Ensaio em elevadas temperaturas	59
3.1.2	Amostragem	61
3.1.3	Geometria dos blocos	61
3.1.4	Idade do ensaio	63
3.1.5	Moldagem, cura e armazenamento	63

3.1.6	Retificação e capeamento.....	65
3.1.7	Aquecimento	66
3.1.8	Medições de temperatura	68
3.2	METODOLOGIA	69
3.2.1	Instrumentação de controle do aquecimento das amostras.....	70
3.2.2	Taxa de aquecimento das amostras	71
3.2.3	Verificação da influência do material no aquecimento das amostras	72
3.2.4	Caracterização das amostras de BCV avaliadas	73
3.3	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS	74
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	84
3.5	PROPOSTA DE NORMA PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BLOCOS DE CONCRETO VAZADOS EM TEMPERATURAS ELEVADAS	85
3.5.1	Escopo.....	85
3.5.2	Definições	85
3.5.3	Tipo de bloco.....	86
3.5.4	Amostragem e corpo-de-prova.....	86
3.5.5	Método de teste e parâmetros.....	88
3.5.6	Equipamento.....	89
3.5.7	Relatório de ensaio	89
4.	PROPRIEDADES TÉRMICAS E FÍSICAS	91
4.1	REFERÊNCIAL TEÓRICO.....	91
4.1.1	Propriedades do agregado em temperaturas elevadas	91
4.1.2	Efeito das altas temperaturas na microestrutura do concreto.....	96
4.1.3	Propriedades do concreto em temperaturas elevadas.....	100
4.1.4	Blocos de concreto em temperaturas elevadas.....	103
4.2	MATERIAIS E MÉTODOS	105
4.2.1	Agregados utilizados	105
4.2.2	Blocos fabricados.....	114
4.2.3	Metodologia para determinação das propriedades térmicas dos blocos.....	116
4.3	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS ...	119
4.3.1	Calor específico.....	119
4.3.2	Condutividade térmica.....	120

4.3.3	Difusividade térmica	122
4.3.4	Densidade	123
4.3.5	Porosidade.....	124
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS	126
5.	PROPRIEDADES MECÂNICAS	128
5.1	REFERENCIAL TEÓRICO.....	128
5.1.1	Resistência à compressão do concreto sob elevadas temperaturas.....	128
5.1.2	Resistência à compressão do concreto em normas de dimensionamento em situação de incêndio.....	131
5.1.3	Módulo de elasticidade sob elevadas temperaturas	133
5.1.4	Propriedades mecânicas de blocos vazados de concreto em elevadas temperaturas	135
5.2	MÉTODO DE ENSAIO	136
5.3	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS ...	138
5.3.1	Resistência residual à compressão	138
5.3.2	Deformabilidade residual	151
5.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	153
6.	MODELAGEM NUMÉRICA E MÉTODO DAS ISOTERMAS.....	154
6.1	REFERENCIAL TEÓRICO.....	154
6.1.1	Modelagem numérica.....	154
6.1.2	Método simplificado de cálculo	158
6.2	METODOLOGIA	159
6.2.1	Modelagem numérica.....	159
6.2.2	Método simplificado de cálculo	163
6.3	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	165
6.3.1	Validação do modelo numérico	165
6.3.2	Determinação das isotermas.....	166
6.3.3	Método das isotermas.....	172
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO	179
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	181
7.1	CONCLUSÕES.....	181
7.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	186
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	188

8.	APÊNDICES.....	197
8.1	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AREIA.....	197
8.2	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO BASALTO	198
8.3	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO CALCÁRIO	199
8.4	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO GNAISSE.....	200
8.5	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA BASALTO	201
8.6	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA CALCÁRIO	202
8.7	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA GNAISSE.....	203
8.8	FICHA TÉCNICA – ADITIVO (PRODUÇÃO BLOCOS).....	204
8.9	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA BASALTO.....	205
8.10	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA CALCÁRIO.....	206
8.11	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA GNAISSE	207
8.12	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA BASALTO.....	208
8.13	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA CALCÁRIO.....	209
8.14	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA GNAISSE	210
8.15	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA BASALTO.....	211
8.16	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA CALCÁRIO.....	212
8.17	CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA GNAISSE	213
8.18	LEITURAS DE TEMPERATURA E RESULTADO DE MODELAGEM	214

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A alvenaria estrutural é um sistema construtivo onde os mesmos elementos que desempenham a função estrutural executam outras funções, tais como: subdivisão do espaço, isolamento térmico e acústico bem como proteção contra incêndio e intempéries, admitindo assim uma ótima racionalização. Com material relativamente barato, durável e capaz de produzir acabamento de aparência muito aceitável, a alvenaria estrutural tem sido cada vez mais utilizada na construção civil apresentando vantagens como custo competitivo, menor prazo de execução e bom desempenho térmico e acústico quando comparado a sistemas de construção tradicional em concreto armado.

No Brasil, construções em alvenaria estrutural são relativamente novas quando comparados a outros sistemas construtivos, tendo seu início na década de 1960. Parsekian *et al.* (2013) relatam que nessa época, pouquíssimos projetistas de estruturas dominavam os conceitos de projeto. A adoção de norma estrangeira, especialmente norte-americana, e mesmo a recorrência a consultores externos para auxiliar no projeto era frequente. Apenas em 1977 foram construídos edifícios de nove pavimentos com blocos sílico-calcários de espessura igual a 240 mm nas paredes estruturais. Os primeiros empreendimentos tinham tecnologia americana (blocos de concreto e bastante armadura, devido aos parâmetros de projeto considerando ação sísmica para aquela região do globo terrestre). Inicialmente surgiram muitas manifestações patológicas, decorrentes da adaptação da tecnologia importada à mão de obra local, aos materiais e ao clima. A partir da década de 1970, foram iniciadas pesquisas no IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; no final da década de 1970 e na década de 1980, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Entre o fim da década de 1980 e início dos anos de 1990, o sistema construtivo ganhou força e as parcerias universidade-empresa permitiram o desenvolvimento de materiais e equipamentos nacionais para produção de alvenaria.

Atualmente no Brasil são construídos inúmeros edifícios em alvenaria estrutural, especialmente edifícios residenciais. Geralmente o sistema construtivo é indicado quando não há previsão de alteração na arquitetura ou quando essa possibilidade é limitada a alteração de somente algumas paredes ainda em fase de projeto e para casos de vãos médios moderados de

cerca de quatro a cinco metros. Em relação à altura do edifício, a opção por alvenaria estrutural comumente é mais econômica em edifícios até cerca de 15 pavimentos (Figura 1.1a) (PARSEKIAN *et al.*, 2013). Nesses casos tem-se predominância da ação vertical e do esforço de compressão, em relação à ação horizontal de menor intensidade, viabilizando o uso de alvenaria não armada ou pouco armada. Outras possibilidades de uso do sistema, como em edifícios mais altos, são tecnicamente possíveis, atrelados a *layouts* favoráveis existem casos de edifícios com 20 a 24 pavimentos, usualmente com menor ganho econômico em relação a outros sistemas construtivos (Figura 1.1b).

Figura 1.1– (a) Edifício típico em alvenaria estrutural; (b) Edifício alto em alvenaria estrutural



(a)



(b)

Fonte: próprio autor

Parsekian; Medeiros; Sipp (2018) afirmam que hoje, o sistema construtivo é extensivamente utilizado em todas as diferentes regiões do Brasil, sendo um ramo reconhecido da Engenharia Civil. Com envolvimento de pesquisadores, projetistas, associações, construtores e fornecedores, a indústria de alvenaria brasileira encontra-se em avançado grau de desenvolvimento. Os blocos fornecidos possuem boa aparência, estética, boa precisão dimensional e ampla faixa de resistência a compressão que, dependendo do uso, atinge valores entre 4 MPa e 36 MPa (área bruta). Outra característica importante no desenvolvimento da alvenaria estrutural na região se dá pelo fato do país encontrar-se no centro da placa tectônica da América do Sul, em uma região classificada como sendo estável tectonicamente. Além disso

a velocidade básica dos ventos varia entre 30 e 50 m/s, de acordo com a região. Historicamente, tremores e vendavais ocorrem com menor frequência, intensidade e poder destrutivo do que em outros países, o que permitiu ao Brasil apresentar grandes casos de sucesso do uso de alvenaria estrutural em edifícios altos.

Edifícios de maior porte, em que há dificuldade de se avaliar o tempo para desocupação e nos quais em eventual desabamento pode afetar a vizinhança ou a equipe de combate, exigem maior nível de segurança e verificação das estruturas em incêndio. Estruturas de alvenaria, com suas paredes espessas e maciças, muitas vezes são apresentadas como eficientes no requisito de resistência ao fogo. Na Figura 1.2 é possível observar imagem do Museu Nacional do Rio de Janeiro após incêndio, apesar da inestimável perda histórica e patrimonial as paredes de alvenaria continuaram estáveis. Entretanto, diferentemente das estruturas de alvenaria antigas, os edifícios de alvenaria estrutural modernos usualmente são construídos com blocos vazados de concreto ou cerâmico com furos verticais, índice de vazios superior a 50% e espessura total de 140 mm.

Figura 1.2 – Vista aérea do Museu Nacional do Rio de Janeiro após incêndio



Fonte: Revista ISTOÉ. <<https://istoe.com.br/>>. Acesso em: 21 set. 2022.

No Brasil, as exigências de segurança contra incêndio das edificações são definidas em legislação estadual e na norma brasileira ABNT NBR 14432: 2001 – Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos das edificações; onde estão prescritos os requisitos que

devem ser atendidos quanto a estanqueidade, isolamento e segurança estrutural por um tempo suficiente para possibilitar a fuga dos ocupantes da edificação em condições de segurança, a segurança das operações de combate ao incêndio e a minimização de danos a edificações adjacentes e à infraestrutura pública. Atualmente, projetos de estruturas de aço, de concreto e de madeira já possuem normas específicas para a situação de incêndio, são elas: ABNT NBR 14323: 2013, ABNT NBR 15200: 2012 e ABNT NBR 7190-1: 2022, respectivamente. No entanto, não há no país, normalização para alvenaria estrutural nessa situação e, portanto, continua sendo necessária a consulta às normas internacionais.

Normalizar é um instrumento importante para garantir a qualidade e o desempenho dos materiais, componentes e sistemas construtivos, fornecendo um instrumento eficaz no controle da segurança contra incêndio das edificações. Segundo Seito et al. (2008) o número de normas precisa ser rapidamente ampliado, mas o esforço de poucos tem sobrecarregado sua atuação, resultando em menor velocidade tanto na revisão de normas existentes como de normas novas. A aplicabilidade das normas internacionais à realidade brasileira, pode não ser muito adequada pois cada país leva em conta as características sociais, ambientais e legislativas de sua região; além de existir variações, entre os países, das composições mineralógicas das rochas utilizadas como agregado, dos tipos de blocos e dos revestimentos habituais. Poucas são as informações no país sobre propriedades térmicas e mecânicas dos materiais e componentes construtivos da alvenaria estrutural. Além disso, nacionalmente, a quantidade de ensaios de paredes é insignificante e modestos são os equipamentos em laboratório nacional aptos à avaliação de paredes carregadas. O que justifica, devido a urgência, elaborar norma nacional sobre o assunto a partir da adaptação de procedimentos internacionais à realidade brasileira.

Isto posto, é clara a necessidade de pesquisas precisas e ordenadas para o desenvolvimento de normalização sobre o assunto. Visto o incipiente parque de equipamentos dos laboratórios nacionais aptos à avaliação de paredes carregadas, ensaios de blocos isolados e com diferentes tipos de acabamentos podem ser realizados considerando o critério de isolamento térmico (*I*). Seguidos pela obtenção das inúmeras propriedades térmicas dos materiais dos blocos usuais do país com a finalidade de mapear isotermas com ajuda da simulação numérica. Com isso, um método de cálculo simplificado pode ser empregado para avaliação do critério de adequação estrutural (*R*). Continuando com ensaios de paredes de alvenaria carregadas em situação de incêndio para, finalmente, reunir informações suficientes que balizem a primeira norma nacional sobre o tema.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Geral

O objetivo principal desta pesquisa é a avaliação, em laboratório, de blocos de concreto estruturais submetidos a altas temperaturas visando contribuir com relevantes informações para projeto de alvenaria estrutural em situação de incêndio.

1.2.2 Específicos

Como objetivos específicos deste trabalho, pretende-se:

- Propor metodologia para avaliação, em laboratório, da resistência mecânica de blocos de concreto sob elevadas temperaturas;
- Avaliar a influência do tipo de agregado graúdo (basalto, calcário e gnaiss) e da classe de resistência de blocos de concreto, pós aquecimento, na resistência mecânica residual;
- Determinar isotermas dos blocos de concreto por modelos numéricos, calibrados a partir dos resultados experimentais;
- Propor modelo simplificado de verificação da resistência de blocos de concreto em situação de incêndio por método analítico.

1.3 JUSTIFICATIVA

Incêndios muitas vezes são inevitáveis no ambiente construído. Em uma situação de incêndio, as estruturas não devem entrar em colapso ao menos antes que ocorra sua total desocupação, pois a prioridade maior é poupar vidas. Em segundo plano deve-se minimizar o dano as perdas financeiras. Para isso, existe a normalização de segurança das estruturas em situação de incêndio. No entanto, não há no país norma para alvenaria estrutural nessa situação, sendo necessária a consulta aos códigos internacionalmente respeitados sobre o assunto.

A Comissão de Estudo ABNT/CE-002:123.010 realizou a unificação das normas de Alvenaria Estrutural no que concerne ao projeto (ABNT NBR 16868-1: 2020), execução e controle de obras (ABNT NBR 16868-2: 2020), e métodos de ensaios (ABNT NBR 16868-3: 2020); e observou a necessidade de garantir a segurança das estruturas de alvenaria estrutural em situação de incêndio. De modo que, um esforço nacional conjunto vem sendo formado para produzir a parte 4 da norma de alvenaria estrutural sobre o tema.

O comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio depende do desempenho a elevadas temperaturas de cada um de seus elementos (blocos, argamassa, eventual armadura e revestimento) isoladamente e em conjunto. Nacionalmente e até mesmo internacionalmente, pouco se conhece sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais componentes da alvenaria estrutural (KODUR; HARMATHY, 2016; NASER, 2019; POPE; ZALOK, 2019). Da mesma forma, quando se avalia resultados de ensaio existentes sobre o comportamento de paredes de alvenaria em situação de incêndio, nota-se, além da insignificância numérica de resultados brasileiros, a inexistência de resultados de paredes avaliadas sob carga adequada. Infelizmente, o parque de equipamentos em laboratórios nacionais aptos à avaliação de paredes carregadas ainda é incipiente.

Visto ao exposto, julga-se de grande relevância a elaboração de uma ampla pesquisa sobre o assunto, onde sejam determinados as propriedades térmicas e mecânicas de componentes (bloco, argamassa, graute e revestimento) e elementos (prisma, pequena parede e parede) da alvenaria estrutural em altas temperaturas. Nada mais lógico que iniciar a pesquisa nacional com as unidades básicas da alvenaria, os blocos; sendo o primeiro passo para o estabelecimento de futuras correlações de resistência mecânica entre blocos, prismas, pequenas paredes e paredes em tamanho natural submetidos à elevadas temperaturas; almejando contribuir para a elaboração da norma nacional sobre o tema trazendo benefícios ao meio técnico, acadêmico e a sociedade.

1.4 METODOLOGIA GERAL

Este trabalho é parte integrante dos estudos desenvolvidos pelo grupo de pesquisa formado mediante parceria entre a Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e a Universidade Estadual de Campinas (Unicamp). As investigações realizadas nesta tese são os estudos iniciais de uma ampla pesquisa sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio que pretende além de caracterizar elementos e componentes da alvenaria estrutural brasileira, contribuir na formulação de uma proposta consistente e sistêmica para a futura revisão da norma.

Para alcançar os objetivos planejados, a tese se divide em cinco fases:

1. Levantamento das lacunas existentes: revisão bibliográfica com a identificação de hiatos de informações sobre o tema e análise da aplicabilidade de estudos internacionais no contexto brasileiro.

2. Procedimentos de ensaios: definição de procedimento padronizado para identificar as reais propriedades mecânicas dos blocos de concreto vazados sob temperaturas elevadas.
3. Caracterização das propriedades térmicas: determinação das propriedades térmicas (condutividade, difusividade e calor específico) dos materiais dos diferentes blocos nacionais estudados.
4. Caracterização das propriedades mecânica: determinação da resistência à compressão e módulo de deformação residual de blocos de concreto sem aplicação de cargas e sob temperaturas elevadas com variação a cada 100°C e até 800°C.
5. Identificação de isotermas: determinação da distribuição de temperatura na seção transversal do bloco, juntamente com a redução das áreas resistentes com auxílio da modelagem numérica.

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Embora todos os objetivos específicos tenham um tema geral comum, eles não são inerentemente interdependentes. Portanto, a fim de facilitar a organização e a compreensão, a tese não possui capítulos exclusivos de revisão bibliográfica e metodologia. Deste modo, em cada capítulo se faz presente referenciais teóricos, métodos, resultados e discussões, bem como comentários sobre o estudo abordado. A tese é composta por seis capítulos, os quais são brevemente descritos aqui com o intuito de elucidar a sequência do trabalho. Para um melhor entendimento, a Figura 1.3 ilustra a organização da tese.

No Capítulo 1 foi apresentada uma introdução contextualizando os temas da pesquisa e sua relevância, bem como os objetivos a serem alcançados, as justificativas, fases da pesquisa e uma visão ampla de como a tese está organizada.

O estado da arte sobre o comportamento da alvenaria em situação de incêndio, destacando os aspectos de outras pesquisas e identificando as lacunas existentes sobre o tema é avaliado no Capítulo 2. Além disso, é discutido a aplicabilidade de códigos e normas internacionais no contexto brasileiro e as pesquisas necessárias para o desenvolvimento de uma proposta de norma consistente e sistêmica sobre o tema.

No terceiro capítulo é debatido e proposto um procedimento para definir as propriedades mecânicas residuais (resistência à compressão e módulo de deformação) dos blocos vazados, levando em consideração as peculiaridades deste componente básico da alvenaria estrutural.

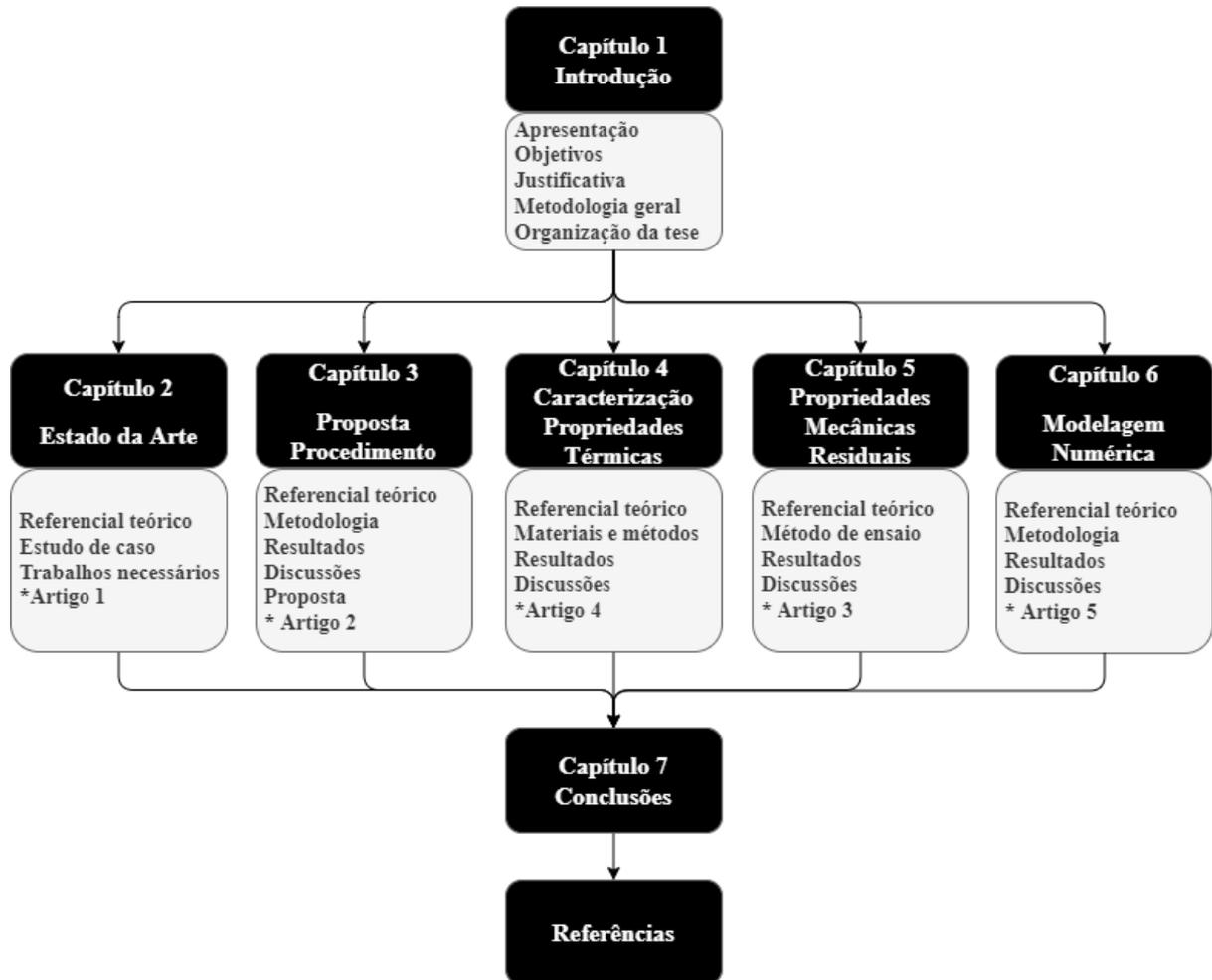
No Capítulo 4 apresentam-se as propriedades térmicas (condutividade, difusividade e calor específico) e físicas dos materiais constituintes dos diferentes blocos vazados de concreto utilizados nessa pesquisa e necessários para a determinação do mapeamento de suas isotermas.

No Capítulo seguinte são avaliadas as propriedades mecânicas residuais de blocos vazados de concreto com diferentes tipos de agregados e resistências, após serem submetidos a elevadas temperaturas (até 800°C).

O sexto capítulo apresenta uma modelagem numérica elaborada com os parâmetros termofísicos adquiridos (capítulo 4) e calibrada com a instrumentação utilizada no desenvolvimento da metodologia da pesquisa (capítulo 3), que em conjunto com as propriedades mecânicas residuais identificadas (capítulo 5), foi capaz de propor, além de isotermas, uma verificação simplificada da resistência para diferentes blocos de concreto em situação de incêndio.

As considerações finais desta tese, com as conclusões de cada capítulo e sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 7. Seguidos das referências bibliográficas utilizadas em toda a tese bem como apêndices.

Figura 1.3 – Fluxograma da tese



Fonte: próprio autor

Artigos de periódicos e como primeiro autor:

¹ MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JR., A. L. *Critical analysis of the use of international codes and standards to design Brazilian structural masonry in fire situation. International Journal of Masonry Research and Innovation*, v. 6, n. 3, p. 285–304, 2021

² 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*, v. 55, n. February, p. 14, 2022.

³ MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JR., A. L. *Residual mechanical properties of hollow concrete blocks with different aggregate types after high temperatures.* (submetido)

⁴ em elaboração

⁵ a elaborar

2. ANÁLISE CRÍTICA DO USO DE CÓDIGOS E NORMAS ESTRANGEIRAS PARA PROJETO DE ALVENARIA ESTRUTURAL BRASILEIRA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

O objetivo deste capítulo é identificar a evolução das pesquisas sobre alvenaria estrutural em situação de incêndio, bem como identificar a possibilidade de aplicação dos resultados encontrados em trabalhos internacionais ao contexto da alvenaria estrutural brasileira, além de apontar sugestões e proposições de investigações necessárias para o desenvolvimento de uma normalização brasileira sobre o tema.

2.1 APRENDENDO COM INCÊNDIOS

Todos os países têm aprendido com os grandes incêndios, inclusive o Brasil. O grande número de vítimas humanas, não apenas se tratando de morte, mas de todas as pessoas que direta e indiretamente tiveram suas vidas afetadas, provocam mudanças no comportamento e na postura da sociedade em relação a segurança contra incêndio. Historicamente, a alvenaria apresentou-se muitas vezes como solução para esses desastres.

O primeiro grande incêndio da Era Cristã foi o de Roma em 64 d.C. A cidade sofreu ação do fogo por nove dias. Após o infortúnio Roma se tornou a primeira cidade do mundo a adotar um sistema de alarmes anti-incêndios, também observou-se na época mais prudência nos projetos da cidade, principalmente nos planejamentos urbanos visando evitar qualquer outro tipo de incêndio (COSTA, 2002).

Outro incêndio histórico ocorreu em Londres no ano de 1666, considerado como uma das maiores catástrofes da capital inglesa arruinando cerca de quatro quintos das casas que existiam. Segundo Lima e Neto (2017) a destruição obrigou a refletir sobre o modo de como reconstruir a cidade e instou a reerguer os lugares à luz de preceitos de salvaguarda que os protegessem e aos seus elementos em caso de futuras calamidades. Pensando nisso, foi adotado a alvenaria como material predominante na reconstrução dos imóveis.

Em Chicago, no ano de 1871, um incêndio de grandes proporções é considerado como um dos maiores desastres do século XIX e um profundo golpe na cidade, que foi reconstruída rapidamente. A reconstrução trouxe estruturas melhores e códigos de incêndio mais rigorosos.

De fato, as amargas lições de destruição de Chicago afetaram o modo como outras cidades foram administradas.

Nos Estados Unidos, a preocupação com a segurança contra incêndio era propagada com ênfase na proteção do patrimônio. Isso pode ser notado pela publicação do primeiro *Handbook*, predecessor do atual Fire Protection Handbook da National Fire Protection Association (NFPA) que na época buscava apenas facilitar o trabalho dos inspetores das companhias de seguros.

Seito et al. (2008) indica que a preocupação com incêndio, no Brasil, era vista como algo que dizia respeito apenas ao corpo de bombeiros, os quais possuíam alguma regulamentação proveniente da área seguradora, indicando em geral provisão de hidrantes, extintores e sinalização desses equipamentos. O Brasil aprendeu a um alto preço com suas catástrofes. Algumas marcantes como a do edifício Andraus, em São Paulo (1972) que gerou grupos de trabalhos, mas com o passar do tempo foram perdendo força e sendo engavetados; e a do edifício Joelma, em São Paulo (1974) que teve grande repercussão e despertou a atenção de diferentes setores. O que proporcionou ainda naquele ano a publicação de norma da ABNT sobre saídas de emergência em edifícios altos.

Atualmente, as catástrofes continuam apontando falhas e de certa forma impulsionando a segurança contra incêndio (SCI). A exemplo disso tem-se a Lei N° 13.425/2017, apelidada de “Lei Kiss Federal” que instituiu obrigações mais duras aos órgãos fiscalizadores e proprietários de estabelecimentos, além de exigir que todos os estudantes na área de construção civil recebam conteúdos relativos à prevenção e combate de incêndios e desastres em seus cursos.

Mesmo os países desenvolvidos e exigentes, quanto a SCI, são muitas vezes surpreendidos, como foi o caso ocorrido na torre Grenfell, em Londres no ano de 2017. Uma reforma concluída em 2016 modificou a fachada utilizando um revestimento para evitar infiltrações e com fins estéticos, que permitiu a quebra da compartimentação vertical podendo ter sido a causa do fogo se propagar com tanta rapidez. Daí a importância do conhecimento nas medidas contra incêndio para adoção das soluções arquitetônicas e construtivas na concepção de projeto.

Nos dias atuais, as informações disponíveis mundialmente facilitam aos países aprenderem e tomarem providências não necessariamente com a ocorrência de sinistros em seu território. Existem várias instituições de pesquisa, laboratórios e associações internacionais estudando e contribuindo com a conscientização, prevenção e inovação da proteção contra incêndio. No Brasil, apesar da ausência sistemática de dados, investigação e divulgação percebe-se que esse cenário começa a mudar. O meio-técnico, as associações e instituições públicas e privadas começam a investigar e estudar os acidentes ocorridos não somente para

buscar o responsável, mas para entender as causas e os mecanismo de falha sofridos pela estrutura no incêndio. A exemplo disso pode-se citar o recente Parecer Técnico PhD 324/2019 sobre o incêndio e colapso do edifício Wilton Paes de Almeida, em São Paulo (2018) que contou com a participação altruísta de instituições privadas e públicas, e inclusive de pessoas físicas que entendendo a motivação não hesitaram em dar seu apoio voluntário e competente.

Essa postura curiosa e científica deve ser enaltecida e buscada constantemente para que, assim, possa melhor prevenir e combater os infelizes desastres causados pelo incêndio.

2.2 ALVENARIA EM SITUAÇÃO DE INCÊNDIO

A construção de alvenaria tem sido amplamente utilizada por muitos séculos. A existência continuada de edifícios históricos e antigos é a melhor evidência para demonstrar a durabilidade, resistência a intempéries, desempenho térmico e acústico, baixo custo e disponibilidade de materiais. O que faz a alvenaria ser um dos materiais mais importantes para a construção civil atualmente. Incêndios históricos como os já relatados (Item 2.1) provaram a capacidade das paredes de alvenaria em resistir aos efeitos de altas temperaturas.

Geralmente, o estudo da alvenaria em situação de incêndio é baseado principalmente nos resultados de laboratório onde, por simplicidade, as normas técnicas permitem que seja empregada curvas de aquecimento padronizadas. É importante ressaltar que essas curvas não representam um incêndio real. Quaisquer conclusões que tenham por base essas curvas devem ser analisadas com cuidado, pois não correspondem ao comportamento real do incêndio ou das estruturas expostas ao fogo. No entanto é comum utilizar-se a curva-padrão associada a períodos padronizados com a finalidade de fornecer parâmetros de projeto (SILVA, 2016).

Esses períodos representam a capacidade que o elemento tem de resistir a um incêndio padrão, realizado em laboratório, antes que um critério de falha específico seja atingido. De modo geral, os critérios básicos de verificação estabelecidos apresentados pelas normas para a alvenaria estrutural são: resistência mecânica (R), estanqueidade (E), isolamento (I) e impacto mecânico (M).

As paredes são elementos verticais de suporte de carga que atualmente empregam materiais de alta resistência com unidades vazadas e pouco espessas, o que torna a resistência à compressão de extrema importância para a alvenaria estrutural. Em alguns casos, paredes são necessárias para resistir a forças horizontais e pressão lateral; portanto, elas também devem suportar tesões de cisalhamento. Além disso, entende-se que o comportamento na interação das unidades com a argamassa sob tensão resultará em uma melhor compreensão da alvenaria.

A resistência ao fogo das paredes de uma edificação é muito importante para a segurança contra incêndios, uma vez que, nos incêndios ocorridos em edifícios de grande altura constatou-se que as vias de circulação apresentavam uma grande vulnerabilidade à fumaça, ao calor e às chamas, o que dificultava o abandono da edificação e permitia ao incêndio propagar-se rapidamente (ONO, 2007). Como apresenta boa resistência ao fogo e não produz fumaça ou gases tóxicos, uma parede de alvenaria torna-se uma boa alternativa para minimizar a propagação do incêndio, proporcionando tanto o isolamento térmico quanto a estabilidade necessária ao edifício.

Internacionalmente, alguns trabalhos relatam o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio, embora esse número seja pequeno quando comparados aos trabalhos para estruturas de aço ou concreto armado. Cita-se, a seguir, algumas informações encontradas de pesquisadores estrangeiros.

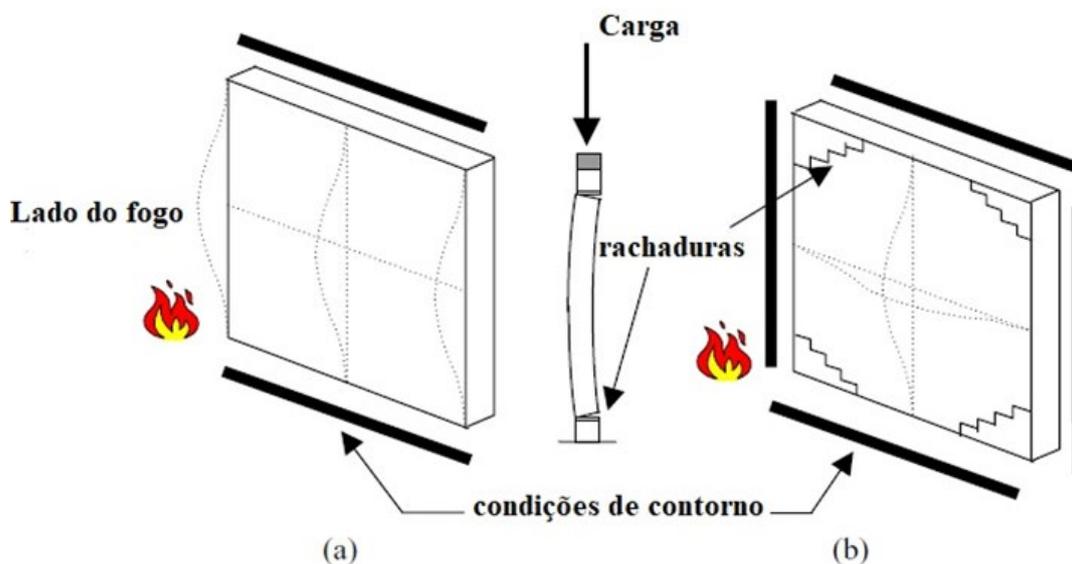
Hendry et al. (2004) afirmam que vários estudos apontaram que a resistência à compressão da alvenaria é influenciada por um número especificado de parâmetros principalmente associados às propriedades da argamassa, unidade, eventual graute e armadura, mão de obra e cura, o que permite também afirmar que o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio vai depender do desempenho resistente a elevadas temperaturas de cada um desses elementos isoladamente e em conjunto.

Bailey (2004) alega que as diretrizes prescritivas para dimensionamento de estruturas de alvenaria em situação de incêndio são baseadas em dados de testes que se estendem por mais de 50 anos. A principal desvantagem dessas diretrizes é que não existe orientação para paredes maiores que as paredes de três metros de altura testadas no forno. À medida que a parede aumenta em altura, o deslocamento lateral na altura média da parede aumentará devido à curvatura térmica, assim paredes maiores que três metros de altura desabam antes das paredes testadas. O projetista pode usar uma outra forma de construção de alvenaria não coberta por norma, neste caso um ensaio com incêndio-padrão precisaria ser realizado. O autor ressalta que a experiência de incêndios reais mostra que as paredes de alvenaria são extremamente boas e a falha, se ocorrer, é geralmente devida à estrutura adjacente que gera cargas excêntricas ou laterais na parede resultando em colapso.

Nadjai et al. (2006) ressaltam que nos elementos de compartimentação, como paredes de alvenaria, o calor geralmente é exposto apenas a um lado, e isto é muito importante no caso da alvenaria devido à sua baixa condutividade térmica, produzindo gradientes térmicos elevados sobre a seção transversal. A curvatura térmica é, portanto, produzida devido à expansão térmica diferencial. Com a face quente da parede se expandindo mais rapidamente do que a fria, a

parede tenderá a se curvar em direção ao fogo. A face da parede exposta ao fogo também experimentará uma redução considerável nas propriedades dos materiais mecânicos, o que efetivamente pode ser representado como uma redução na espessura da face quente. Como resultado da mudança de espessura, qualquer carga aplicada se moverá para o lado exposto ao fogo e deve ser reconhecida como tendo o efeito vantajoso de manter a estabilidade estrutural contrariando o arco térmico (Figura 2.1). As normas atuais não fornecem modelos de cálculo concisos para a determinação dos tempos de resistência ao fogo. Algumas orientações estão disponíveis com base exclusivamente em testes de incêndio-padrão isolados, que relacionam períodos mínimos de resistência ao fogo com a espessura de parede necessária. Os deslocamentos térmicos juntamente com a degradação da propriedade do material podem resultar em colapso estrutural da parede, dependendo das condições de contorno, magnitude da carga aplicada e geometria da parede. As estruturas em grande escala raramente são testadas por causa do custo e as limitações físicas dos fornos padrão. Por isso, há poucas evidências experimentais que relacionam a resistência ao fogo de componentes individuais com a de uma construção completa. Uma maneira de superar os limites de tamanho no teste é o uso de simulações numéricas. Por conseguinte, tem tido muito interesse no desenvolvimento de programas computacionais que modelam o comportamento de elementos estruturais e subconjuntos no fogo.

Figura 2.1 – Padrão de deformação e fissuras em paredes de alvenaria (a) carregada axialmente e (b) não carregada.



Fonte: adaptado Nadjai *et al.* (2006)

Para Ingham (2009) a alvenaria pode ser seriamente afetada pelos incêndios. O dano tende a ser concentrado em torno das aberturas das portas e janelas, mas também pode afetar toda a

alvenaria estrutural. Uma parede estrutural exposta ao fogo sofrerá uma redução progressiva da resistência devido à deterioração da argamassa, sendo provável que um grave dano seja causado pela expansão ou colapso de outros elementos estruturais. A altas temperaturas de 600°C a 800°C, a resistência da maioria dos blocos e argamassa é seriamente afetada e, se ocorrer choque térmico, como o resfriamento com água nas operações de combate ao incêndio, pode ocorrer o colapso da alvenaria devido ao intenso panorama de fissuração das paredes que irá se formar. Ainda segundo Ingham (2009) os tijolos cerâmicos podem suportar temperaturas na faixa de 1000°C ou mais sem danos, mas sob um aquecimento muito severo e prolongado, a superfície do tijolo pode se fundir. O lascamento explosivo pode ocorrer com alguns tipos de blocos, principalmente os vazados. A temperaturas mais baixas de 250-300°C, o dano geralmente é restrito às mudanças de cor, como o avermelhamento de rochas e argamassas compostas de ferro (Figura 2.2). Embora não seja estruturalmente significativo, a mudança de cor não é reversível, podendo ser significativa por razões estéticas, especialmente no caso de edifícios históricos. Em alguns casos, a alvenaria que está longe do fogo pode sofrer de manchas de fumaça ou escurecimento.

Figura 2.2 – Alvenaria danificada pelo fogo exibindo coloração vermelha da argamassa.



Fonte: (INGHAM, J., 2009)

Andreini e Sassu (2011) informam que o comportamento da alvenaria em situação de incêndio provocou grande interesse na construção de edifícios por causa da capacidade considerável da alvenaria de isolar partes do interior de um edifício, tanto do fogo em si quanto dos efeitos da fumaça (as chamadas paredes de compartimentação). Além disso, a alvenaria é bastante resistente ao efeito deteriorante do aumento da temperatura. Na verdade, blocos estruturais, cerâmicos ou concreto de agregado leve, mantêm sua resistência e rigidez para uma ampla gama de temperaturas e, mesmo quando degradam, fazem-no gradualmente. Além disso,

a argamassa comum geralmente exibe propriedades favoráveis em termos de resistência e resposta ao fogo.

Nguyen e Meftah (2012) afirmam que os códigos e normas geralmente expressam a taxa de resistência ao fogo de elementos estruturais em termos do tempo máximo no qual cada critério (I, E R) permanece satisfazendo sua solicitação. A resistência ao fogo da maioria das paredes de alvenaria pode ser determinada usando um método de ensaio padrão (ASTM E119: 2020; AS 1530-4: 2014; ISO 834-1: 1999) ou métodos semiempíricos (ACI 216.1: 2014; EM 1996-1-2: 2005; AS 3700: 2018). Esses métodos semiempíricos para requisitos de resistência ao fogo (disponíveis principalmente em códigos e normas internacionais) geralmente resultam em projetos conservadores, financeiramente mais onerosos ao proprietário e com limitada flexibilidade de projeto. Um procedimento alternativo é adotar uma abordagem de dimensionamento baseado no desempenho, geralmente é realizado com modelos numéricos e computacionais avançados. Esta abordagem também permite a consideração de cenários de incêndio específicos, geometrias não padronizadas e processos de degradação complexos, tais como *spalling*, que provoca desmoronamento de partes da parede de alvenaria que levam a um aumento significativo de sua vulnerabilidade ao fogo.

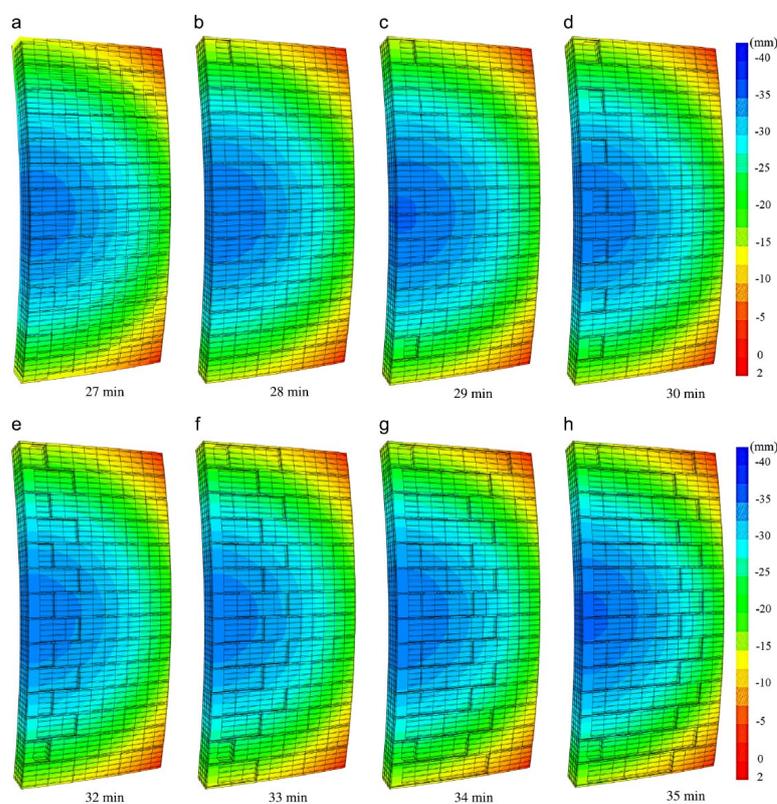
Nguyen e Meftah (2012) ainda relatam em seu trabalho que o comportamento da alvenaria em situação de incêndio pode ser mais precisamente avaliado utilizando métodos de cálculo avançado para melhor estimar os critérios I, E e R. No entanto, tais modelos sofisticados requerem o uso de testes experimentais especialmente projetados para obter dados suficientes para a identificação de parâmetros físicos do modelo. Porém, a maioria dos dados disponíveis em literatura ou por relatórios de ensaios experimentais, são obtidos usando método de ensaio padrão que não permitem fornecer uma estratégia de modelagem avançada. Na verdade, esses testes são projetados para fornecer apenas critérios globais (I, E e R) para uma configuração específica. Eles não podem ser estendidos de forma segura para outras configurações devido à falta de informações sobre variabilidade do material, condições de contorno efetivas e outras.

Segundo Nguyen e Meftah (2014) paralelamente ao surgimento de novos materiais, a alvenaria ainda ocupa uma importante parte do mercado da construção em diversos países. Na verdade, as alvenarias fornecem soluções de menor custo. As vantagens típicas são a redução do tempo de execução, o isolamento térmico e acústico, a redução significativa da condutividade térmica, a proteção contra incêndio e a redução da espessura do revestimento, levando a um sistema construtivo mais sustentável devido a redução dos custos energéticos. Mesmo com as evoluções dos requisitos de construção, a alvenaria é continuamente adotada na

tentativa de fornecer melhores soluções para resistência ao fogo, terremoto, isolamento térmico e acústico, ambiental etc.

Em sua pesquisa, Nguyen e Meftah (2014) demonstra que o comportamento da alvenaria com blocos vazados em situação de incêndio apresenta mecanismos complexos, tais como *spalling* e que existem poucos estudos sobre esse assunto. Um modelo 3D não-linear é proposto para simular o comportamento da alvenaria com blocos de concreto em situação de incêndio. Na Figura 2.3, são apresentados o estado de deformação e fragmentação da parede para alguns instantes representativos. Os resultados numéricos obtiveram em boa concordância com os experimentais, tanto para respostas térmicas quanto mecânicas.

Figura 2.3 – Deformação da parede em instantes diferentes.



Fonte: Nguyen e Meftah (2014)

Russo e Sciarretta (2016) abordam o problema da confiabilidade residual das estruturas de alvenaria após a ação do fogo, do ponto de vista do comportamento mecânico. Ao longo desta questão peculiar, a variedade de tipos de alvenaria, devido principalmente a materiais, padrões, condições e idade, levanta uma série de questões numéricas e experimentais; este ramo da pesquisa é orientado para o conhecimento de proteção e preservação de edifícios de alvenaria, especialmente de interesse histórico, paisagístico ou monumental. No caso das estruturas de alvenaria submetidas ao fogo, informações científicas estão disponíveis especialmente sobre o desempenho em situação de incêndio; relativamente poucos trabalhos

dizem respeito às propriedades e ao comportamento mecânico após o incêndio; uma abordagem teórico-experimental foi elaborada pelos autores para simular a ação do fogo e investigar o comportamento mecânico residual da alvenaria tradicional de blocos e argamassa.

Russo e Sciarretta (2016) expõem que os testes de resistência ao fogo nos fornecem uma grande quantidade de informações que devem ser exploradas de maneiras inovadoras. Em particular, investigar as relações entre o fogo e o desempenho pós-fogo pode ser muito útil sempre que sejam exigidos altos níveis de proteção contra incêndio, o que significa que um desempenho mecânico adequado é solicitado mesmo após o incêndio. O trabalho foi realizado pelos autores para estabelecer e avaliar abordagens numéricas de MEF com o software Diana, que poderiam se aplicar ao problema das propriedades mecânicas residuais dos elementos da alvenaria. O critério de resistência ao fogo (I) é definitivamente o modo de falha mais frequente de paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio, incluindo tijolos maciços e blocos vazados. Geralmente, os blocos vazados (seja cerâmico, de concreto ou silicato de cálcio) proporcionam um melhor isolamento térmico dentro de uma faixa de temperatura normal, mas mostram um comportamento em situação de incêndio pior do que os tijolos maciços de mesma espessura externa. Isto é devido às características da troca de calor do ar dentro das cavidades; ao aumentar as temperaturas, a radiação predomina sobre a convecção e a condução dentro do bloco, e o fluxo de calor trocado aumenta muito rapidamente de acordo com a lei de Stefan-Boltzmann. Conseqüentemente, as alvenarias de blocos vazados são sensíveis aos fenômenos de lascamento explosivo e atingem menores taxas de resistência ao fogo do que as construídas de tijolos maciços.

Bošnjak *et al.* (2020) investiga experimentalmente e simula numericamente o comportamento residual da alvenaria após exposição a temperaturas elevadas. A principal motivação para os ensaios realizados foi fornecer mais informações para a avaliação das estruturas de alvenaria danificadas pós fogo. O comportamento compressivo residual foi investigado em argamassas, unidades de tijolos e prismas de três tijolos, sendo considerados dois tipos de unidades de alvenaria: tijolos cerâmicos e tijolos de silicato de cálcio. Verificou-se que a resistência à compressão residual de ambos os tipos de alvenaria é relativamente boa e mais favorável do que as disposições do Eurocode 6 (2005). No entanto, principalmente devido à forte degradação da argamassa, a rigidez residual é significativamente influenciada pela exposição a temperaturas elevadas. Embora a resistência da alvenaria permaneça pelo menos igual à resistência de referência (temperatura ambiente) até quase 700°C, a rigidez diminui progressivamente com a temperatura. Verifica-se ainda que os tijolos de silicato de cálcio sofrem danos substanciais se deixados em condições ambientais após exposição a temperaturas

elevadas e que esse fenômeno requer mais investigação. As investigações numéricas foram realizadas com base na modelagem 3D de elementos finitos e utilizando modelo constitutivo dependente da temperatura para materiais quase-frágeis. A abordagem da modelagem numérica mostrou-se promissora e capaz de replicar razoavelmente bem o comportamento compressivo residual do sistema de alvenaria após exposição a temperaturas elevadas.

No Brasil, Rosemann (2011) estudou a resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, por métodos experimentais e analítico-numéricos, considerando apenas o critério de isolamento térmico (I). Na parte experimental, foram ensaiadas paredes não carregadas, alternando a presença de revestimentos de argamassa e o preenchimento dos vazados com areia, com a aplicação de aquecimento controlado em uma das faces. O autor constatou que as paredes sem revestimento e sem preenchimento apresentaram resistência ao fogo de 106 minutos; com a aplicação de revestimento nas faces, obteve-se um aumento de 80%, e com o preenchimento dos vazados o acréscimo foi de 100% na resistência ao fogo. O método de cálculo analítico apresentou valores 25% inferiores aos resultados experimentais, já o método de elementos finitos conseguiu reproduzir a transferência de calor através das paredes, fornecendo resultados muito próximos aos experimentais.

Ainda no Brasil, Rigão (2012) realizou ensaios com carregamento em pequenas paredes de alvenaria estrutural com blocos cerâmicos, analisando o nível de degradação dos materiais isoladamente e no conjunto, o aumento de carga devido à elevação da temperatura, além da resistência residual da alvenaria e seus constituintes após exposição às altas temperaturas. É importante ressaltar que a taxa de aquecimento do forno não seguiu a curva de incêndio-padrão. O autor constatou que as paredes obtiveram bom desempenho frente às altas temperaturas, apresentando níveis de fissuração baixo e mantendo a estabilidade estrutural. Os prismas cerâmicos obtiveram resistências superiores à resistência média de argamassas de mesma resistência e submetidas ao mesmo aquecimento. Além disso, a tensão de ruptura da pequena parede exposta às altas temperaturas ficou bem próxima à média dos prismas cerâmicos submetidos à mesma taxa de aquecimento.

2.3 RECOMENDAÇÕES DE PROJETO CONFORME DIFERENTES CÓDIGOS E NORMAS

O comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio depende do desempenho resistente a elevadas temperaturas de cada um de seus elementos (blocos, argamassa, eventual armadura e revestimento) isoladamente e em conjunto.

A resistência ao fogo é a capacidade de um elemento construtivo de resistir à ação do fogo, mantendo suas funções para as quais foi projetado durante determinado tempo. De modo geral, os códigos e normas internacionais exigem que a estrutura deve obedecer a alguns critérios básicos de verificação:

- a. resistência mecânica (R), a estrutura não deverá alcançar a ruptura em situação de incêndio, com tensões atuantes inferiores às permitidas por normatização nacional em vigor, com esforços atuantes e resistentes resultantes da combinação de ações dita como excepcional;
- b. estanqueidade (E), em que não se deve apresentar trincas ou aberturas suficientes que permitam a passagem de gases quentes ou chamas;
- c. isolamento térmico (I), no qual não se deve apresentar um aumento de temperatura, na face não exposta, acima da temperatura inicial, superior em média a 140°C e em qualquer ponto a 180°C ;
- d. impacto mecânico (M), quando for necessário um elemento de separação vertical deve resistir à aplicação de carga concentrada horizontal.

Os objetivos gerais da verificação de estruturas em situação de incêndio são: limitar o risco à vida humana, limitar o risco da vizinhança e da própria sociedade, e limitar o risco da propriedade exposta ao fogo. As edificações de grande porte, sobretudo mais altas ou contendo maior carga de incêndio devem atender a exigências mais severas para cumprir com os requisitos gerais.

Geralmente, os códigos e normas internacionais realizam a análise da estrutura em situação de incêndio por métodos tabulares. Entretanto, permitem que a análise por outros métodos como: ensaios em laboratório, desempenho histórico ou novas tecnologias emergentes; possam ser utilizados desde que obedçam a critérios estabelecidos por normas correspondentes. Modelos computacionais, quando usados, devem ser validados e apoiados por literatura publicada para comprovar sua precisão.

2.3.1 Código Americano (ACI/TMS 216.1: 2014)

Os procedimentos de dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio são tratados pelo código americano ACI/TMS 216.1 (2014). As paredes de alvenaria estrutural são verificadas em função de valores mínimos para a sua espessura equivalente. A espessura equivalente mínima é determinada em função do tipo de bloco e do tempo requerido de resistência ao fogo, conforme apresentado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Espessura equivalente mínima (T_{ea}) da parede em função do tempo de resistência ao fogo (em mm)

Tipo de bloco e agregado empregado	Espessura equivalente mínima T_{ea} (mm) para TRF (min)						
	30	45	60	90	120	180	240
Bloco de concreto com agregado silicoso	51	61	71	91	107	135	157
Bloco de concreto com agregado calcário	48	58	69	86	102	127	150
Bloco de concreto com argila expandida, xisto expandido ou ardósia expandida	46	56	66	84	91	112	130
Bloco de concreto com escória expandida ou pedra-pomes	38	48	53	69	81	102	119
Tijolo cerâmico maciço	55*	62*	69	83*	97	124	152
Bloco cerâmico vazado, sem preenchimento	50*	55*	58	72*	86	109	127
Bloco cerâmico vazado, grauteado ou preenchido com materiais específicos	63*	71*	76	94*	112	140	168

* valores interpolados

Fonte: adaptado ACI/TMS 216.1 (2014)

A espessura equivalente da alvenaria estrutural é determinada conforme as equações:

$$T_{ea} = T_e + T_{ef} \quad \text{Equação 2.1}$$

$$T_e = \frac{V_n}{LH} \quad \text{Equação 2.2}$$

onde T_{ea} é a espessura equivalente da parede de alvenaria; T_e é a espessura equivalente do bloco; T_{ef} é a espessura equivalente do acabamento; V_n é o volume líquido do bloco; L é o comprimento do bloco; e H é a altura especificada do bloco.

No cálculo da espessura efetiva são considerados parâmetros como o tipo de acabamento e a configuração de vazios do bloco. Em paredes não grauteadas ou parcialmente grauteadas, a espessura equivalente, T_e , deverá ser determinada pela Equação 2.2. Em construções totalmente grauteadas, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco. Em blocos vazados preenchidos com material solto, a espessura equivalente, T_e , deverá ser a própria espessura do bloco quando o material de preenchimento for areia, brita 0 ou brita 1, argila expandida, cinzas volantes expandidas, cinzas, perlita ou vermiculita.

Paredes de alvenaria com acabamento aplicado ao lado não exposto ao fogo, tem a espessura do acabamento ajustada pela multiplicação da espessura real do acabamento pelo fator aplicável da Tabela 2.2 com base no tipo de agregado dos blocos ou no tipo de alvenaria cerâmica. A espessura de revestimento ajustada deve ser adicionada à espessura equivalente da parede, em seguida, determina-se o tempo de resistência ao fogo da alvenaria, incluindo o efeito do acabamento.

Tabela 2.2 – Fator multiplicador da espessura de revestimentos aplicados no lado não exposto ao fogo

Tipo de material usado na parede	Revestimento com argamassa cimentícia ou ladrilho hidráulico	Revestimento de gesso com areia	Revestimento de gesso com vermiculita ou perlita	Revestimento em gesso acartonado (Drywall)
Parede de alvenaria de concreto				
Blocos de concreto - agregado: silicoso, calcário, cinzas, escória de alto forno resfriada a ar	1.00	1.25	1.75	3.00
Blocos de concreto - produzidos com 80% ou mais de xisto expandido, ardósia expandida, argila expandida, escória expandida ou pedra-pomes.	0.75	1.00	1.25	2.25
Parede de alvenaria cerâmica				
Tijolos maciços	1.00	1.25	1.75	3.00
Blocos vazados	0.75	1.00	1.50	2.25

Fonte: adaptado ACI/TMS 216.1 (2014)

Nas paredes de alvenaria com revestimento aplicado no lado exposto ao fogo, o tempo atribuído ao acabamento, conforme a Tabela 2.3, deve ser adicionado ao TRF da alvenaria determinado na Tabela 2.1, verificando a resistência ao fogo de todo o conjunto.

Tabela 2.3 – Tempo atribuído aos materiais de revestimento na face exposta ao fogo

Revestimento	Tempo (min)
Gesso acartonado (<i>Drywall</i>)	
3/8 pol. (9,5 mm)	10
1/2 pol. (12,7 mm)	15
5/8 pol. (15,9 mm)	20
Duas camadas de 3/8 pol. (Duas camadas de 9,5 mm)	25
Uma camada de 3/8 pol. (9,5 mm) e uma camada de 1/2 pol. (12,7 mm)	35
Duas camadas de 1/2 pol. (Duas camadas de 12,7 mm)	40
<i>Drywall</i> tipo "X" (resistente ao fogo)	
1/2 pol. (12,7 mm)	25
5/8 pol. (15,9 mm)	40
Argamassa de cimento Portland e areia aplicada diretamente*	
Argamassa de cimento Portland e areia sobre tela metálica	
3/4 pol. (19 mm)	20
7/8 pol. (22,2 mm)	25
1 pol. (25,4 mm)	30
Argamassa de gesso e areia sobre ripas de gesso de 3/8 pol. (9,5 mm)	
1/2 pol. (12,7 mm)	35
5/8 pol. (15,9 mm)	40
3/4 pol. (19 mm)	50
Argamassa de gesso e areia sobre tela metálica	
3/4 pol. (19 mm)	50
7/8 pol. (22,2 mm)	60
1 pol. (25,4 mm)	80

*para considerar a contribuição da argamassa de cimento Portland e areia para determinar a espessura equivalente da alvenaria na utilização das tabelas de Tea, é permitido o uso da espessura real da argamassa não ultrapassando o valor de tempo correspondente a 5/8 pol. (15,9 mm)

Fonte: adaptado ACI/TMS 216.1 (2014)

Paredes com acabamentos diferentes em suas faces de provável exposição ao fogo devem ser verificadas, assumindo que cada face como sendo o lado de exposição ao fogo. A resistência ao fogo dessa parede (TRF) deve ser tomada como o menor dos tempos obtidos nos cálculos isolados. Quando os revestimentos (no caso de aplicação em ambas as faces) contribuem para a resistência ao fogo do conjunto, deve-se limitar essa contribuição total à metade da contribuição atribuída à parede sem revestimento.

2.3.2 Norma Australiana (AS 3700: 2018)

A norma australiana AS 3700 (2018), permite que os projetistas de paredes de alvenaria em situação de incêndio utilizem os critérios de adequabilidade estrutural (R), estanqueidade (E) e isolamento térmico (I), respeitando os limites tabelados de espessura e esbeltez da parede

e cobrimento de armadura; ou projetem a estrutura com base em resultados de ensaio em laboratório, utilizando, por exemplo, ábacos de dimensionamento fornecidos pelos fabricantes de blocos daquele país.

A adequabilidade estrutural (R) de uma parede é afetada pela expansão térmica do material utilizado na fabricação dos blocos e de sua esbelteza, verificada de acordo com o índice, S_{rf} – *slenderness ratio on fire resistance*, que, por sua vez, depende das vinculações das paredes em suas extremidades, da espessura da parede e do distanciamento entre seus apoios verticais e horizontais. O S_{rf} da parede não deve exceder o valor de referência da Tabela 2.4. Se a esbelteza da parede for maior que a máxima permitida, a parede deverá ser redimensionada com uma espessura maior ou modificado o arranjo estrutural de forma a aumentar a rigidez do elemento, introduzindo novas restrições na mesma.

Tabela 2.4 – Índice de esbelteza máximo para a adequabilidade estrutural

	Tempo de resistência ao fogo (min)					
	30	60	90	120	180	240
1 Alvenaria não armada						
i. Blocos cerâmicos	25.0	22.5	21.0	20.0	18.0	17.0
ii. Blocos de silicato de cálcio com agregado basáltico						
(A) menos de 45% de todos os agregados	20.5	19.0	18.0	17.5	16.5	15.5
(B) pelo menos 45% de todos os agregados	25.0	22.5	21.0	20.0	18.0	17.0
iii. Blocos de concreto com agregados basálticos						
(A) menos de 45% de todos os agregados	19.5	18.0	17.0	16.0	15.5	15.0
(B) pelo menos 45% de todos os agregados	25.0	22.5	21.0	20.0	18.0	17.0
2 Alvenaria armada	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0	36.0

Fonte: adaptado AS 3700 (2018)

O índice de esbelteza é definido em função do tipo de vinculação da parede. Paredes que não possuem apoio nas laterais têm o índice de esbelteza definido pela Equação 2.3.

$$S_{rf} = \frac{a_{vf}H}{t} \quad \text{Equação 2.3}$$

Paredes que possuem apoios em apenas uma ou nas duas laterais têm seu índice de esbelteza calculado pelo menor valor dado nas Equações 2.3, 2.4 e 2.5.

$$S_{rf} = \frac{0,7}{t} \sqrt{a_{vf}H \cdot a_hL} \quad \text{Equação 2.4}$$

$$S_{rf} = \frac{a_hL}{t} \quad \text{Equação 2.5}$$

onde:

S_{rf} = índice de esbelteza da parede em situação de incêndio;

a_{vf} = igual a 0,75 caso a parede possua apoios superior e inferior. No caso de a parede possuir somente apoio inferior, o coeficiente vale 2,0;

H = altura do membro entre os travamentos verticais da parede;

t = espessura total da parede;

a_h = vale 1,0 se o elemento possui apoios ao longo de suas bordas laterais. Caso o elemento seja apoiado lateralmente ao longo de apenas uma borda vertical, o valor a ser adotado é 2,5;

L = comprimento da parede entre as faces laterais restringidas ou o comprimento de uma parede com travamento lateral em apenas uma de suas extremidades. No caso de juntas prumo ou no caso de paredes com aberturas, o comprimento é medido até a junta ou abertura.

A norma australiana determina que para definir o período de resistência ao fogo em relação ao isolamento, a espessura do material de uma parede deve ser a espessura total da parede quando a parede é construída a partir de blocos com uma proporção de vazios não superior a 30% ou estiver totalmente grauteada. Quando a parede é construída por blocos com uma proporção de vazios superiores a 30% e não for totalmente grauteada, utiliza-se a espessura equivalente do bloco, que é calculada a partir do volume líquido do material dividido pela área da face vertical exposta do bloco. Na determinação da espessura do material, qualquer reboco aplicado a uma face exposta ao fogo não deve ser considerado. Quando aplicado a uma face não exposta ao fogo pode ser considerado para uma espessura máxima de 20 mm.

Assim, a verificação do isolamento térmico (I) não deve ser menor que os valores apresentados na Tabela 2.5, lembrando que estes valores só são válidos para paredes com juntas verticais preenchidas.

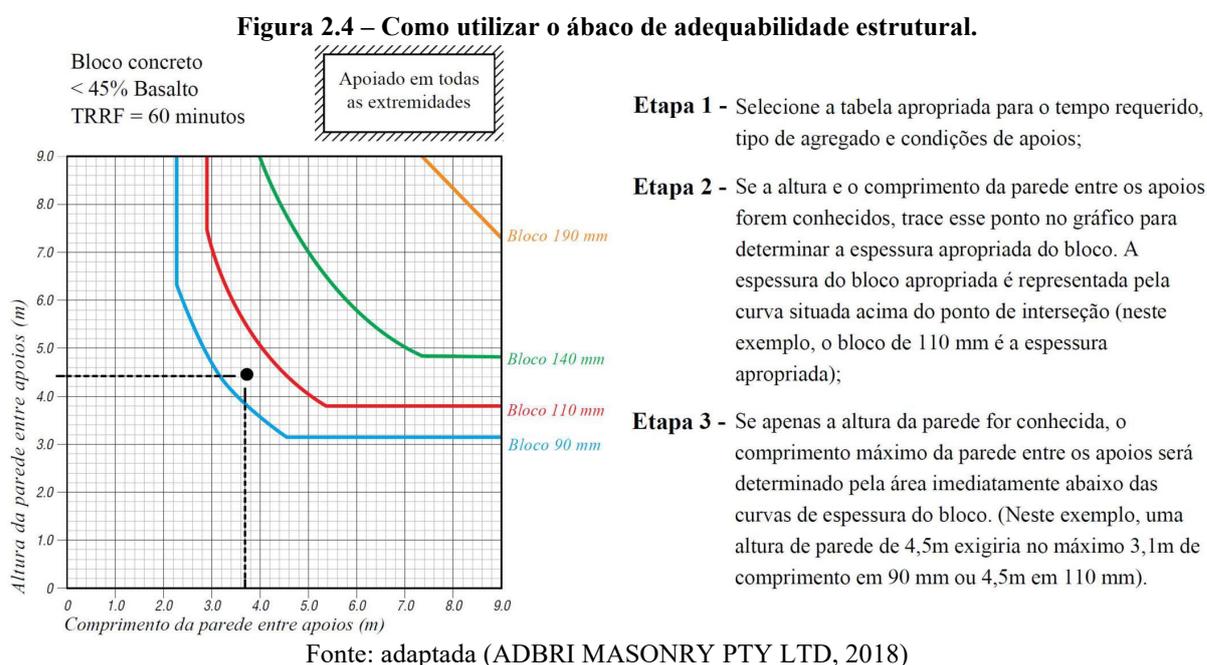
Tabela 2.5 – Espessura mínima de paredes considerando o isolamento térmico (mm)

Tipo de bloco	TRF (min)					
	30	60	90	120	180	240
Cerâmico	60	90	110	130	160	180
Silicato de cálcio	50	70	90	110	135	160
Concreto com densidade:						
> 1800 kg/m ³	55	80	100	120	150	180
≤ 1800 kg/m ³	55	75	90	110	135	160

Fonte: adaptado AS 3700 (2018)

A norma AS 3700 (2018) informa que na ausência de ensaios para atender ao critério de estanqueidade (E), o elemento é considerado satisfatório, caso cumpra com os requisitos da Tabela 2.4 para adequação estrutural (R) e os requisitos da Tabela 2.5 para isolamento (I).

Uma alternativa ao dimensionamento tabular também permitida na norma da Austrália é a consideração de ábacos fornecidos pelas indústrias de blocos do país. Esses ábacos permitem a verificação rápida do critério de adequabilidade estrutural já considerando os demais critérios (estanqueidade e isolamento térmico). Assim é necessário apenas, ajustar a espessura da parede conforme o material do bloco, o TRRF, as condições de apoio e as dimensões da parede. Na Figura 2.4 é ilustrado esse procedimento. Vale ressaltar que esses ábacos não especificam os níveis de carregamento das paredes, considerando implicitamente a função estrutural através da definição de limites para o índice de esbeltez.



2.3.3 Eurocode 6 (EN 1996-1-2: 2005)

Apesar do EN 1996-1-2 está sendo alterado e se encontrar em processo de consulta público e já se sabe que algumas alterações serão realizadas, tais como: remoção dos atuais Anexos A (orientação sobre a seleção dos períodos de resistência ao fogo) e Anexo C (modelo simplificado de cálculo); revisão dos dados tabulados com adoção dos limites inferiores das atuais faixas de espessuras prescrita; e novos dados para o método de cálculo avançado. O Eurocode 6 (2005) se apresenta como um dos mais completos códigos de dimensionamento da alvenaria estrutural. Além de especificar o grau de solicitações das paredes, adiciona o critério de impacto mecânico (M) com base na função da parede de alvenaria na edificação. O código informa que a análise da alvenaria em situação de incêndio pode ser realizada por meio de testes laboratoriais; dados tabulados; análise de elementos estruturais, partes da estrutura ou análise geral da estrutura. Para essas análises, o código oferece os dados necessários para a realização

de um modelo de cálculo avançado que pode ser realizado com o auxílio de softwares comerciais de modelagem numérica.

O método tabular é um dos métodos mais simples e fáceis de usar, e provavelmente, o mais conservador. Em seu Anexo B, é possível encontrar um total de 32 tabelas divididas pela função da parede (critérios de resistência ao fogo), pelo tipo de material do bloco (cerâmico, concreto, sílico calcário etc.), pela resistência à compressão dos blocos (f_b), pela densidade dos blocos (ρ) e pela função da relação entre força solicitante de cálculo da parede em situação de incêndio e a força resistente de cálculo à compressão da parede em situação normal (α), na proposta de norma que se encontra em consulta pública esse termo foi substituído pelo grau de utilização no tempo zero (μ_0). As espessuras são prescritas em valores exatos ou em intervalos recomendados, também indicam as espessuras para paredes com revestimentos adequados às exigências do código (espessura mínima de 10 mm nas duas faces para paredes simples, ou na face exposta ao fogo para parede dupla). Para melhor entendimento, na Tabela 2.6, é demonstrado uma dessas tabelas apresentadas pelo Eurocode 6 para dimensionamento da alvenaria em situação de incêndio.

Tabela 2.6 – Espessura mínima de paredes carregadas de blocos de concreto (critério REI)

Propriedades dos materiais Resistência à compressão (f_b) [N/mm ²] Densidade (ρ) [kg/m ³] Agregado normal $6 \leq f_b \leq 35$ (área líquida) $720 \leq \rho \leq 1650$	Espessura mínima em milímetro (t_f) para o tempo de resistência ao fogo (TRF) em minutos na classificação REI						
	30	45	60	90	120	180	240
$\alpha \leq 1,0$	90/170 (90/140)	90/170 (100/140)	90/170 (90/140)	90/170 (90/140)	100/190 (90/170)	140/240 (100/190)	150/300 (100/240)
$\alpha \leq 0,6$	70/140 (60/100)	90/140 (70/100)	70/140 (70/100)	90/170 (70/100)	90/170 (70/140)	100/190 (90/170)	140/240 (100/190)

Fonte: adaptado EN 1996-1-2 (2005)

O método de cálculo simplificado recomendado pelo EN 1996-1-2 (2005) está detalhado em seu Anexo C, sendo válido para paredes e pilares de alvenaria sob exposição a incêndio-padrão construídos com blocos e combinações de argamassas especificadas. Neste método de cálculo, a capacidade de carga em situação de incêndio é obtida pelas condições de contorno na seção transversal residual da alvenaria para períodos determinados de exposição a incêndio indicados usando o carregamento a temperatura normal. A relação entre dilatação térmica e temperatura de alvenaria pode ser considerada constante.

O Eurocode 6 (2005) propõe uma verificação da seção no ELU e as ações combinadas conforme as recomendações usuais do código, similar ao que ocorre com a verificação no

concreto armado e no aço. São determinadas duas isotermas da seção transversal: uma da seção estruturalmente ineficaz (θ_2) e uma seção da transversal residual (θ_1), calculando-se a capacidade de carga no ELU com a seção transversal residual (Figura 2.5). No ELU, para a situação de incêndio, o valor solicitante da carga vertical aplicada a uma parede ou pilar deve ser menor ou igual ao valor de carga vertical resistente da parede ou pilar:

$$N_{Sd} \leq N_{Rd,fi\theta 2} \quad \text{Equação 2.6}$$

O valor de carga vertical resistente da parede ou pilar é dado por:

$$N_{Rd,fi\theta 2} = \Phi(f_{d\theta 1} A_{\theta 1} + f_{d\theta 2} A_{\theta 2}) \quad \text{Equação 2.7}$$

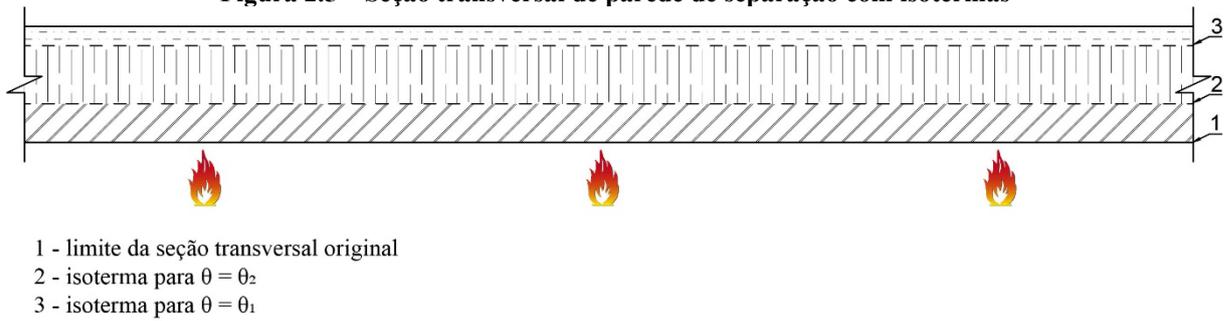
A excentricidade, $e_{\Delta\theta}$, devido a variação de temperatura na parede ou pilar de alvenaria, para uso no método simplificado de cálculo pode ser obtida a partir de:

$$e_{\Delta\theta} = \sqrt[3]{h_{ef}^2 [\alpha_t(\theta_2 - 20)] / t_{Fr}} \leq h_{ef} / 20 \quad \text{Equação 2.8}$$

onde:

- A área total de alvenaria
- $A_{\theta 1}$ área de alvenaria até θ_1
- $A_{\theta 2}$ área de alvenaria entre θ_1 e θ_2
- θ_1 temperatura até a qual pode-se utilizar a capacidade resistente da alvenaria (tabelado)
- θ_2 temperatura acima da qual o material é desprezado (tabelado)
- N_{Sd} valor da força vertical solicitante de cálculo
- $N_{Rd,fi\theta 2}$ valor da força vertical resistente de cálculo, em situação de incêndio
- $f_{d\theta 1}$ resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria até θ_1
- $f_{d\theta 2}$ resistência à compressão, de cálculo, da alvenaria entre θ_1 e θ_2
- $e_{\Delta\theta}$ excentricidade devido à variação de temperatura na alvenaria
- Φ fator de minoração da capacidade portante da parede que leva em consideração eventual excentricidade adicional $e_{\Delta\theta}$
- h_{ef} altura efetiva da parede
- α_t coeficiente de expansão térmica
- t_{Fr} espessura da seção transversal cuja temperatura não exceda θ_2 .

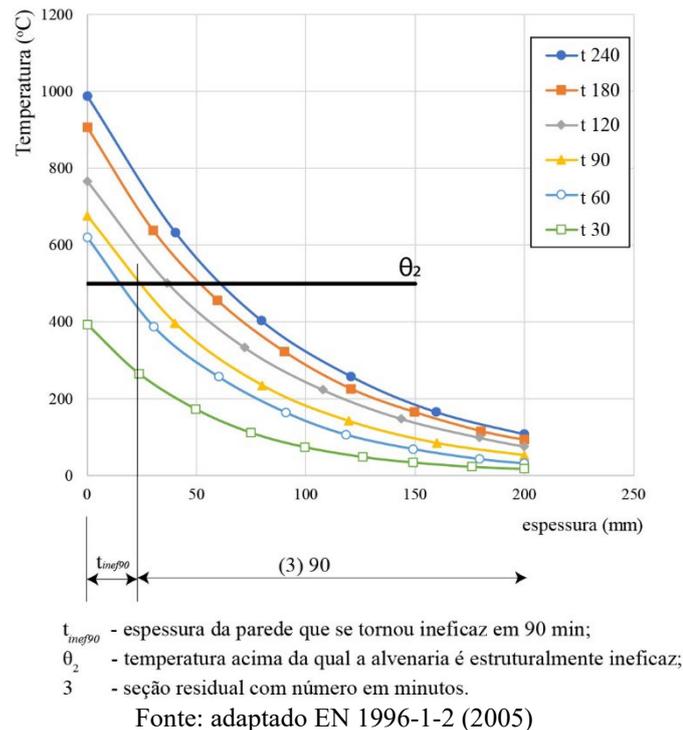
Figura 2.5 – Seção transversal de parede de separação com isoterma



Fonte: adaptado EN 1996-1-2 (2005)

A distribuição da temperatura na seção da alvenaria e a temperatura à qual a alvenaria se torna ineficaz, dependendo do tempo de exposição ao fogo, devem ser obtidas a partir dos resultados dos ensaios ou de um banco de dados. Na ausência de resultados de testes ou banco de dados, gráficos como a Figura 2.6 estão disponíveis para cada tipo de alvenaria.

Figura 2.6 – Distribuição em uma seção de alvenaria e a temperatura na qual a alvenaria se torna ineficaz



Quanto ao dimensionamento de alvenarias estruturais em situação de incêndio utilizando métodos avançados de cálculo, deve-se basear nos princípios reconhecidos da teoria da mecânica estrutural, considerando as alterações das propriedades mecânicas com a temperatura. Os efeitos de deformações e tensões induzidas termicamente devido ao aumento da temperatura e devido a diferenças de temperatura devem ser considerados. O Eurocode 6 (2005) fornece informações relevantes, para cada tipo de alvenaria, através de gráficos sobre: propriedades térmicas (condutividade térmica e capacidade térmica específica), propriedades físicas

(densidade) e propriedades mecânicas (relações tensão-deformação), com valores para cada temperatura em relação aos valores para a temperatura ambiente (20°C).

2.4 APLICABILIDADE DOS CÓDIGOS INTERNACIONAIS À REALIDADE BRASILEIRA

Como já informado (item 1.1), o Brasil ainda não possui norma para alvenaria em situação de incêndio, apesar de já estar sendo discutido pela Comissão de Estudo de Alvenaria Estrutural ABNT/CE-002: 123.010. Por ser amplamente utilizado em edifícios residenciais altos e não possuir norma nacional vigente, o Corpo de Bombeiros do Estado de São Paulo (2019), assim como corpos de bombeiros de outros estados, recomendam que o projeto de alvenaria estrutural em situação de incêndio seja executado de acordo com as instruções do Eurocode 6 em sua última edição, ou a norma similar reconhecida internacionalmente até que existam regulamentações nacionais sobre o assunto.

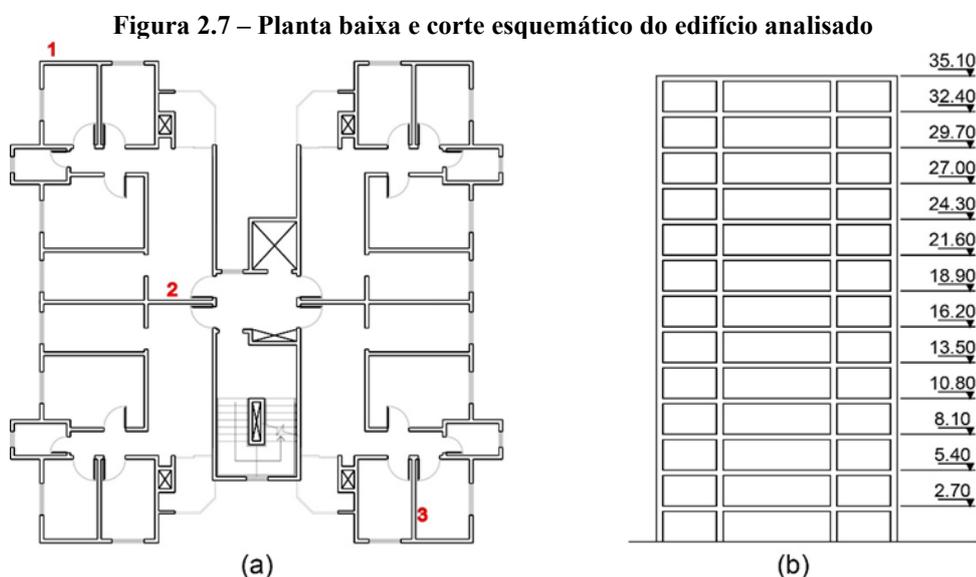
A aplicabilidade das normas internacionais à realidade brasileira, visto que há variabilidade na geometria, capacidade de resistência e materiais usados tanto em blocos quanto em revestimento entre os países, deve ser questionada. Existem diferenças significativas ao nível das propriedades térmicas e mecânicas que influenciam fortemente o comportamento da alvenaria em situação de incêndio. Outra questão que deve ser considerada diz respeito às metodologias de teste usadas em cada país para determinar a classificação de resistência ao fogo de materiais de construção, componentes e estruturas, já que cada método de projeto é baseado em diferentes métodos de teste. Embora existam semelhanças entre os diferentes protocolos de teste, também pode haver diferenças suficientes que podem resultar em uma classificação diferente de acordo com o procedimento que foi adotado nos códigos: ASTM E119 (2020) – América do Norte, AS 1530.4 (2014) – Austrália ou ISO 834 (1999) – Europa.

Para exemplificar a aplicabilidade de normas internacionais sobre a resistência ao fogo no contexto brasileiro é apresentado no item seguinte um exemplo prático de um típico edifício residencial em alvenaria estrutural encontrado no país.

2.4.1 Estudo de caso

Apresenta-se a seguir, a verificação em situação de incêndio de uma edificação residencial típica brasileira construída em alvenaria estrutural. Diferentemente do que se encontra fora do Brasil, o prédio analisado possui 12 pavimentos, 4 apartamentos por andar e distância entre pavimentos (pé-direito + laje) de 2,70 m. São realizadas duas análises,

considerando a utilização de dois blocos distintos: bloco de concreto vazado e bloco cerâmico vazado de parede maciça. Também é considerado o revestimento de 10 mm de argamassa de cimento e areia aplicado nas faces externas e internas das paredes. É importante salientar que revestimentos de menores espessuras, como por exemplo, 5 mm de gesso em paredes internas, também são comumente adotados no Brasil, entretanto, essa espessura de revestimento não é contemplada nas normas internacionais estudadas. A Figura 2.7(a) mostra a planta baixa do edifício, enquanto a Figura 2.7(b) mostra um corte esquemático do edifício. A escolha desses parâmetros: altura da edificação, planta baixa, tipos de blocos, espessura das paredes e acabamentos foram feitos para atender uma maior representatividade das construções residenciais de alvenaria brasileiras.



Fonte: (MEDEIROS *et al.*, 2021)

Todas as paredes do edifício têm função estrutural, assim deve ser considerado o critério R para a parede 3. Algumas paredes também cumprem a função de isolamento e estanqueidade, parede 2 por exemplo, sendo necessário verificá-las de acordo com o critério REI e outras podem ser passíveis de impacto mecânico (parede 1), neste caso o critério REI-M é o mais adequado.

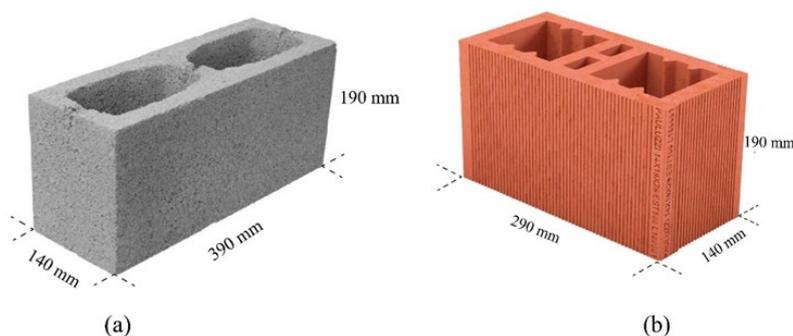
A norma brasileira ABNT NBR 14432 (2001), determina o Tempo Requerido de Resistência ao Fogo (TRRF) que toda estrutura deve garantir de acordo com sua classificação quanto à ocupação e altura da edificação. Neste estudo de caso, foi abordado um edifício residencial com habitações multifamiliares, com altura total superior a 30 metros. Assim, de acordo com a norma brasileira, deve ser garantido um TRRF de 120 minutos para a edificação.

Sabe-se que o tipo de agregado e a geometria do elemento afetam o desempenho térmico e as propriedades mecânicas em altas temperaturas. Dessa forma, um fato relevante que deve

ser levado em consideração são os tipos de agregados e a geometria dos blocos estruturais brasileiros. Há uma diferença significativa entre os países nos tipos de agregados utilizados e, em suas classificações, principalmente quando se trata de blocos de concreto. No Brasil, há uma expressiva predominância no uso de agregados de peso normal, porém não são fornecidas informações sobre a origem mineralógica desses agregados – se magmáticos (basalto, granito...); metamórfica (quartzo, gnaise...) ou sedimentar (calcário, arenito...) – quando os blocos são adquiridos. No que diz respeito à geometria, os blocos de concreto possuem projeto padronizado e dimensões mínimas regulamentadas de acordo com a ABNT NBR 6136 (2016); dependendo do fabricante, é possível encontrar variações de 40 a 50% nos volumes de vazios dos blocos. Já os blocos cerâmicos, mesmo tendo dimensões mínimas regulamentadas pela ABNT NBR 15270-1 (2017), são facilmente encontrados com geometria de seção transversal interna diferente dependendo do fornecedor, o que altera bastante a espessura equivalente de cada unidade.

Para este estudo de caso, verificou-se a necessidade de um bloco com resistência característica $f_{bk} = 12$ MPa (área bruta). Os blocos estruturais comerciais foram escolhidos de empresas certificadas pelos Programas Setoriais de Qualidade (PSQ) em seu respectivo setor, que atendem a todos os requisitos da norma correspondente. Blocos de concreto vazado são frequentemente utilizados nas dimensões de $140 \times 190 \times 390$ mm (Figura 2.8a), o bloco da empresa certificada escolhida apresenta como agregado rocha magmática tipo granito e espessura equivalente (T_e) de 78,8 mm. Os blocos cerâmicos extrusados na resistência solicitada de 12 MPa, são mais comumente encontrados nas dimensões de $140 \times 190 \times 290$ mm (Figura 2.8b), na empresa certificada escolhida estes blocos possuem paredes externas maciças e paredes internas vazadas e espessura equivalente (T_e) de 67,2 mm. Considerando esses dados, verifica-se a seguir, se o dimensionamento da edificação em alvenaria estrutural brasileira, atende aos códigos e normas internacionais estudados.

Figura 2.8 – Blocos estruturais brasileiros utilizados em prédios de alvenaria estrutural



Fonte: próprio autor

2.4.1.1 Projeto de acordo com o código americano ACI/TMS 216.1

Conforme relatado anteriormente, o ACI/TMS 216.1 (2014) trata do dimensionamento de paredes de alvenaria por meio de métodos tabulares, considerando apenas critérios de estanqueidade e isolamento. Portanto, exige espessuras mínimas que as paredes de alvenaria devem ter para resistir ao fogo por um determinado tempo. De acordo com a Tabela 2.1, observa-se que para atender a TRRF de 120 minutos, será necessária a espessura equivalente (T_{ea}) de 107 mm para blocos vazados de concreto com agregados silicosos e 86 mm para blocos cerâmicos vazados.

Se as paredes não tivessem acabamentos, a espessura equivalente da alvenaria (T_{ea}) seria igual à espessura equivalente dos blocos (T_e). No caso: 78,8 mm para blocos de concreto e 67,2 mm para blocos cerâmicos, isso corresponde ao tempo de resistência ao fogo de 72 e 80 minutos respectivamente, conforme a interpolação linear dos valores apresentados na Tabela 2.1. No entanto, deve-se avaliar a contribuição que os revestimentos proporcionam à alvenaria.

As paredes externas e divisórias entre apartamentos devem ser consideradas como tendo uma face exposta ao fogo e outra não. A face não exposta ao fogo tem seu revestimento somado à espessura equivalente do bloco, obedecendo às prescrições da Tabela 2.2. De acordo com esta tabela, o fator multiplicador 1 é utilizado para acabamentos em paredes de blocos de concreto e fator multiplicador 0,75 para paredes com blocos cerâmicos vazados, que proporciona a espessura equivalente do acabamento (T_{ef}) de 10 mm para a face não exposta ao fogo nas paredes com blocos de concreto e T_{ef} de 7,5 mm nas paredes com blocos cerâmicos. Assim, a espessura equivalente da parede de alvenaria passa a ser considerada 88,8 mm e 74,7 mm, respectivamente. Por interpolação linear dos valores apresentados na Tabela 2.1, obtém-se um tempo de resistência ao fogo de 87 minutos para paredes com blocos de concreto; e 96 minutos para paredes com blocos cerâmicos. A contribuição do tempo referente aos acabamentos utilizados nas faces expostas ao fogo deve ser acrescida, utilizando a Tabela 2.3. Ressalta-se que a espessura de acabamento no estudo de caso, e geralmente utilizada no Brasil, de 10 mm não é abordada nesta tabela. Se uma interpolação de valores baseada na tabela em questão puder ser considerada, 10 minutos podem ser adicionados. Portanto, a alvenaria com exposição ao fogo de apenas um lado, que deve garantir os critérios de isolamento e estanqueidade, tem uma resistência total ao fogo de 97 minutos para paredes com blocos de concreto e 106 minutos para paredes com blocos cerâmicos.

Paredes internas de um mesmo apartamento não precisam atender ao critério (EI), mas como se trata de alvenaria estrutural, ainda precisam atender ao critério (R). Portanto, considera-se a possibilidade de exposição ao fogo de ambos os lados, o que resultaria em um tempo total

de resistência ao fogo de 92 minutos para alvenaria de blocos de concreto e 100 minutos para alvenaria com blocos cerâmicos. Nota-se que, utilizando as diretrizes do código americano e assumindo a consideração de uma espessura de acabamento que não esteja prevista no referido código; ambas as alvenarias (blocos de concreto e cerâmico) não atendem ao TRF de 120 minutos, exigido pela norma brasileira ABNT NBR 14432 (2001).

2.4.1.2 Projeto de acordo com a norma australiana AS 3700

A norma australiana considera os critérios básicos de verificação: adequação estrutural (R), isolamento (I) e estanqueidade (E). Para a verificação da capacidade portante, avalia-se se o menor índice de esbeltez de um elemento, calculado de acordo com as equações (2.3), (2.4) e (2.5), atende aos valores prescritos na Tabela 2.4. Assim, para o estudo de caso em questão, a razão de esbeltez S_{rf} não deve ser maior que 20.

Verifica-se na planta baixa, que todas as paredes têm apoios superiores e inferiores. Assim, o menor valor de S_{rf} das paredes não ultrapassa o limite de 20 determinado pela Tabela 2.4, o que garante o atendimento aos critérios de adequação estrutural (R) exigidos pela norma australiana.

Tanto os blocos de concreto como os blocos cerâmicos usados nas paredes do edifício de estudo de caso têm volume vazado superior a 30%, estas paredes são revestidas em ambas as faces, contudo a espessura do revestimento exposto ao fogo não deve ser considerada. Nesta situação, a espessura equivalente do bloco deve ser calculada pelo volume líquido do material dividido pela área da face vertical do bloco exposto ao fogo. Assim, considerando a alvenaria com um lado exposto ao fogo, obtêm-se espessuras equivalentes de 88,8 mm para as paredes de blocos de concreto e 77,2 mm para as paredes de blocos cerâmicos. Lembrando-se que as paredes sujeitas à exposição ao fogo em ambas as faces não necessitam de garantir a estanqueidade e o isolamento, sendo apenas necessário cumprir a adequação estrutural (R). Dessa forma, o critério de isolamento (I) para um TRRF de 120 minutos exigido pela AS 3700 (2018) e apresentado na Tabela 2.5, não é atendido satisfatoriamente para nenhum dos blocos, pois seria necessária uma espessura equivalente de 120 mm para alvenaria de blocos de concreto e 130 mm para alvenaria de blocos cerâmicos. É interessante notar que, na norma australiana, para um mesmo TRF os blocos cerâmicos requerem uma espessura equivalente maior que os blocos de concreto, diferentemente do que ocorre na norma americana; isso pode estar relacionado ao tipo de material e geometria dos blocos utilizados em cada país.

Quanto ao critério de estanqueidade (E), a norma australiana informa que na ausência de testes o critério é satisfeito se atender tanto aos critérios já verificados (R) quanto (I). Assim,

levando em conta essas considerações, apenas as paredes internas de um mesmo apartamento, que não precisam atender estanqueidade e isolamento, atenderiam aos requisitos estabelecidos pela norma australiana. Outro aspecto relevante é que o método tabular proposto, baseou-se apenas em ensaios com fogo de apenas um lado e na esbeltez da parede, tornando o critério (R) para paredes de não compartimentação, menos exigente que para paredes que devem atender o critério de isolamento.

2.4.1.3 Projeto de acordo com o Eurocode 6 - EN 1996-1-2

O dimensionamento pelo método tabular do código europeu apresenta várias tabelas que se dividem, inicialmente, pela função da parede no edifício (critérios de resistência ao fogo) e pelo material da unidade de alvenaria (cerâmico, silicato de cálcio, concreto celular autoclavado, concreto de agregado leve e agregado de peso normal). Em seguida, cada tabela é dividida de acordo com a resistência das unidades (f_b), de acordo com a densidade bruta seca (ρ) e, por fim, de acordo com a relação da carga de projeto aplicada na parede e a resistência de projeto da parede (α), mostrando os valores de espessura dos blocos com e sem os revestimentos aplicado nas superfícies da parede.

Para realizar a verificação da edificação estudada, primeiro é necessário identificar qual tabela é adequada para cada alvenaria. As alvenarias formadas por blocos de concreto com material de peso normal utilizam as tabelas: N.B.3.3 para critério (R), N.B.3.2 para critério (REI) e N.B.3.5 para critério (REI-M). De acordo com a classificação da EN 1996-1-1, o bloco utilizado pertence ao Grupo 2, pois possuem furos verticais e 44% de volume vazio; atenção para a resistência do bloco (f_b) em área líquida e sua densidade: o bloco em questão possui 21,6 MPa e 2140 kg/m³ respectivamente.

As alvenarias formadas por blocos cerâmicos utilizam as tabelas: N.B.1.3 para critério (R), N.B.1.2 para critério (REI) e N.B.1.5 para critério (REI-M). De acordo com a classificação da EN 1996-1-1, o bloco utilizado também pertence ao Grupo 2, pois possuem furos verticais e 52% de volume vazio; atenção à resistência do bloco (f_b) em área líquida, densidade e proporção da espessura combinada como uma porcentagem da espessura da parede (ct): o bloco adotado possui 25 MPa, 1921 kg/m³ e 36% respectivamente.

No projeto de alvenaria da edificação estudada, identificou-se que a parede mais carregada deveria suportar uma carga de 213,6 kN/m. Seguindo as diretrizes de projeto da ABNT NBR 16868-1, verificou-se que a relação entre a carga de projeto considerada na parede em situação de incêndio e a resistência de projeto da parede será de 0,61 para a alvenaria de

blocos de concreto e 0,63 para a alvenaria de blocos cerâmico, ou seja, ambas as alvenarias têm um nível de carregamento (α) > 0,6.

A consideração do revestimento é possível se o acabamento tiver espessura mínima de 10 mm aplicada em ambas as faces, conforme adotado neste caso. Com essas informações, os valores mínimos para a espessura de cada alvenaria podem ser encontrados em sua tabela específica. Os valores para cada situação são mostrados na Tabela 2.7 para melhor visualização.

Tabela 2.7 – Tabelas utilizadas no estudo de caso com as espessuras mínimas para cada critério de verificação

Bloco	Critério de resistência	Tabela	Espessura mínima da parede (mm) para TRRF de 120 (min)
Cerâmico	R	N.B.1.3	170
	REI	N.B.1.2	140
	REI-M	N.B.1.5	365
Concreto	R	N.B.3.3	240
	REI	N.B.3.2	100/170
	REI-M	N.B.3.5	<i>vna</i>

* *vna* - valor não atribuído

Fonte: adaptado EN 1996-1-2 (2005)

Com essas considerações, para esta parede, é possível observar que somente o critério *REI* (resistência mecânica, estanqueidade e isolamento) cumpre os requisitos do código europeu. Lembrando que numa situação real, todas as paredes devem ser verificadas conforme sua função, características e carregamento. Nota-se que, para a utilização de blocos de concreto no caso de estudo, é dado um intervalo onde o valor escolhido pode variar de acordo com o país que adota o código, portanto, é provável que esta parede não seja aceita conforme o critério de alguns países europeus. Tomando como exemplo os anexos nacionais da Alemanha e Reino Unido, verificou-se que a parede não atende aos critérios alemães, mas atende aos critérios britânicos.

O modelo de cálculo simplificado é válido para paredes de alvenaria expostas ao fogo seguindo a curva padrão de incêndio proposta pela ISO-834 (1999), construídas com combinações de blocos e argamassas específicas. As curvas e valores informados no Eurocode para este método de cálculo foram desenvolvidos para blocos com volume de vazios inferior a 25%, portanto, apesar de ser uma ideia muito interessante, seria incorreto adotar os valores que ali se encontram disponíveis para os blocos deste estudo de caso e que são comumente usados no Brasil.

2.4.1.4 Análise e discussão sobre o estudo de caso

Diante dos resultados encontrados e da prescrição do Corpo de Bombeiros, que determina que, na ausência de uma norma nacional para dimensionamento de estruturas de alvenaria em situações de incêndio, seja adotada uma norma internacionalmente reconhecida, observa-se que algumas medidas podem ser implementadas para viabilizar a edificação estudada.

Seguindo as recomendações da ACI/TMS 216.1 (2014) o estudo de caso como foi projetado atende a um TRRF de 90 minutos, exigido para edifícios residenciais de até 30 metros de altura. Para garantir TRRF de 120 minutos para construção, os blocos vazados podem ser preenchidos com material solto (areia, brita, pedra-pomes, escória, xisto expandido, argila expandida, escória expandida, cinza volante expandida, perlita ou vermiculita). Considerando a espessura total do bloco; outra opção seria manter os blocos vazados, mas alterar sua espessura de 140 mm para 190 mm; também é possível manter a configuração atual do bloco e alterar o tipo de acabamento utilizado para materiais mais resistentes ao fogo; ou poderia implementar proteções ativas como detectores de fumaça e chuveiros automáticos (*sprinklers*) que podem diminuir o TRRF em até 30 minutos, atendendo assim as exigências solicitadas.

De acordo com a AS 3700 (2018), as paredes internas de cada apartamento que atendem apenas aos critérios de suporte de carga (*R*) atendem perfeitamente aos requisitos da norma. Quanto ao isolamento, a configuração atual da edificação estudada garantiria um TRRF de 60 minutos para construção com blocos de concreto e um TRRF de 30 minutos para construção com blocos cerâmicos. O que parece ser questionável, já que para uma situação mais agressiva (fogo em ambos os lados) é menos exigente que a consideração de fogo de apenas um lado. As soluções possíveis seriam preencher os blocos vazados ou aumentar sua espessura.

De acordo com a EN 1996-1-2 (2005), as paredes divisórias que isolam os diferentes apartamentos e áreas comuns (critérios *REI*) cumprem os requisitos do código. No entanto, as paredes com funções exclusivamente de resistência (*R*), que estão sujeitas à exposição ao fogo em ambas as faces, cumprem apenas um TRRF de 90 minutos, desta forma faz-se necessário aumentar a espessura do bloco ou implantar proteções ativas.

Diante dessa avaliação, é importante lembrar que cada país utiliza materiais e geometrias diferentes em seus blocos. Tradicionalmente, os outros países utilizam blocos mais robustos, maciços ou perfurados com baixo volume de vazios, utilizando ainda materiais com propriedades térmicas e mecânicas diferentes das utilizadas no Brasil. O mesmo pode ser dito para os revestimentos comumente utilizados nas edificações.

Com esta análise é possível perceber as diferenças entre a forma de abordar a alvenaria em situação de incêndio dos códigos e normas internacionais utilizados. Pode-se notar que o

código americano está totalmente focado no critério de isolamento e estanqueidade. Como tal, é mais conservador do que a norma europeia que contemplam os níveis de carregamento das paredes. Verifica-se também que a consideração dos diferentes tipos de revestimentos é melhor detalhada mesmo que as tabelas não apresentem variação na espessura desses acabamentos.

Seguindo a norma australiana, as construções residenciais típicas brasileiras devem atender ao critério de resistência (R), pois a norma considera apenas a esbeltez de um elemento. Quanto ao critério de isolamento (I), o fato de desconsiderar o revestimento da face exposta ao fogo associado à forma de avaliação da espessura equivalente, pode revelar-se mais conservador que as demais normas para paredes de compartimentação. Curiosamente, de acordo com esta norma, os blocos cerâmicos precisam de uma espessura equivalente maior que os blocos de concreto para o mesmo período de resistência ao fogo. Observa-se também que a possibilidade de utilização de ábacos fornecidos pelos fabricantes dos blocos pode ser bastante prática para dimensionamento da alvenaria em situação de incêndio.

O código europeu, usando o método tabular, pode ser menos conservador do que as normas americanas e australianas. Suas diversas tabelas que possuem intervalos mínimos de espessura para resistência ao fogo por um determinado período, podem ser um pouco confusas, pois, em muitas dessas tabelas, os mesmos intervalos se repetem em diferentes tempos de resistência ao fogo, variando os valores de espessura de acordo com o país em que está sendo adotado. Considerando o critério REI , os blocos brasileiros devem atender aos requisitos desta norma, pelo anexo nacional do Reino Unido. No entanto, é importante notar que existem diferenças entre as propriedades dos blocos fabricados no Brasil e na Europa. Por vezes não se encontra nas tabelas, blocos com densidade, resistência e volume de vazios idênticos aos utilizados no Brasil, por isso é necessário ter cautela e bom senso na hora de escolher a tabela que melhor se adequa à situação.

No Brasil, pouco se conhece sobre as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais que compõem a alvenaria estrutural. Da mesma forma, ao avaliar os resultados existentes sobre o comportamento das paredes de alvenaria em situação de incêndio, verifica-se uma insignificância numérica dos resultados nacionais. Os resultados obtidos no estudo de caso servem de alerta. Este tipo de construção é comum em todas as regiões do país. A situação peculiar do país exige que essas questões sejam abordadas com urgência no uso de normas internacionais. Sabe-se que nem sempre sua utilização retratará a real situação das edificações brasileiras.

É necessário enfatizar que as propriedades térmicas dos materiais têm forte influência no desempenho termomecânico do elemento em altas temperaturas. Os blocos vazados de concreto

brasileiros utilizam, exclusivamente, agregados de peso normal fabricados por grandes prensas vibratórias com forte energia de compactação e baixo consumo de cimento, enquanto em outros países também é utilizado blocos de agregado leve que resultam em unidades bastante diferentes das encontradas no país. Outro fator relevante diz respeito à geometria dos blocos cerâmicos brasileiros com maiores volumes de vazios e desenhos de seção transversal interna variando de acordo com o fornecedor.

Portanto, é de grande importância caracterizar os componentes e elementos de alvenaria estrutural utilizados no país, determinando o desempenho e as propriedades físicas e mecânicas de cada tipo diferente de bloco, além de compreender e determinar parâmetros básicos para projetos de alvenaria estrutural em situações de incêndio.

2.5 PESQUISAS NECESSÁRIAS PARA DESENVOLVIMENTO DE UMA NORMA BRASILEIRA

A segurança contra incêndio é tema dos mais relevantes sendo tratada em diversas legislações e normas técnicas, além de ser operada por vários profissionais, em especial das áreas de engenharia e arquitetura, não se restringindo a uma preocupação só dos bombeiros. No Brasil, a segurança contra incêndio é estadualizada. Desta forma, em vários estados há decretos associados a Instruções Técnicas (*IT*) dos Corpos de Bombeiros que fornecem exigências e recomendações sobre os sistemas de segurança contra incêndio. Na ausência dessas *ITs* empregam-se normas brasileiras publicadas pela ABNT. Normas estrangeiras ou internacionais podem ser usadas caso não existam normas equivalentes de âmbito nacional (ABNT NBR) ou de forma complementar, por exigência própria de algumas empresas ou de seguradoras para a garantia de um seguro, que acabam, em regra, sendo mais restritivas do que as normas nacionais. O Corpo de Bombeiros de São Paulo, por exemplo, admite o uso de normas internacionais, conforme estabelecido no item 2.2 da Instrução Técnica N° 08/2019 (Segurança estrutural contra incêndio):

Na ausência de norma nacional sobre dimensionamento das estruturas em situação de incêndio, adota-se o Eurocode em sua última edição ou norma similar reconhecida internacionalmente. No momento da publicação de norma nacional sobre o assunto, esta passará a ser adotada nos termos desta *IT* (POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2019).

Isso se deve à procura dos órgãos competentes por uma forma de manter as condições mínimas de segurança contra incêndio das edificações, buscando a preservação da vida das pessoas, mitigação de danos patrimoniais e possibilidade de atuação do CBPM em eventual

caso de sinistro. Apesar de ainda necessária, a aplicabilidade de códigos internacionais diante a ausência de uma norma nacional deve ser feita com bastante cuidado. Como visto no item anterior, cada país possui especificações de geometria, capacidade resistente e espessura a serem respeitadas pela indústria de blocos estruturais. Além disso, existem variações, entre as regiões, das composições mineralógicas das rochas utilizadas como agregado e dos revestimentos usuais. Desta forma faz-se necessária a elaboração de uma norma brasileira que considere as peculiaridades do país juntamente com o conhecimento já adquirido internacionalmente.

Infelizmente, no país, pouco se conhece sobre as propriedades térmicas e mecânicas em elevadas temperaturas dos componentes e elementos da alvenaria estrutural. Do mesmo modo, ensaios de paredes estruturais sob carregamento com blocos nacionais também são raros. Após extensa pesquisa, os únicos ensaios nacionais de paredes estruturais carregadas com blocos de concreto encontrados são os presentes no Manual de desempenho – Alvenaria com blocos de concreto (ABCP; BLOCO BRASIL; SINAPROCIM, 2021). Os resultados encontrados nestes ensaios indicaram coerência quando comparados com os valores calculados de acordo com as normas internacionais, entretanto, alguns pontos devem ser cuidadosamente analisados. É notório que o número de ensaios brasileiros é insignificante, além disso, os poucos existentes foram realizados com carregamento básico (em torno de 12% a 20% da capacidade de carga da parede) e com incidência do fogo apenas em uma das faces. O que deixa várias lacunas a serem respondidas, tais como: nível de carregamento, incidência de fogo em uma e duas faces, comportamento individual dos componentes (revestimento, argamassa de assentamento, graute, bloco, prisma e eventual armadura) e elementos, quando em conjunto.

Para o desenvolvimento de uma norma brasileira de alvenaria estrutural em situação de incêndio pesquisas concisas e alinhadas devem ser realizadas. Leite et al. (2016) sugerem que inicialmente, por conta ainda do incipiente parque de equipamentos em laboratórios nacionais aptos à avaliação de paredes carregadas, ensaios de blocos isolados e com diferentes tipos de acabamentos podem ser realizados, para que tabelas semelhantes às americanas sejam elaboradas, de forma que se possam calcular estruturas de alvenaria em situação de incêndio considerando pelo menos o critério de isolamento térmico (I). Para conseguir isso, a melhor alternativa seria a união dos poucos laboratórios nacionais equipados para avaliar, em conjunto, todos os blocos usuais do país.

Em seguida, o próximo passo seria o mapeamento das isotermas de todos os blocos, sendo a simulação numérica o caminho mais rápido e adequado para esse fim. Ressalta-se que, para o mapeamento de isotermas, é necessário a obtenção de inúmeras propriedades térmicas para

os blocos, as quais seriam obtidas, também, no citado esforço conjunto entre os poucos laboratórios nacionais equipados para tal caracterização. Com isso, um método de cálculo simplificado semelhante ao do Eurocode 6 (2005), apresentado na seção 2.3.3, poderia ser empregado para avaliação da resistência mecânica da parede (R) em situação de incêndio.

Finalmente, ensaios de paredes de alvenaria, carregadas, em situação de incêndio deverão ser feitos, para que ábacos semelhantes aos australianos possam ser montados e assim, finalmente, serão reunidas informações suficientes para balizar uma primeira normalização nacional sobre o tema.

No capítulo seguinte, uma metodologia de ensaio é desenvolvida como forma de determinar com maior precisão as propriedades mecânicas dos componentes básicos da alvenaria em elevadas temperaturas.

3. METODOLOGIA DE ENSAIO PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BLOCOS DE CONCRETO A ALTAS TEMPERATURAS

Para o caso da alvenaria estrutural de blocos de concreto, existem correlações entre resistência mecânica de blocos, prismas, pequenas paredes e paredes em tamanho natural. É óbvia a justificativa para a existência destas correlações: o ensaio em laboratório, sob elevadas temperaturas, de um bloco ou de um prisma é infinitamente mais barato que a avaliação de uma parede. Em situação de incêndio estas correlações, ainda, não existem. Além disso não existe um procedimento normalizado para avaliar as propriedades mecânicas residuais levando em consideração as propriedades intrínsecas dos blocos de concreto vazado (BCV). Desta forma, neste capítulo se discute sobre um padrão para a determinação dessas propriedades mecânicas (resistência à compressão e módulo de deformação) de blocos de concreto vazado sob temperaturas elevadas; primeiro passo para o estabelecimento das citadas correlações de resistência mecânica entre blocos, prismas, pequenas paredes e paredes em tamanho natural. Tendo como base as recomendações já existentes para a determinação da resistência mecânica do concreto sob temperaturas elevadas RILEM TC 200-HTC (2007), um extenso programa experimental foi desenvolvido para balizar a adaptação destas citadas recomendações para o caso de blocos de concreto; com destaque para a taxa de aquecimento e resfriamento das amostras a ser adotada nestas recomendações. Como resultado, apresenta-se para o bloco de concreto vazado sugestões de parâmetros necessários à avaliação, em laboratório, da resistência mecânica residual sob temperaturas elevadas: número de amostras, idade de avaliação, condições necessárias de armazenamento, a taxa de elevação da temperatura com o tempo para aquecimento das amostras e sugestões de instrumentação interna do equipamento para o controle efetivo desta taxa e garantia de uniformidade de aquecimento.

3.1 REFERENCIAL TEÓRICO

O comportamento em situação de incêndio de uma edificação em alvenaria estrutural está diretamente relacionado ao comportamento de seus materiais constituintes sob temperaturas elevadas. Avaliar a resistência mecânica residual, pós exposição a temperaturas elevadas, dos componentes da alvenaria estrutural é imprescindível, portanto, na definição de qualquer

procedimento de verificação de estruturas em alvenaria. No caso de blocos de concreto, uma vez que já existe recomendação internacional RILEM TC 200-HTC (2007) para avaliar a resistência mecânica residual do material, concreto, sob elevadas temperaturas, à primeira vista, parece natural a adoção destas recomendações para esta análise de comportamento. Entretanto, observa-se que é praticamente impossível a replicação de procedimentos de execução dos blocos na execução de amostra padronizada deste material destinada a esta avaliação. As etapas de fabricação de blocos de concreto envolvem uma série de parâmetros que variam de acordo com a necessidade do fabricante em questão (materiais, traço, moldagem, equipamentos, cura etc.).

Difícilmente haverá meios de se reproduzir, em laboratório, mistura de concreto similar àquela de produção dos blocos em fábrica sem uma vibro-prensa. Deste modo, como relatado por vários autores (ANDREINI *et al.*, 2015; AYALA, 2010; HARMATHY; ALLEN, 1972, 1973; KODUR; HARMATHY, 2016; NASER, 2019; NEVILLE, 2016; POPE; ZALOK, 2019, 2020; RUSSO; SCIARRETTA, 2013), considera-se que existe variações das propriedades térmicas e mecânicas entre o concreto produzido a partir de uma mistura fluida moldada e consolidada em uma forma e o concreto utilizado na fabricação de blocos para alvenaria estrutural; de consistência bem seca e vibroprensado. Entende-se que essas variações são influenciadas pela quantidade de cimento, tipo e tamanho do agregado, traço, proporção de água da mistura, teor de umidade, processo de produção, geometria, porosidade, cura etc. Como afirmam (DAWARE; NASER, 2021; NASER, 2019; POPE; ZALOK, 2019), poucos foram os trabalhos de pesquisa com foco específico nas propriedades térmicas do elemento (bloco) de alvenaria. Desta forma, pode-se concluir que a avaliação das propriedades térmicas e mecânicas de uma mistura de concreto moldado úmido como forma de representar o comportamento do concreto seco e vibroprensado, utilizado na fabricação dos blocos para alvenaria estrutural, pode levar a resultados não representativos.

A solução viável é, então, avaliar a resistência mecânica residual do próprio bloco, o que se justifica quando se almeja a obtenção de parâmetros para uma correlação entre esta resistência mecânica residual e a resistência mecânica residual de prismas, pequenas paredes e paredes em tamanho natural executadas com este mesmo bloco. Correlação esta, vale observar, já determinada, e empregada em procedimentos de projeto, para a alvenaria estrutural em situação de temperatura ambiente.

Resta então, a discussão dos procedimentos metodológicos de avaliação das propriedades mecânicas destes elementos de alvenaria (blocos) sob elevadas temperaturas. Pesquisadores da área (KODUR *et al.*, 2008; KODUR; HARMATHY, 2016) enfatizam que a ausência de um

procedimento padrão pode levar a resultados de difícil comparação e que, portanto, devem ser adotados com cautela em modelos gerais constitutivos.

Há que se padronizar todo o procedimento de avaliação, desde a etapa de seleção e preparação das amostras, equipamentos de ensaio, instrumentos de controle de aquecimento, taxa de aquecimento e resfriamento das amostras, entre outros.

Neste capítulo é apresentado um estudo teórico/experimental desenvolvido com o objetivo de definir um procedimento para avaliação, em laboratório, das propriedades mecânicas residuais, pós aquecimento a temperaturas elevadas, de blocos de concreto para alvenaria estrutural. O estudo teórico/experimental teve como base a adaptação de metodologia semelhante já consagrada internacionalmente para misturas de concreto (RILEM TECHNICAL COMMITTEE, 1995, 1997; 1998; 2000a; 2000b; 2000c, 2004, 2005; 2007a; 2007b; 2007c); levando em consideração as peculiaridades dos BCV no que diz respeito as características do componente (geometria, tamanho, processo de fabricação, moldagem, cura, armazenamento, preparação e idade) e, principalmente, a definição de uma taxa de aquecimento e resfriamento que fosse adequada à amostra (BCV) em avaliação. A avaliação dos resultados permitiu a definição de parâmetros metodológicos inerentes ao procedimento ora proposto; principalmente no que diz respeito a garantia de distribuição uniforme de calor nas amostras e taxa de aquecimento. Mesmo com a existência de recomendações internacionais bem definidas pela RILEM para avaliação da resistência mecânica de misturas de concreto sob elevadas temperaturas em laboratório, várias questões específicas precisam ser respondidas antes da adaptação destes procedimentos para o caso inerente de BCV (RUSSO; SCIARRETTA, 2013). No caso da resistência à compressão residual sob elevadas temperaturas, existe a necessidade de estabelecer padrão adequado em relação a: a preparação dos corpos-de-prova, a taxa de aquecimento e resfriamento adequada à geometria de blocos vazados (que não são corpos-de-prova cilíndricos) e a instrumentação que permita verificar o aquecimento uniforme da amostra até a temperatura de interesse (número e posicionamento dos pontos de medição de temperatura). A seguir, são apresentadas e discutidas as questões metodológicas que devem ser consideradas ao realizar tais ensaios em blocos de concreto vazados.

3.1.1 Ensaios em elevadas temperaturas

A maioria dos procedimentos de teste usados para determinar o comportamento do concreto a temperaturas elevadas não envolve elemento em escala natural ou uma temperatura padrão do forno. Em vez disso, a maioria dos testes de incêndio usa amostras pequenas (geralmente um cilindro) que são aquecidas a uma temperatura máxima a uma taxa de

aquecimento especificada. Quando a temperatura desejada é atingida, a temperatura permanece constante por um período especificado. Após essa duração, a amostra pode ser resfriada de várias maneiras. A maneira mais simples é permitir que a amostra esfrie naturalmente até as condições ambientais. Quando um regime de resfriamento é especificado, a amostra é deixada no forno e a temperatura do forno é reduzida por uma taxa de resfriamento especificada. Há casos em que as amostras são resfriadas com o uso de água (POPE; ZALOK, 2019).

Apesar de quase todos os autores seguirem um procedimento de teste específico para cada uma das amostras, os métodos de teste podem variar significativamente entre os pesquisadores. Por exemplo, as taxas de aquecimento podem variar entre $0,1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $500^{\circ}\text{C}/\text{min}$ ou mais. As temperaturas máximas podem variar de ambiente à mais de 1200°C . Além disso, os regimes de resfriamento podem variar de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a um resfriamento quase instantâneo. Embora os testes possam ajudar a obter novos conhecimentos sobre o comportamento do material da alvenaria de concreto em situações de incêndio, é importante pensar criticamente ao comparar os resultados de diferentes testes de incêndio juntos.

Além disso, quando novos materiais são adicionados a uma mistura de concreto para determinar seus efeitos em temperaturas elevadas, é importante observar que as misturas usadas pelos pesquisadores podem ser significativamente diferentes, apesar do uso de terminologia semelhante. Por exemplo, dois pesquisadores podem substituir 30% do agregado fino por cinza volante, mas sem conhecer fatores como a relação água/cimento, tipo de agregado e aditivos usados, será difícil comparar quantitativamente os resultados.

Pope e Zalok (2020) alertam para a importância de observar que o concreto não conduz calor rapidamente através do material. Portanto, as camadas externas de concreto são mais quentes que as camadas internas. Como o incêndio padrão ultrapassa os 1000°C , é importante saber o que acontece com o concreto, pois ele é aquecido da temperatura ambiente até essa temperatura elevada. Quando pequenos cilindros são usados para teste, eles normalmente são expostos de todos os lados, para que possam aquecer a temperatura desejada. Depois de ser exposto à mesma temperatura por um período suficiente, a temperatura de todo o cilindro se torna uniforme. Testes com durações curtas ou amostras maiores não são tão precisos devido à falta de uniformidade de temperatura nos cilindros. Se a maioria do concreto não é afetada pela temperatura elevada, os resultados não são indicativos de suas propriedades de resistência ao fogo.

3.1.2 Amostragem

A RILEM TC 200-HTC (2007a), na avaliação da resistência mecânica residual sob elevadas temperaturas de uma mistura de concreto, propõe que um mínimo de dois corpos-de-prova deva ser ensaiado para qualquer combinação única de parâmetros de teste e material, para cada temperatura. A média simples dos resultados deve ser considerada como resultado desta avaliação. Se os resultados obtidos diferirem mais de 20% da média, um terceiro ensaio deve ser realizado. Se o resultado de qualquer exemplar diferir mais de 20% da média, esse deve ser descartado.

Por outro lado, códigos nacionais e internacionais para avaliação da resistência mecânica de blocos vazados de concreto (ASTM C140/C140M, 2021; ABNT NBR 6136, 2016; EN 772-1, 2011) em temperatura ambiente, recomendam um conjunto mínimo de seis blocos como amostragem. Esses ensaios são para caracterização de lotes de produção, não especificamente para caracterização da resistência mecânica sob elevadas temperaturas. Embora os blocos vazados de concreto sejam produzidos com controle industrial, é possível apresentar dispersão de resultados inerente ao processo de fabricação adotado em cada fábrica; o que provavelmente justifica o número mínimo de 6 amostras por lote recomendado na avaliação da resistência mecânica em temperatura ambiente. Levando em conta essa especificidade, considera-se que, na caracterização de um lote de produção de blocos para alvenaria estrutural quanto a resistência mecânica residual sob temperaturas elevadas, também um número mínimo de 6 blocos, para cada temperatura de interesse, deva ser empregado.

Mantem-se a prescrição da RILEM (2007a) para a média simples dos resultados dos espécimes, onde os resultados obtidos diferirem mais de 20% da média, um terço ou mais amostras devem ser testadas. Se o resultado de uma única amostra difere mais de 20% da média de todas as amostras, ela deve ser excluída da avaliação.

3.1.3 Geometria dos blocos

Em função dos mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação térmica), vários aspectos influenciam no tempo de homogeneização da temperatura de um corpo aquecido dentro de um forno. Um dos principais fatores é a geometria da peça (volume) que está sendo aquecida. Os corpos-de-prova considerados pela RILEM (2007a) podem ser moldados em laboratório, moldados em campo ou extraídas de núcleos das peças, desde que sejam cilíndricos com dimensões adequadas prescritas em função do tamanho máximo do agregado empregado na mistura de concreto em avaliação. A partir das dimensões do cilindro

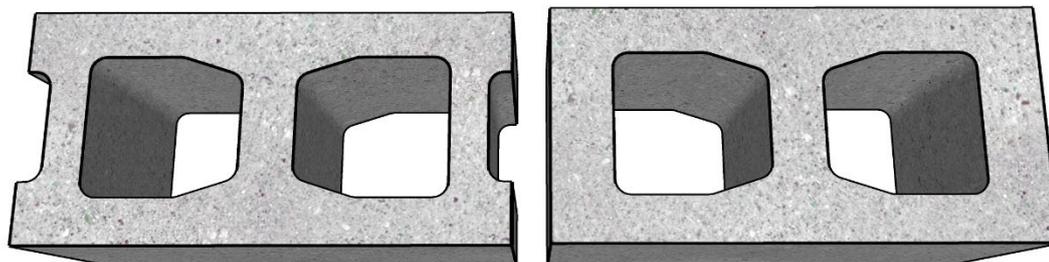
outros aspectos do método de ensaio são definidos, com destaque para a taxa mínima de aquecimento.

Nguyen *et al.* (2009) mostra que as características geométricas do bloco, tais como o tipo de bloco (vazado ou maciço), as dimensões externas, o percentual e o formato dos vazados apresentam alto grau de influência na resistência ao fogo. Blocos com maiores espessuras apresentam maiores resistências quanto ao isolamento térmico, uma vez que existe maior espaço a ser percorrido na transferência de calor por condução. Com a existência dos vazados dos blocos, ocorre alteração dos mecanismos de transferência de calor acontecendo também a convecção e a radiação nos septos vazados. Esta circunstância resulta em redução da condutividade térmica efetiva e do calor absorvido pela parede.

Em ensaios realizados por Al-Hadhrami; Ahmad (2009), verificou-se que a variação do formato e da distribuição dos vazados internos também exercem influência no isolamento térmico. Blocos com dois vazados apresentam aumento significativo do isolamento térmico em relação a blocos com um único vazado, considerando ambos os casos, com dimensões idênticas dos blocos. Quanto às dimensões externas dos blocos, estas determinam a quantidade de juntas de argamassa de assentamento necessárias, o que influencia diretamente o isolamento térmico devido às diferentes propriedades termofísicas dos materiais (ROSEMANN, 2011).

Embora a espessura equivalente, adotada pelos códigos e normas, possa ser uma ferramenta útil para fornecer uma estimativa aproximada da resistência ao fogo de blocos de alvenaria com diferentes quantidades de material, ela não leva em consideração os efeitos de diferentes blocos e geometrias de parede, já que a resistência ao fogo dos blocos de alvenaria é amplamente afetada por sua geometria. Blocos com mais material e barreiras apresentam melhor resistência ao fogo, pois reduzem a convecção e a radiação através dos blocos (POPE; ZALOK, 2020).

Entretanto, o bloco de concreto vazado é um pré-fabricado em dimensões pré-estabelecidas conforme códigos de sua região (ASTM C90, 2016; ABNT NBR 6136, 2016; EN 771-3, 2011). No Brasil, por exemplo, só são admitidos blocos estruturais de concreto vazados no formato e dimensões definidas (Figura 3.1), assim, não faz sentido ao método de ensaio definir a geometria, e sim definir parâmetros de ensaio adequados à essa forma pré-definida (instrumentação, taxa de elevação/resfriamento da temperatura). Esse ponto, como já discutido anteriormente neste capítulo, não pode ser adaptado do método da RILEM (2007a).

Figura 3.1 - Bloco de concreto vazado

Fonte: próprio autor

3.1.4 Idade do ensaio

É notório, que as propriedades físicas, térmicas e mecânicas do concreto tem seus valores alterados em função da idade da amostra avaliada (MEHTA; MONTEIRO, 2014a; NEVILLE, 2016). A mesma afirmação é válida para um bloco de concreto para alvenaria estrutural. Parâmetros como o tipo e proporção entre os materiais da mistura, moldagem e cura influenciam em um incremento ou decréscimo de uma determinada propriedade com a idade da amostra. Para idades mais avançadas, a tendência é de estabilização ou mesmo de diminuição acentuada desta taxa de variação. Em virtude disso, para o concreto, a RILEM (2007a) recomenda que a avaliação da resistência mecânica residual sob temperaturas elevadas deve ser feita em amostras com pelo menos 90 dias de idade; de forma a garantir que a fase de reações aceleradas do cimento já tenha ocorrido, não havendo variação significativa das propriedades físicas, mecânicas e térmicas da mistura durante todo o processo de caracterização. Entende-se que para o bloco vazado de concreto, esta recomendação deva ser adotada; uma vez que o bloco é, também, feito em concreto.

3.1.5 Moldagem, cura e armazenamento

Moldes cilíndricos feitos de aço ou polímero não absorvente e estanques, com moldagem realizada em duas ou três etapas para cada amostra, preferencialmente em mesa vibratória, além de tempo e condições de cura pós moldagem são descritos e recomendados pela RILEM (2007a) para concreto convencional.

Contudo, os blocos vazados de concreto, como já definido, são amostras de um mesmo lote, cuja moldagem e cura seguiu procedimentos inerentes ao fabricante. Assim sendo, não cabe uma proposta de metodologia para padronização de procedimentos de moldagem e cura posterior ao executado em fábrica. Sugere-se que em eventual relatório de ensaio estas informações sobre o processo de fabricação e cura dos blocos sejam apresentadas.

O teor de umidade afeta o comportamento do concreto sob temperaturas elevadas (HURLEY, 2015; NEVILLE, 2016). A padronização deste teor de umidade é desejável nas

avaliações em laboratório com vistas ao desempenho mecânico. No caso de avaliação da resistência mecânica de misturas de concreto sob elevadas temperaturas, a RILEM (2007a) orienta condições de armazenamento das amostras que devem ser mantidos até o início dos ensaios. As condições de armazenamento propostas para a condição de umidade 'd' (*drying concrete*) é de armazenamento ao ar a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e UR de $50 \pm 5\%$, onde, a perda de umidade das amostras durante o período de armazenamento deve ser determinada por pesagem.

No referente aos blocos vazados de concreto, não foi encontrado estudos que comprovem o grau de influência do teor de umidade sobre eles, quando em elevadas temperaturas. Entretanto, em temperatura ambiente, existem diferentes orientações (ASTM C140/C140M, 2021; ABNT NBR 16868-3, 2020; EN 772-1, 2011) sobre procedimentos de armazenamento de amostras após a entrega no laboratório e antes da realização do ensaio de resistência mecânica. Em todos esses códigos normativos, o controle de temperatura e umidade das amostras deve ser feito durante um determinado período antes do ensaio.

A norma ASTM C140/C140M (2021) determina que após a entrega, o laboratório armazene os corpos-de-prova (desempilhados e separados por pelo menos 13 mm em todos os lados) a uma temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar inferior a 80% por pelo menos 48h. As amostras não devem ser submetidas a secagem em estufa.

O EN 772-1 (2011) prescreve diferentes recomendações para diferentes materiais de blocos, as seguintes situações de acondicionamento das amostras são prescritas para blocos de concreto vazado: condição de ar-seco; de secagem em estufa; para teor de umidade de 6% e para unidades imersas. No caso de bloco vazados de concreto entende-se que a condição adequada é a de ar-seco. Esta condição, de acordo com a norma europeia, será alcançada em duas situações: a) quando se armazena as amostras por pelo menos 14 dias no laboratório em temperatura maior igual a 15°C e umidade relativa menor igual 65%, podendo as amostras serem testadas antes de 14 dias se a massa constante for atingida. A massa constante será considerada atingida se, durante o processo de secagem em pesagens subsequentes, com um intervalo não inferior a 24h, a perda de massa entre duas reduções for igual a 0,2% da massa total. b) quando as amostras forem secas a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por pelo menos 24h e resfriadas em temperatura ambiente por pelo menos 4h.

A norma brasileira (ABNT NBR 16868-3, 2020) tem uma abordagem mais simples e determina que os elementos de alvenaria devam ser armazenados em ambiente protegido, com temperatura de $25 \pm 10^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar entre 40% a 90%. Ensaio relatados por (PARSEKIAN *et al.*, 2021) indicam que secar blocos vazados de concreto em estufa a 100°C leva a um aumento de sua resistência a compressão, enquanto secá-los a 40°C levam a

resultados semelhantes do que blocos secados a temperatura ambiente (23°C). Blocos secos nessa temperatura ambiente por 24 ou 48h não apresentaram diferença de resultado a compressão em temperatura ambiente.

Referente ao armazenamento, quando se compara as normas de blocos de concreto vazados anteriormente citadas é possível verificar diferenças significativas entre elas. Ressalta-se ainda que as referidas normas tratam de procedimentos de testes não levando em consideração a influência de altas temperaturas e realizados exclusivamente em temperatura ambiente. Tendo em vista, também, que as condições de armazenamento até o início dos ensaios devem ser escolhidas para simular as condições de umidade do bloco na prática, para alcançar uma melhor representação do bloco de concreto vazado submetido a altas temperaturas e atender à condição mais restritiva entre as normas citadas, entende-se ser adequado armazenar os blocos em ambiente protegido de intempéries, ao ar livre, em temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$, UR < 80% durante pelo menos os 14 dias imediatamente anteriores ao ensaio, lembrando-se ainda que, conforme item anterior, não pode ser feito antes de 90 dias de idade dos blocos.

3.1.6 Retificação e capeamento

A preparação de uma amostra para ensaio de avaliação da resistência à compressão deve garantir faces planas e ortogonais ao eixo axial de avaliação e garantia de distribuição uniforme das tensões na face carregada, inclusive na amostra pós aquecimento.

Por conta do processo de fabricação, os blocos de concretos podem apresentar irregularidades nas faces superior e inferior. Logo, para uma distribuição uniforme das tensões durante o ensaio, as normas (ASTM C140/C140M, 2021; ABNT NBR 12118, 2013; EN 772-1, 2011) especificam a retificação dessas faces ou o capeamento do bloco com gesso ou material cimentício. A norma canadense (CSA S304 (2014)), permite a utilização de placa de fibra mineral para capeamento. Estudos (FORTES *et al.*, 2013; KLEEMAN; PAGE, 1989, 1990; PAGE; KLEEMAN, 1991) relatam os resultados, em temperatura ambiente, de testes comparativos em vários tipos de tijolos e blocos utilizando capeamento com argamassa, gesso, placa de fibra mineral ou compensado. A comparação também foi feita com amostras testadas com superfícies retificadas. Diferenças nas resistências à compressão entre tipos de capeamento foram encontradas. A utilização de placa de fibra mineral geralmente resultou em menor resistência do bloco.

A retificação consiste na remoção, por meios mecânicos, de uma fina camada de material do topo do corpo-de-prova. Esta operação é normalmente executada em máquinas especialmente adaptadas para essa finalidade, com a utilização de ferramentas abrasivas e água.

Similarmente, o capeamento com pastas ou argamassas são aplicados úmidos como forma de garantir plasticidade ao material proporcionando uma superfície mais plana e regularizada.

Após o aquecimento, as amostras se tornam muito frágeis e qualquer processo de regularização por meios mecânicos, pode ser inviável, a depender do grau de fragilidade das amostras. Do mesmo modo, o capeamento com material cimentício plástico e úmido (no instante de aplicação) não é recomendável, a custos de danificar ou mesmo alterar as propriedades químicas do material, bastante seco, da amostra pela eventual reidratação. Desse modo o processo de retificação ou capeamento do bloco vazado de concreto após aquecimento pode ser inviável. Uma alternativa seria a retificação, por processos mecânicos, do bloco antes da etapa de aquecimento, entretanto, é comum o aparecimento de danos nas superfícies das amostras quando aquecidas a elevadas temperaturas, tendo nesses casos que serem descartadas.

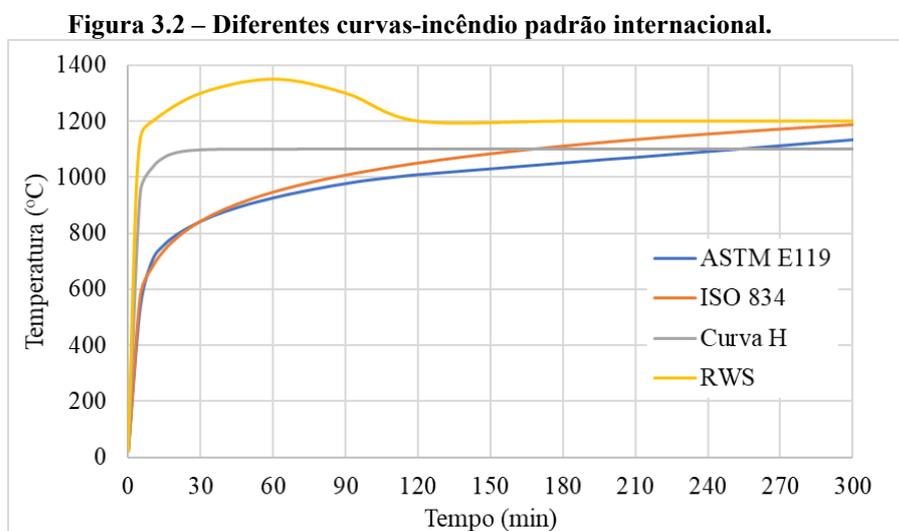
Deste modo, considerando todos os aspectos aqui elencados e, principalmente, resgatando o fato de que as amostras são avaliadas quanto a resistência mecânica residual, pós aquecimento, de forma comparativa; tomando como referência o resultado de resistência mecânica obtido em situação ambiente, considera-se que a utilização de forro de fibra mineral, conforme apresentado na norma canadense (CSA S304, 2014) é bastante útil e pode ser utilizado; desde que o mesmo tipo de regularização seja empregado na determinação da resistência mecânica de referência em situação ambiente.

Porém, é válido observar que independente do processo de regularização das superfícies adotado, toda amostra que se apresente com as superfícies danificadas após aquecimento deve ser descartada.

3.1.7 Aquecimento

As curvas temperatura vs. tempo de um incêndio natural compartimentado dependem de vários parâmetros: carga de incêndio, grau de ventilação, características termofísicas dos materiais, entre outras, ou seja, cada compartimento de cada edificação possui uma curva diferente. Por simplicidade, as normas técnicas permitem que curvas padronizadas sejam empregadas como curva de aquecimento em projeto de estruturas. Os ensaios laboratoriais de elementos da construção (porta corta fogo, paredes etc.) a altas temperaturas costumam seguir esse modelo de incêndio-padrão. A curva padrão ISO 834-1 (1999) é bastante similar a curva ASTM E119 (2020), ambas são aplicadas a incêndios em que a carga de incêndio é, em termos de potencial calorífico, similar a madeira (papel, pano, palha etc.). Quando a carga de incêndio é formada por material cuja origem é hidrocarboneto o EN 1991-1-2 (2002) propõe o uso de

outra curva conhecida como curva H. Além dessas, outras curvas são propostas de acordo com a situação e a carga de incêndio (Figura 3.2).



Fonte: próprio autor

Quando se quer ter um conhecimento detalhado das propriedades do material para diferentes temperaturas, os pesquisadores costumam seguir taxas de aquecimentos mais lentas variando entre $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$ a $5^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Essa taxa mais branda visa permitir uma uniformidade da temperatura em todo o corpo-de-prova, além de evitar a ocorrência de fenômenos físicos, como o *spalling*, que possam prejudicar a determinação das propriedades mecânicas do material. A RILEM (2007a) recomenda metodologias de teste para determinar as diferentes propriedades mecânicas do concreto usado na construção em altas temperaturas. Ao aquecer o concreto, ocorrem diferentes processos físicos e reações químicas, que dependem muito da composição específica do material, da carga e das condições ambientais. O aumento da temperatura causa gradientes de temperatura e migração de água. Além disso, ocorrem perdas de umidade, desidratação e transformações de cristais. Essas reações levam a mudanças significativas na micro e macro estrutura do concreto, como mudanças na porosidade e permeabilidade.

A RILEM (2007a) estipula o aquecimento, e resfriamento, das amostras de concreto sob taxas e tempo, em função, logicamente, do tamanho das amostras adotadas. Taxas mais brandas garantem um aquecimento gradual de amostras maiores, de forma que toda a amostra, ao final do tempo de aquecimento alcance a temperatura de avaliação estipulada.

Para misturas de concreto usual, as taxas de aquecimento e resfriamento máximas especificadas pela RILEM (2007a) são de $0,5^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, conforme o diâmetro da amostra cilíndrica iguais a 150, 100, 80 e 60 mm, respectivamente. Os blocos vazados de concreto, como já apresentado na Figura 3.1, possuem geometrias diferentes da

proposta pela RILEM para o concreto, assim a taxa de aquecimento utilizada é uma lacuna a ser respondida a partir do programa experimental aqui proposto.

Após atingir a temperatura máxima de teste na superfície, essa deve ser mantida por um período de 60 ± 5 min. Esse padrão de tempo adotado pela RILEM (2007a), para o concreto, independe do tamanho da amostra e se refere a um tempo mínimo de exposição do material à temperatura de interesse, em relação ao tempo suficiente para que eventuais transformações químicas e físicas ocorram na amostra de concreto sob aquecimento. Desta forma, por se tratar de blocos de concreto, nada mais lógico do que adotar o mesmo valor, independente da mudança de geometria.

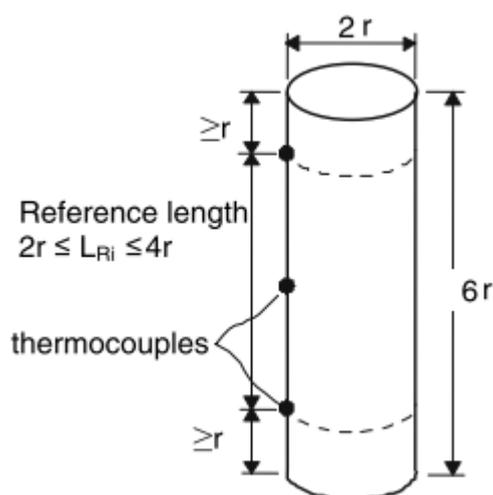
Ao final do período de aquecimento, a amostra deve ser resfriada com taxa, no máximo, igual a de aquecimento. A garantia de resfriamento lento e gradual, de forma a não danificar as amostras por um resfriamento mais rápido, deve ser mantida para esta metodologia proposta para o caso do resfriamento dos blocos vazados de concreto. De forma a se evitar ganhos ou perdas adicionais de resistência mecânica com o processo de reidratação (SOUZA; MORENO JR, 2010) é adequado que a avaliação da resistência mecânica seja feita ao final do período de aquecimento, quando se quer medir a propriedade nesta temperatura ou imediatamente após a amostra ser resfriada quando se quer medir a propriedade residual. É conhecido que uma das alterações que ocorrem no concreto quando a temperatura sobe até cerca de 400°C é a decomposição do hidróxido de cálcio, restando CaO, em virtude da secagem (MEHTA; MONTEIRO, 2014a; NEVILLE, 2016). Entretanto, caso, após o resfriamento, o concreto entre em contato com a umidade do ar, ocorre a reidratação do CaO que pode causar desagregação, principalmente para concretos que utilizam agregados calcários e cimentos sem adição de pozolanas, que removem o hidróxido de cálcio. Nesse ponto de vista, é importante alertar que a manifestação do dano pode ocorrer dias após um incêndio por exemplo, sendo importante, portanto, avaliar a resistência mecânica para esse tipo de material ao longo do tempo.

3.1.8 Medições de temperatura

O aquecimento e resfriamento das amostras deve ser uniforme e de acordo com o padrão estabelecido. O equipamento (forno) deve ser capaz de seguir este padrão proposto de aquecimento e resfriamento das amostras durante todo o ensaio. A verificação/controlado desta uniformidade de aquecimento é feita indiretamente através de pontos de medida de temperatura dispostos na superfície das amostras. De acordo com a RILEM (2007a), este controle, para o caso de misturas de concreto, é feito em pontos de medida apresentados na Figura 3.3, para amostras cilíndricas; com três pontos de medição que devem ser dispostos simetricamente em

relação a cada seção transversal, sendo esta perpendicular ao eixo central. A garantia desta uniformidade de aquecimento é traduzida pela exigência de que a diferença de leitura de temperatura nestes pontos, e a temperatura padrão estabelecida no procedimento, não deve exceder 1°C , para temperaturas no forno de 20°C , 5°C para temperatura no forno de 100°C e 20°C para 750°C . Para valores intermediários, as diferenças máximas permitidas para as leituras de temperatura nestes pontos devem ser calculadas por interpolação linear.

Figura 3.3 – Corpo-de-prova cilíndrico mostrando a localização dos três pontos de medição de temperatura



Fonte: RILEM (2007a)

A distribuição dos pontos de medição, para verificação da uniformidade de aquecimento das amostras de blocos vazados é outra questão a ser respondida nesta pesquisa. Diferentemente da amostra cilíndrica e maciça da figura anterior (Figura 3.3), o bloco de concreto é vazado (Figura 3.1) e deve-se garantir o aquecimento uniforme de toda a superfície (interna e externa) do bloco.

3.2 METODOLOGIA

Levantadas as questões a respeito dos parâmetros e procedimentos para caracterização de blocos de concreto vazados em altas temperaturas, pode-se concluir que alguns pontos do método de ensaio podem ser definidos tendo como referência procedimento internacional similar já existente para misturas de concreto (RILEM, 1995, 1997, 1998, 2000a, 2000b, 2000c, 2004, 2005, 2007a, 2007b, 2007c) ou mesmo códigos normativos nacionais e internacionais para a caracterização do blocos vazados de concreto em temperatura ambiente (ASTM C90, 2016; ASTM C140/C140M, 2021; ABNT NBR 12118, 2013; ABNT NBR 6136, 2016; ABNT

NBR 16868-3, 2020; EN 772-1, 2011; EN 771-3, 2011). Entretanto, como ressaltado anteriormente, dois parâmetros em particular ficaram, ainda, em aberto na definição de procedimentos proposta neste trabalho, quais sejam: a instrumentação de controle da uniformidade de aquecimento das amostras e a taxa de aquecimento das amostras.

3.2.1 Instrumentação de controle do aquecimento das amostras

O forno deve ser capaz de promover o aquecimento, até a temperatura máxima de interesse, de todo o volume da amostra ao final da rampa de aquecimento. Após este aquecimento progressivo, a temperatura máxima de interesse deve permanecer constante por 60 ± 5 minutos quando, então, a amostra deve ser resfriada, a uma taxa de diminuição da temperatura com o tempo, no máximo, igual a taxa empregada no aquecimento. Este trabalho propôs investigar taxas de aquecimento e resfriamento máxima de $1^\circ\text{C}/\text{min}$, $2^\circ\text{C}/\text{min}$ e $4^\circ\text{C}/\text{min}$.

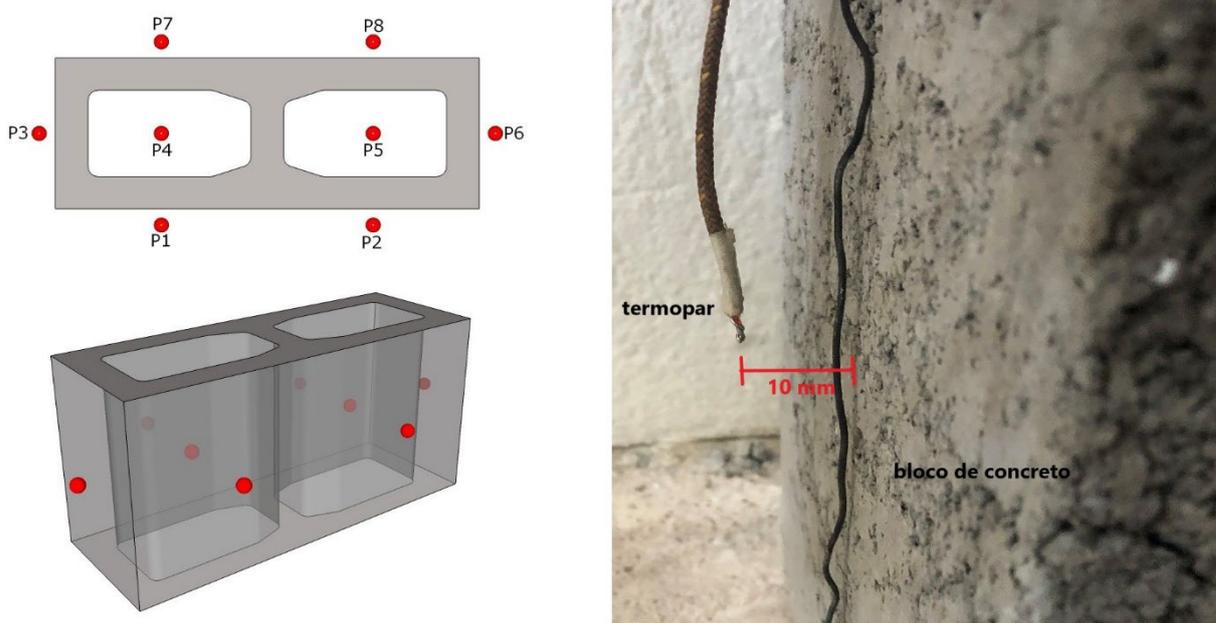
O equipamento (forno) deve ser capaz de elevar a temperatura em seu interior de acordo com o roteiro proposto (rampa de aquecimento, patamar e resfriamento) e, o que é primordial, este aquecimento deve ser uniforme em com toda a superfície da amostra (interna e externa). Esta uniformidade de aquecimento, do mesmo modo que para as misturas de concreto RILEM (2007a), é garantida quando se verifica, para pontos próximos à superfície da amostra e a temperatura prevista no roteiro de aquecimento (forno), uma diferença de temperatura limite de 1°C a 20°C , 5°C a 100°C e 20°C a 750°C ; sendo que para valores intermediários, as diferenças máximas de temperatura permitidas devem ser calculadas por interpolação linear entre os dois pontos adjacentes. No patamar de temperatura máxima, o mesmo limite de diferenças deve ser respeitado em relação à temperatura estudada.

Para verificar se todas as faces do bloco vazado de concreto (internas e externas) estão sujeitas a uma temperatura uniforme durante todo o ensaio, respeitando aos limites de diferença máximos permitidos, foi proposta a instrumentação A, onde os pontos de medição de temperatura estavam posicionados nos centros dos vazios do bloco e a uma distância aproximada de 10 mm da superfície externa do bloco, também a meia altura como apontado na Figura 3.4. Suportes externos metálicos foram empregados para garantir o correto posicionamento dos fios termopares nestes pontos de medição de temperatura pretendidos.

É válido observar que esta uniformidade de aquecimento está diretamente relacionada à eficiência do equipamento (forno) empregado na avaliação da amostra. Equipamentos que não promovem esta uniformidade não devem ser empregados para esta avaliação. A distribuição

proposta dos pontos de medida, dispostos próximos a todas as paredes externas e internas do bloco de concreto, tem esta finalidade.

Figura 3.4 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação A)



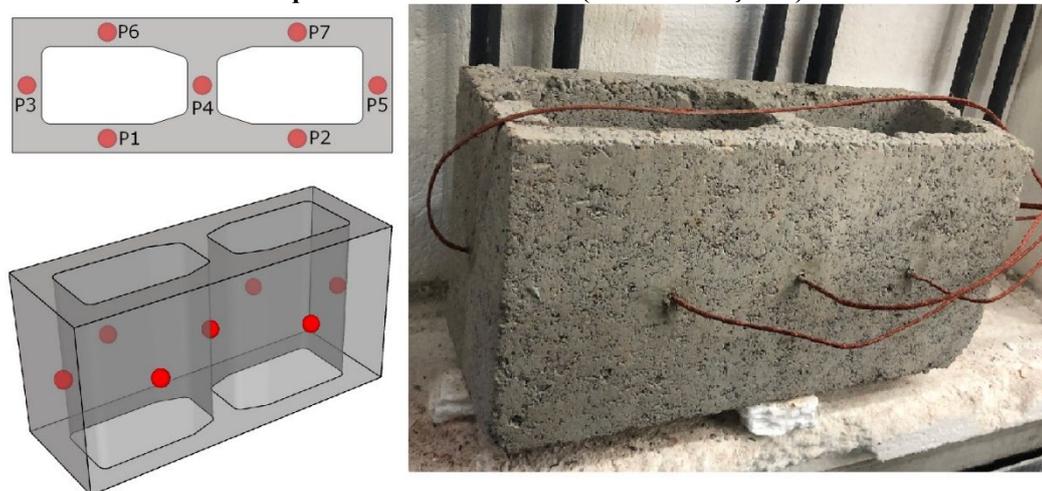
Fonte: próprio autor

3.2.2 Taxa de aquecimento das amostras

Uma vez garantido o controle de uniformidade do aquecimento das amostras, a segunda etapa deste trabalho é definir a taxa de aquecimento das amostras. Supõe-se que o forno deve ser capaz de elevar a temperatura dentro dele de acordo com o roteiro proposto. Para verificar o atendimento à premissa metodológica anterior, este trabalho propôs investigar taxas de aquecimento e resfriamento máxima de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ e $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$.

Com intuito de responder à questão da taxa de aquecimento/resfriamento adequada, se fez necessário conhecer em detalhes a distribuição da temperatura, em diferentes pontos internos do bloco, durante o aquecimento. Para tanto, blocos de concreto foram instrumentados com fios termopares em seu interior (instrumentação B), conforme indicado na Figura 3.5. As medições de temperatura foram feitas durante todo o ensaio (aquecimento, patamar e resfriamento) em sete pontos da amostra. Os pontos de medição foram posicionados a meia profundidade da espessura das paredes e a meia altura dos blocos. Os fios do termopar foram inseridos em furos perfurados nos blocos, de 4 mm de diâmetro, que posteriormente foram preenchidos completamente com pasta de cimento, com cuidado especial para não deixar folgas ou falhas de fixação.

Figura 3.5 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação B)



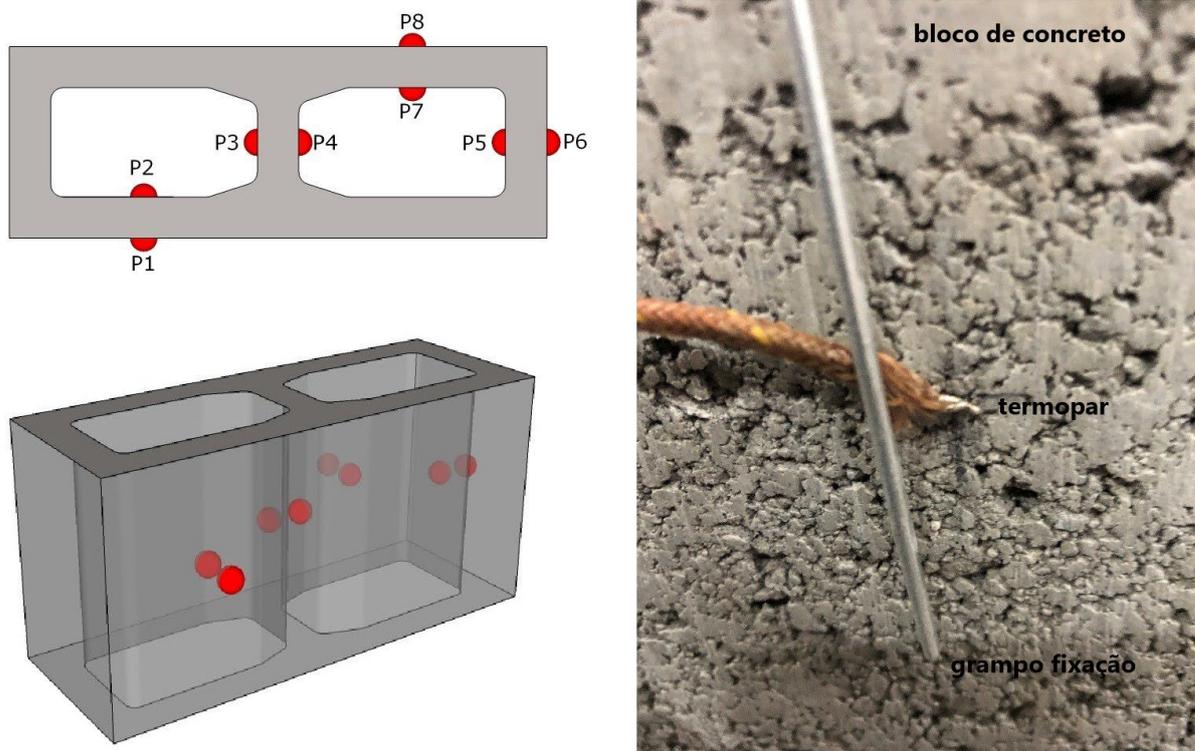
Fonte: próprio autor

Ao longo de toda a rampa de aquecimento, para todos os 7 pontos de medição de temperatura no interior da amostra, foi verificado se havia equidade de temperatura entre estes pontos e o exterior da amostra (interior do forno) nas temperaturas de 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700 e 800°C. A taxa adequada ao procedimento de avaliação da resistência mecânica residual, sob elevadas temperaturas, de blocos de concreto para alvenaria estrutural, deve ser aquela que satisfaz a condição de equidade.

3.2.3 Verificação da influência do material no aquecimento das amostras

Para o concreto, a RILEM (2007a) informa a localização em que os pontos de medição devem ser fixados (Figura 3.3). Apesar de interpretar que os pontos não devem estar tocando a superfície, a imagem pode trazer dúvidas da correta instrumentação do corpo de prova. Assim, adicionalmente às duas instrumentações relatadas anteriormente, a título de investigação e mesmo de comparação, uma outra proposta de instrumentação foi avaliada. Para comparar a temperatura na superfície do bloco, durante toda a curva de aquecimento, patamar e resfriamento, com a temperatura em um ponto próximo a 10 mm (instrumentação A), foi proposta a instrumentação C. Nessa instrumentação os pontos de medição foram posicionados encostados na superfície dos blocos a meia altura do bloco segundo demonstrado na Figura 3.6, foi utilizado grampos metálicos para prender os termopares nestes pontos. Essa instrumentação foi indicada para verificar se o fato de o termopar estar tocando no material possa resultar em diferentes medições de temperatura em relação à temperatura do forno. Sendo importante também, para criar uma base de dados que permita melhores modelagem numérica do comportamento térmico dos blocos de concreto vazados.

Figura 3.6 – Posicionamento dos pontos de medição de temperatura para a definição da taxa de aquecimento das amostras (Instrumentação C)



Fonte: próprio autor

3.2.4 Caracterização das amostras de BCV avaliadas

Foram ensaiados blocos de concreto vazados de $390 \times 190 \times 140$ mm; resistência a compressão de 21 MPa (área líquida); produzidos em indústria de artefatos de concreto com: cimento CPV-ARI (Type III - conforme (ASTM C150/C150M, 2021), areia natural, pó de pedra e pedrisco de rocha metamórfica (gnaisse) com diâmetro máximo de 9,5mm.

Todos os blocos tinham idade superior a 90 dias na data do ensaio. Nos 14 dias anteriores ao ensaio, os blocos foram acondicionados dentro do laboratório com temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$, UR < 80%.

Para cada instrumentação proposta (A, B e C) foram aquecidas 6 amostras, até a temperatura máxima de 800°C (já que após essa temperatura o material teria suas propriedades bastante deterioradas, o que poderia prejudicar a aquisição de dados); cada uma com uma taxa de aquecimento diferente de $4^\circ\text{C}/\text{min}$, $2^\circ\text{C}/\text{min}$ e $1^\circ\text{C}/\text{min}$, com intervalos de registro de temperaturas de 2 min, 4 min e 8 min, respectivamente. Foram utilizados termopares Tipo K com isolamento duplo, aferidos e calibrados obedecendo as recomendações da RILEM (2007a), onde a precisão das medições de temperatura deve ser de pelo menos $0,5^\circ\text{C}$ ou 1% dos valores medidos, o que for maior.

Os blocos vazados de concreto foram aquecidos até 800°C, nas diferentes taxas de aquecimento e resfriamento escolhidas (1°C/min, 2°C/min e 4°C/min). No aquecimento foi empregado um forno elétrico, existente no Laboratório de Estruturas e Construção Civil da Faculdade de Engenharia Civil e Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas (Figura 3.7).

Figura 3.7 - Forno elétrico – Laboratório de Estruturas e Construção Civil (UNICAMP)



Fonte: próprio autor

3.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos com cada uma das diferentes instrumentações.

Como relatado anteriormente, a instrumentação do tipo B, onde os termopares se encontram a uma distância de aproximadamente 10 mm das faces externas e no centro dos vazados do blocos (Figura 3.5), teve como objetivo constatar se mesmo com esta geometria diferenciada (Figura 3.1), todas as superfícies do bloco vazado (internas e externas) seriam aquecidas uniformemente, durante todo o procedimento de ensaio, respeitando os limites de diferenças máximas adotados para o concreto RILEM (2007a) e discutidos anteriormente.

Nas Tabelas 3.1 a 3.3, a seguir, apresentam-se alguns⁶ dos valores de temperatura obtidos em cada um dos 8 pontos de leitura referentes à instrumentação A e com o aquecimento da amostra segundo as taxas de elevação da temperatura com o tempo de 4°C/min, 2°C/min e 1°C/min, respectivamente. Nestas mesmas tabelas estão apresentadas as diferenças encontradas entre a temperatura requerida (de acordo com o roteiro de aquecimento teórico proposto) e a temperatura efetiva, medida nos pontos de leitura posicionados junto a superfície da amostra.

Tabela 3.1 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 4°C/min

Forno (°C)	4°C/min - A								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitida
21	21	21	22	21	21	22	21	21	1	1
101	102	102	101	99	99	101	103	103	2	5
205	208	208	205	203	203	205	208	208	3	7
301	304	304	301	298	298	301	304	304	3	10
405	409	409	405	401	401	405	409	409	4	12
501	505	505	501	497	497	501	505	505	4	14
605	610	610	605	600	600	605	610	610	5	17
701	706	706	701	695	695	701	706	706	6	19
800	800	800	800	791	791	800	800	800	9	21
800	800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

Tabela 3.2 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 2°C/min

Forno (°C)	2°C/min - A								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitida
24	24	24	24	24	25	24	24	24	1	1
104	104	104	103	102	102	103	104	104	2	5
200	200	200	199	198	198	199	200	200	2	7
304	304	304	302	301	301	303	304	304	3	10
400	400	400	398	397	397	399	400	400	3	12
504	504	504	503	502	502	503	504	504	2	14
600	600	600	599	599	599	600	600	600	1	17
704	704	704	703	703	703	704	704	704	1	19
800	800	800	799	798	798	800	800	800	2	21
800	800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

⁶ As leituras de todas as temperaturas realizada durante os ensaios estão disponíveis na base de dados de pesquisa do Repositório Institucional da UFSCar < <https://www.sibi.ufscar.br/fontes-de-informacao/colecao-dados-pesquisa-ri-ufscar> >

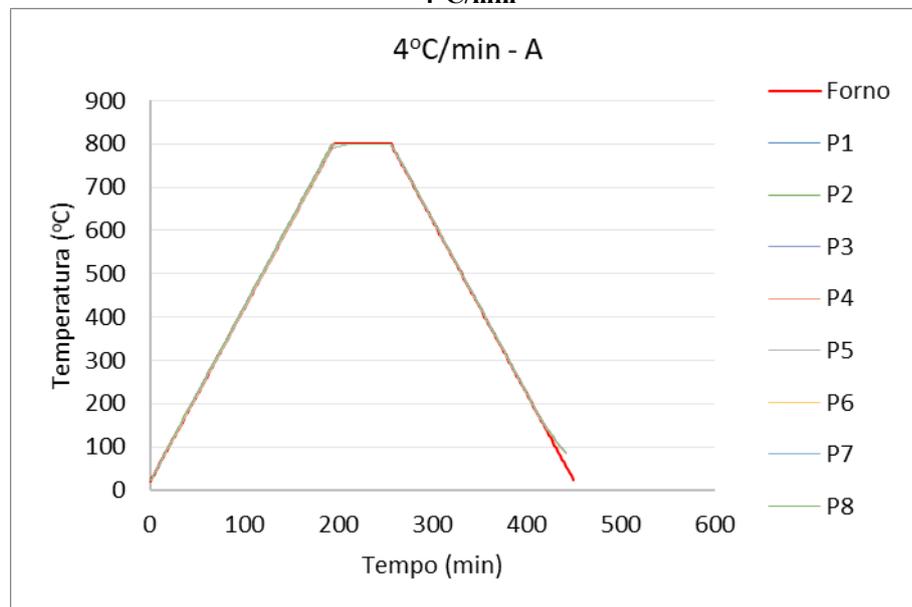
Tabela 3.3 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 1°C/min

Forno (°C)	1°C/min - A								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitida
25	25	25	26	25	25	26	25	25	1	1
105	105	105	105	104	104	105	105	105	1	5
201	201	201	201	200	200	201	201	201	1	7
305	305	305	305	304	303	305	305	305	2	10
401	401	401	401	400	399	401	401	401	2	12
505	505	505	505	504	503	505	505	505	2	14
601	601	601	601	600	599	601	601	601	2	17
705	705	705	705	703	702	705	705	705	3	19
800	800	800	800	799	799	800	800	800	1	21
800	800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

Do mesmo modo, como forma de ilustrar as diferenças de temperatura observadas, apresenta-se, na Figura 3.8, a seguir, os valores de temperatura obtidos em cada um dos 8 pontos de leitura referentes à instrumentação A e com o aquecimento da amostra a uma taxa de elevação da temperatura com o tempo de 4°C/min.

Figura 3.8 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação A com taxa de 4°C/min



Fonte: próprio autor

Com base nos resultados apresentados nas Tabelas 3.1 a 3.3, para taxas de aquecimento e resfriamento diferentes (4°C/min, 2°C/min e 1°C/min) e a permanência de 60 minutos na temperatura máxima de 800°C, constata-se que todos os pontos de leitura apresentaram diferenças inferiores à tolerância permitida. Desta forma, pode-se concluir que,

independentemente da taxa de aquecimento empregada, a uniformidade de aquecimento das amostras foi alcançada. Este fato comprova a eficiência do equipamento de aquecimento empregado.

É válido observar que o equipamento a ser empregado no aquecimento das amostras deve ser capaz de manter este aquecimento uniforme em toda a superfície de exposição do bloco vazado (superfícies internas e externas) e, muito importante, segundo o roteiro de aquecimento proposto neste procedimento (rampa de aquecimento a uma taxa especificada até uma temperatura máxima de análise, seguido por um patamar de uma hora de aquecimento nesta temperatura máxima e posterior resfriamento a uma taxa de, no máximo, a de aquecimento empregada). Considerando este fato, é conveniente que no procedimento metodológico aqui discutido seja verificada esta eficiência; o que justifica a proposta de emprego dos 8 pontos de controle de temperatura utilizados neste trabalho como critério para a avaliação em laboratório da resistência mecânica residual, sob elevadas temperaturas, de blocos de concreto para alvenaria estrutural.

Nas Tabelas 3.4 a 3.6, a seguir, apresentam-se alguns⁷ dos valores de temperatura obtidos em cada um dos 7 pontos de leitura referentes à instrumentação B e com o aquecimento da amostra segundo as taxas de elevação da temperatura com o tempo de 4°C/min 2°C/min e 1°C/min, respectivamente. Nestas mesmas tabelas estão apresentadas as diferenças máximas encontradas entre a temperatura do forno e a temperatura nos pontos de leitura no interior da amostra, para cada um dos 7 pontos de instrumentação B, bem como a diferença máxima permitida admitindo-se o critério de tolerância para diferenças entre temperaturas internas e externas indicado na Seção 3.1.8 (1°C a 20°C, 5°C a 100°C e 20°C a 750°C).

⁷ As leituras de todas as temperaturas realizada durante os ensaios estão disponíveis na base de dados de pesquisa do Repositório Institucional da UFSCar < <https://www.sibi.ufscar.br/fontes-de-informacao/colecao-dados-pesquisa-ri-ufscar> >

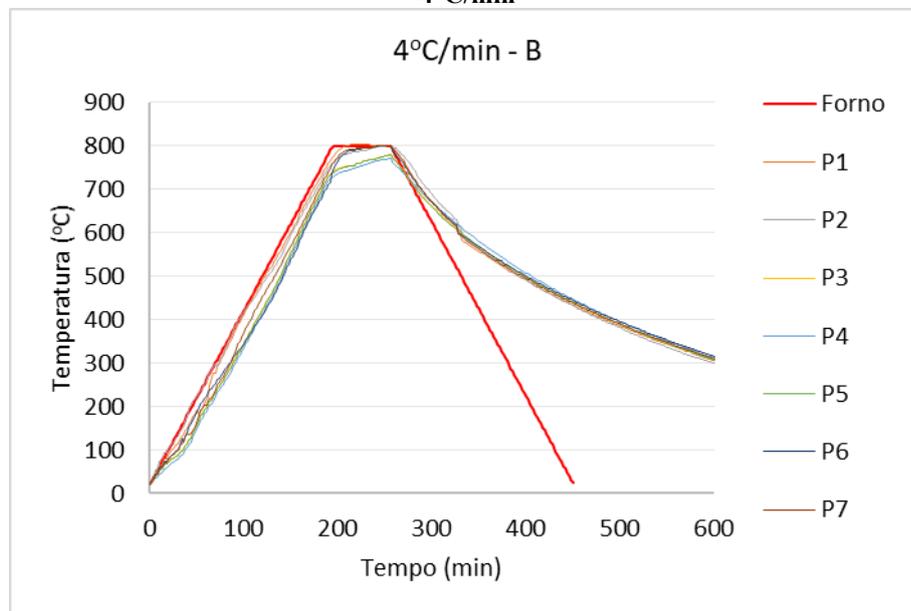
Tabela 3.4 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação B com taxa de 4°C/min

Forno (°C)	4°C/min - B							Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)	P4 (°C)	P5 (°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	Máxima	Permitida
21	21	21	21	20	21	20	20	1	1
101	87	103	72	62	71	78	77	39	5
205	176	212	139	129	138	169	145	76	7
301	277	301	232	222	231	253	239	79	10
405	393	403	328	318	327	332	349	87	12
501	490	481	423	410	422	413	452	91	14
605	586	575	536	520	535	526	554	85	17
701	683	671	644	629	643	634	654	72	19
800	776	762	740	730	739	749	763	70	21
800	804	790	766	757	765	794	795	43	21

Fonte: próprio autor

Do mesmo modo, como forma de ilustrar as diferenças de temperatura observadas, apresenta-se, na Figura 3.9, a seguir, os valores de temperatura obtidos em cada um dos 7 pontos de leitura referentes à instrumentação B e com o aquecimento da amostra a uma taxa de elevação da temperatura com o tempo de 4°C/min.

Figura 3.9 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação B com taxa de 4°C/min



Fonte: próprio autor

Para o caso da taxa de elevação de temperatura com o tempo de 4°C/min, nota-se que existe grande diferença entre as leituras nos pontos internos (P1 a P7) e a temperatura externa ao bloco (forno). A equidade pretendida, ao longo da rampa de aquecimento, não é atingida em nenhuma temperatura (Figura 3.9). Entretanto, é conveniente adotarmos as mesmas tolerâncias

permitidas pela RILEM (2007a) para o caso da verificação de uniformidade de aquecimento das amostras no concreto, indicado anteriormente (1°C a 20°C, 5°C a 100°C e 20°C a 750°C) e, mesmo assim, é possível afirmar que a taxa de aquecimento de 4°C/min não deve ser utilizada para o estudo das propriedades do bloco vazado de concreto para qualquer temperatura máxima de aquecimento pretendida; até os 800°C avaliado. Comparando as diferenças de temperatura, indicadas na Tabela 3.4, para esta taxa de 4°C/min, em nenhum instante do aquecimento da amostra até a temperatura máxima de 800°C, a tolerância em questão foi observada.

Com utilização da taxa de elevação de 2°C/min foi possível observar que existe diferença de leituras entre os pontos ao longo o aquecimento (Tabela 3.5). Adotando o mesmo critério de tolerância para diferenças entre temperaturas internas e externas (1°C a 20°C, 5°C a 100°C e 20°C a 750°C), percebe-se que não há equidade de temperatura do forno com o material. Assim, fica claro que essa taxa de aquecimento não deve ser utilizada, já que não se pode assegurar que todo o material será exposto à temperatura proposta.

Tabela 3.5 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação B com taxa de 2°C/min

Forno (°C)	2°C/min - B							Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	Máxima	Permitida
24	24	24	24	23	24	24	24	1	1
104	91	92	83	83	87	97	90	21	5
200	190	186	178	157	181	191	182	43	7
304	295	282	274	269	270	290	281	35	10
400	390	372	372	367	379	389	379	33	12
504	496	488	475	470	479	495	483	34	14
600	590	585	574	567	579	588	580	33	17
704	694	693	681	687	690	690	689	23	19
800	790	789	783	780	783	783	784	20	21
800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

Ainda, em relação às referidas taxas de 4°C/min e 2°C/min, foi possível verificar que o resfriamento interno do material ocorreu de forma mais lenta que a curva proposta de resfriamento do forno. Tal comportamento é o esperado visto que o resfriamento interno depende do volume, condutividade e capacidade térmica do material. No que diz respeito ao resfriamento, vale observar que a taxa máxima de resfriamento recomendada é aquela igual a de aquecimento, no máximo. Esta condição foi satisfeita no procedimento de resfriamento da amostra em análise, tanto para o aquecimento segundo a taxa de 4°C/min quanto para o aquecimento segundo a taxa de 2°C/min.

Por fim, os resultados com a taxa de 1°C/min (Tabela 3.6 e Figura 3.10) indicam equidade de temperatura entre todos os pontos de medição e a temperatura externa, durante toda a rampa de aquecimento até 800°C. Este resultado demonstra que todo o volume do material do bloco vazado de concreto estará exposto à temperatura externa máxima proposta, independente da temperatura analisada (Figura 3.10). Mais uma vez foi constatado que o resfriamento interno do material ocorre de forma mais lenta devido às suas propriedades térmicas, conforme já explicado.

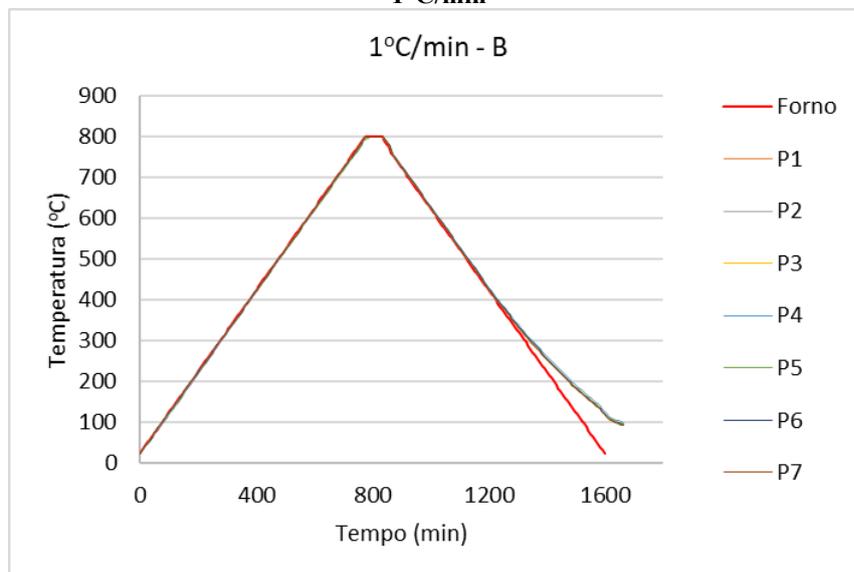
A partir de constatação de que a taxa de 1°C/min é suficiente para manter a equidade das temperaturas externa e internas, ensaios com taxa de 0,5°C/min não foram necessários.

Tabela 3.6 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação A com taxa de 1°C/min

Forno (°C)	1°C/min - B							Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3 (°C)	P4 (°C)	P5 (°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	Máxima	Permitida
25	25	25	25	24	25	25	25	1	1
105	105	105	103	100	103	105	105	5	5
201	201	200	199	195	200	201	201	6	7
305	303	302	304	301	304	305	303	4	10
401	399	397	400	397	399	400	399	3	12
505	503	500	504	502	502	504	503	4	14
601	599	596	599	598	597	599	599	3	17
705	703	699	703	702	699	703	703	4	19
800	799	794	799	798	794	798	799	5	21
800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

Figura 3.10 - Temperaturas obtidas em cada um dos pontos de medição na Instrumentação B com taxa de 1°C/min



Fonte: próprio autor

Na instrumentação do tipo C, os pontos de leitura encontram-se encostados nas faces internas e externas do bloco (Figura 3.6). As Tabelas 3.7 a 3.9, a seguir, apresentam-se alguns⁸ dos valores de temperatura obtidos em cada um dos 8 pontos de leitura referentes à instrumentação C e com o aquecimento da amostra segundo as taxas de elevação da temperatura com o tempo de 4°C/min, 2°C/min e 1°C/min, respectivamente. Foi constatado que a leituras realizadas com os termopares tocando o corpo de prova são diferentes das obtidas na proximidade da face principalmente com as taxas de elevação maiores e nas temperaturas abaixo dos 200°C. Isso já era esperado visto que nessas temperaturas a água adsorvida no material evapora e tende a sair pelos poros, além disso, a leitura pode estar sendo influenciada pela presença de um agregado, pasta ou poro encontrado no ponto exato onde foi fixado na superfície do bloco.

Tabela 3.7 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 4°C/min

Forno (°C)	4°C/min - C								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitido
21	21	21	21	22	21	22	21	21	0	1
101	96	97	97	94	99	98	96	97	7	5
205	199	199	200	195	202	201	199	199	10	7
301	295	294	296	292	296	297	295	294	9	10
405	399	397	400	397	399	400	399	397	8	12
501	495	492	496	493	494	496	495	492	8	14
605	599	596	599	598	597	599	599	596	8	17
701	695	691	695	694	691	695	695	691	10	19
800	799	794	799	798	794	798	799	794	6	21
800	800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

⁸ As leituras de todas as temperaturas realizada durante os ensaios estão disponíveis na base de dados de pesquisa do Repositório Institucional da UFSCar < <https://www.sibi.ufscar.br/fontes-de-informacao/colecao-dados-pesquisa-ri-ufscar> >

Tabela 3.8 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 2°C/min

Forno (°C)	2°C/min - C								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitido
24	24	24	25	25	24	24	24	24	1	1
104	103	103	105	99	107	106	103	103	5	5
200	199	199	200	195	202	201	199	199	5	7
304	303	302	304	301	304	305	303	302	3	10
400	399	397	400	397	399	400	399	397	3	12
504	503	500	504	502	502	504	503	500	2	14
600	599	596	599	598	597	599	599	596	3	17
704	703	699	703	702	699	703	703	699	5	19
800	799	794	799	798	794	798	799	794	6	21
800	800	800	800	800	800	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

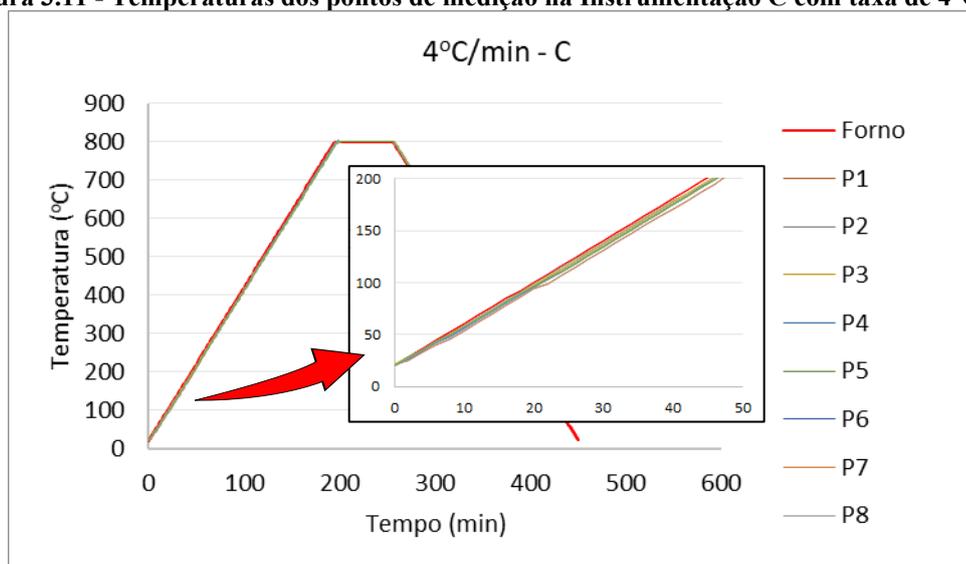
Tabela 3.9 – Resumo de leituras realizadas na Instrumentação C com taxa de 1°C/min

Forno (°C)	1°C/min - C								Diferença (°C)	
	P1 (°C)	P2 (°C)	P3(°C)	P4 (°C)	P5(°C)	P6 (°C)	P7 (°C)	P8 (°C)	Máxima	Permitido
25	25	25	25	25	26	25	25	26	1	1
105	104	104	106	102	107	106	104	105	3	5
201	200	200	201	196	202	202	199	200	5	7
305	304	303	305	302	305	305	303	304	3	10
401	400	398	401	398	400	401	399	400	3	12
505	504	501	505	503	503	505	502	503	3	14
601	600	597	600	599	597	600	598	599	4	17
705	704	700	704	703	700	704	702	703	5	19
800	800	795	800	799	795	799	797	798	1	21
800	800	800	800	800	799	800	800	800	0	21

Fonte: próprio autor

Como já discutido nos itens anteriores, o bloco deve estar submetidos a elevação de temperaturas uniforme por todas as suas superfícies, conforme comprovado pela instrumentação A, entretanto, é importante alertar que caso o critério de diferenças máximas entre pontos de medição fosse considerado com os pontos tocando a superfície do material conforme instrumentação C, a taxa de elevação de 4°C/min, não deveriam ser tomada para ensaios de blocos vazados, já que as diferenças máximas permitidas até 200°C não foram atendidas. Nas Figura 3.11, são apresentados os gráficos com as temperaturas obtidas na instrumentação tipo C, com taxa de elevação 4°C/min, em destaque diferenças de leituras até 200°C.

Figura 3.11 - Temperaturas dos pontos de medição na Instrumentação C com taxa de 4°C/min



Fonte: próprio autor

Ressalta-se que as instrumentações não foram aplicadas ao mesmo tempo. A garantia de uniformidade no aquecimento das amostras e a conseqüente eficiência do equipamento foi avaliada neste trabalho via instrumentação A. Assumindo, portanto, que o aquecimento das amostras ocorreu como pretendido, pode-se argumentar que a não uniformidade de temperatura no caso B, nas taxas de aquecimento de 2 e 4°C/min, não pode ter sido causada pelo aquecimento não uniforme do ar ao redor do corpo de prova. No entanto, como o forno aqueceu o ar ao redor das amostras uniformemente em todos os casos (conforme verificado pela instrumentação A), pode-se supor que a falha de uniformidade de temperatura no caso B pode ser causada por vários fatores, como medições imperfeitas causadas por fixação inadequada do termopar ou isolamento nos furos; imperfeições do corpo de prova devido ao processo de fabricação do bloco ou diferentes condições de umidade. Cuidados especiais foram tomados na fixação dos termopares com pasta de cimento para preencher completamente os furos sem deixar folgas ou falhas de fixação, conforme informado na Seção 3.2.2. Embora a padronização dos procedimentos de moldagem e cura após a moldagem não se enquadre nesta metodologia proposta por serem inerentes ao fabricante, havia a preocupação de que os blocos de concreto testados nesta pesquisa fossem fabricados por uma empresa com certificação de qualidade e equipamentos totalmente automatizados, o que garante a uniformidade do material da unidade. Antes do exame dos corpos de prova, os corpos de prova foram mantidos em laboratório com temperatura e umidade controladas pelo período de 14 dias proposto neste trabalho (Seção 3.1.5) que garante a uniformidade de umidade entre os corpos de prova. Além disso, os resultados da Tabela 3.7 mostram que as diferenças de temperatura nos testes de 4°C/min

ocorreram em temperaturas até os 100°C (temperatura na qual a água adsorvida evapora), o que descarta a influência da umidade. Assim, só resta confirmar que a não uniformidade de temperatura entre as instrumentações não está ligada à hipótese anterior e sim à condutividade térmica do material e sua geometria, que demandam certo tempo para que a temperatura seja uniforme ao longo de todo o material do bloco.

3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Através deste programa experimental, foi possível propor uma metodologia de ensaio (apresentada a seguir) para determinação das propriedades mecânicas de blocos de concreto vazado em elevadas temperaturas equivalente às recomendações já existentes, para o concreto, da RILEM (2007a) levando em consideração as características próprias dos blocos vazados de concreto (processo de fabricação, mistura, geometria, cura etc.).

Analisando as recomendações já existentes da RILEM para concreto e as normas para blocos de concreto vazado em temperatura ambiente, foi possível estabelecer de forma análoga, a quantidade mínima de seis corpos-de-prova, em tamanho natural tomados diretamente do fornecedor e com idade mínima de 90 dias. Na ausência de estudos que demonstrem o teor de umidade em estruturas de alvenarias e sua influência nas propriedades mecânicas em elevadas temperaturas, recomenda-se, com base nas normas de alvenaria regionais para temperatura ambiente, que a amostra deve ser armazenada durante no mínimo 14 dias dentro do laboratório com temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$, UR < 80% antes da realização do ensaio. No momento do ensaio deve ser utilizado forro mineral para o capeamento dos blocos.

Como este programa experimental pode-se constatar ainda, que a taxa de $1^\circ\text{C}/\text{min}$ é adequada para o estudo das propriedades mecânicas dos blocos vazados, visto que foi possível averiguar equidade da temperatura em todo o volume interno do material do bloco ao final do período de aquecimento. Até 800°C as taxas de $2^\circ\text{C}/\text{min}$ e $4^\circ\text{C}/\text{min}$ não permitem conformidade em nenhuma temperatura.

Pelo critério de uniformidade de aquecimento ao longo da superfície externa, considerando o ponto de leitura a 10 mm da superfície, as três taxas de aquecimento atenderam às necessidades do procedimento proposto. Demonstrando que, independentemente da taxa de aquecimento empregada, a distribuição das amostras no interior do equipamento (forno) se mostrou adequada e, também, o equipamento empregado no aquecimento das amostras se mostrou eficaz neste processo de aquecimento uniforme.

Pode-se deduzir ainda que o resfriamento dos blocos vazados depende fortemente das propriedades térmicas e do volume do material; do tempo e das características do forno. Ainda que esse não seja um critério de norma RILEM, percebe-se maior equidade entre a temperatura interna do material com a temperatura do forno para taxas de resfriamento menores. No caso de taxa de $4^{\circ}\text{C}/\text{min}$, o bloco resfria de maneira bem mais lenta que a observada para a temperatura do forno.

Considerando a necessidade de uniformidade de aquecimento das amostras em toda superfície externa e a geometria particular do bloco vazado, entende-se ser adequado adotar os oito pontos de controle de temperatura do equipamento (forno) empregados nesta pesquisa (Figura 3.4). O equipamento empregado (forno) deve ser capaz de manter o aquecimento uniforme das amostras, segundo o roteiro de aquecimento proposto, durante todo o procedimento metodológico sugerido neste trabalho para a avaliação da resistência mecânica residual, sob elevadas temperaturas, de blocos de concreto para alvenaria estrutural.

3.5 PROPOSTA DE NORMA PARA DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE BLOCOS DE CONCRETO VAZADOS EM TEMPERATURAS ELEVADAS

3.5.1 Escopo

Esta recomendação é válida para aplicações estruturais de blocos de concreto vazados em condições de serviço (exposição de longo prazo a temperaturas na faixa de 20 a 200°C) e acidental (exposição de curto prazo a temperaturas na faixa de 20 a 800°C ou mais). Este documento apresenta parâmetros de ensaio e procedimentos de ensaio para determinar a relação tensão-deformação do bloco de concreto vazado à temperatura constante T_{max} após o primeiro aquecimento ou após o resfriamento da T_{max} à temperatura ambiente. As temperaturas de teste variam de 20°C a 800°C ou acima. A relação tensão-deformação pode ser determinada para corpos de prova aquecidos com ou sem uma carga de compressão uniaxial constante aplicada externamente.

3.5.2 Definições

A relação tensão-deformação é definida aqui como a curva experimental da tensão uniaxial média sob uma deformação de compressão monotonicamente crescente. Essa relação pode ser determinada tanto por deformação sob tensão de compressão uniaxial crescente (tensão-deformação taxa controlada), ou por tensão sob deformação crescente (taxa de

deformação controlada). Conseqüentemente, a relação tensão-deformação do bloco de concreto vazado é chamada de:

- Relação tensão-deformação "controlada por taxa de tensão";
- Relação tensão-deformação "controlada por taxa de deformação".

A relação tensão-deformação pode ser determinada no estado quente ou à temperatura ambiente após aquecimento e resfriamento. As relações tensão-deformação determinadas na temperatura T_{max} são doravante descritas como “quentes”. As relações tensão-deformação determinadas após o resfriamento do T_{max} são doravante descritas como “residuais”.

Conseqüentemente, a relação tensão-tensão do concreto é referida como:

- Relação tensão-deformação a quente,
- Relação tensão-deformação residual.

A relação tensão-deformação do bloco de concreto vazado pode ser determinada para corpos de prova que são carregados ou não carregados durante a exposição térmica antes do ensaio. Como o nível de tensão σ durante o aquecimento influencia a relação tensão-deformação do concreto, propõe-se distinguir dois casos:

- A relação tensão-deformação "quente" ou "residual" de amostras sem carga durante a exposição à temperatura antes do teste é daqui em diante definida como "não tensionada".
- A relação tensão-deformação "quente" ou "residual" de amostras que são carregadas durante a exposição à temperatura antes do teste é daqui em diante definida como "tensionada".

3.5.3 Tipo de bloco

Esta recomendação aplica-se a todos os tipos de blocos de concreto vazados utilizados na construção, desde que esteja de acordo com a normas ABNT NBR 6136 (2016).

3.5.4 Amostragem e corpo-de-prova

3.5.4.1 Introdução

As amostras referidas nesta recomendação devem ter o formato e dimensões em conformidade com a norma ABNT NBR 6136 (2016).

As amostras devem ser tomadas de um mesmo lote, cuja moldagem e cura seguiu procedimentos inerentes ao fabricante. Sugere-se que em eventual relatório de ensaio estas informações sobre o processo de fabricação e cura dos blocos sejam apresentadas.

Para caracterização de um lote de produção de blocos para alvenaria estrutural quanto a resistência mecânica residual sob temperaturas elevadas, um número mínimo de seis blocos, para cada temperatura de interesse, deva ser empregado. O resultado será dado pela média simples dos resultados dos corpos-de-prova, onde os resultados obtidos diferirem mais de 20% da média, um terço ou mais amostras devem ser testadas. Se o resultado de uma única amostra difere mais de 20% da média de todas as amostras, ela deve ser excluída da avaliação.

3.5.4.2 Idade da amostra

A avaliação da resistência mecânica residual sob temperaturas elevadas deve ser feita em amostras com pelo menos 90 dias de idade; de forma a garantir que a fase de reações aceleradas do cimento já tenha ocorrido, não havendo variação significativa das propriedades físicas, mecânicas e térmicas da mistura durante todo o processo de caracterização.

3.5.4.3 Armazenamento

Tendo em vista, que as condições de armazenamento até o início dos ensaios devem ser escolhidas para simular as condições de umidade do bloco na prática, deve-se armazenar os blocos em ambiente protegido de intempéries, ao ar livre, em temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$, UR < 80% durante pelo menos os 14 dias imediatamente anteriores ao ensaio, lembrando-se ainda que, conforme item anterior, não pode ser feito antes de 90 dias de idade dos blocos.

3.5.4.4 Retificação e capeamento

Após o aquecimento, as amostras não devem ser retificadas e nem capeadas com material cimentício plástico e úmido. Quando retificado antes da etapa de aquecimento, deve-se verificar se ocorreu algum dano nas superfícies retificadas, caso positivo estes corpos-de-prova devem ser descartados.

Para obtenção das propriedades mecânicas residuais é recomendado a utilização de forro de fibra mineral, desde que esse mesmo tipo de regularização seja empregado na determinação da resistência mecânica de referência em situação ambiente.

Independente do processo de regularização das superfícies adotado, toda amostra que se apresente com as superfícies danificadas após aquecimento deve ser descartada.

3.5.4.5 Resistência à compressão padrão e de referência

A resistência à compressão padrão do bloco vazado à temperatura ambiente deve ser determinada no momento do ensaio, de acordo com os requisitos nacionais. O resultado deve ser usado como resistência de referência para os corpos de prova aquecidos sob tensão.

As amostras de resistência de referência relacionadas devem vir do mesmo conjunto de lotes e devem ser testadas sob a mesma temperatura e condição de carga.

3.5.5 Método de teste e parâmetros

3.5.5.1 Introdução

Os seguintes parâmetros de teste são recomendados como “padrão” para permitir uma geração e comparação consistentes dos resultados do teste. No entanto, os parâmetros de teste podem ser alterados para atender a aplicações específicas. Isso deve ser descrito como “não padrão” e deve ser cuidadosamente detalhado no relatório de teste.

3.5.5.2 Medições

As medições de comprimento, deformações e carregamento bem como a precisão dessas medidas seguem as recomendações da ABNT NBR 16868-3 (2020).

Quanto as medições de temperaturas, podem ser usados termopares ou outros tipos de dispositivos de medição de temperatura. Em casos especiais pode ser necessário proteger os termopares de superfície contra radiação.

As medições de temperatura devem ser feitas durante o aquecimento e, quando necessário, durante o resfriamento em oito pontos ao redor do corpo de prova. Os pontos de medição devem estar localizados nos centros dos vazios do bloco e a uma distância aproximada de 10 mm da superfície externa do bloco, a meia altura como apontado na Figura 3.4. Suportes externos metálicos podem ser empregados para garantir o correto posicionamento dos fios termopares.

A precisão das medições de temperatura deve ser de pelo menos $0,5^{\circ}\text{C}$ ou 1% dos valores medidos, o que for maior. A temperatura média da amostra é a temperatura média simples das 8 medições feitas nos pontos ao redor da amostra.

3.5.5.3 Condições de aquecimento e resfriamento

Para blocos vazados, a taxa de aquecimento e resfriamento máxima recomendada é de $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$, com o intervalo de registro de temperatura de 8 minutos, para condições de serviço e acidental.

O aquecimento do corpo de prova de concreto deve ser feito de forma que se garanta uma temperatura uniforme ao redor do corpo de prova. As diferenças máximas de temperatura entre qualquer uma das oito leituras de temperatura não deve exceder 1°C a 20°C , 5°C a 100°C e

20°C a 750°C. Para valores intermediários, as diferenças máximas de temperatura entre os pontos medidos permitidas devem ser calculadas.

O forno deve ser capaz de promover o aquecimento, até a temperatura máxima de interesse, de todo o volume da amostra ao final da rampa de aquecimento. Após este aquecimento progressivo, a temperatura máxima de interesse deve permanecer constante por 60 ± 5 minutos quando, então, a amostra deve ser resfriada, a uma taxa de diminuição da temperatura com o tempo, no máximo, igual a taxa empregada no aquecimento.

É recomendado que a avaliação da resistência mecânica seja feita ao final do período de aquecimento, quando se quer medir a propriedade nesta temperatura ou imediatamente após a amostra ser resfriada quando se quer medir a propriedade residual. Vale ressaltar que após aquecimento, no bloco de concreto em contato com a umidade do ar, ocorre reidratação do CaO que pode causar desagregação, principalmente para concretos que utilizam agregados calcários e cimentos sem adição de pozolanas.

3.5.6 Equipamento

O aparato de teste normalmente compreende um dispositivo de aquecimento, um dispositivo de carregamento e instrumentos para medir as mudanças de temperatura, carga e comprimento do corpo de prova.

O aparelho de teste deve ser capaz de cumprir as recomendações dadas na Seção 3.5.5 para os parâmetros de teste e os níveis de precisão.

3.5.7 Relatório de ensaio

O relatório de ensaio deve conter no mínimo as seguintes informações:

- a. identificação do solicitante;
- b. identificação de todos os corpos de prova;
- c. data fabricação dos blocos;
- d. tipo de agregados e materiais utilizados na composição;
- e. data do recebimento dos materiais;
- f. data do assentamento;
- g. condições de cura;
- h. descrição de todos os equipamentos utilizados para carregamento e instrumentação;
- i. data do ensaio;
- j. características geométricas dos blocos/prismas e descrição da instrumentação utilizada e sua posição;

- k. características gerais da construção dos prismas, disposição da argamassa de assentamento e do graute;
- l. registros das especificações e resultados de ensaio de resistência à compressão das amostras dos blocos ou tijolos, argamassa e graute;
- m. valores da área líquida e bruta média, expressos em milímetros quadrados (mm^2);
- n. cargas de ruptura individuais, expressas em Newtons (N);
- o. resistências individuais, característica e média dos blocos e prismas determinadas na área bruta, expressas em megapascal (MPa), com aproximação decimal e valor do coeficiente de variação;
- p. valores individuais e médios do módulo de deformação secante (E_p), e gráficos traçados durante o ensaio para cada corpo de prova, conforme mostrado na Figura 2 da ABNT NBR 16868-3. O módulo de deformação secante (E_p) deve ser calculado no intervalo correspondente a 5% e 30% da tensão de ruptura do gráfico, conforme mostrado Figura 2 da ABNT NBR 16868-3, de cada corpo de prova;
- q. carga do surgimento da primeira fissura (quando for possível sua observação);
- r. descrição do modo de ruptura, podendo-se utilizar fotografias ou desenhos;
- s. registros sobre eventos não previstos no decorrer dos ensaios;
- t. referência às Normas utilizadas.

4. PROPRIEDADES TÉRMICAS E FÍSICAS

Como se sabe, o comportamento dos materiais de construção é fortemente afetado pela temperatura, em geral, o aumento da temperatura dos elementos estruturais, causa redução da resistência e do módulo de elasticidade. Porém antes de analisar as influências das elevadas temperaturas no comportamento mecânico, faz-se necessário entender o comportamento termofísico desses materiais. Assim sendo, este capítulo propõe apresentar as variações com a temperatura das propriedades térmicas e físicas do concreto vibroprensado utilizado para fabricação dos blocos, transferindo as propriedades mecânicas para o capítulo posterior. Entretanto, antes de apresentar as alterações de propriedades termofísicas, faz-se necessário realizar um levantamento bibliográfico evidenciando as diferenças e influências intrínsecas de cada material, além de caracterizar todo o material utilizado na fabricação dos blocos estudados comparando-os com as informações disponíveis na literatura. Devido a carência de resultados para o concreto seco e às particularidades deste concreto, que é utilizado em blocos de alvenaria, em relação àquele empregado em estruturas de concreto armado (porosidade, umidade, densidade etc.), entende-se que os parâmetros térmicos (condutividade térmica, calor específico e alongamento térmico) serão de fundamental importância para servir como ponto de partida na entrada de dados dos modelos térmicos, ainda que precisem ser ajustados para que apresentem resultados coerentes com ensaios feitos no forno.

4.1 REFERÊNCIAL TEÓRICO

4.1.1 Propriedades do agregado em temperaturas elevadas

A alvenaria de concreto é conhecida por ter excelentes propriedades de proteção contra incêndio. A sua grande massa térmica ajuda a conter o fogo e reduz a temperatura no núcleo do conjunto de alvenaria o que permite um maior tempo sob carregamento. Isso é importante porque as propriedades mecânicas dos blocos de concreto e da argamassa começam a se deteriorar à medida que o material aquece. As principais propriedades que afetam a estabilidade e o perfil de temperatura da alvenaria exposta ao fogo são sua expansão térmica, densidade, condutividade térmica e capacidade de calor específico. Sendo importante ressaltar que pode haver uma grande diferença nas propriedades entre duas misturas de concreto, com base em fatores como tipo de agregado, traço da mistura, teor de umidade e adição de materiais cimentícios suplementares. Este capítulo tem como objetivo delinear a influência e as alterações que ocorrem com essas propriedades. Isso é feito explicando as mudanças químicas e físicas

que o concreto sofre quando é aquecido, bem como descrevendo os resultados de diferentes pesquisadores.

Antes de abordar as propriedades afetadas pela temperatura, é importante ressaltar as diferenças entre experimentos. A maioria dos procedimentos de ensaios usados para determinar o comportamento do concreto em temperaturas elevadas não envolve um componente em escala real ou uma temperatura padrão do forno. Em vez disso, a maioria dos ensaios em altas temperaturas usam amostras pequenas que são aquecidos a uma temperatura máxima a uma taxa de aquecimento especificada. Percebe-se que os procedimentos de teste podem variar significativamente (taxas de aquecimento, temperaturas máximas e regimes de resfriamento) e ainda que os testes possam ajudar a obter novos conhecimentos sobre o comportamento do material de alvenaria de concreto em situações de incêndio, é importante pensar criticamente ao comparar os resultados de diferentes ensaios juntos. Destacando que o material concreto não conduz calor rapidamente, assim, testes com durações curtas ou corpos de prova maiores não são tão precisos devido à falta de uniformidade de temperatura nas amostras. Se a maior parte do concreto não for afetada pela temperatura elevada, então os resultados não são indicativos de suas propriedades de resistência ao fogo.

Além disso, quando novos materiais são adicionados a uma mistura de concreto para determinar seus efeitos em temperaturas elevadas, é importante notar que as misturas usadas pelos pesquisadores podem ser significativamente diferentes, apesar do uso de terminologia semelhante. Por exemplo, dois ensaios que substituem o mesmo percentual de agregado miúdo por cinza volante, mas sem conhecer fatores como a relação água/cimento (a/c), tipo de agregado e aditivos usados, será difícil comparar quantitativamente os resultados. Um problema semelhante ocorre ao comparar amostras de controle com novas dosagens de materiais. A maioria dos trabalhos inclui uma amostra de controle feita de concreto comum sem a adição do novo material ou aditivos ao comparar os efeitos de uma ou mais alterações no traço da mistura. Se a amostra de controle for muito diferente da nova mistura, a comparação será menos útil. Esse problema geralmente ocorre quando a adição de um novo material requer a alteração de vários fatores (como relação a/c , quantidade de agregados e aditivos) no traço da mistura.

Feitas essas considerações é possível abordar as principais propriedades que interferem no comportamento dos materiais da alvenaria em altas temperaturas. Sendo importante ressaltar a expansão térmica, que é a mudança no tamanho e/ou forma do material em relação à temperatura (unidades $1/K$). Um material com alto coeficiente de expansão térmica é aquele que aumenta consideravelmente seu tamanho com o aumento da temperatura, um material com baixo coeficiente de expansão térmica é aquele que aumenta minimamente de tamanho com o

aumento da temperatura. Um material com um coeficiente de expansão térmica negativo é aquele que diminui de tamanho com o aumento da temperatura. O coeficiente de expansão térmica muda com base no material, bem como com diferentes faixas de temperatura.

A expansão térmica para a maioria dos agregados aumenta linearmente com a temperatura (MINDEGUIA *et al.*, 2012). Após 570°C a expansão térmica aumenta repentinamente devido à transformação do quartzo (que incha). Agregados silicosos como o sílex apresentam expansão térmica maior do que outros agregados (cerca de duas vezes mais), o que faz com que ocorra trincas ao redor dos agregados devido ao descasamento nas expansões térmicas do agregado e do cimento (MINDEGUIA *et al.*, 2012). Após o resfriamento, as deformações térmicas residuais são muito maiores para agregados silicosos em comparação com outros agregados de peso normal.

Os principais problemas com a expansão térmica são as tensões térmicas induzidas, bem como a expansão térmica desigual. Como a alvenaria se expande quando aquecida, ela exerce uma força na estrutura que a cerca. Se a estrutura for rígida o suficiente para suportar esta força, a parede é submetida à compressão (GNANAKRISHNAN; LAWATHER, 1989). O concreto é resistente à compressão, portanto, se as forças forem uniformes, geralmente não há preocupação. No entanto, a alvenaria é composta por diferentes materiais que possuem diferentes valores de expansão térmica. A argamassa não se expande tanto quanto os blocos que os une, isso, juntamente com retração pela perda de umidade, pode causar a formação de físsuras na interface argamassa-bloco. Outra questão sobre as propriedades do concreto utilizados nos blocos envolvem os agregados e a resistência das unidades; se os agregados se expandirem a uma taxa diferente da pasta de cimento, microfissuras podem se formar e reduzir a resistência do concreto; além disso, a resistência inicial dos blocos é adquirida pela dosagem e melhor adensamento em seu processo de fabricação. A escolha de um agregado com expansão térmica semelhante à pasta de cimento e o bom adensamento, que reduz a quantidade pasta de cimento, é uma forma de reduzir as microfissuras.

Os agregados de concreto podem ter um grande impacto na resistência a altas temperaturas do concreto, porque a maioria do concreto é agregado (70-80% em volume) (XING *et al.*, 2014). Agregados de concreto leve (*LWC*), muito utilizados em outros países e não utilizados no Brasil, são conhecidos por se comportarem melhor do que agregados de peso normal em temperaturas elevadas (AL-HADHRAMI; AHMAD, 2009). Existem também vários outros agregados que podem ser usados em misturas de concreto, cada um com suas vantagens e desvantagens.

Dois tipos principais de agregados de peso normal são calcários e silicosos. As rochas calcárias são rochas sedimentares que contêm uma alta proporção de carbonato de cálcio (CaCO_3). Algumas rochas calcárias comuns incluem calcário e dolomita (XING *et al.*, 2014). As rochas silicosas são rochas sedimentares que contêm sílica (SiO_2). Alguns tipos comuns de rocha siliciosa são granito, sílex e arenito (XING *et al.*, 2014).

Os agregados calcários geralmente apresentam melhor resistência ao fogo do que os agregados silicosos (XING *et al.*, 2014). A razão pela qual o agregado calcário tem uma melhor resistência ao fogo deve-se em parte a um processo de calcinação endotérmica que ocorre a temperaturas elevadas que absorve calor (NETINGER *et al.*, 2011). A menor densidade do material calcinado significa que o material é capaz de maior isolamento (NETINGER *et al.*, 2011). Os agregados calcários são capazes de permanecer relativamente intactos até cerca de 600°C , temperatura em que o carbonato de cálcio começa a decompor-se em cal (CaO) e dióxido de carbono (CO_2), o que reduz a resistência do agregado. Este processo de decomposição atinge o pico em 800°C e continua até 898°C (XING *et al.*, 2014). Os agregados silicosos têm resistência ao fogo inferior porque o quartzo no agregado silicoso sofre alterações físicas a temperaturas elevadas que fazem com que o agregado e o próprio concreto enfraqueçam (NETINGER *et al.*, 2011; XING *et al.*, 2014). Quando o quartzo atinge 573°C sofre uma expansão de volume reversível de 1-5,7% (XING *et al.*, 2014), o que pode causar a formação de fissuras no concreto.

Os *LWCs* são menos densos e geralmente contêm vazios que fornecem peso próprio reduzido, propriedades de isolamento térmico mais altas e maior resistência ao fogo. Uma vez que a condutividade térmica do concreto é baseada em sua densidade; quanto menor a densidade, melhor o isolamento. O *LWC* para isolamento geralmente tem uma densidade inferior a 1450 kg/m^3 e resistência tão baixa quanto 0,5 MPa (AL-SIBAHIY; EDWARDS, 2013). Embora o *LWC* tenha melhores propriedades de isolamento, a desvantagem é que o *LWC* não é tão resistente quanto o concreto comum. Agregados leves como pedra-pomes e argila expandida são formados em altas temperaturas e, portanto, são mais estáveis em situação de incêndio. Agregados leves são mais capazes de manter as propriedades mecânicas do que a maioria dos agregados de peso normal, por exemplo, *LWC* usando pedra-pomes mostrou ter o dobro da resistência à compressão residual do concreto de peso normal a 800°C (MA *et al.*, 2015). Agregados leves também são capazes de reter propriedades mecânicas em temperaturas onde agregados normais perderam toda a resistência.

Agregados reciclados, como a escória de aço, também podem ser usados no concreto das unidades de alvenaria, apesar de não ser comum seu uso no Brasil, mas estarem presentes nos

principais códigos e normas internacionais. Eles podem fornecer um método ecologicamente correto e econômico para a produção de concreto. A escória de aço tem boas propriedades em elevadas temperaturas porque é formada em temperaturas muito altas (possivelmente até 1650°C), o que significa que é termicamente estável (NETINGER *et al.*, 2011). A escória de aço confere sua melhor estabilidade térmica ao concreto (YU *et al.*, 2014). O concreto com agregado de escória pode não ser mais resistente em condições ambientais, mas sua capacidade de manter sua resistência é um benefício importante quando exposto ao fogo. Quando comparadas com agregados calcários e siliciosos, as amostras de escória apresentaram propriedades mecânicas melhoradas em toda a faixa de temperatura. A escória mostrou-se estável mesmo em temperaturas entre 800°C e 1000°C, quando a maioria do concreto tem pouca ou nenhuma resistência.

No entanto, a qualidade dos agregados reciclados pode desempenhar um grande papel na resistência do concreto tanto em condições ambientais quanto em temperaturas de fogo. O intemperismo da escória pode eliminar os possíveis vestígios de cal livre (CaO) e/ou óxido de magnésio livre (MgO), que, se presentes, podem levar à expansão e fissuração do concreto (YU *et al.*, 2014). Outro método é tratar termicamente a escória. Os agregados de escória tratados termicamente são aquecidos acima de 800°C e mantidos nessa temperatura elevada por tempo suficiente para permitir que o óxido de ferro (FeO) na escória se transforme em magnetita (Fe₃O₄). Essa transformação causa uma expansão volumétrica irreversível, o que significa que o agregado de escória tratado termicamente não sofrerá essa expansão quando incluído no concreto (NETINGER *et al.*, 2013).

Embora a escória possa ser um bom agregado para resistência ao fogo, ela pode ter alguns resultados negativos quando usada com cimento Portland devido a microfissuras. As microfissuras normalmente ocorrem porque o agregado se expande quando aquecido, mas a pasta de cimento encolhe em temperaturas elevadas. O agregado de escória (mesmo agregado tratado) se expande mais do que o agregado regular devido ao seu alto coeficiente de expansão térmica, o que causa mais microfissuração (NETINGER *et al.*, 2013). Essas fissuras, por sua vez, enfraquecem o próprio concreto, principalmente a resistência à flexão. A adição de fibras de polipropileno e cinzas volantes pode ajudar a melhorar a resistência ao fogo ao usar escória, pois ambos reduzem microfissuras no concreto (DEMIREL; KELEŞTEMUR, 2010).

Até 400°C, quaisquer alterações na resistência à compressão do concreto são insignificantes (HANDOO *et al.*, 2002). Abaixo de 400°C ocorre a secagem que “alivia a pressão e cria maiores forças de “*Van der Waals*” o que resulta em uma configuração mais próxima dos poros capilares e um ganho de resistência (NETINGER *et al.*, 2013). Outra razão

para o ganho de resistência, até 300°C, deve-se à melhor hidratação dos grãos de cimento não hidratados “devido a uma condição de autoclavagem interna” que é causada pela temperatura elevada e pela evaporação da umidade (MA *et al.*, 2015). Este ganho de resistência é mais prevalente em concretos de alta resistência devido à baixa permeabilidade que resiste ao fluxo de umidade. Assim, as forças de *Van der Waals* e a ação de autoclavagem são duas razões pelas quais a resistência à compressão do concreto permanece constante ou aumenta quando é aquecido. Este ganho de força é então perdido novamente à medida que a temperatura continua a aumentar. Após 400°C a resistência diminui devido à perda de umidade quimicamente ligada. Essa perda resulta na redução do conteúdo de portlandita e na formação de microfissuras (HANDOO *et al.*, 2002). O aumento de resistência pode ser um pouco menor para alvenaria que já foi autoclavada. Entretanto, para um melhor entendimento da influência da resistência no comportamento do concreto sob elevadas temperaturas faz-se necessário compreender os efeitos que o aquecimento provoca na microestrutura do concreto.

4.1.2 Efeito das altas temperaturas na microestrutura do concreto

As relações microestrutura-propriedade do concreto não estão ainda completamente desenvolvidas; no entanto, certo conhecimento sobre os elementos essenciais da microestrutura é necessário antes de se discutir os fatores de influência nas propriedades importantes para a engenharia do concreto, tais como: resistência, deformabilidade e fissuração. Um amplo conhecimento das características importantes da microestrutura de cada uma das três fases do concreto (agregado, pasta de cimento e zona de transição) é essencial para compreender e controlar as propriedades do material compósito (MEHTA; MONTEIRO, 2014a). A deterioração do concreto quando exposto a altas temperaturas também é atribuída a fatores relacionados a estas três fases: alterações físico-químicas na pasta de cimento, nos agregados e a incompatibilidade térmica entre ambos. Fatores influenciados pelo ambiente, como: nível de temperatura, taxa de aquecimento, carregamento aplicado e a umidade, também influenciam na deterioração do material (KHOURY, 2000). Portanto, é importante discutir os efeitos das altas temperaturas no concreto, focando as alterações da microestrutura dos agregados, da pasta de cimento hidratada e da zona de transição.

Mesmo sendo mais resistente do que as outras fases do concreto, o agregado normalmente não tem influência direta na resistência do concreto normal (MEHTA; MONTEIRO, 2014a). Entretanto, os agregados representam uma proporção considerável de volume no concreto e a condutividade térmica do concreto deve ser consideravelmente influenciada pela condutividade térmica dos agregados que, de acordo com sua composição mineralógica e sua microestrutura

interna, apresentam valores de condutividade térmica muito diferentes. Além disso, essa condutividade evolui de forma diferente com a temperatura dependendo do tipo de agregado (XING *et al.*, 2011, 2014, 2015). Agregados silicosos e areias, que contêm quartzo em sua composição, sofrem significantes transformações a altas temperaturas, sendo a mais conhecida a expansão volumétrica após 500°C, devido à transformação da forma cristalina do quartzo de α em β . Apesar dessa transformação ser reversível, fissuras radiais ao redor dos agregados podem ser verificadas, em função dessa expansão. Bem como, agregados de origem carbonáticas, como a dolomita, tornam-se instáveis em temperaturas maiores do que 700°C, devido a transformação de carbonato de cálcio (CaCO_3) em óxido de cálcio (cal - CaO) e dióxido de carbono (CO_2). Esse processo, que atinge o pico aos 800°C e finaliza aos 898°C, é endotérmico e tende a retardar a evolução da temperatura no concreto. Nos agregados calcários, o fenômeno inicia em 600°C pela decomposição do carbonato de cálcio. Agregados de basalto apresentam grande estabilidade térmica e começam a derreter a partir de temperaturas de 1000°C. Durante esse processo, expandem e liberam gases armazenados no interior da rocha (MINDEGUIA *et al.*, 2012; RAZAFINJATO *et al.*, 2016). Por outro lado, a dimensão e a forma do agregado gráudo podem, entretanto, afetar a resistência do concreto de forma indireta. Mehta e Monteiro (2014) e Neville (2016) afirmam que quanto maior o tamanho do agregado no concreto, maior será a tendência de acúmulo de filme de água junto à superfície do agregado, enfraquecendo a zona de transição na interface pasta-agregado. No caso dos blocos de concreto tem-se geralmente agregados gráudos com menores dimensões do que no concreto convencional. Para blocos, o tamanho máximo dos grãos devem ser no máximo de 9,5 mm para permitir sua utilização em equipamentos com cavidades de dimensões reduzidas, sendo aconselhado um diâmetro 6,3 mm (FERNANDES, 2019). Logo, a água de exsudação interna que tende a se acumular em torno de partículas de agregado gráudos será reduzida no caso dos blocos. Desse modo, essas regiões que formam a zona de transição entre pasta-agregado e que tendem a ser fraca ou com grande microfissuração serão reduzidas nos blocos de concreto vazados.

Outra fase do concreto de grande importância é a pasta de cimento hidratada que é formada principalmente por sólidos, vazios e água. O comportamento da pasta de cimento hidratada frente a altas temperaturas depende de fatores como a relação água/cimento, a relação entre C/S (CaO/SiO_2 ou óxido de cálcio/dióxido de silício) quantidade de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (portlandita/CH) formada, grau de hidratação e umidade (HAGER, 2013; MINDEGUIA *et al.*, 2012).

Sob altas temperaturas, o primeiro processo de degradação desencadeado é a decomposição da etringita, que ocorre aproximadamente a 80°C (CASTELLOTE *et al.*, 2004; INGHAM, J. P., 2009). Em seguida a pasta de cimento desidrata, inicialmente, a água capilar (água livre), que não sofre influência das forças de atração de *Van der Waals*, evapora, seguida pela evaporação das águas lamelares e adsorvidas, devido a um processo físico. Por último, a água quimicamente associada aos cristais de C-S-H (silicato de cálcio hidratado) é perdida (HAGER, 2013). Essa desidratação do C-S-H se inicia aos 100°C promovendo o relaxamento das microtensões responsável pela fluência transiente e deflagra a perda de massa da pasta de cimento, junto com o aumento da fissuração e da porosidade. Aos 700°C o C-S-H se decompõe acarretando a retração da pasta de cimento e em uma grande redução da resistência. A perda de água associada ao C-S-H promove um incremento na porosidade, contribuindo para a redução de resistência (CASTELLOTE *et al.*, 2004; HAGER, 2013). Os cristais de portlandita também sofrem um processo de desidratação em temperaturas acima de 420°C, contribuindo para a retração e microfissuração da pasta de cimento. Nesse processo, o Ca(OH)_2 se decompõe em CaO (óxido de cálcio) e água. Outra alteração incidente é a descarbonatação do carbonato de cálcio (CaCO_3), que se decompõe em CaO e CO_2 , a partir de temperaturas maiores que 650°C (CASTELLOTE *et al.*, 2004).

As altas temperaturas promovem a expansão dos grãos de clínquer não hidratados, que podem ser encontrados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas, mesmo muito tempo depois da hidratação (NEVILLE, 2016). Esse fenômeno, em concomitância com a retração na pasta promovida pelas alterações no C-S-H e CH, conduz a expansões térmicas diferenciais entre os materiais, que resultam em microfissuras no concreto, que por sua vez, aumentam a porosidade deste (KHOURY, 2000).

A porosidade também é influenciada pelas altas temperaturas, crescendo de modo não linear, devido, principalmente, ao processo progressivo de desidratação do C-S-H. Dos 20°C até os 300°C o aumento na porosidade é baixo, menor do que a perda de massa ocorrida. Acima dos 300°C essa relação se inverte, com um grande aumento da porosidade, com intensificação das microfissuras. Acima dos 900°C, outro pico de aumento da porosidade é verificado. Nas condições em que a pasta do cimento não perde rapidamente a umidade para o ambiente, como no interior de seções de concreto de grandes dimensões, o aquecimento pode levar ao surgimento de C-S-H ou outros cristais, dependendo da relação de CaO/SiO_2 (HAGER, 2013; KHOURY, 2000).

O resfriamento, após a exposição a altas temperaturas, também promove alterações na pasta de cimento. Os produtos cimentícios da pasta podem se reidratar, formando novos géis

ou componentes cristalinos. A cal formada também reidrata e expande, formando novas fissuras (FERNANDES *et al.*, 2017).

No concreto plástico, a quantidade de pasta disponível é normalmente muito generosa, enquanto nos blocos de concreto a pasta de cimento hidratada é bem menor, com granulometria muito bem distribuída e com finos ocupando os vazios dos agregados maiores a fim de diminuir ao mínimo, a necessidade de pasta da mistura (FERNANDES, 2019).

A zona de transição na interface, geralmente o elo mais fraco da corrente, é considerada como a fase limitante da resistência no concreto, sua resistência em qualquer região depende do volume e tamanho dos vazios existentes, além disso um fator importante responsável pela baixa resistência da zona de transição na interface no concreto é a presença de microfissuras. É por causa da presença da zona de transição que se dá a ruptura do concreto em nível de tensão consideravelmente mais baixo do que a resistência de qualquer um dos outros dois componentes principais (FERNANDES *et al.*, 2017). Uma vez que não são necessários níveis muito altos de energia para aumentar as fissuras já existentes na zona de transição na interface, mesmo a 50% da resistência última, maiores incrementos de deformação podem ser obtidos por unidade de carga aplicada. Isso explica o fenômeno em que os componentes do concreto (agregado e pasta de cimento hidratada) normalmente permanecem elásticos até a ruptura em um ensaio de compressão uniaxial, enquanto o concreto em si apresenta comportamento inelástico. Uma quantidade considerável de energia é necessária para a formação e extensão das fissuras na matriz sob ação de cargas de compressão. Por outro lado, nos esforços de tração, as fissuras se propagam rapidamente e em um nível de tensão bem menor. Por esse motivo, o concreto se rompe fragilmente na tração, mas é relativamente dúctil na compressão. Essa é também a razão por que a sua resistência à tração é muito menor do que a resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014a; NEVILLE, 2016). O aquecimento do concreto leva a uma expansão térmica diferencial entre o agregado e a matriz cimentícia. A pasta, devido à desidratação, sofre um intenso processo de retração durante o aquecimento, ao passo que os agregados sofrem um processo de expansão resultando em fissuras, que surgem inicialmente na zona de transição, devido à sua maior fragilidade. Nos blocos de concreto o melhor arranjo entre os grãos e o menor índice de vazios dos agregados permitem uma menor quantidade de finos necessária e conseqüentemente um menor consumo de cimento e menores zonas de transição; ademais a vibroprensa garante ao bloco um melhor adensamento diminuindo consideravelmente a presença de microfissuras.

4.1.3 Propriedades do concreto em temperaturas elevadas

De acordo com Neville (2016) as propriedades térmicas podem ser importantes para o desempenho do concreto são: o coeficiente de dilatação térmica, a condutividade, a difusividade e o calor específico.

O coeficiente de dilatação influencia o valor correspondente do concreto que contém esse agregado, sendo que, quanto maior for o coeficiente do agregado, maior será o coeficiente do concreto. Entretanto o coeficiente do concreto também depende do teor de agregados na mistura e das proporções da mistura em geral. O coeficiente linear de dilatação térmica varia conforme o tipo de rocha matriz (Tabela 4.1). Para a pasta de cimento Portland hidratada, esse coeficiente varia entre $11 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ e $16 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, mas valores até $20,7 \cdot 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ já foram observados, sendo que o valor varia com o grau de saturação. Desta forma, uma diferença expressiva entre os coeficientes ocorrerá em agregados com expansão muito pequena, como alguns granitos, calcários e mármore. Caso sejam esperadas temperaturas extremas, as propriedades dos agregados devem ser conhecidas de forma detalhada. Por exemplo, o quartzo sofre inversão a 574°C e tem uma expansão súbita de 0,85%. Isso poderia desagregar o concreto.

Tabela 4.1 – Valores típicos de coeficiente de dilatação (agregado e concreto), massa específica, condutividade e difusividade térmica

Tipo de agregado	Coeficiente de dilatação térmica linear ($10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)		Massa específica úmida do concreto (kg/m^3)	Condutividade térmica ($\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{s}^{\circ}\text{C}/\text{m}$) ou ($\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}$)	Difusividade térmica (m^2/h)
Granito	1,8	8,6	2.420	2,6-2,7	0,0040
Diorito, andesito	4,1	10,3	-	-	-
Gabro, basalto, diabásio	3,6	9,7	2.520	1,9-2,2	0,0030
Arenito	4,3	10,1	2.400	2,9	-
Dolomito	6,7	8,6	2.500	3,3	0,0047
Calcário	0,9	6,5	2.450	2,6-3,3	0,0046
Chert	7,3	13,1	-	-	-
Mármore	1,1	16,0	-	-	-
Quartzito	-	12,2	2.440	3,5	0,0054
Barita	-	-	3.040	2,0	-
Folhelho expandido	-	9,9	1.590	0,85	-

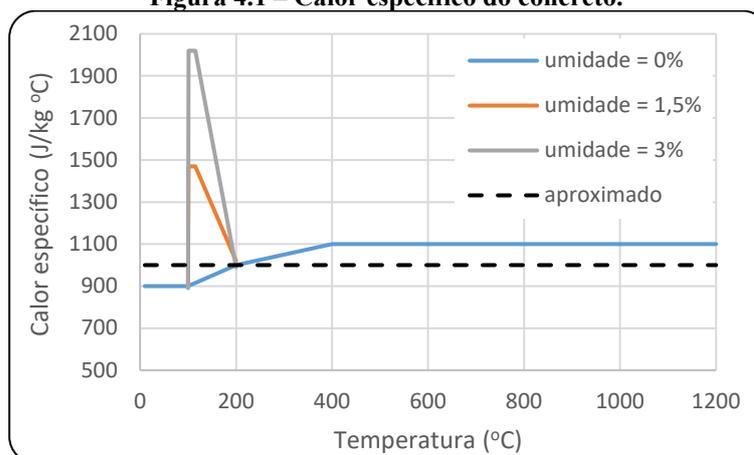
Fonte: adaptado Mehta e Monteiro (2104) e Neville (2016)

A condutividade térmica mede a capacidade de um material de conduzir calor e é definida como a relação entre o fluxo de calor e o gradiente de temperatura. A partir da Tabela

4.1, pode observar que a característica mineralógica do agregado exerce influência sobre a condutividade do concreto produzido com ele. Em geral, a cristalinidade da rocha aumenta sua condutividade, assim, o basalto possui baixa condutividade, o calcário possui uma condutividade intermediária e o quartzito possui a maior condutividade. A condutividade não é muito afetada em faixa de temperaturas ambientes. Em temperaturas mais elevadas, a variação da condutividade fica complexa, pois ela aumenta lentamente com a elevação da temperatura até um valor máximo, aproximadamente, entre 50°C e 60°C. Com a perda de água do concreto, devida ao aumento da temperatura até 120°C, a condutividade diminui abruptamente. Em temperaturas acima de 120°C a 140°C, o valor da condutividade tende a estabilizar, sendo que a 800°C é certa de metade do valor a 20°C (NEVILLE, 2016).

A difusividade representa a velocidade de variação da temperatura no interior de uma massa, ou seja, o calor se move mais facilmente pelo concreto com maior difusividade térmica. Para o concreto de densidade normal, a condutividade geralmente controla a difusividade térmica porque a densidade e o calor específico não variam muito (MEHTA; MONTEIRO, 2014a).

O calor específico representa a capacidade térmica do concreto e é pouco influenciado pelas características mineralógicas do agregado, mas aumenta bastante com a elevação do teor de umidade do concreto. Ele também aumenta com a elevação da temperatura e com diminuição da massa específica do concreto. O intervalo de valores comum para concretos normais é entre 840 e 1.170 J/kg °C, a variação do calor específico do concreto com a temperatura pode ser observada na Figura 4.1, onde se percebe que, desconsiderando a umidade, seus valores aumentam quase-linearmente em temperaturas na faixa de 100 a 400° C, nas quais a temperatura do concreto aumenta. Outra propriedade térmica do concreto é a absorvidade térmica, que é interessante para a consideração dos efeitos do fogo. Ela é definida como $(K\rho c)^{1/2}$, onde K é a condutividade térmica, ρ é a absorvidade térmica do concreto normal e c é o calor específico.

Figura 4.1 – Calor específico do concreto.

Fonte: adaptado EN 1992-1-2 (2004)

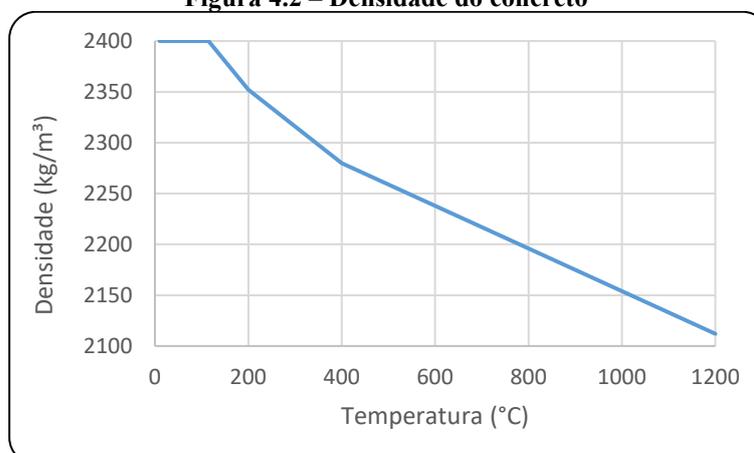
A Figura 4.2 mostra a variação percentual na densidade do concreto de peso normal com a temperatura, segundo o Eurocode 2. De ambiente a 1200°C há uma redução de 12% na densidade, com a maior mudança ocorrendo entre 115 e 200°C. A variação da densidade com a temperatura encontrada no EN 1992-1-2 (2004) é influenciada pela perda de água e é definida da seguinte forma:

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}), \text{ para } 20^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 115^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(1 - \frac{0,02(\theta - 115)}{85} \right), \text{ para } 115^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 200^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,98 - \frac{0,03(\theta - 200)}{200} \right), \text{ para } 200^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 400^{\circ}\text{C}$$

$$\rho(\theta) = \rho(20^{\circ}\text{C}) \cdot \left(0,95 - \frac{0,07(\theta - 400)}{800} \right), \text{ para } 400^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq 1200^{\circ}\text{C}$$

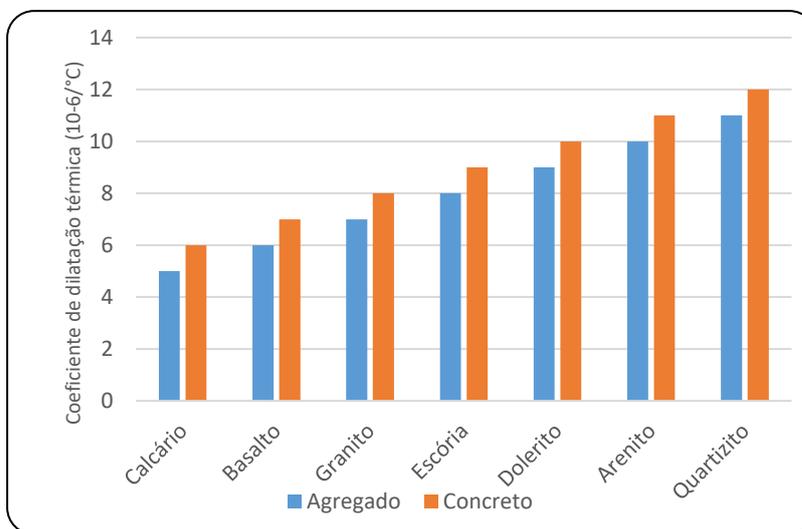
Figura 4.2 – Densidade do concreto

Fonte: adaptado EN 1992-1-2 (2004)

O coeficiente de expansão térmica do concreto está diretamente relacionado ao coeficiente de expansão térmica do agregado presente, no concreto, a seleção de um agregado

com coeficiente mais baixo fornece outra abordagem para reduzir a deformação térmica. Supondo haver de 70 a 80% de agregado na dosagem de concreto, Mehta e Monteiro (2014) apresenta na Figura 4.3, os valores calculados do coeficiente para vários tipos de rocha.

Figura 4.3 – Coeficiente de expansão térmica de agregados e concretos



Fonte: Mehta e Monteiro (2014)

4.1.4 Blocos de concreto em temperaturas elevadas

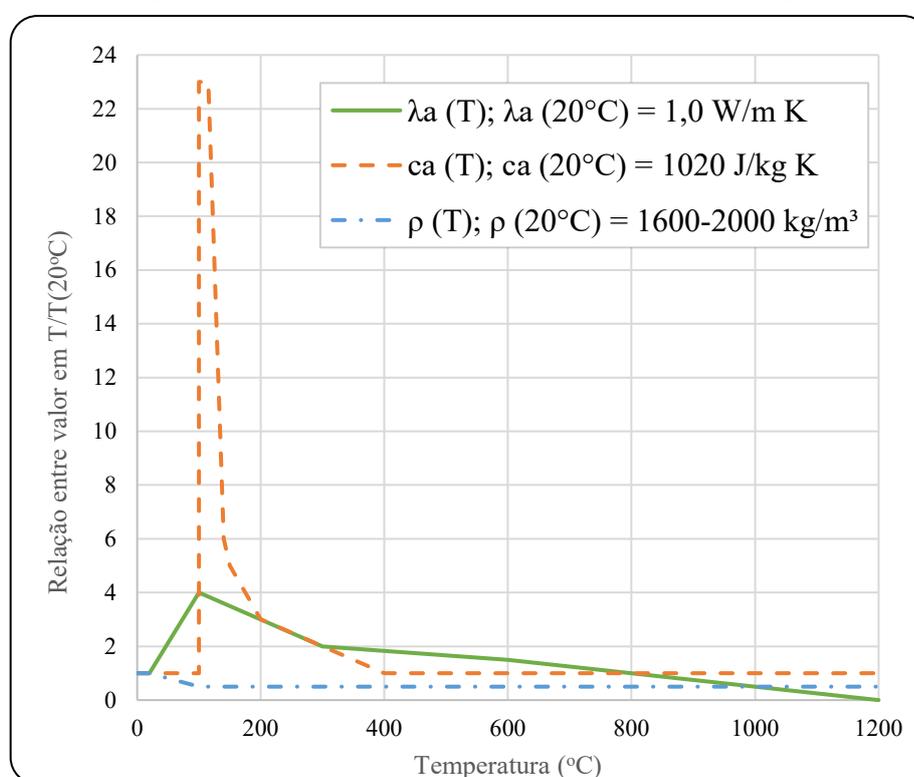
As unidades de alvenaria, geralmente blocos quando têm função estrutural, são feitas de cerâmica, solo-cimento, concreto, sílico-calcário, pedra e vidro, sendo mais comuns os de cerâmica e de concreto. Sabe-se que existe redução na resistência à compressão dos materiais quando submetida ao calor. Esse trabalho ate-se aos blocos estruturais vazados de concreto sendo, portanto, importante compreender melhor o desempenho ao fogo do seu material constituinte.

Conforme afirmam Kodur e Harmathy (2016); Naser (2019) e Pope; Zalok (2019), poucos foram os trabalhos de pesquisa com foco específico nas propriedades térmicas da alvenaria. Além disso, vários autores (ANDREINI *et al.*, 2015; AYALA, 2010; HARMATHY; ALLEN, 1972, 1973; NEVILLE, 2016; POPE; ZALOK, 2020; RUSSO; SCIARRETTA, 2013) consideram que existe variações das propriedades térmicas e mecânicas entre o concreto produzido a partir de uma mistura fluida moldada e consolidada em uma forma e o concreto de fabricação de blocos para alvenaria estrutural de consistência bem seca e vibroprensado. Desta forma, a avaliação das propriedades térmicas e mecânicas de uma mistura de concreto moldado úmido como forma de representar o comportamento do concreto seco e vibroprensado, utilizado na fabricação dos blocos para alvenaria estrutural, pode levar a resultados não representativos.

A norma internacional sobre alvenaria em situação de incêndio (EN 1996-1-2, 2005) fornece informações relevantes, para cada tipo de alvenaria, através de gráficos sobre as

propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) e propriedades físicas (densidade) para cada temperatura relacionada com os valores para a temperatura de 20°C. Na Figura 4.4 é possível verificar um desses gráficos para blocos de silicato de cálcio, não tão usuais no Brasil, porém com densidade próxima aos utilizados no país. O relevante é que, dessa forma, é possível realizar o dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio utilizando métodos avançados de cálculo baseando-se nos princípios reconhecidos da teoria da mecânica estrutural, considerando as alterações das propriedades mecânicas com a temperatura. Os efeitos de deformações e tensões induzidas termicamente devido ao aumento da temperatura e devido aos diferenciais de temperatura devem ser considerados.

Figura 4.4 – Valores de cálculo de blocos de silicato de cálcio de propriedades de material dependentes da temperatura com uma faixa de densidade de 1.600–2.000 kg/m³



Fonte: adaptado EN 1996-1-2 (2005)

Por serem poucos os trabalhos encontrados na literatura tratando especificamente de concreto seco e vibroprensado, com agregados de peso normal, utilizados na fabricação de blocos de concreto em altas temperaturas e mesmo entendendo que as propriedades do concreto são influenciadas pelas variações entre tipo e tamanho do agregado, métodos de ensaio, quantidade de cimento, traço, proporção de água da mistura, teor de umidade, processo de produção, geometria, porosidade, cura etc.; as maior parte das informações apuradas e utilizadas para comparação neste trabalho tratam do concreto lançado pois, de certa forma, servem como

orientação para a investigação do estado da arte sobre o tema. Os resultados aqui relatados são importantes para preencher a lacuna de conhecimento sobre o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio utilizando blocos vazados de concreto com agregados de peso normal produzidos a partir de uma mistura de concreto vibroprensada e de consistência muito seca.

4.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Visto a forte influência que o agregado exerce sob o comportamento do concreto, unidos às peculiaridades que o processo de fabricação confere às unidades de alvenaria, este trabalho propôs analisar blocos de concreto vazados constituídos de diferentes tipos de agregados e com resistências diferentes. Para tanto, uma análise criteriosa partindo desde a escolha do agregado a serem considerados juntamente com a fabricação dos blocos em processo industrial, foi realizada como forma de obter a maior precisão das unidades de alvenaria encontradas em cenário nacional.

4.2.1 Agregados utilizados

Como já visto, o tipo de agregado exerce grande influência nas propriedades térmicas e mecânicas dos blocos de concreto; os códigos e normas internacionais tratam sobre a resistência do concreto com diferentes tipos de agregados, em relação ao aquecimento, entretanto, existe variações das composições mineralógicas das rochas mais comumente utilizadas como agregado em cada país. Neste trabalho, decidiu-se pela escolha de rochas de diferentes origens mineralógicas que representassem a maioria dos minerais empregados na construção civil no Brasil. Segundo Departamento Nacional de Produção Mineral (2018), no Brasil, 64% da produção de brita nacional advém de rochas plutônicas (granito, gnaisse, sienito), 30% são provenientes de rochas vulcânicas (basalto, riolito, diabásio), 4% de rochas calcárias (calcário e dolomito) e apenas 2% de outras rochas.

La Sena e Rezende (2009) informa que em todas as regiões brasileiras há mineração de rocha para brita. Entretanto, em vastas áreas da Região Norte são explorados os raros maciços cristalinos no Amapá, Roraima e Amazonas lateritos e cascalhos no Maranhão. As rochas basálticas são utilizadas nas localidades assentadas sobre a Bacia do Paraná. Granitos, gnaisse e calcários são usados para fabricação de brita principalmente nas regiões litorâneas, mas também em áreas do interior de Goiás, São Paulo e Estados do Nordeste.

De posse dessas informações e juntamente com o diálogo junto a Associação Brasileira da Indústria de Blocos de Concreto (Bloco Brasil) decidiu-se pela escolha de três agregados de origem distintas: gnaiss, calcário e basalto (Figura 4.5) pois as características desses agregados representam quase a totalidade dos agregados utilizados para fabricação de blocos de concreto no Brasil.

Figura 4.5 – Agregados selecionados para a fabricação dos blocos.



Fonte: Próprio Autor

Decidido os tipos de agregados que foram utilizados nos blocos de concreto, iniciou-se a busca por fornecedores para o envio do material à indústria fabricante. A empresa produtora dos blocos de concreto encontra-se na cidade de Guarulhos – SP portanto fazia-se necessário que as mineradoras localizassem o mais próximo possível para diminuir os custos de transporte.

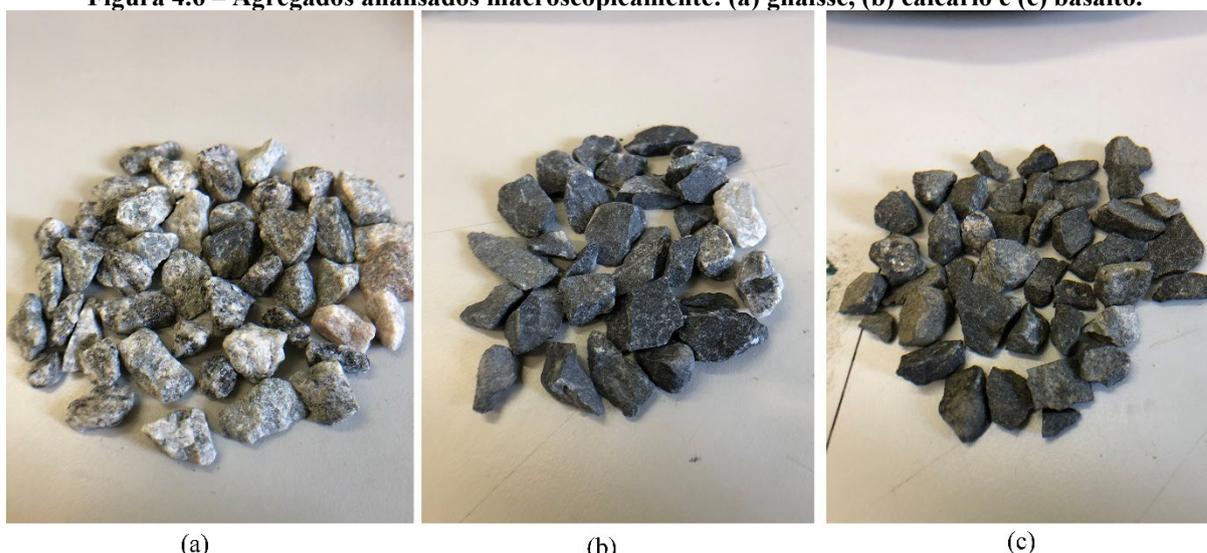
O agregado de calcário utilizado tem origem de Salto do Pirapora – SP, o basalto da cidade de Jaguariúna – SP e o gnaiss é o mesmo agregado originalmente utilizado pela indústria de blocos de concreto, sendo originário da cidade de Lageado – SP.

Após a escolha e aquisição fez-se necessário caracterizar os agregados adotados na pesquisa a fim de sanar quaisquer dúvidas a respeito de sua origem.

4.2.1.1 Análise petrográfica

Mesmo com o fornecimento de laudos técnicos das mineradoras identificando os tipos de rochas dos agregados, foi realizado primeiramente uma identificação detalhada dos constituintes da rocha através de exame macroscópico, auxiliado por lupa e utilização de ácido clorídrico diluído para confirmação da presença de carbonatos. Na Figura 4.6 observa-se os agregados analisados.

Figura 4.6 – Agregados analisados macroscopicamente: (a) gnaiss, (b) calcário e (c) basalto.



Fonte: Próprio Autor

Com a análise macroscópica foi possível identificar as seguintes características:

Gnaiss: rocha metamórfica

- Estrutura Gnáissica: foliação caracterizada por bandamento composicional (bandas claras ricas em quartzo e feldspato e bandas escuras ricas, por exemplo em biotita e hornblenda). Minerais visíveis a olho nu;
- Textura Granoblástica: rocha com minerais granulares, sem orientação;
- Classificação quanto ao tipo de metamorfismo: regional/dinamotermal;
- Cor: cinza, esbranquiçada com bandas escuras;
- Minerais essenciais: quartzo, feldspato, biotita, hornblenda.

Calcário: rocha sedimentar

- Estrutura Maciça: com homogeneidade aparente;
- Textura Não Clástica: químicas (formadas por precipitação química, efervesce com HCl), podendo ser calcário calcítico (CaCO_3) ou dolomito (MgCO_3);
- Classificação quanto ao tipo de metamorfismo: regional/dinamotermal;
- Cor: cinza e esbranquiçada com presença de material fino entre grão;
- Minerais essenciais: quartzo, feldspato, calcita e argilas.

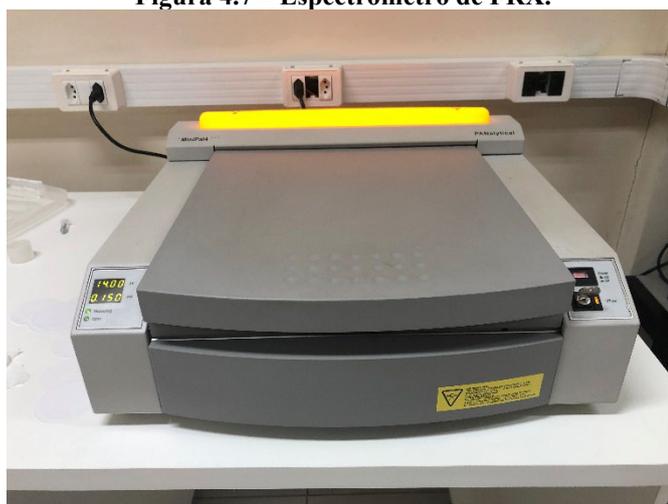
Basalto: rocha ígnea ou magmática

- Estrutura Maciça: que reflete a aparência homogênea e compacta das rochas;
- Textura: holocristalina afanítica, com minerais muito pequenos, impossível de se ver a olho nu;
- Classificação quanto à gênese: extrusiva;
- Cor: melanocrática, mais de 60% de minerais escuros;
- Mineral passível de ser identificado, plagioclásio cálcico, sem quartzo;

4.2.1.2 Fluorescência de raios X (FRX)

Para identificar os minerais criptocristalinos não identificáveis por via óptica fez-se o uso da espectrometria de fluorescência de raios-X (FRX), é uma técnica não destrutiva, que permite identificar e analisar os elementos químicos que estão presentes em uma determinada amostra, sendo um método bem estabelecido para análise elementar, monitoramento de processos e caracterização química quantitativa de materiais metálicos, cerâmicos e poliméricos. FRX foi usado nesse trabalho para avaliar a microestrutura dos agregados caracterizando-os quimicamente, além de estabelecer a concentração, por proporção, dos elementos presentes, assegurando a correta identificação. A Figura 4.7 apresenta o equipamento de fluorescência de raios-X utilizado.

Figura 4.7 – Espectrômetro de FRX.

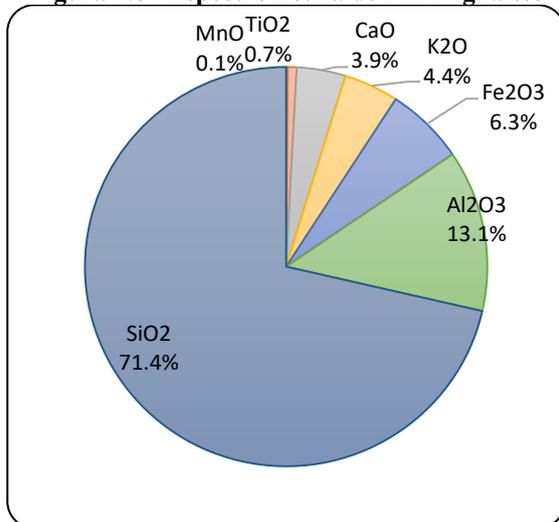


Fonte: Próprio Autor

Os elementos químicos encontrados e suas respectivas percentagem na composição do agregado estão detalhados nas Figuras 4.8 a 4.11. Com esses ensaios foi possível melhor caracterizar os minerais e confirmar as informações recebidas pelas mineradoras. Observou-se, ainda, que a areia e o gnaíse são agregados majoritariamente silicosos (SiO_2). O basalto possui

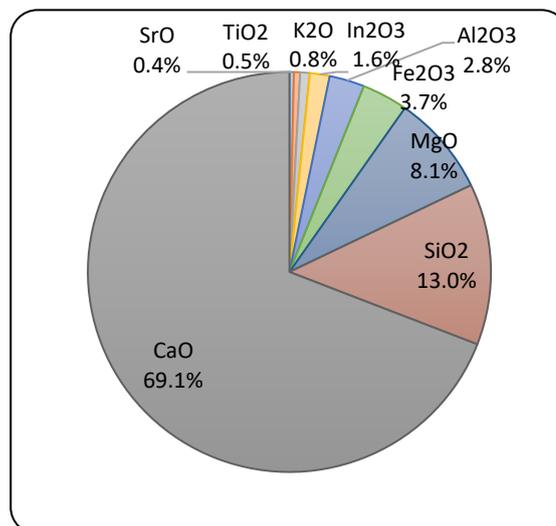
a maior parte de sua composição formada por sílica (Si), também sendo encontrado uma quantidade significativa de óxido de ferro (Fe_2O_3). Como esperado, uma grande proporção de óxido de cálcio (CaO) e magnésia (MgO) foi identificada no agregado de calcário, sendo classificado como um carbonato.

Figura 4.8– Espectrometria de FRX - gnaiss



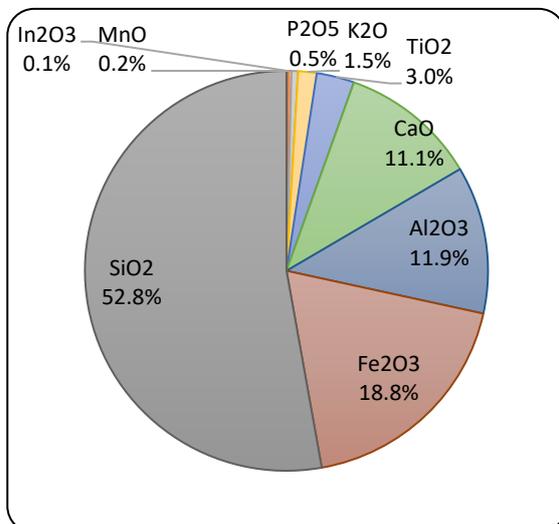
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.10 – Espectrometria de FRX - calcário



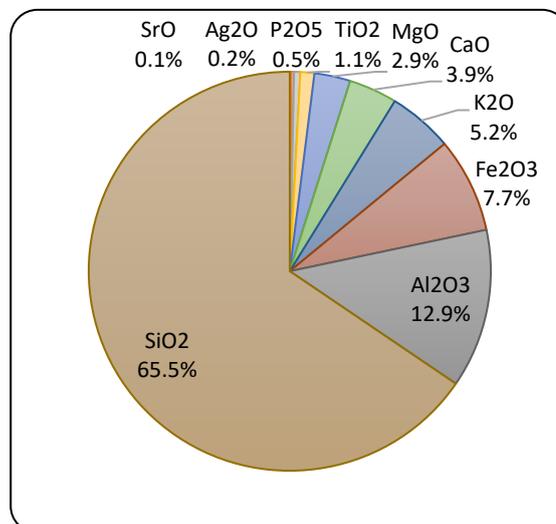
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.9 – Espectrometria de FRX - basalto



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.11 – Espectrometria de FRX - areia



Fonte: Próprio Autor

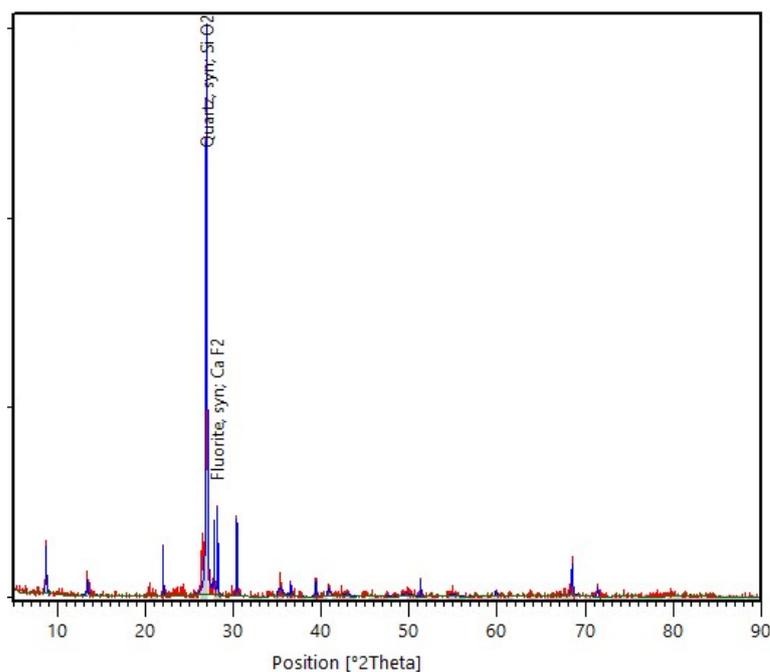
4.2.1.3 Difractometria de raios X (DRX)

Ainda no processo de identificação dos minerais fez-se o uso da técnica de difração de raios X, garantindo uma identificação mineral através da caracterização de sua estrutura cristalina, trata-se de uma análise mais qualitativa da composição dos agregados, sendo possível por exemplo distinguir compostos com estados de oxidação diferentes ou entre polímeros diferentes. Na Figura 4.12 pode-se visualizar o espectrômetro de difração de raios X utilizado.

Figura 4.12 – Espectrômetro de DRX

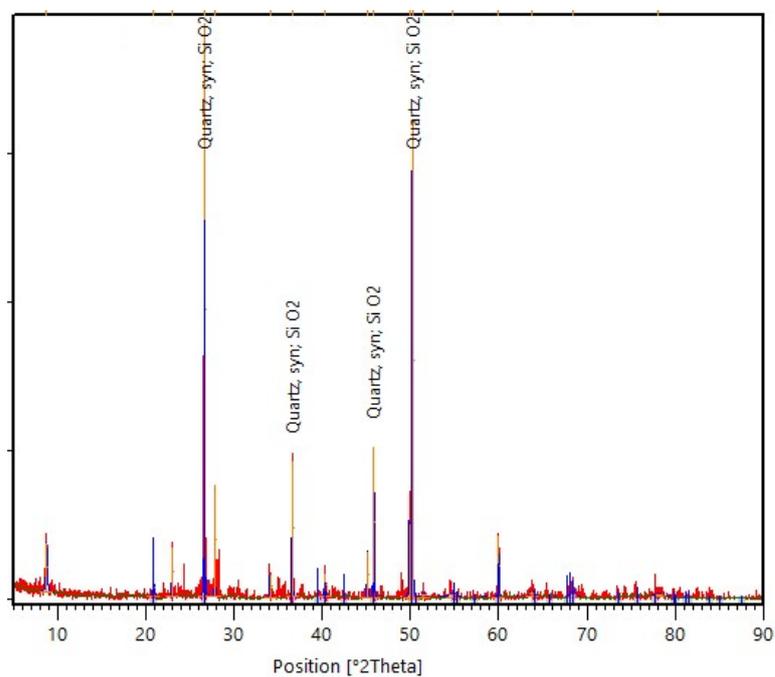
Fonte: Próprio Autor

A partir dos resultados da difratometria foi possível afirmar que os agregados de gnaiss e a areia são compostos essencialmente por quartzo. O material basalto utilizado, possui mineralogia principalmente formada por quartzo e óxido de ferro do tipo hematita, enquanto o agregado calcário pode ser classificado como calcítico. Nas Figura 4.13 a 4.16 são apresentados os resultados da difratometria de raios X realizados.

Figura 4.13 – Espectrômetro de DRX - Areia

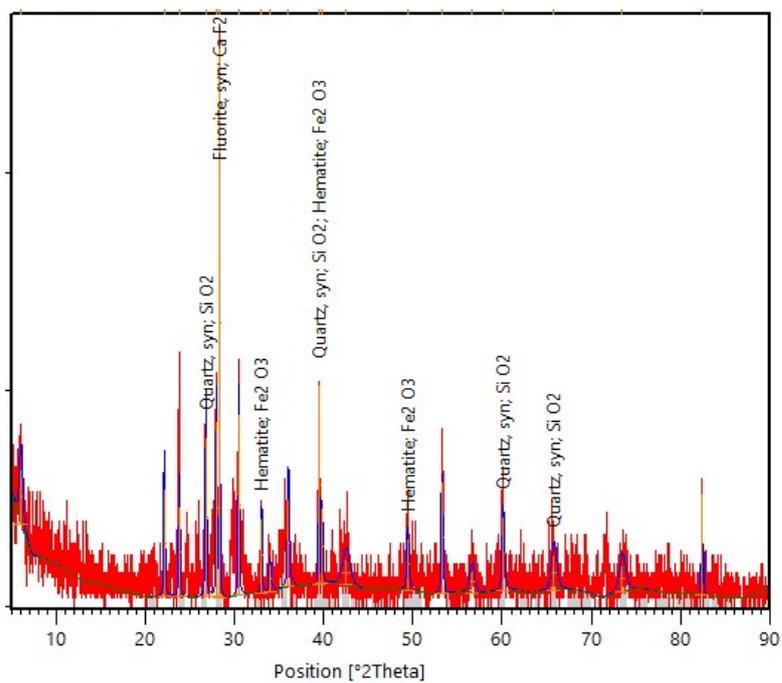
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.14 – Espectrômetro de DRX - Gnaiss



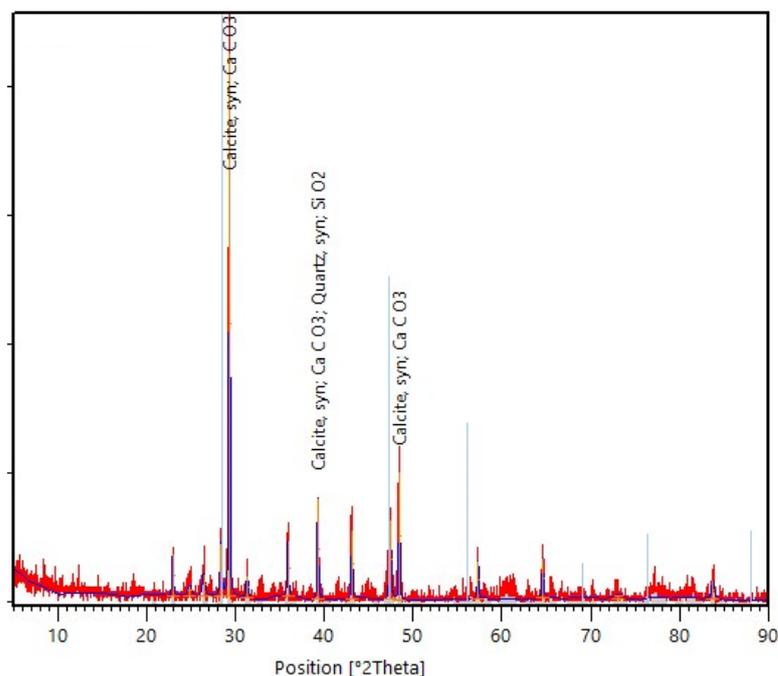
Fonte: Próprio Autor

Figura 4.15 – Espectrômetro de DRX - Basalto



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.16 – Espectrômetro de DRX - Calcário



Fonte: Próprio Autor

4.2.1.4 Termogravimetria (TG)

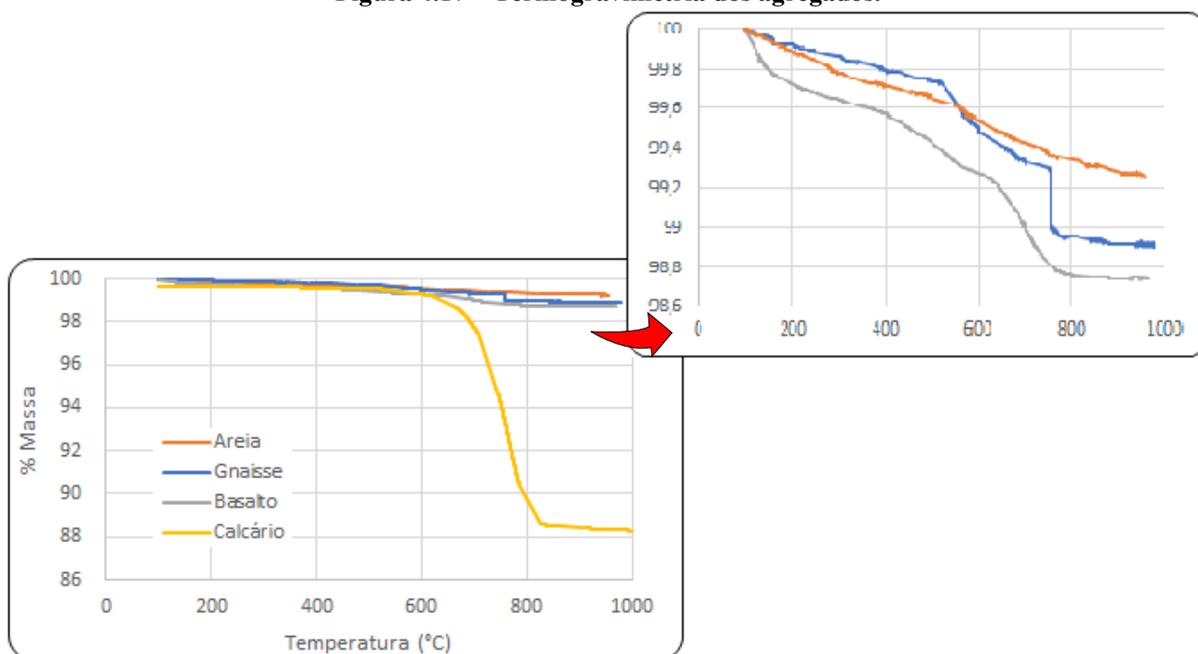
A termogravimetria ou análise termogravimétrica (TG) é uma técnica da análise térmica na qual a variação da massa da amostra (perda ou ganho) é determinada em função da temperatura e/ou tempo, enquanto a amostra é submetida a uma programação controlada de temperatura. Esta técnica possibilita conhecer as alterações que o aquecimento pode provocar na massa de substâncias, permitindo estabelecer a faixa de temperatura em que começam a decompor e acompanhar o andamento de reações de desidratação (perda de umidade).

Na Figura 4.17 são apresentadas curvas TGA para os agregados utilizados nesta pesquisa, com um pequeno destaque para os agregados siliciosos e de quartzito. Comparando as curvas TGA de agregados siliciosos e de quartzito, pode-se afirmar que a perda de peso dos agregados silicosos é inicialmente mais evidente do que para os agregados de quartzito. O pico endotérmico ocorrendo em torno de 573°C e pode ser identificado dentro do agregado gnaisse, característico de quartzito, granito e rochas quartzo-feldspáticas, corresponde à transformação alotrópica do quartzo- α em quartzo- β . A curva da areia e basalto não apresenta o mesmo pico endotérmico embora seja composta por sílica (SiO_2). A área do pico diminui com o tamanho das partículas de quartzo especialmente abaixo de 20 μm (RAZAFINJATO *et al.*, 2016). A perda de peso do gnaisse mostra uma progressão de duas vezes: a primeira antes da transformação α - β de quartzo e outra depois, representando uma perda de peso total em torno de 1%. O basalto tem quase a mesma perda de peso (cerca de 1%) a 700°C. Além disso, suas perdas de peso são semelhantes

às dos agregados siliciosos polifásicos (0,5-1%). As curvas TGA dos agregados de rocha quartzo-feldspática (areia e gnaiss) são diferentes da curva do basalto. Enquanto a perda de peso da areia e gnaiss são em torno de 0,4% a 600°C, a de basalto ocorre continuamente a partir da temperatura ambiente. Isso é típico da desidratação da goethita [$2\text{FeO}(\text{OH})$] que gera hematita (Fe_2O_3) identificada por DRX. A hematita é quem fornece cor vermelha para esses agregados após aquecimento/resfriamento a 300°C ou mais. Sua desidratação começa em torno de 230°C e termina em 250°C levando a cerca de 0,40% de perda de peso.

Para agregados calcários, as perdas de peso são em torno de 12% até 1000°C. A decomposição de agregados dolomíticos ocorre em duas etapas: a primeira ocorre em torno de 680-780°C e a segunda em torno de 800°C. Esses picos correspondem à decomposição da dolomita ($\text{Ca; Mg} \text{CO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{MgO} + \text{CO}_2$ e depois calcita $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$ de 760°C a 920 °C).

Figura 4.17 – Termogravimetria dos agregados.



Fonte: Próprio Autor

4.2.1.5 Demais caracterizações

Os agregados utilizados na fabricação dos blocos de concreto: areia, pó de pedra (гнаiss, calcário e basalto) e pedrisco (гнаiss, calcário e basalto) – Figura 4.18; foram caracterizados quanto a granulometria, massa unitária, absorção de água, massa específica, material pulverulento e teor de umidade conforme prescrito pelas normas brasileiras em vigor. É importante ressaltar que esse material foi adquirido obedecendo as especificações solicitadas,

conforme dosagem otimizada adotada pelo fabricante. Todas as informações dessas caracterizações encontram-se nos Apêndices 8.1 a 8.7.

Figura 4.18 – Agregados graúdos e miúdos utilizados na fabricação dos blocos.



Fonte: Próprio Autor

4.2.2 Blocos fabricados

Visando a melhor representatividade dos blocos de concreto utilizados nas edificações de alvenaria estrutural do país, foram escolhidos blocos de três resistências distintas: 6, 12 e 24 MPa (área bruta). A norma brasileira indica que blocos estruturais de concreto fabricados com agregados normais devem ter resistência mínima característica de 4 MPa. Comercialmente, as indústrias fornecem blocos de concreto com resistência de até 26 MPa; podendo chegar a 35 MPa quando solicitadas por clientes, porém não é prática comum atualmente. Hoje, a alvenaria estrutural é amplamente utilizada em edificações habitacionais e comerciais de até 24 (vinte quatro) pavimentos, desta forma a escolha dessas três resistências abrange os diferentes usos da alvenaria estrutural brasileira.

4.2.2.1 Produção dos blocos de concreto

Os blocos foram produzidos por indústria instalada na cidade de Guarulhos – SP equipada com excelentes máquinas e com capacidade instalada de mais de 4 milhões de blocos por mês. A empresa possui 51 anos de mercado e seus produtos são todos certificados. Aproveita-se aqui para agradecer a empresa Glasser Tecnologia em Alvenaria e Pavimentação, que reservou uma de suas máquinas da linha de produção para fabricar os blocos de concreto gratuitamente.

Os blocos da pesquisa foram produzidos no mesmo dia, pela mesma máquina seguindo as proporções de mistura otimizada (Tabela 4.2) já utilizada na fabricação dos blocos que a empresa fornece para o mercado, substituindo apenas os agregados: pedrisco e pó de pedra para a moldagem dos diferentes blocos. A fábrica utiliza cimento Portland CPV-ARI [*Type III* -

(ASTM C150/C150M, 2021)], areia industrial de britagem (mesmo fornecedor do agregado gnaisse e já caracterizada nos itens anteriores) e aditivo super plastificante (ficha técnica no Apêndice 8.8).

Tabela 4.2 – Mistura utilizada na fabricação dos blocos

Bloco	Traço (kg)					
	Agregado		Areia	Cimento	Água	Aditivo
	Pedrisco	Pó de pedra				
6 MPa	1000	1655	295	190	197,19	1,65
12 MPa	1100	1100	750	260	218,28	2,35
24 MPa	610	627	412	324	137,12	2,90

Fonte: Próprio Autor

Foram fabricados blocos com três diferentes resistências (6, 12 e 24 MPa) e utilizando os diferentes agregados (gnaisse, calcário e basalto), totalizando nove blocos diferentes que foram nomeados de: 6G; 6C; 6B; 12G; 12C; 12B; 24G; 24C e 24B. Na Figura 4.19 observa-se a máquina vibro compactadora *Bresser* que produziu os blocos.

Figura 4.19 – Vibro prensadora utilizada na fabricação dos blocos.



Fonte: Próprio Autor

Passado o período de cura e com o atendimento das resistências desejadas, os blocos foram liberados pelo fabricante e encaminhado para universidade.

4.2.2.2 Caracterização dos blocos

A análise dimensional; determinação de massa seca, aparente e saturada; área líquida, absorção de água e umidade relativa (Figura 4.20 a Figura 4.22) foram determinadas para cada

tipo de bloco conforme prescrito pela ABNT NBR 12118 (2013). As informações detalhadas obtidas em cada um dos ensaios relatados encontram-se nos Apêndices 8.9 a 8.17.

Figura 4.20 – Análise dimensional.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.21 – Blocos em estufa



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.22 – Blocos submersos



Fonte: Próprio Autor

4.2.3 Metodologia para determinação das propriedades térmicas dos blocos

Para determinação das propriedades térmicas dos blocos de concreto optou-se pela utilização do método *Hot Disk*, também conhecido como método *Transient Plane Source* (TPS), que permite testes rápidos, precisos e não destrutivos de condutividade térmica,

difusividade térmica, efusividade térmica e calor específico da maioria dos tipos de materiais, tudo em uma única medição. A condutividade térmica e a difusividade térmica são testadas diretamente, e a efusividade térmica e a capacidade térmica específica são calculadas a partir das duas primeiras.

Um aspecto fundamental do método TPS é que ele é absoluto. Não há necessidade de calibrações repetidas ou uso de amostras padrão, como é comum em outras abordagens. O método TPS é altamente flexível e requer apenas duas peças da amostra em questão para testar, cada uma não necessitando mais do que uma superfície plana onde o sensor espiral duplo *Hot Disk* pode ser aplicado. Não há necessidade de geometrias de amostra fixas, como os demais métodos exigem, o que impossibilitaria a tomada das propriedades térmicas levando em consideração as peculiaridades da mistura e do processo de fabricação dos blocos de concreto. Para enfatizar a robustez da técnica, desde 2008 o método é padronizado na ISO 22007-2 (2008), e ao longo dos anos foram publicadas milhares de publicações com resultados adquiridos com instrumentos *Hot Disk*.

Foram extraídos quatro corpos-de-prova para cada um dos nove diferentes tipos de blocos (3 resistências \times 3 agregados). Na Figura 4.23 é mostrado os parâmetros variados.

Figura 4.23 – Parâmetros variados para determinação das propriedades térmicas

Amostras extraídas			
Agregado	Basalto	Calcário	Gnaíse
Resistência	6 MPa	6 MPa	6 MPa
	12 MPa	12 MPa	12 MPa
	24 MPa	24 MPa	24 MPa

Fonte: Próprio autor

Amostras circulares com 50 mm de diâmetro e com a espessura das paredes dos blocos (± 25 mm), foram extraídos de cada tipo de bloco (6G; 6C; 6B; 12G; 12C; 12B; 24G; 24C e 24B). Além disso, fez-se necessário retificar a superfície que fica em contato com o sensor do *Hot Disk* para garantir um melhor contato entre as peças (Figura 4.24 e 4.25). Os dados aqui obtidos são de fundamental importância para a execução de modelos térmicos mais precisos.

Figura 4.24 – Extração das amostras



Fonte: Próprio autor

Figura 4.25 – Amostras para ensaio pelo método TPS



Fonte: Próprio autor

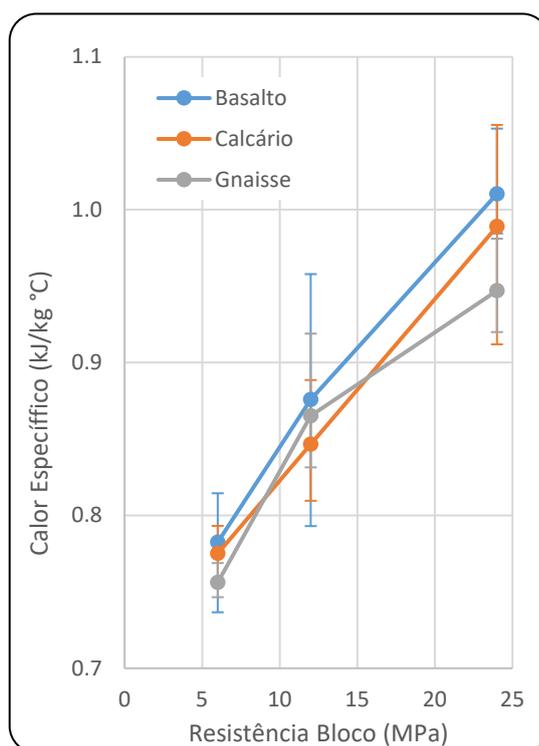
Para obter os parâmetros físicos (densidade, porosidade) dos blocos em elevadas temperaturas, seguiu-se as recomendações adaptadas da RILEM TC 200-HTC (2007a) e proposta por MEDEIROS et al. (2022) relatadas no capítulo anterior. Três corpos-de-prova para

cada um dos nove diferentes tipos de blocos (3 resistências \times 3 agregados) em cada temperatura de interesse, foram testados.

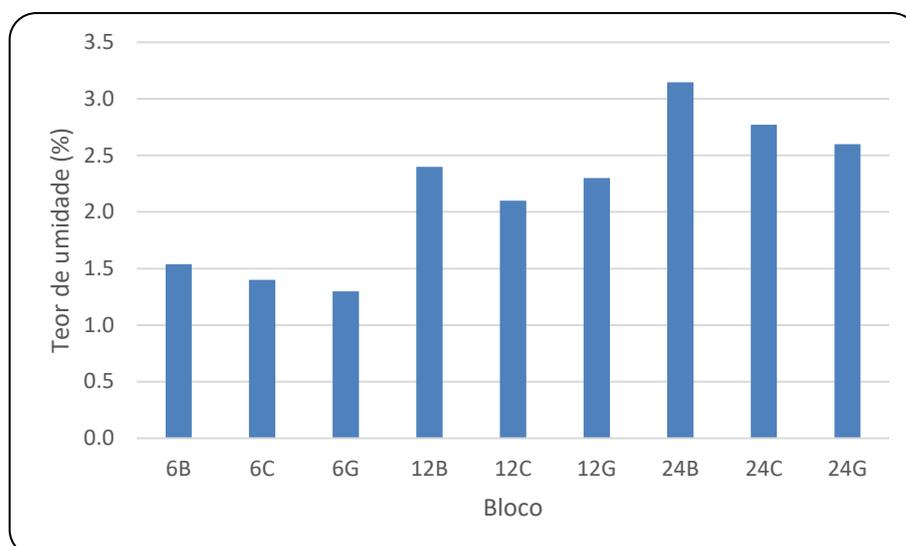
4.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.3.1 Calor específico

Assim como já referenciado no item 4.1.3 os diferentes tipos de agregados têm pouco efeito sobre o calor específico do concreto. No entanto, é consideravelmente aumentada por um aumento no teor de umidade. Além disso, sabe-se que o calor específico aumenta com o aumento da temperatura e com a diminuição da densidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014a). Antes da medição, as amostras devem atingir um equilíbrio hidrotérmico. Portanto, não é possível com este método quantificar a influência das diferentes transformações físico-químicas sobre o calor específico. O calor específico medido neste estudo deve ser considerado como um calor específico fundamental, não levando em conta o calor latente de diferentes transformações físico-químicas. A Figura 4.26 mostra um aumento do calor específico com o aumento da resistência dos blocos. O calor específico dos concretos com agregado basalto aumenta pouco em relação aos concretos com agregado calcário ou de gnaíse. O aumento do calor específico, no entanto, pode estar relacionado à presença de uma pequena quantidade de água existente nos blocos. Como foi observado na pesquisa, os blocos de concreto com maior resistência são menos porosos e conseqüentemente possuem maior teor de umidade. É interessante perceber que os valores obtidos para o calor específico dos blocos variam conforme a teor de umidade apresentados por cada um dos blocos, como pode ser observado na Figura 4.27. Outra observação, diz respeito aos intervalos de valores encontrado para o concreto dos blocos serem similares aos intervalos de valores de concretos normais. Para o calor específico, o concreto seco usado no processo de fabricação de um bloco apresentou valores relativos ao concreto moldado úmido, independentemente do tipo de agregado utilizado. Entende-se que o calor específico dos concretos não depende da natureza dos agregados, mas parece ser mais influenciado pelo teor de umidade da amostra de concreto. Estas observações são semelhantes às de Mehta; Monteiro, (2014) e Neville (2016).

Figura 4.26 – Calor específico

Fonte: Próprio Autor

Figura 4.27 – Teor de umidade

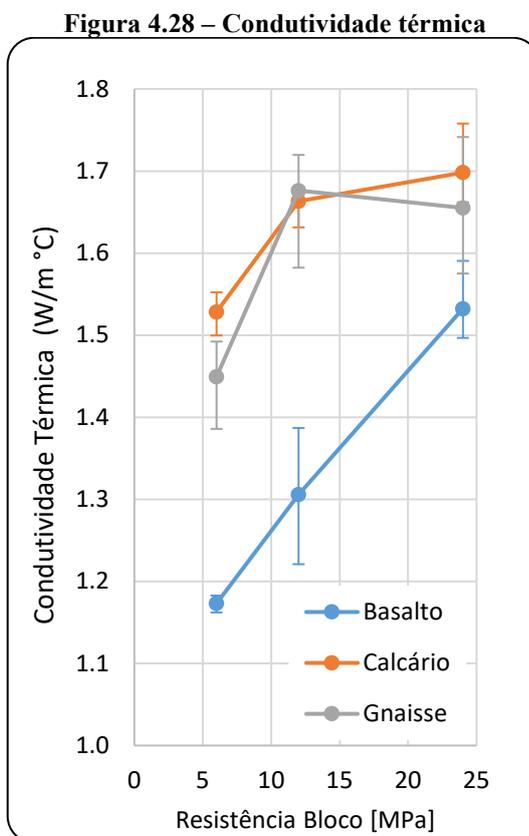
Fonte: Próprio Autor

4.3.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica fornece o fluxo de calor transmitido através de uma unidade de área de um material sob unidade de gradiente de temperatura unitária, sendo assim, a condutividade térmica do concreto é influenciada pelas características mineralógicas do agregado, pelo teor de umidade, densidade, porosidade e temperatura.

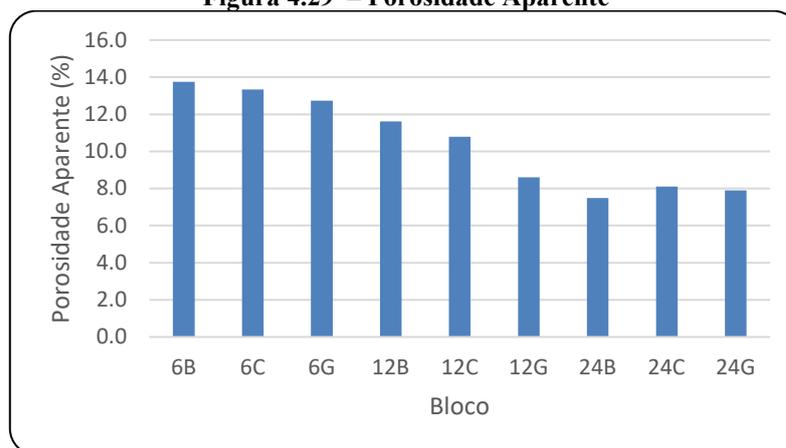
Observando a Figura 4.28, constata-se que o concreto dos blocos com agregado basalto possuem os menores valores de condutividade térmica, enquanto o concreto dos blocos de agregado calcário e gnaisse possuem valores de condutividade térmica maiores e similares entre si. Outra observação que deve ser considerada é que para um mesmo tipo de agregado, blocos de maiores resistências obtiveram maiores valores, isso deve ser explicado pela diferença de porosidade apresentada por cada um dos blocos (Figura 4.29). Quanto menor porosidade há conseqüentemente uma maior transmissão do fluxo de calor, o que explica valores de condutividade térmica respectivamente maiores.

O intervalo de valores encontrados na análise dos blocos para cada tipo de agregado está coerente com o intervalo de valores encontrados na literatura e apresentados na Tabela 4.1. Entretanto, apesar da coerência observa-se que a condutividade térmica do concreto seco, utilizado nas unidades de alvenaria, está ligeiramente menor que a apontada para o concreto plástico encontrados em outros trabalhos. Este fato também é justificado pela maior porosidade dos concretos secos. Podendo-se concluir que a utilização dos valores de literatura estará em favor da segurança numa possível análise numérica e mais avançada.



Fonte: Próprio Autor

Figura 4.29 – Porosidade Aparente

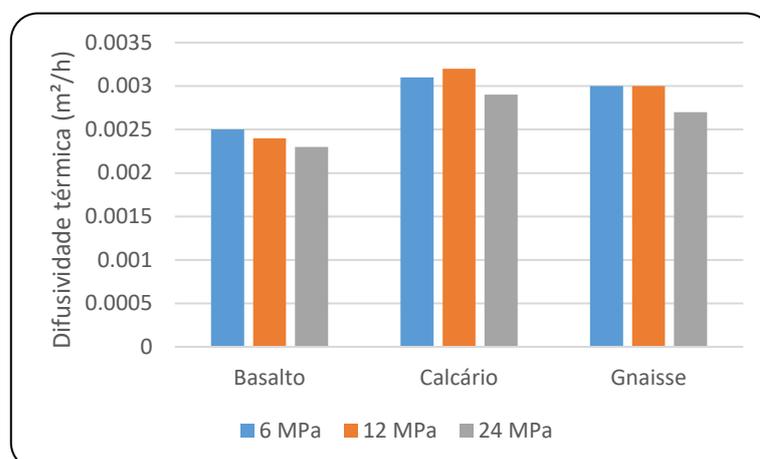


Fonte: Próprio Autor

4.3.3 Difusividade térmica

A difusividade térmica é diretamente proporcional à condutividade térmica e inversamente proporcional ao calor específico. Como o calor específico não muda muito entre agregados, a evolução da difusividade térmica com a temperatura está intimamente ligada à da condutividade. A difusividade térmica do concreto varia diferentemente com os três tipos de agregados. Blocos de classe de resistência mais elevada, apresentaram valores levemente menores, a diminuição pode ser explicada pela saída de água e formação de microfissuras no interior do material, como já comentado, blocos mais resistentes tendem a ser menos porosos. Os concretos dos blocos com calcário e gnaïsse apresentam maior difusividade térmica, que diminui mais em relação ao concreto do bloco com basalto. (Figura 4.30). Também não se observou influência relevante da natureza do agregado na difusividade térmica entre os concretos calcário e gnaïsse, pelos motivos descritos acima (fração volumétrica baixa de quartzo macrocristalino).

Figura 4.30 – Difusividade térmica



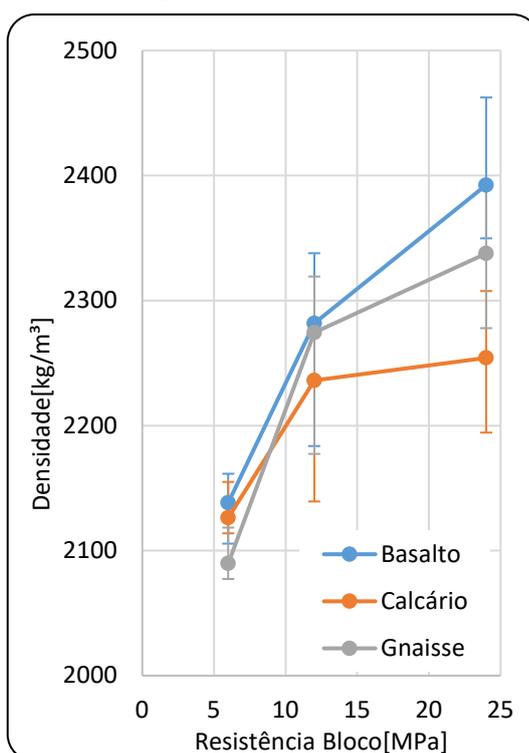
Fonte: Próprio Autor

A condutividade térmica e a difusividade do concreto à temperatura ambiente estão fortemente ligadas à natureza dos agregados, em especial para o tipo de quartzo (macrocristalino ou criptocristalino). Assim, como ocorreu nos valores encontrados para condutividade térmica, os intervalos de valores encontrados em literatura para difusividade térmica apresentados na Tabela 4.1, são coerentes e estão a favor da segurança quando comparados com os valores encontrados para o concreto seco utilizado nos blocos de alvenaria.

4.3.4 Densidade

Na prática, a densidade do concreto normal moldado úmido varia entre 2.200 e 2.600 kg/m³. A própria norma ABNT NBR 6118 (2014) se aplica aos concretos de massa específica normal, que são aqueles que, depois de secos em estufa, têm massa específica compreendida entre 2.000 kg/m³ e 2.800 kg/m³. Os blocos de concreto brasileiros também possuem valores de densidade dentro desse intervalo, conforme pode ser observado na Figura 4.31, constatando um pequeno aumento com a elevação da resistência. Deve ser lembrado, assim como no concreto moldado úmido, a resistência do concreto seco, utilizada nos blocos de alvenaria, é uma função direta de sua massa específica e dos vazios originados pelo ar incorporado ou da pouca compactação. Como era de se esperar, os blocos com agregados mais densos, como o basalto, obtiveram massa específica maior que os blocos com agregados menos denso como calcário.

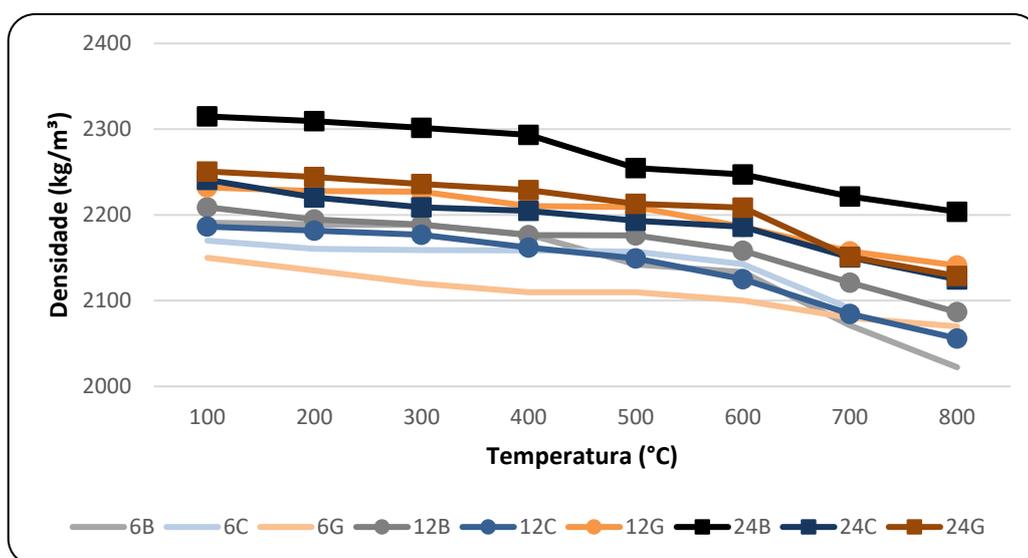
Figura 4.31 – Densidade



Fonte: Próprio Autor

Uma outra análise que pode ser observada é a diminuição da densidade de todos os concretos estudados com o aumento da temperatura (Figura 4.32). A diminuição pode ser explicada pela saída de água, pelo aumento da porosidade e pela formação de fissuras no interior do material. Também não se observou influência significativa da natureza do agregado na diminuição da densidade com a elevação da temperatura. Ressalta-se que os blocos estruturais brasileiros são fabricados exclusivamente com agregados de peso normal e densidade entre 2.000 kg/m^3 e 2.400 kg/m^3 , possuem furos verticais e índices de vazios entre 40 a 50%.

Figura 4.32 – Densidade versus temperatura



Fonte: Próprio Autor

4.3.5 Porosidade

Os blocos de concreto são fabricados com baixo consumo de cimento quando comparados ao concreto plástico. Uma alta relação agregado/cimento tende a aumentar a relação água/cimento, causando mais porosidade nos blocos. Além disso, o tipo de adensamento da mistura e a granulometria utilizada na fabricação dos blocos, lhes garantem geralmente um maior volume de vazios no concreto, como pode ser visto na Figura 4.33. Como já relatado anteriormente, essa porosidade provoca forte influência nas propriedades térmicas do concreto sendo responsável por algumas das diferenças encontradas entre o concreto moldado úmido relatado pela literatura e os resultados obtidos nesse estudo.

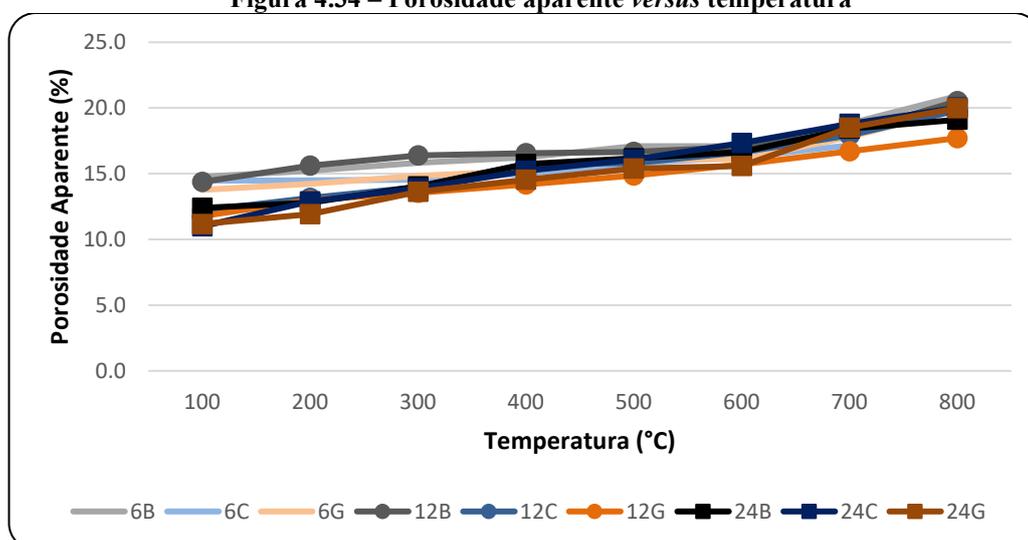
Figura 4.33 – (a) Seção transversal de parede do bloco; (b) Imagem ampliada



Fonte: Próprio Autor

O comportamento da porosidade nos blocos de concreto ocorreu inversamente proporcional à densidade dos blocos (Figura 4.34). Com o aumento da temperatura, também se observa um aumento da porosidade, como era de se esperar, explicada pela saída de água e aumento da fissuração do material. Assim como a densidade, não se observou influência significativa da natureza do agregado no aumento da porosidade com a elevação da temperatura.

Figura 4.34 – Porosidade aparente *versus* temperatura



Fonte: Próprio Autor

4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresentou um estudo comparativo das propriedades termofísicas de nove blocos de concretos analisando a influência da natureza dos agregados e a resistência nominal dos blocos. Foram utilizados três tipos diferentes de agregados: basalto, calcário e gnaiss, que foram minuciosamente identificados. Foram estudados a perda de massa e porosidade com a elevação da temperatura, além da condutividade térmica, difusividade térmica, calor específico desses concretos. Essas propriedades variam dependendo dos tipos de agregados. A partir dos resultados deste estudo, pode ser obtidas as seguintes conclusões principais:

- A perda de massa dos concretos é afetada pela natureza mineralógica dos agregados a partir do aquecimento de 300°C. A perda de massa dos blocos de concretos com calcário aumenta após 600°C, após a saída do CO₂ da descarbonatação da calcita.
- A densidade dos blocos de concreto diminui enquanto a porosidade dos concretos aumenta com a temperatura. A diminuição da densidade e o aumento da porosidade com a elevação da temperatura, acontece independente da natureza do agregado.
- A condutividade térmica e a difusividade dos concretos estão fortemente ligadas à dos agregados, em especial, o tipo de quartzo (macrocrystalino ou criptocrystalino). Para uma mesma composição química de agregados, o grau de cristalinidade de seus minerais rege as propriedades térmicas e sua evolução com a temperatura. Assim como o que acontece para o concreto moldado úmido, os concretos com agregado de basalto obtiveram menor condutividade térmica, seguido pelos blocos com agregado de gnaiss e calcário, respectivamente. A estrutura macrocrystalina do quartzo dos agregados de quartzitos pode promover a redução mais forte da condutividade térmica. Apesar da coerência com os intervalos de valores evidenciados na literatura para concreto plástico, o concreto seco aferiu valores inferiores de condutividade térmica, significando que a adoção dos valores de literatura estaria a favor da segurança numa eventual análise avançada, como modelagem numérica. A compacidade da pasta de cimento afeta ligeiramente os valores de condutividade térmica. A difusividade térmica dos blocos de concretos varia diferentemente com os três tipos de agregados em uma tendência semelhante à da condutividade.

- O calor específico dos blocos de concretos não depende da natureza dos agregados, sendo mais influenciado pelo teor de umidade das amostras de concreto.

5. PROPRIEDADES MECÂNICAS

A exposição do concreto a altas temperaturas afeta suas propriedades mecânicas, e os fatores de redução dessas propriedades têm sido alvo de diversos estudos ao longo dos anos. Entretanto, poucos são os estudos sobre o concreto para fabricação de blocos para alvenaria estrutural de consistência bem seca e vibroprensado. Neste capítulo é apresentado resultados de um estudo experimental sobre a resistência mecânica e o módulo de deformabilidade residual de blocos vazados de concreto exposto a temperaturas de 100 a 800°C, seguindo o método de ensaio adequado à geometria dos blocos vazados, adaptado da RILEM e proposto por Medeiros *et al.* (2022). Três tipos de agregados graúdos - basalto, gnaiss e calcário - foram utilizados, variando também a resistência dos blocos analisados - 6 MPa, 12 MPa e 24 MPa. Foi possível perceber variações das propriedades térmicas e mecânicas entre o concreto produzido a partir de uma mistura fluida moldada e consolidada em uma forma e o concreto de fabricação de blocos para alvenaria estrutural de consistência bem seca e vibroprensado. Os resultados também confirmaram a pequena influência da resistência à compressão na evolução da resistência mecânica residual e a forte influência do tipo de agregado nesse comportamento. Também foi constatado que, a avaliação das propriedades térmicas e mecânicas residual de uma mistura de concreto moldado úmido como forma de representar o comportamento do concreto seco e vibroprensado, utilizado na fabricação dos blocos para alvenaria estrutural, pode levar a resultados não representativos. Não há precedente de um estudo realizado com esses parâmetros para esse fim e que tenha aplicado tais recomendações internacionais.

5.1 REFERÊNCIAL TEÓRICO

5.1.1 Resistência à compressão do concreto sob elevadas temperaturas

Basicamente, quando um concreto plástico de agregado normal é aquecido, a água livre evapora e acima de aproximadamente 150°C, a água quimicamente ligada é liberada do silicato de cálcio hidratado. Este processo tem um pico local a 270°C. A desidratação da matriz e a expansão térmica do agregado dão origem a tensões internas, e a partir de 300°C microfissuras se alastrarão pelo material. A resistência à compressão e à tração, a condutividade térmica e o módulo de elasticidade são reduzidos e um corpo de prova sem carregamento estará sujeito a uma expansão irreversível. A 400-600°C, cristais de hidróxido de cálcio se decompõem em óxido de cálcio e água, o processo que atinge sua maior intensidade em cerca de 535°C. Isso enfraquece o concreto, mas durante a fase de resfriamento e nos primeiros dias após a exposição

ao calor, o óxido de cálcio absorve a água do ar ambiente e se expande, abrindo as fissuras já formadas. A resistência à compressão é reduzida em mais 20% durante a fase de resfriamento e a resistência mínima é encontrada até uma semana após o aquecimento, dependendo da geometria da estrutura. Acima de 600°C, o silicato de cálcio hidratado se decompõe ainda mais e esta segunda fase do processo tem um pico a 710°C. A 800°C, o concreto pode muitas vezes ser desintegrado em cascalho pelos dedos, e acima de 1150°C o feldspato derrete e os minerais restantes da pasta de cimento se transformam em uma fase vítrea (HERTZ, 2007).

Se o concreto for carregado, as tensões de compressão na matriz devem primeiro ser descarregadas antes que as tensões de tração possam ser estabelecidas e microfissuras formadas quando os agregados se expandem. A chamada deformação transiente, que é uma contribuição de deformação que só ocorre se o corpo de prova for carregado durante o aquecimento. Uma vez que a microfissuração é reduzida, a queda da resistência à compressão em condição quente e após um aquecimento também é reduzida. O concreto pode ser até 25% mais resistente do que um concreto exposto a altas temperaturas sem carregamento se forem aplicadas tensões de compressão de 25 a 30% da resistência original. No entanto é mais seguro usar valores obtidos em ensaios de corpos de prova sem carregamento em vez dos valores transitórios da resistência à compressão (MEHTA; MONTEIRO, 2014a).

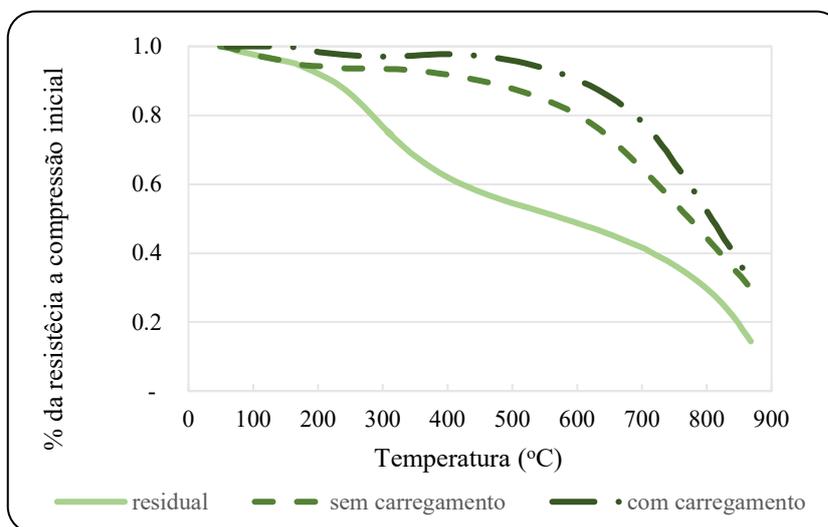
Um dos primeiros estudos sobre os efeitos do aquecimento do concreto a altas temperaturas foi conduzido por (ABRAMS, 1971). Foram ensaiados cilindros de concreto feitos de agregados leves de xisto expandido. As resistências do concreto variaram de 22,8 a 44,8 MPa. Os testes não foram concluídos até que a diferença de temperatura entre quatro termopares estivesse dentro de 11°C. Corpos de prova carregados e aquecidos; aquecidos não carregados; e aquecidos não carregados e depois resfriados revelaram o bom desempenho do concreto leve até 480°C, no qual a resistência obtida foi de 90%, 75% e 53%, respectivamente.

Hammer (1995) também realizou testes não carregados para estudar o comportamento do concreto leve no fogo. Foram utilizados dois cilindros, com dimensões de 100 × 310 mm e resistência nominal de 69 MPa a 118 MPa. As amostras foram testadas aos 90 e 150 dias usando uma relação água/cimento de 0,36. As taxas de aquecimento e carregamento foram de 2°C/min e 0,8 MPa/s, respectivamente. Observou-se que a diferença de perda de força com o aumento da temperatura era insignificante. Um “ponto quebra” típico na curva foi observado a 300°C; isso ocorreu devido a uma falha explosiva seguida pela liberação de muito vapor (*spalling*).

Kodur; Harmathy (2016) estudaram a resistência à compressão do concreto usando agregado com areia natural e resistência inicial de 26,9 MPa. Observou-se que a resistência era quase a mesma até cerca de 200°C em todas as misturas. Acima de 200°C, a resistência residual

sem carregamento do teste de mistura de areia foi a mais baixa, e a mistura de areia com carregamento atingiu a maior resistência até 800°C (Figura 5.1).

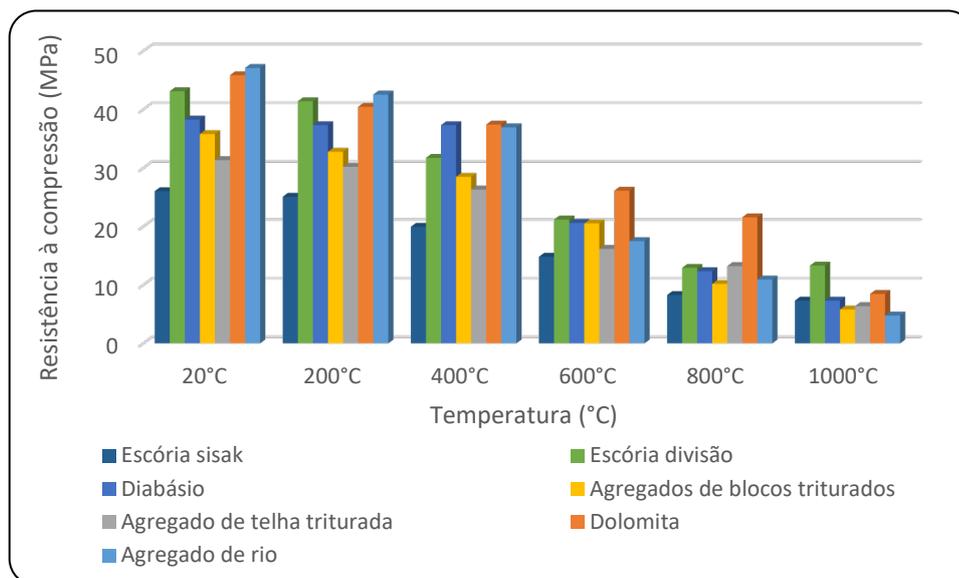
Figura 5.1 – Efeito da temperatura na resistência à compressão de dois concretos leves sendo um com areia natural.



Fonte: adaptado (KODUR; HARMATHY, 2016)

Netinger et al. (2011) avaliou os benefícios do uso de materiais que foram formados em altas temperaturas como agregado para concreto exposto a altas temperaturas. A resistência ao fogo do concreto feito com alguns agregados potencialmente disponíveis no local, "resistentes ao fogo", como diabásio, escória de aço, tijolos triturados e telhas esmagadas, foi investigada. As amostras de medidas 40×40×160 mm³ foram mantidas em moldes durante 24h e, após desmoldagem, foram mantidas na água à temperatura ambiente de cerca de 20±2°C até o teste. Na idade de 28 dias, os corpos-de-prova, com umidade dentro dos limites de 35%, foram expostos a altas temperaturas em forno previamente aquecido. As propriedades mecânicas residuais (resistências à compressão e à flexão) desses concretos após o resfriamento natural foram comparadas com as propriedades mecânicas residuais do concreto feito com agregados de rio e dolomita comumente usados naquela região (Figura 5.2). A substituição de agregados naturais de concreto por resíduos de indústrias de tijolos e aço foi justificada, não apenas em termos de aumento da resistência ao fogo, mas também em termos de descarte de resíduos mais responsável.

Figura 5.2 – Impacto da temperatura na resistência à compressão dos corpos-de-prova.



Fonte: adaptado (NETINGER *et al.*, 2011)

Apesar das diferentes relações tensão-temperatura dos diferentes agregados, todos os pesquisadores obtiveram uma maior perda de resistência à compressão nos corpos-de-prova ensaiados com a resistência residual sem carregamento durante o experimento.

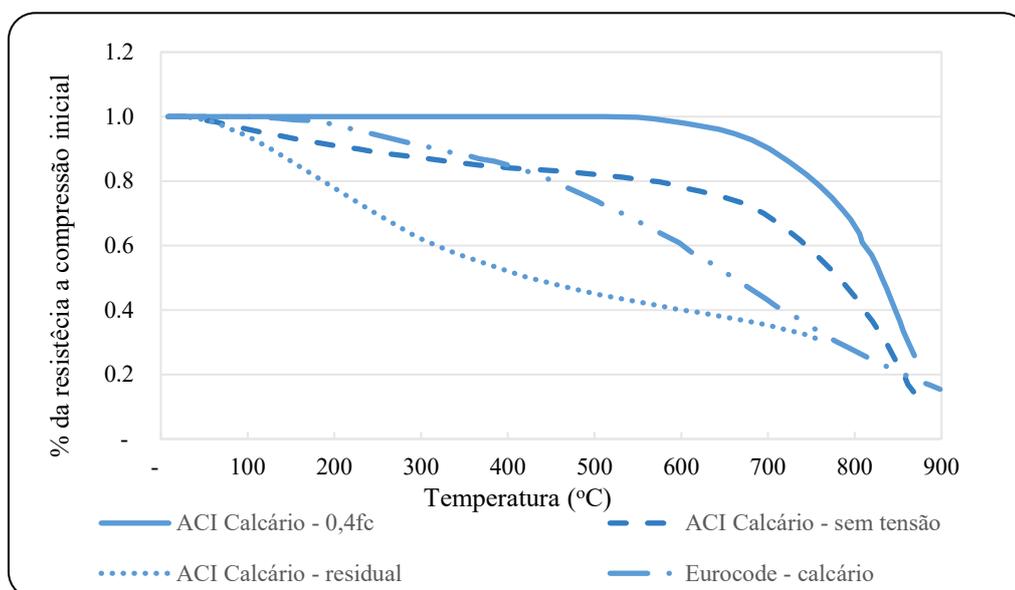
5.1.2 Resistência à compressão do concreto em normas de dimensionamento em situação de incêndio

A variação das propriedades térmicas e mecânicas do concreto depende de diversos fatores, tais como o tipo de agregado utilizado e o nível do carregamento aplicado. Baseados em diversos estudos de diferentes pesquisadores, o código americano ACI/TMS 216.1 (2014) e o Eurocode 2 (2004) tratam sobre a resistência a compressão do concreto com diferentes tipos de agregados em relação ao aquecimento. A Figura 5.3 mostra a relação tensão-temperatura para concretos com agregados de carbonatos, siliciosos e leve, respectivamente. A resistência à compressão não é apenas uma função da temperatura, mas também é afetada pela carga aplicada, conforme mostrado nos valores da ACI/TMS 216.1(2014) dados na Figura 5.3a. Observa-se que os valores marcados como (tensão de $0,4 \cdot f'_c$) foram obtidos de amostras inicialmente carregadas a 40% de sua resistência à compressão durante o processo de aquecimento; quando a temperatura desejada foi atingida, as amostras foram então carregadas até a falha. Os valores marcados (sem tensão) foram aquecidos até à temperatura desejada e depois carregados até ruptura. Aqueles etiquetados (sem tensão/residual) foram aquecidos, resfriados à temperatura ambiente e depois carregados até a falha. A Figura 5.3b ilustra que, para os resultados com tensão de $0,4 \cdot f'_c$, a resistência à compressão do concreto permanece relativamente inalterada até 400°C. Acima de 400°C, a resistência à compressão do concreto

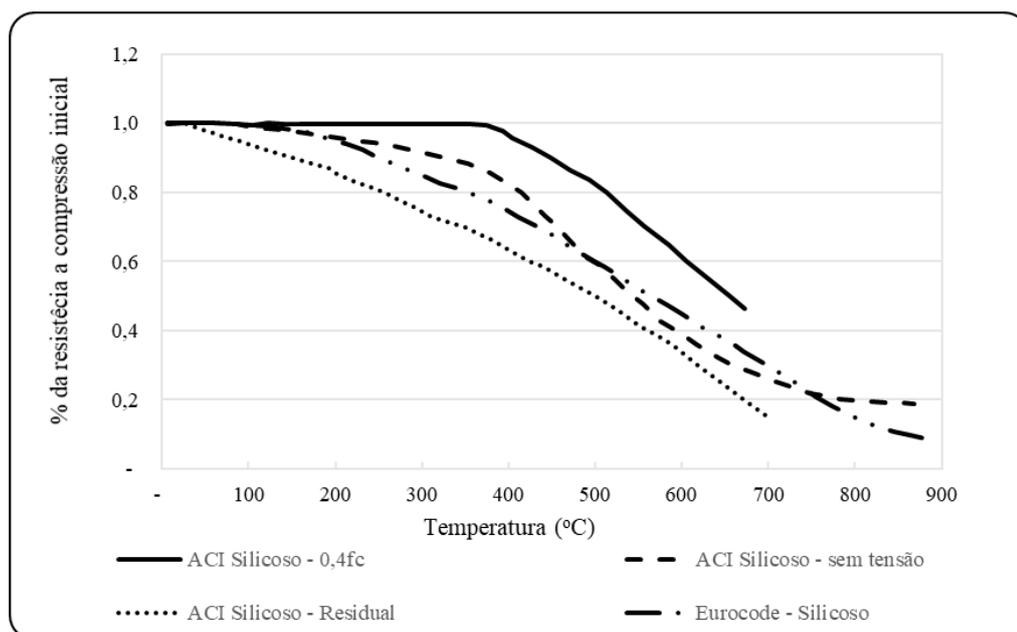
de agregado silicioso começa a diminuir rapidamente e é considerada ineficaz em temperaturas acima de 650°C, onde a resistência à compressão foi reduzida em aproximadamente 50% do valor em temperaturas normais. Entretanto, para agregados de carbonatos e leves (tensão de $0,4 \cdot f'_c$), a resistência à compressão permanece relativamente inalterada até 650°C e não é considerada ineficaz até atingir uma temperatura de 760°C. O método experimental utilizado pode influenciar a resistência à compressão relatada.

Amostras aquecidas sem cargas compressivas e, em seguida, carregadas até a falha enquanto quentes, têm resistência à compressão menor do que aquelas aquecidas durante o carregamento. Os resultados do EN 1992-1-2 (2004) estão mais próximos dos resultados do ACI/TMS 216.1 (2014) sem tensão.

Figura 5.3 – (a) relação resistência-temperatura para concretos com agregados de carbonato. (b) relação resistência-temperatura para concretos com agregados siliciosos.



(a)



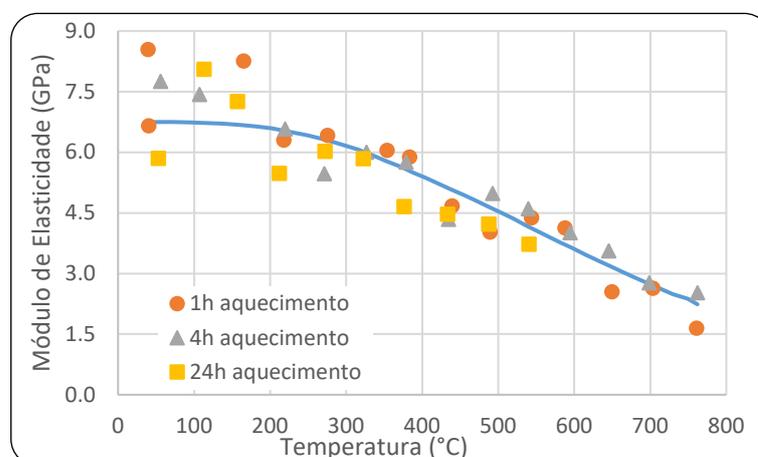
(b)

Fonte: adaptado ACI 216.1 (2014) e Eurocode 2 (2004)

5.1.3 Módulo de elasticidade sob elevadas temperaturas

Alguns estudos foram realizados para definir o comportamento do módulo de elasticidade do concreto em altas temperaturas. Harmathy; Berndt (1966) estudaram a relação tensão-deformação na compressão de cimento Portland hidratado e um concreto com agregado de xisto expandido em temperaturas elevadas. As propriedades de ambos os materiais pareciam praticamente não serem afetadas pela temperatura de até cerca de 200°C. Acima disso, o módulo de elasticidade e a resistência máxima diminuía com o aumento da temperatura, o resultado deste estudo quanto ao módulo residual está contido na Figura 5.4.

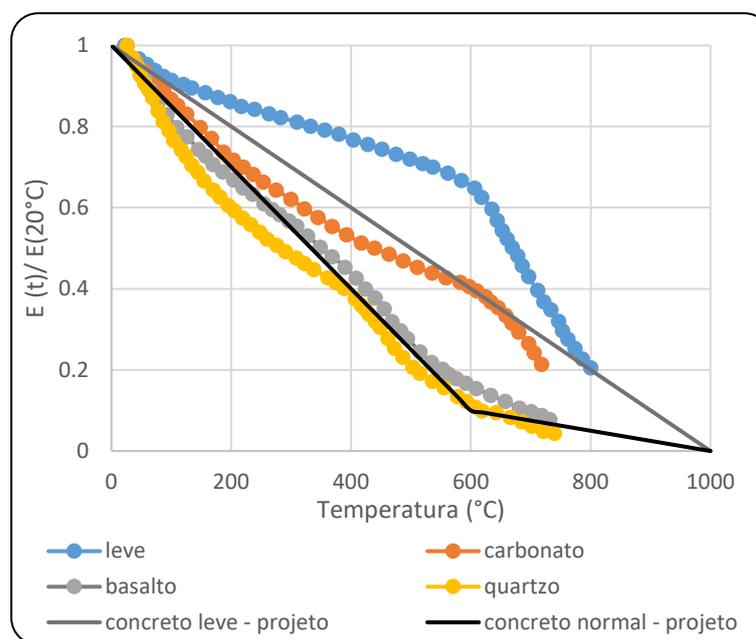
Figura 5.4 – Módulo de elasticidade de concreto leve com xisto expandido em elevadas temperaturas.



Fonte: adaptado (HARMATHY; BERNDT, 1966)

Schneider (1988) realizou uma pesquisa do concreto com foco em diferentes propriedades em altas temperaturas. Em seu trabalho foi destacado a importância da relação água/cimento, tipo de agregado, tipo de cimento, relação agregado/cimento, nível de carga, taxa de aquecimento, taxa de evaporação, idade do concreto, tipo de cura e vedação na obtenção do módulo de elasticidade do concreto a temperaturas elevadas. De acordo com seus resultados, o tipo de agregado tem na maioria dos casos uma forte influência (Figura 5.5). Os concretos com agregados leves indicam a menor redução do módulo de elasticidade e concretos agregados siliciosos o mais alto.

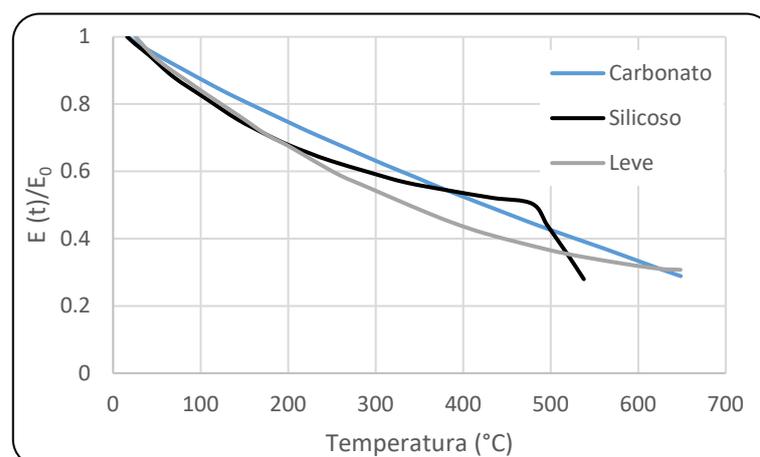
Figura 5.5 – Módulo de elasticidade do concreto com diferentes agregados em elevadas temperaturas



Fonte: adaptado (SCHNEIDER, 1988)

Foram estudados concretos com vários tipos de agregados, e o módulo de elasticidade de todos eles apresentou uma perda conforme a temperatura aumentou: a 200°C, o módulo é reduzido para 70 a 80%, a 400°C, valores de 40 a 50% foram alcançados (Figura 5.6). Bazant; Kaplan (1996) associaram essa redução com a quebra da ligação na microestrutura da pasta de cimento quando as temperaturas aumentaram e com o aumento da fluência rápida em curto período.

Figura 5.6 – Redução do Módulo de elasticidade para diferentes agregados com a temperatura.



Fonte: adaptado (BAZANT; KAPLAN, 1996)

5.1.4 Propriedades mecânicas de blocos vazados de concreto em elevadas temperaturas

Poucos trabalhos analisando blocos vazados de concreto de agregado normal foram encontrados. Amaral *et al.* (2022) realizou uma campanha experimental para avaliar a resistência à compressão residual e o módulo de deformação de quatro diferentes blocos vazados de concreto. Mesmo observando comportamento semelhante sob altas temperaturas entre as misturas de concreto moldado a úmido e os blocos fabricados com concreto seco, os pesquisadores perceberam que a resistência à compressão residual é maior para os blocos de concreto vazado, além disso, blocos de baixa resistência obtiveram menores perdas entre 300°C e 700°C. Por outro lado, o módulo de deformação após aquecimento é pouco influenciado pela resistência à compressão nominal do bloco à temperatura ambiente; sendo o tipo de agregado e a metodologia de avaliação dessas propriedades mecânicas, em laboratório, os parâmetros que mais influenciam nos resultados observados.

Leal *et al.*, (2021) investigou por meio de análises experimentais, o comportamento térmico e as propriedades mecânicas residuais da alvenaria estrutural de blocos vazados de concreto e seus materiais componentes em situação de incêndio. Foram realizados ensaios de compressão com elementos representativos da alvenaria (blocos, prismas e pequenas paredes) expostos por 70 minutos ao Incêndio-Padrão proposto na ISO 834-1 (1999). A influência da resistência inicial do concreto no comportamento da alvenaria foi avaliada considerando-se blocos com diferentes resistências características à temperatura ambiente. Os resultados apontam significativa perda de capacidade resistente da alvenaria quando em temperaturas elevadas, principalmente nos casos em que o fogo atua em ambas as faces, onde a resistência

residual à compressão resultou entre 20% e 27% para os blocos e em torno de 14% para prismas e pequenas paredes, em média.

5.2 MÉTODO DE ENSAIO

Como já evidenciado por vários autores e apresentado em várias normas, a resistência a compressão não é influenciada apenas em função da temperatura, sendo também afetada pelo nível de carregamento durante ensaio. Assim, existem três métodos de teste disponíveis para encontrar a resistência a compressão do concreto a temperaturas elevadas: resistência residual obtida em ensaios de corpos-de-prova aquecidos sem carga e rompidos pós aquecimento, resistência residual obtida em ensaios de corpos-de-prova aquecidos com carga e rompidos pós aquecimento e resistência residual obtida em ensaios de corpos-de-prova aquecidos sem carga e rompidos pós resfriamento. Este último apresenta os menores valores de resistência e, portanto, pode ser o mais adequado para ser empregado em critérios de verificação da resistência ao fogo de elementos em concreto (SOLLERO *et al.*, 2021).

Blocos de concreto sem aplicação de cargas foram caracterizados para obtenção das propriedades mecânicas e suas devidas curvas residuais. Os blocos de concreto foram aquecidos e resfriados a uma taxa de 1°C/minuto, permanecendo na temperatura máxima de interesse por uma hora. Sendo determinadas as propriedades mecânicas dos blocos da temperatura ambiente à 800°C com intervalos a cada 100°C para temperaturas máximas de interesse no aquecimento dos blocos de concreto. Seis corpos-de-prova para cada um dos nove diferentes tipos de blocos (3 resistências × 3 agregados) em cada temperatura de interesse, foram testados. No total, o programa experimental testou 486 blocos. Na Figura 5.7 é mostrado os parâmetros variados e o número de testes realizados conforme recomendações adaptadas da RILEM TC 200-HTC (2007) e proposta por Medeiros et al. (2022) relatadas no capítulo anterior. Blocos de resistência nominal de 6 MPa, 12MPa e 24MPa e com diferentes agregados (basalto, calcário e gnaiss) foram ensaiados.

Figura 5.7 – Relação de ensaios

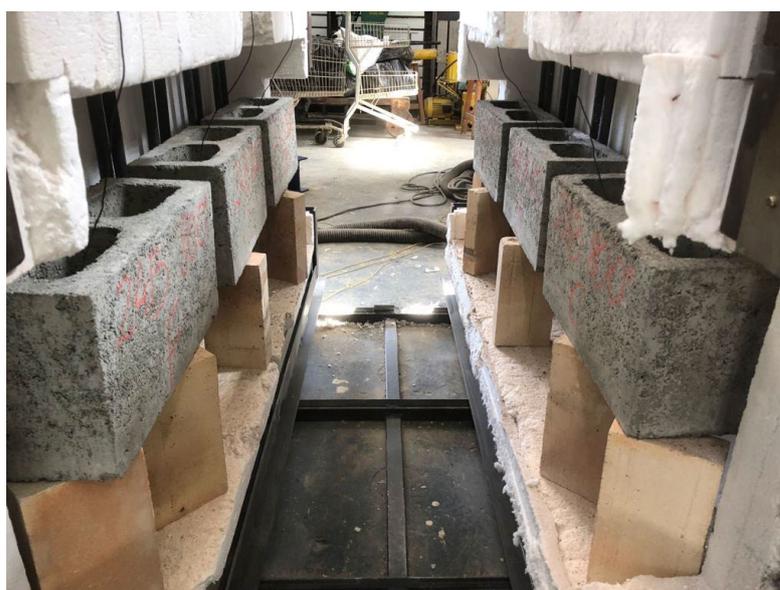
Blocos Ensaiaados			
Agregado	Basalto	Calcário	Gnaiss
Resistência	6 MPa 12 MPa 24 MPa	6 MPa 12 MPa 24 MPa	6 MPa 12 MPa 24 MPa
Temperatura	Ambiente 100°C 200°C 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C 800°C	Ambiente 100°C 200°C 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C 800°C	Ambiente 100°C 200°C 300°C 400°C 500°C 600°C 700°C 800°C

* Foram ensaiados 6 corpos-de-prova para cada tipo de bloco e temperatura

Fonte: próprio autor

Para o aquecimento dos blocos de concreto vazado foi utilizado um forno elétrico com capacidade de temperatura máxima de aquecimento de 1100°C e dimensões internas de 400×600×1400 mm, ilustrado na Figura 5.8. A temperatura no interior do forno pode ser controlada eletronicamente.

Figura 5.8 – Disposição dos blocos para aquecimento no forno



Fonte: próprio autor

Após o aquecimento e posterior resfriamento lento, foram avaliados a resistência à compressão e módulo de deformação dos blocos. A Figura 5.9 ilustra blocos posicionados em uma prensa universal; onde também é notada a instalação de instrumentação específica para medir as deformações longitudinais das amostras durante a aplicação do carregamento axial.

Figura 5.9 – Ensaio para determinação da resistência e módulo de elasticidade residual



Fonte: próprio autor

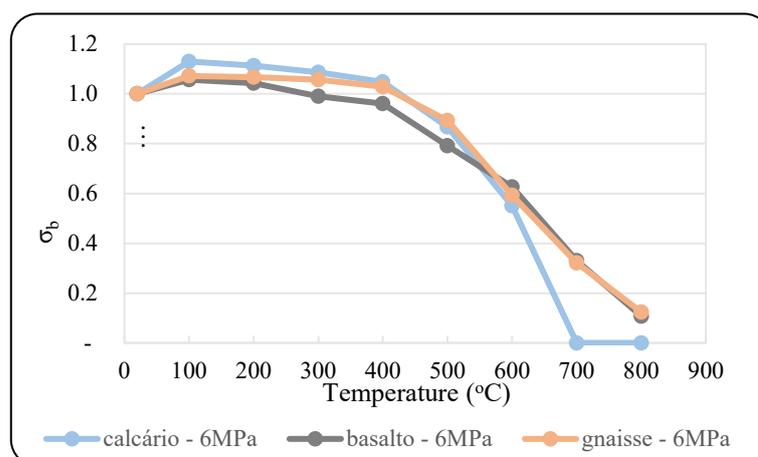
5.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Observa-se que os seguintes resultados são sempre apresentados em relação à resistência mecânica residual para cada temperatura de aquecimento das amostras em análise. A resistência compressiva e o módulo de deformação obtidos, para blocos, à temperatura ambiente foram utilizados como referência (100%) para calcular o valor residual da respectiva resistência mecânica após o aquecimento.

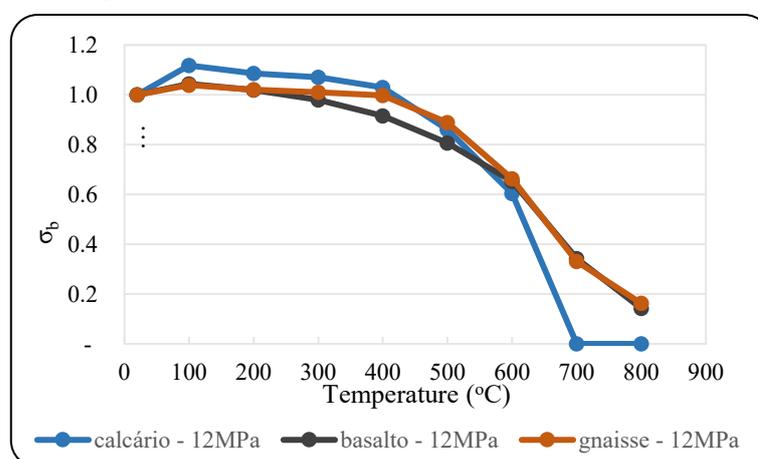
5.3.1 Resistência residual à compressão

5.3.1.1 Por classe de resistência dos blocos

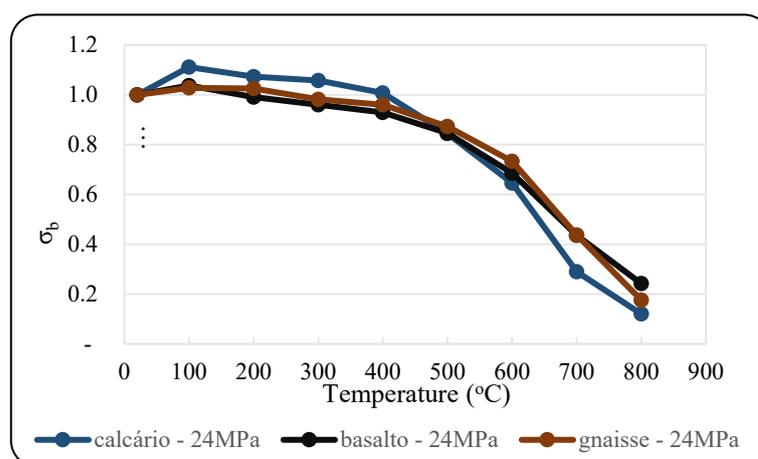
Inicialmente foi analisado a resistência residual a compressão dos blocos vazados de concreto, separando-os por classe de resistência. Nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12 são apresentadas as curvas de redução da resistência em função da temperatura para blocos com classe de resistência nominal de 6, 12 e 24 MPa, respectivamente.

Figura 5.10 – Resistência residual dos blocos de 6MPa

Fonte: próprio autor

Figura 5.11 – Resistência residual dos blocos de 12MPa

Fonte: próprio autor

Figura 5.12 – Resistência residual dos blocos de 24MPa

Fonte: próprio autor

Ao fixar as classes de resistência e comparando-os é possível perceber que a partir de 100°C existe um pequeno aumento da resistência do bloco, sendo esse acréscimo mais fortemente observado em blocos de menor classe de resistência. Nas temperaturas seguintes o

efeito deteriorante das temperaturas elevadas é percebido, sendo mais evidente após os 400°C independente da classe de resistência do bloco. Em relação ao tipo de agregado verifica-se que o agregado calcário obtém um maior acréscimo de resistência até 100°C, o que lhe garante um melhor desempenho até os 500°C, após esta temperatura a degradação desse agregado (calcário) é mais evidente sendo desprezível aos 700°C.

Uma análise estatística e qualitativa foi realizada para todos os resultados pela formulação ANOVA com análise de variância (5% de significância), onde valor-p menor que o nível de significância implica que os resultados são considerados significativos. Ao fixar o parâmetro resistência, observou-se que dentro de uma mesma classe de resistência a variação da temperatura é fortemente significativa (Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3), como já esperado e claramente identificado nas curvas apresentadas nas Figuras 5.10, 5.11 e 5.12.

Tabela 5.1 – ANOVA blocos de 6 MPa

6 MPa					
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>	
Basalto	8	5.906069	0.738259	0.126608	
Calcário	8	5.797047	0.724631	0.236069	
Gnaisse	8	6.154925	0.769366	0.142029	
100	3	3.258658	1.086219	0.001493	
200	3	3.224146	1.074715	0.001297	
300	3	3.133386	1.044462	0.00244	
400	3	3.037753	1.012584	0.002143	
500	3	2.551321	0.85044	0.00277	
600	3	1.769468	0.589823	0.001427	
700	3	0.651723	0.217241	0.035417	
800	3	0.231587	0.077196	0.004533	

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Agregado	0.008412	2	0.004206	0.622285	0.550922	3.738892
Temperatura	3.438315	7	0.491188	72.67055	6.31E-10	2.764199
Erro	0.094627	14	0.006759			
Total	3.541354	23				

Fonte: próprio autor

Tabela 5.2 – ANOVA blocos de 12 MPa

12 MPa

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Basalto	8	5.903425	0.737928	0.1123
Calcário	8	5.767835	0.720979	0.225797
Gnaisse	8	6.113177	0.764147	0.118834
100	3	3.201236	1.067079	0.001955
200	3	3.125391	1.041797	0.001431
300	3	3.060902	1.020301	0.002101
400	3	2.942486	0.980829	0.003457
500	3	2.556488	0.852163	0.001754
600	3	1.919529	0.639843	0.00101
700	3	0.673105	0.224368	0.037791
800	3	0.305301	0.101767	0.007867

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Agregado	0.007568	2	0.003784	0.494356	0.620221	3.738892
Temperatura	3.091349	7	0.441621	57.6922	2.98E-09	2.764199
Erro	0.107167	14	0.007655			
Total	3.206084	23				

Fonte: próprio autor

Tabela 5.3 – ANOVA blocos de 24 MPa

24 MPa

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
Basalto	8	6.125337	0.765667	0.083621
Calcário	8	6.148216	0.768527	0.145729
Gnaisse	8	6.215476	0.776935	0.098262
100	3	3.175927	1.058642	0.002089
200	3	3.089248	1.029749	0.001693
300	3	2.99852	0.999507	0.002578
400	3	2.896802	0.965601	0.001512
500	3	2.563001	0.854334	0.000265
600	3	2.065061	0.688354	0.001909
700	3	1.162263	0.387421	0.007141
800	3	0.538208	0.179403	0.003731

ANOVA

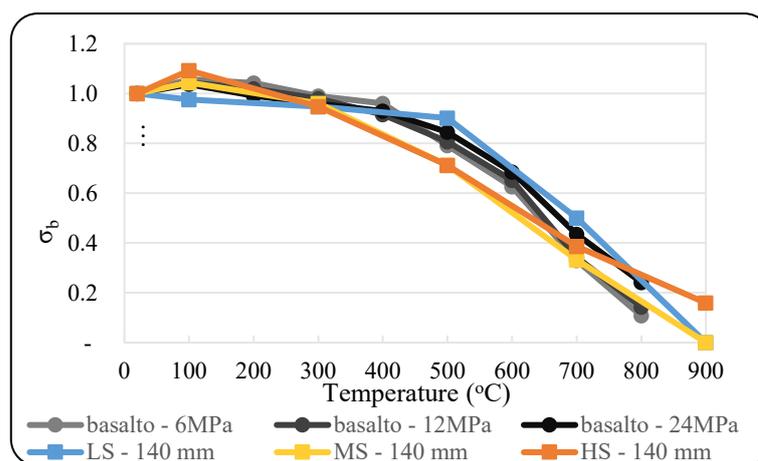
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Agregado	0.000549	2	0.000274	0.093057	0.911701	3.738892
Temperatura	2.251998	7	0.321714	109.0921	3.99E-11	2.764199
Erro	0.041286	14	0.002949			
Total	2.293833	23				

Fonte: próprio autor

A norma ACI/TMS 216.1 (2014) apresenta curvas de redução da resistência característica do concreto levando em consideração apenas a temperatura e o tipo de agregado. Enquanto o Eurocode 2 (2004), além desses parâmetros possui um coeficiente de redução relativo a classe de resistência do concreto, quanto maior a resistência do concreto menor será a relação $f_{c\theta}/f_{ck}$. Comparando as classes de resistências propostas pelo Eurocode 2 (2004) e a faixa de resistência dos blocos estudados, percebe-se que os valores pertencem a uma mesma classe de resistência, onde o comportamento do decréscimo de resistência tende a ter a mesmas características.

Na carência de códigos normativos específicos para alvenaria estrutural de blocos de concreto vazado, a título de comparação, a Figura 5.13 apresentam as curvas encontrados por Amaral *et al.* para blocos com a mesma geometria e processo de fabricação, para blocos com agregados silicosos, juntamente com as encontradas neste trabalho. É possível perceber semelhanças de comportamento dos blocos estudados por aquele autor e por este trabalho.

Figura 5.13 – Resistência residual dos blocos de com agregado silicoso

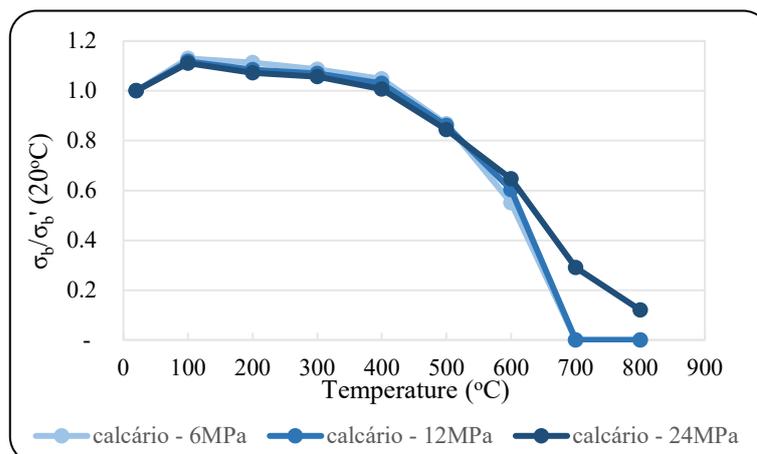


Fonte: próprio autor

5.3.1.2 Por tipo de agregado

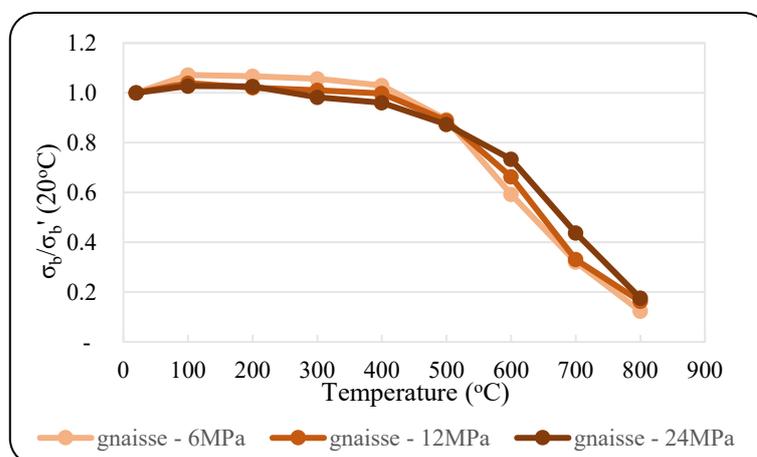
Nas Figura 5.14, 5.15 e 5.16 são apresentadas as curvas de redução da resistência a compressão em função da temperatura, agrupando-os por diferentes tipos de agregados, sendo assim são reunidos em cada gráfico blocos de diferentes resistências, mas com os mesmo tipo de agregado, respectivamente, calcário, gnaiss e basalto.

Figura 5.14 – Resistência residual dos blocos de calcário



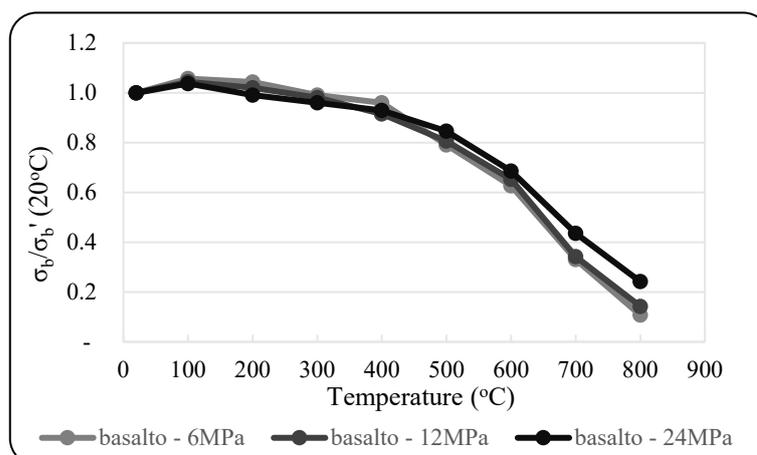
Fonte: próprio autor

Figura 5.15 – Resistência residual dos blocos de gnaiss



Fonte: próprio autor

Figura 5.16 – Resistência residual dos blocos de basalto



Fonte: próprio autor

Todos os blocos com agregados de calcário estudados (Figura 5.14), independente da resistência do bloco, foi apresentado aumento da resistência quando aquecido a 100°C, seguido pelo decréscimo da resistência residual de forma branda até os 400°C, após esta temperatura, o

efeito deteriorante das temperaturas elevadas ($>500^{\circ}\text{C}$) é facilmente identificado percebendo-se ainda uma queda abrupta após os 600°C , com perda total da resistência nos 700°C para blocos de menores classes de resistência. Os blocos com agregados de gnaiss (Figura 5.15), também apresentaram um aumento da resistência residual quando aquecidos a 100°C , porém menor que o ocorrido para blocos com agregado de calcário, com decréscimo de resistência residual também branda até os 400°C , após esta temperatura ($>500^{\circ}\text{C}$) a degradação da resistência residual é mais evidente, entretanto até os 800°C ainda foi possível obter resistência residual em todas as classes de resistência mesmo que em valores bastante reduzidos, independente da classe de resistência. Para os blocos com agregado de basalto (Figura 5.16) o acréscimo da resistência residual quando aquecido a 100°C foi pouco significativo, com resistência residual inferior à resistência de referência após os 200°C , com uma inclinação maior da curva de resistência residual após os 500°C , possuindo, assim como nos blocos de agregado gnaiss, pequena resistência residual mesmo a 800°C para todas as classes de blocos.

A análise estatística e qualitativa através da formulação ANOVA (Tabelas 5.4, 5.5 e 5.6) com análise de variância (valor- $p < 0,05$), fixando-se o parâmetro tipo de agregado demonstrou uma forte diferença entre os grupos a respeito do fator temperatura, indicando que a diferença observada para esse parâmetro não é ao acaso. Já para o fator resistência não foi observado diferenças significativas o que corrobora com os gráficos similares apresentados nas Figuras 5.14, 5.15 e 5.16.

Tabela 5.4 – ANOVA blocos de com agregado calcário

CALCÁRIO

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
6 MPa	8	5.797047	0.724631	0.236069
12MPa	8	5.767835	0.720979	0.225797
24 MPa	8	6.148216	0.768527	0.145729
100	3	3.359188	1.119729	9.11E-05
200	3	3.272082	1.090694	0.000443
300	3	3.213618	1.071206	0.000225
400	3	3.084557	1.028186	0.000428
500	3	2.572875	0.857625	0.000143
600	3	1.800859	0.600286	0.0023
700	3	0.28985	0.096617	0.028004
800	3	0.12007	0.040023	0.004806

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Resistência	0.011203	2	0.005601	1.271419	0.310904	3.738892
Temperatura	4.19149	7	0.598784	135.9159	8.84E-12	2.764199
Erro	0.061678	14	0.004406			
Total	4.26437	23				

Fonte: próprio autor

Tabela 5.5 – ANOVA blocos de com agregado gnaisse

GNAISSE

<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>
6 MPa	8	6.154925	0.769366	0.142029
12MPa	8	6.113177	0.764147	0.118834
24 MPa	8	6.215476	0.776935	0.098262
100	3	3.13852	1.046173	0.000524
200	3	3.113051	1.037684	0.000667
300	3	3.04911	1.01637	0.001419
400	3	2.987049	0.995683	0.001195
500	3	2.654413	0.884804	0.000106
600	3	1.989796	0.663265	0.004968
700	3	1.08917	0.363057	0.00416
800	3	0.46247	0.154157	0.000737

ANOVA

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Resistência	0.000661	2	0.000331	0.17219	0.843576	3.738892
Temperatura	2.486987	7	0.355284	184.9782	1.06E-12	2.764199
Erro	0.02689	14	0.001921			
Total	2.514538	23				

Fonte: próprio autor

Tabela 5.6 – ANOVA blocos de com agregado basalto

BASALTO						
<i>RESUMO</i>	<i>Contagem</i>	<i>Soma</i>	<i>Média</i>	<i>Variância</i>		
6 MPa	8	5.906068503	0.738259	0.126608		
12MPa	8	5.903425371	0.737928	0.1123		
24 MPa	8	6.125337293	0.765667	0.083621		
100	3	3.138112671	1.046038	0.0001		
200	3	3.053652337	1.017884	0.000685		
300	3	2.93007939	0.976693	0.000236		
400	3	2.805434362	0.935145	0.000524		
500	3	2.44352173	0.814507	0.000782		
600	3	1.963403359	0.654468	0.000871		
700	3	1.108071759	0.369357	0.003275		
800	3	0.492555559	0.164185	0.004856		

ANOVA						
<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Resistência	0.004055	2	0.002028	1.525959	0.251468	3.738892
Temperatura	2.239095	7	0.319871	240.7182	1.71E-13	2.764199
Erro	0.018603	14	0.001329			
Total	2.261754	23				

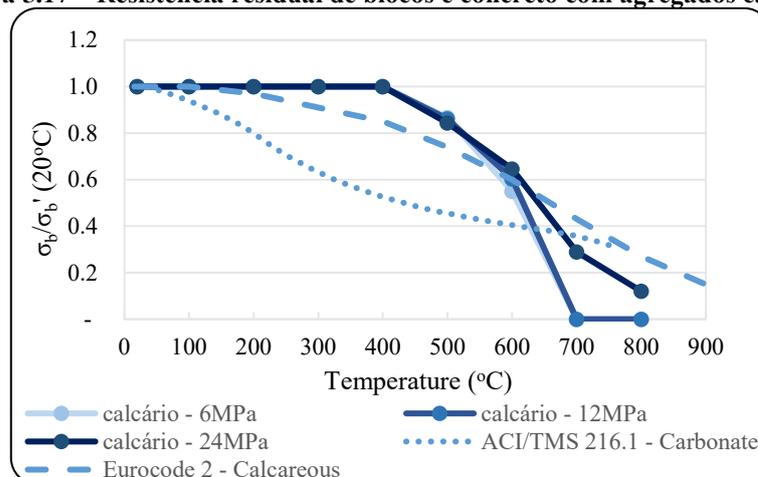
Fonte: próprio autor

Quando comparado com o concreto moldado úmido, o efeito das altas temperaturas em função do tipo de agregado mostram-se coerentes. As rochas carbonáticas, como o calcário, tornam-se instáveis após 600°C, devido a transformação de carbonato de cálcio (CaCO₃) em óxido de cálcio (cal - CaO) e dióxido de carbono (CO₂). Entretanto, agregados silicosos, como o gnaiss e basalto, apresentam grande estabilidade térmica e se tornam instáveis apenas em temperaturas próximas a 1000°C.

A norma ACI/TMS (2014) apresenta curvas de redução da resistência característica do concreto considerando temperatura, tipo de agregado e carga aplicada. Ao passo que as curvas de resistência residual apresentadas no Eurocode 2 (2004) não especificam o regime de carregamento, sendo, portanto, proporcionada por resultados obtidos em diferentes situações de carga. Entende-se que para garantir melhor segurança, os acréscimos de resistências obtidos nos blocos nas primeiras temperaturas devam ser desprezados. Nas Figura 5.17 e 5.18, são comparadas as curvas obtidas neste trabalho (sem acréscimo de resistência), para blocos de concreto vazados, com as curvas apresentadas nas normas citadas para concreto moldado úmido em corpos de prova cilíndricos. Ressalta-se que foi apresentada a curva residual (aquecidos sem carregamento e rompidos após resfriamento) para ACI/TMS 216.1 (2014). Em geral, a resistência residual dos blocos de concreto vazados foi mantida por temperaturas mais elevadas

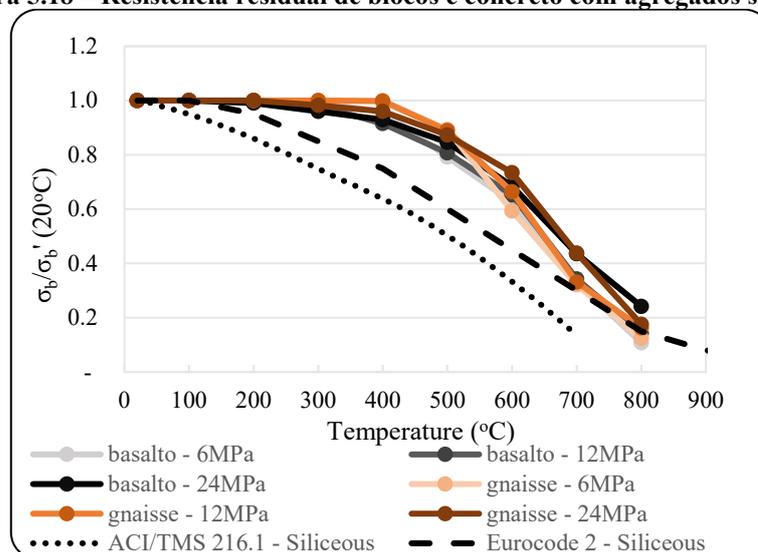
quando comparadas com o concreto moldado úmido. Para os blocos com agregados calcários, observa-se que não houve perda de resistência até 400°C, entretanto após 600°C uma queda abrupta da resistência é constatada. Além disso, é percebido uma significativa diferença entre os valores disponíveis entre as duas normas. Em relação aos blocos com agregados silicosos nota-se que eles alcançam resistências residuais maiores que os atribuídos ao concreto moldado úmido praticamente por todo o aquecimento até por volta dos 800°C.

Figura 5.17 – Resistência residual de blocos e concreto com agregados calcários



Fonte: próprio autor

Figura 5.18 – Resistência residual de blocos e concreto com agregados silicosos



Fonte: próprio autor

Não foram encontrados em literatura outros trabalhos realizados em blocos vazados de concreto com variação do tipo de agregado para realizar comparação e avaliação entre resultados.

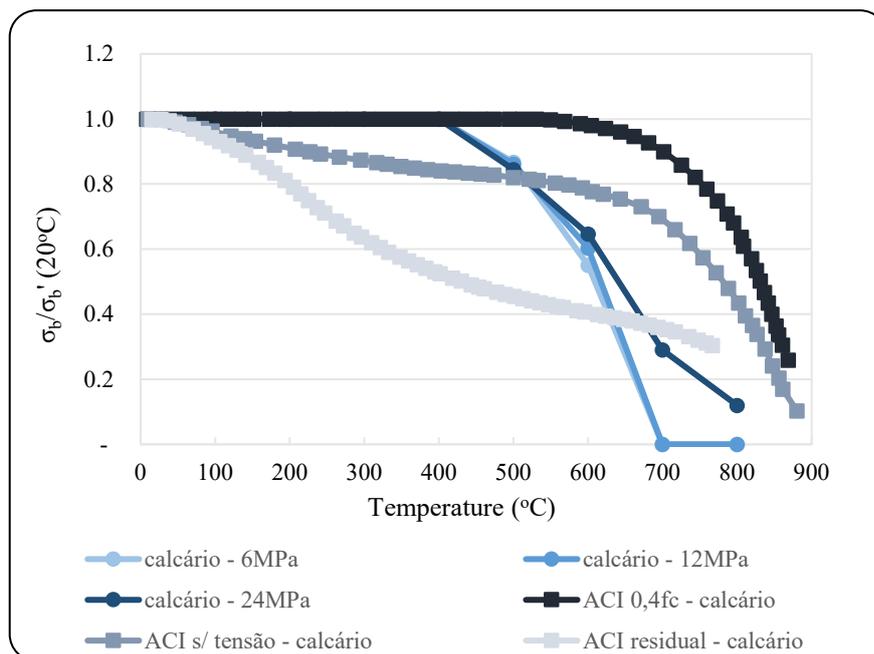
A mistura utilizada na produção dos blocos é bastante seca, o que resulta em uma menor relação água/material seco (agregados + cimento), resultando na maior possibilidade de os

grãos de cimento não terem sido completamente hidratados. A elevação inicial da temperatura, até os 100°C, provocou o aumento da resistência constatado que é justificado pela reidratação dos sólidos presentes na pasta de cimento provocada pela evaporação da água existente no material que reagirá com os grãos de clínquer não hidratados. No que concerne o acréscimo de resistência inicial ocorrer de forma mais evidente nos blocos com agregado calcário, atribui-se a maior presença de cálcio no material que é o responsável pelas fases sólidas na pasta hidratada: silicato de cálcio hidratado, hidróxido de cálcio, sulfoaluminatos de cálcio. Esses produtos de hidratação do cimento tendem a aderir fortemente não apenas entre si, como também aos sólidos de área superficial reduzida e partículas de agregado miúdo e graúdo (MEHTA; MONTEIRO, 2014a).

Outra constatação verificada nos resultados trata da deterioração tardia da resistência residual dos blocos quando comparados ao concreto moldado úmido. Essa observação é atribuída à zona de transição na interface do concreto. Um fator importante responsável pela baixa resistência da zona de transição na interface no concreto é a presença de microfissuras (MEHTA; MONTEIRO, 2014a; NEVILLE, 2016). No caso dos blocos de concreto, a dosagem de concreto com agregados de menor granulometria, baixo consumo de cimento e água; atrelados ao processo de fabricação industrial que garante um melhor adensamento; e o aquecimento lento que elevou a resistência inicial, conforme, relatado no parágrafo anterior, garante que a zona de transição na interface formada nessas condições seja menos suscetíveis à fissuração quando sujeita à influência de tensões de tração induzidas por movimentos diferenciais entre o agregado e a pasta de cimento hidratada.

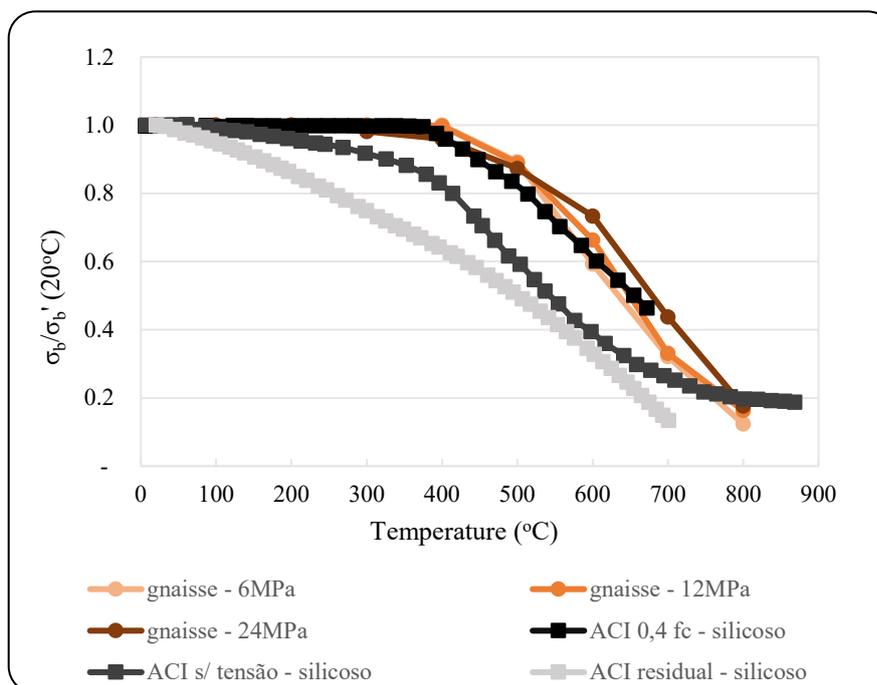
Também é verificado que as curvas de resistência residual dos blocos de concreto vazados se assemelham às curvas proposta para o ACI para corpos de prova ensaiados sob carregamento, conforme demonstrado nas Figura 5.19, 5.20 e 5.21. Isso também se deve à influência da zona de transição nas propriedades do concreto. A zona de transição na interface, geralmente é considerada como a fase limitante da resistência no concreto. Nos ensaios em elevadas temperaturas com o concreto carregado sob compressão, as tensões de compressão na matriz devem primeiro ser descarregadas antes que as tensões de tração possam ser estabelecidas e microfissuras formadas quando os agregados se expandem. Já os blocos de concreto produzidos a partir de uma mistura bastante seca, com distribuição granulométrica com maior quantidade de finos e submetidos a vibrocompactação no seu processo de fabricação apresentam uma melhor interação entre agregado e pasta de cimento tendo, portanto, sua zona de transição com menor microfissuração. Uma vez que a microfissuração é reduzida, a queda da resistência à compressão em condição quente e após um aquecimento também é reduzida (HERTZ, 2007).

Figura 5.19 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados calcários



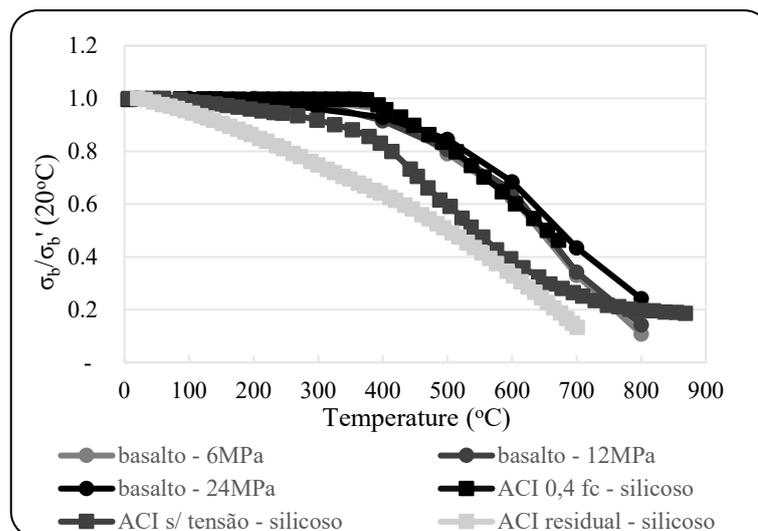
Fonte: próprio autor

Figura 5.20 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados gnaisse



Fonte: próprio autor

Figura 5.21 – Comparação entre resistência residual de blocos e resistência de concreto conforme ACI para agregados basalto

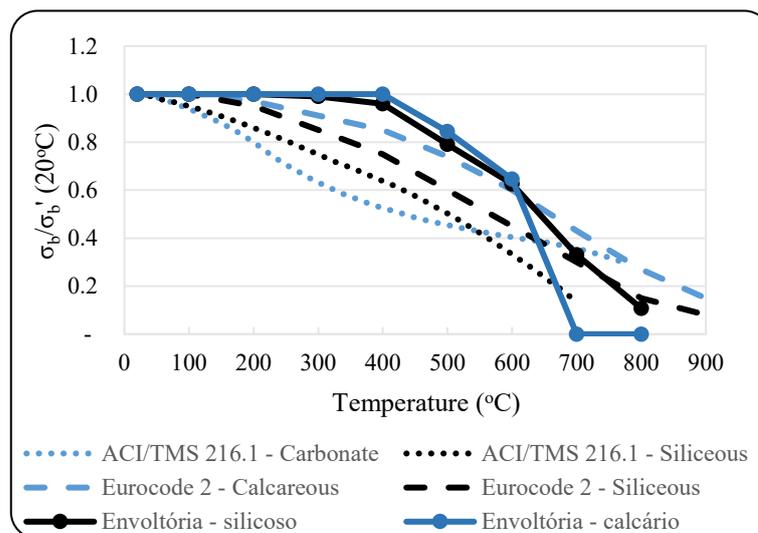


Fonte: próprio autor

Além disso, uma outra observação realizada foi a queda abrupta da resistência residual observada nos blocos de concreto com agregado calcário (Figura 5.14). A mineralogia do agregado exerce importante influência sobre o comportamento do concreto sob altas temperaturas. No caso de rochas carbonáticas, quando submetidas a temperaturas acima de 600°C ocorre a descarbonatação (MEHTA; MONTEIRO, 2014a; NEVILLE, 2016), essa deterioração também foi percebida nos testes de termogravimetria apresentados na Figura 4.16. Além das possíveis transformações de fase de decomposição térmica do agregado, a mineralogia deste determina também a resposta do concreto à elevadas temperaturas, como por exemplo as expansões térmicas diferenciais entre agregado e pasta de cimento e a resistência última da zona de transição na interface, já mencionadas no parágrafo anterior.

A partir dos resultados obtidos e com a constatação que o comportamento da resistência residual dos blocos é fortemente influenciado pelo tipo de agregado, notando-se ainda que os agregados basalto e gnaisse, ambos de material silicoso como demonstrado na análise se FRX (Figuras 4.7 e 4.8) possuem comportamento similar, na Figura 5.22 é proposto uma curva residual característica para blocos de concreto vazado, determinada a partir de envoltória com o comportamento crítica para cada tipo de agregado. É importante ressaltar que esta proposta é baseada apenas na pesquisa realizada neste trabalho e nos poucos trabalhos encontrados para o mesmo tipo de bloco (Amaral *et al.*, 2022). Observa-se que o bloco de concreto mantém sua resistência por temperaturas maiores, assim como os ensaios de concreto sob tensão já relatados anteriormente, entretanto após 700°C os resultados obtidos para blocos de concreto vibroprensado são menores que os obtidos para o concreto moldado úmido.

Figura 5.22 – Proposta de curva residual para blocos de concreto

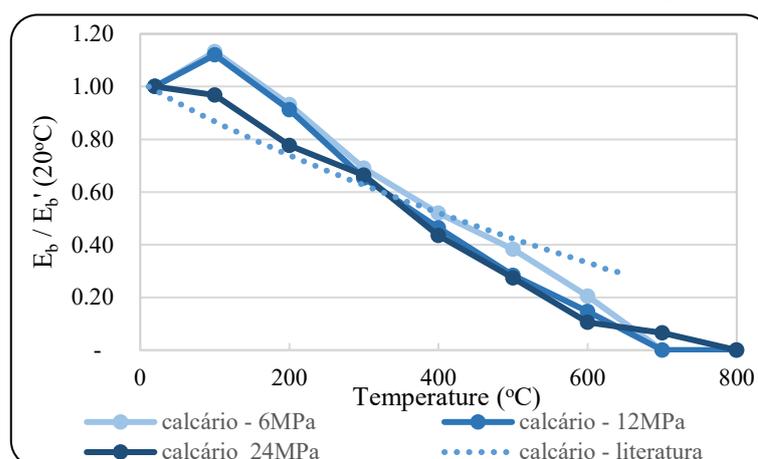


Fonte: próprio autor

5.3.2 Deformabilidade residual

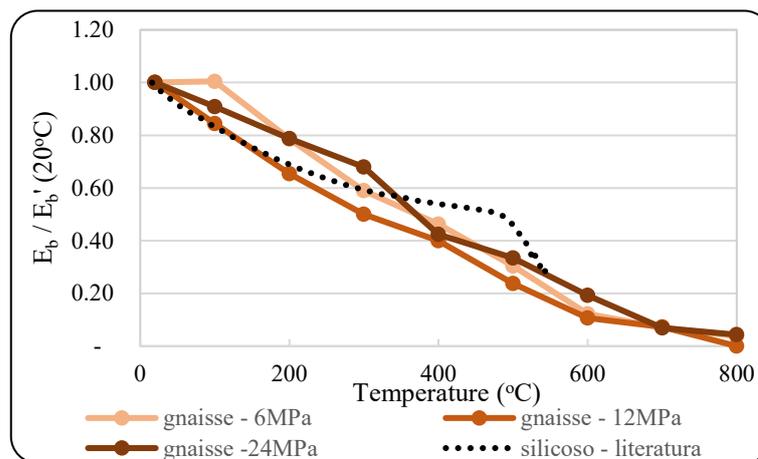
O módulo de elasticidade é uma propriedade que define a tendência de um material ser deformado elasticamente quando uma força é aplicada. Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25 são apresentados a variação da razão (temperatura alvo/temperatura ambiente) da deformabilidade dos blocos e do concreto moldado úmido para cada tipo de agregado. Observa-se que a tendência de perda de rigidez nos diferentes tipos de blocos é semelhante, sendo também semelhantes quando comparados ao concreto de agregado normal moldado úmido.

Figura 5.23 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado basalto



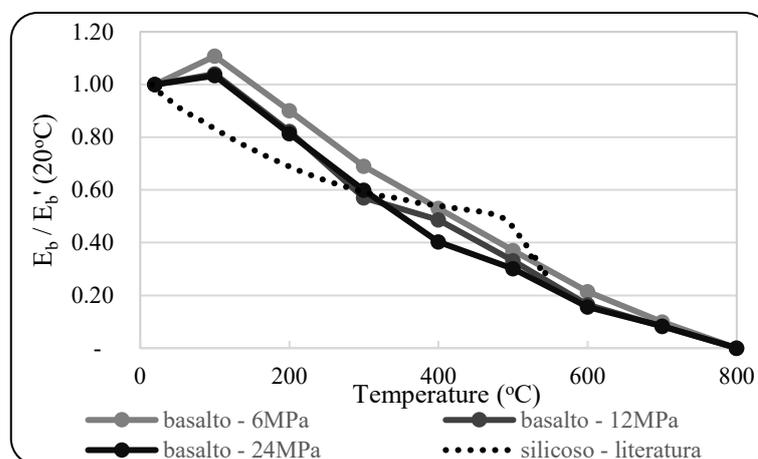
Fonte: próprio autor

Figura 5.24 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado gnaisse



Fonte: próprio autor

Figura 5.25 – Módulo de elasticidade residual dos blocos com agregado calcário



Fonte: próprio autor

A rápida diminuição no módulo de elasticidade dos blocos é explicada também pela microestrutura da zona de transição na interface que exerce grande influência na rigidez ou no módulo de elasticidade do concreto. No material compósito, a zona de transição serve como uma ponte entre dois componentes: a matriz argamassa e as partículas de agregado graúdo. A rigidez do compósito é reduzida em função das microfissuras e vazios na zona de transição, que não permitem transferência de tensão. Assim, devido à microfissuração por exposição a altas temperaturas, o módulo de elasticidade do concreto cai mais rapidamente do que a resistência à compressão.

Observa-se que os blocos de concreto têm a deformabilidade mais fortemente degradada com a temperatura elevada que a resistência à compressão. Baseado nessa constatação é importante alertar para a consideração da estabilidade de edificações pós-fogo, pois mesmo que a resistência dos blocos não tenha sofrido grandes danos até os 400°C, para essa mesma temperatura o módulo de deformação foi reduzido à metade.

5.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado um estudo comparativo das propriedades termomecânicas de nove blocos de concreto vazados expostos a ciclos de temperatura de até 800°C analisando a influência da natureza dos agregados e resistência. Foram utilizados três tipos diferentes de agregados: calcário, gnaiss e basalto; com três resistências de blocos: 6, 12 e 24MPa. Analisou-se a degradação da resistência e do módulo de elasticidade dos blocos e a partir dos resultados deste estudo, podem ser observadas as seguintes conclusões principais:

Quanto ao tipo agregado observou-se que este transfere aos blocos comportamentos diferentes frente a elevadas temperaturas. Blocos com agregados do tipo gnaiss e basalto tiveram comportamento semelhantes, porém os blocos com agregado do tipo calcário apesar de obterem um acréscimo de resistência a partir de 100°C, após os 600°C um declínio abrupto da resistência foi observado;

Quanto ao fator resistência dos blocos, não foram observadas diferenças significativas no comportamento das diferentes resistências de blocos em vista da temperatura. Blocos com um mesmo tipo de agregado, tiveram desempenhos semelhantes independente da classe de resistência do bloco. Entretanto, bloco de maiores resistência dos agregados basalto e gnaiss ainda possuíam uma pequena resistência residual aos 800°C;

Foi observado uma deterioração tardia da resistência residual dos blocos de concreto quando comparados com o concreto plástico, percebendo-se que os blocos fabricados com concreto seco, possuem uma resistência residual à compressão maior na faixa até 400° C e menor após os 700°C;

Uma curva específica de resistência residual a compressão para blocos de concreto vazados é proposta, visto as diferenças observadas quando comparadas com as curvas de normas para o material concreto. Sobre essa recomendação é importante ressaltar que a curva é sugerida a partir dos trabalhos existentes até o momento, assim, visto o reduzido número de pesquisas com esse tipo de bloco acredita-se que esse comportamento poderá sofrer pequenas alterações com a inclusão de mais dados de estudos futuros;

Relativo ao módulo de elasticidade dos blocos, observou-se que a exposição a altas temperaturas afetam de forma mais intensa a deformabilidade do material que sua resistência, as curvas residuais do módulo de elasticidade são mais declinadas que as de resistência residuais e independem do tipo de agregado ou da resistência dos blocos, assim como ocorre no concreto moldado úmido.

6. MODELAGEM NUMÉRICA E MÉTODO DAS ISOTERMAS

Geralmente as normas para projeto dos diferentes tipos de estruturas em situação de incêndio permitem a utilização de métodos alternativos de dimensionamento, seja estruturas de concreto (ABNT NBR 15200: 2012); aço, mista de aço (ABNT NBR 14323: 2013) e ou até mesmo de alvenaria (EN 1996-1-2: 2005). Neste capítulo, a partir do emprego de modelos numéricos-computacionais calibrados com os parâmetros adquiridos nos capítulos 4 e 5, um método simplificado de cálculo baseado no Eurocode 6 é proposto para verificar uma parede de alvenaria estrutural em situação de incêndio quanto a capacidade de carga considerando fogo em uma e ambas as faces. Destaca-se que a modelagem realizada é baseada apenas nos resultados adquiridos na análise das unidades de alvenaria (blocos de concreto). Portanto, ainda incipiente para representar o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio que depende do desempenho resistente a elevadas temperaturas de cada um de seus elementos (blocos, argamassa, eventual armadura, graute e revestimento) e das condições de contorno a que a parede se encontra (carregamento, esbeltez, excentricidade etc.). Entretanto, a abordagem apresenta-se de forma promissora visto que os resultados obtidos se demonstraram coerentes e compatíveis com o ensaio em escala real disponível para o mesmo tipo de bloco. A abordagem deve ser melhorada e implementada com resultado de pesquisas futuras.

6.1 REFERENCIAL TEÓRICO

6.1.1 Modelagem numérica

A modelagem numérica é uma ferramenta poderosa que pode ser utilizada para estudar o comportamento de estruturas sob diferentes condições de contorno. Um dos benefícios da análise numérica é fato de ser menos dispendiosa na investigação frente a análises experimentais. Modelos numéricos também permitem estudar o efeito isolado de cada parâmetro no comportamento de paredes, identificando os mais influentes que afetaram o comportamento global da estrutura. O desafio de sua utilização na alvenaria estrutural é como tratar um elemento estrutural, a parede, formada pela junção de blocos (com e sem grauteamento), argamassa de assentamento e eventuais armaduras de aço, além dos fenômenos não-lineares que ocorrem na interface entre esses materiais. A complexidade do comportamento

se deve a uma série de fatores intervenientes, tais como: o mecanismo de formação de fissuras até eventual ruptura por tração ou compressão da parede, a aderência entre bloco e graute ou bloco e argamassa, as propriedades térmicas e mecânicas dos materiais etc. Dependendo do nível de precisão e da simplicidade desejada, é possível usar diferentes estratégias de modelagem (LOURENÇO, 1996). Além disso, esses modelos precisam ser calibrados e validados com o teste experimental.

Modelos numéricos predecessores, embora com alguma limitação, foram capazes de prever o comportamento de paredes de alvenaria com e sem carregamento em temperaturas elevadas. Gnanakrishnan; Lawther (1989) desenvolveram um modelo simplificado de elementos finitos de deformação plana, usando elementos isoparamétricos quadriláteros de quatro nós. Argamassa e bloco foram modelados separadamente e os resultados obtidos foram consideravelmente mais conservadores. Isso foi atribuído ao fato de que tanto a não linearidade geométrica quanto a fissuração do material frágil não foram incluídas no modelo.

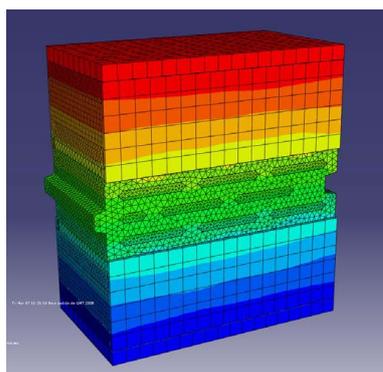
Tentando compreender as características de curvatura de paredes de alvenaria submetidas ao incêndio como forma de analisar os modos de falha de isolamento, integridade e adequação estrutural da parede, Dhanasekar et al. (1994) criaram um modelo de elementos finitos, na época em desenvolvimento, usando elementos de casca de uma camada. O modelo foi validado com resultados de testes em um painel de parede de alvenaria sem carregamento e uma concordância considerável foi alcançada entre a análise e os dados experimentais. O modelo também assumiu uma distribuição linear de temperatura através da parede, ignorando assim as tensões térmicas criadas por uma distribuição de temperatura não linear.

Nadjai *et al.* (2003) apresentam um modelo numérico desenvolvido com base no Método dos Elementos Finitos, o qual é capaz de simular o comportamento estrutural de paredes maciças de alvenaria submetidas a elevadas temperaturas. O modelo contempla situações de incêndio compartimentado (incêndio em apenas um lado). Além disso, leva em consideração as não-linearidades geométricas e de material, incluindo os efeitos da expansão térmica e da fissuração no caso de materiais frágeis. Em Nadjai *et al.* (2003) são apresentados os detalhes sobre a formulação e o desenvolvimento desse modelo numérico, o qual foi intitulado MasSET (*Masonry Subject to Elevated Temperatures*). Segundo os autores, o modelo é capaz de realizar análises termo estruturais em paredes maciças com blocos cerâmicos ou de concreto, incluindo situações com ou sem carregamento. A partir de melhorias realizadas nesse modelo numérico, onde incluiu-se a possibilidade de se considerar, além da alvenaria, as lajes de concreto armado localizadas acima e abaixo das paredes, Nadjai *et al.* (2006) apresenta um estudo cujo objetivo foi avaliar diferentes subpartes do sistema estrutural para a análise do seu comportamento em

situação de incêndio. A ideia foi verificar se o estudo do sistema estrutural completo da edificação é realmente necessário ou se o mesmo pode ser adequadamente representado por suas subpartes na verificação em situação de incêndio.

Poças (2008) efetuou a análise térmica e mecânica de paredes de alvenaria recorrendo ao método dos elementos finitos. Em seu estudo, o comportamento não-linear dos materiais constituintes é considerado relevante, assim como a existência de interfaces entre os blocos e a argamassa. A simulação numérica é efetuada utilizando o software comercial *Abaqus*, que possui uma formulação para o comportamento mecânico do concreto, tendo sido necessário ajustar essa formulação ao problema proposto. É efetuada uma análise tridimensional de modo a ser possível estudar a influência da argamassa de assentamento, dos revestimentos, da junta vertical e dos alvéolos (Figura 6.1). O modelo de simulação numérica do processo de transferência de calor é validado segundo a norma EN 1745 (2012).

Figura 6.1 – Diagrama de distribuição de temperaturas obtidos no processo de simulação.



Fonte: (POÇAS, 2008)

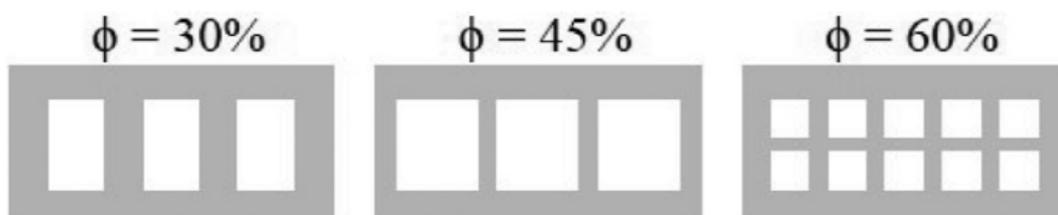
Andreini; Sassu (2011) apresentam um modelo analítico para prever a resistência mecânica de painéis de alvenaria sob ação de compressão e flexão combinadas, com exposição de incêndio-padrão em um lado. É realizada a análise térmica dos painéis, considerando os efeitos de convecção e radiação produzidos pelo incêndio, para determinar as condições de colapso para compressão e flexão combinadas. As análises numéricas, são realizadas com base nos dados retirados da norma europeia EN 1996-1-2 (2005), para paredes de alvenaria de tijolo e concreto de agregado leve, com várias espessuras e tempos de exposição ao incêndio-padrão. Um exemplo numérico demonstra a aplicabilidade do modelo e uma comparação com um conjunto de dados experimentais em painéis de alvenaria demonstra a eficiência do modelo.

Nguyen; Meftah (2014) realizam modelagem numérica na qual o comportamento termoestrutural de duas paredes, ensaiadas anteriormente em Nguyen; Meftah (2012), é investigado. A evolução do estudo ocorre com a análise mais detalhadamente focando no entendimento e representação do *spalling* em blocos cerâmicos furados em situação de incêndio

por meio de análises numéricas em elementos finitos. As geometrias dos blocos e a disposição dos furos (orientados na horizontal e na vertical) também foram analisadas de acordo com a existência ou não de carregamento.

Ferramentas numéricas para estabelecer abordagens simplificadas são apresentadas por Russo; Sciarretta (2016). Este artigo faz parte de uma pesquisa que visa investigar a relação entre o comportamento mecânico durante e após o incêndio de paredes de alvenaria. As análises avaliam prismas de blocos cerâmicos vazados com diferentes configurações e percentuais de vazios (Figura 6.2), os quais foram submetidos a incêndio-padrão. No trabalho, uma abordagem de MEF é aplicada ao problema de desempenho mecânico residual de paredes de alvenaria de compartimentação após falha de isolamento focando na influência das diferenças de geometria e na representação dos blocos constituídos por material único e fictício, de condutividade equivalente, que permite considerar as cavidades de ar. Dentre os principais resultados, destaca-se a boa correlação entre os resultados encontrados com os modelos detalhado (com os vazios dos blocos modelados) e simplificado (blocos maciços equivalentes), indicando um possível caminho para se utilizar modelos numéricos mais simples na simulação da alvenaria estrutural em situação de incêndio.

Figura 6.2 – Blocos com diferentes taxas de vazios (ϕ)



Fonte: Russo e Sciarretta (2016)

Blocos vazados de concreto brasileiros foram avaliados por Rodovalho; Corrêa (2019), o objetivo foi verificar a capacidade de isolamento térmico de alvenarias constituídas por blocos de concreto em situação de incêndio por meio da simulação térmica de prismas. A análise também foi capaz de representar o ar presente nas cavidades dos blocos utilizando a interação fluido-estrutura no software *Abaqus*. Verificaram-se os casos de prisma com e sem revestimento de argamassa nas duas faces, em situação de incêndio. O isolamento térmico do prisma sem revestimento foi mantido por mais de 60 minutos e com a aplicação de revestimento nas duas faces do prisma ocorreu um aumento de 59% em relação a esse tempo. Os campos térmicos foram gerados possibilitando futuras análises termomecânicas.

Percebe-se que a aplicação de modelos numéricos confiáveis para representar a alvenaria em situação de incêndio requer pesquisa avançada e contínua. Desenvolver ferramentas válidas

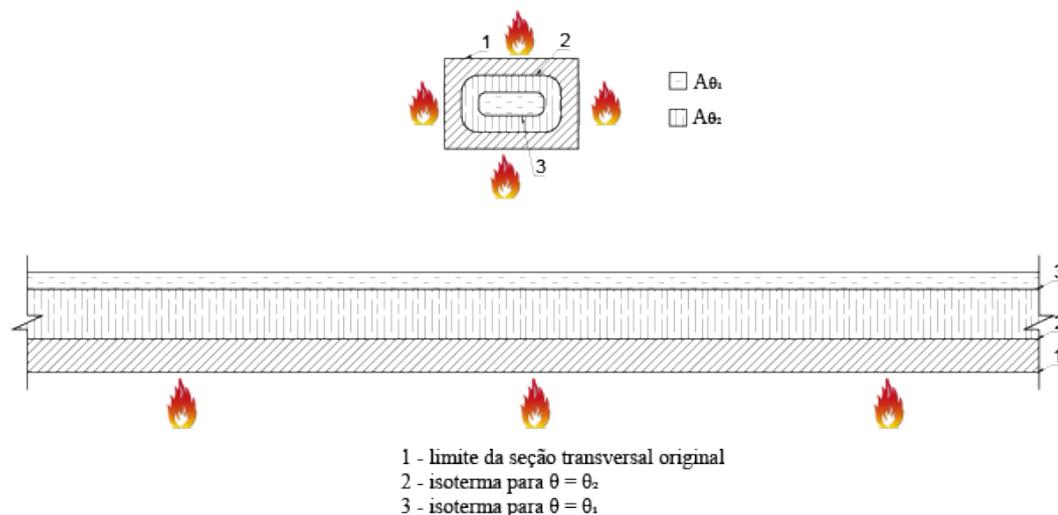
que representem com precisão o seu comportamento incluem descrições precisas de todos os materiais envolvidos e estratégias de solução racionais. Para isso o primeiro passo é investigar as propriedades térmicas e mecânicas reais dos componentes (bloco, argamassa, graute e revestimento) e elementos (prisma, pequena parede e parede) da alvenaria estrutural em altas temperaturas. Juntamente com representação do cenário de um incêndio-padrão, que contemplem as deformações, tensões e prováveis mudanças nas condições de contorno será possível apresentar modelo numérico robusto e preciso da alvenaria exposta ao fogo.

6.1.2 Método simplificado de cálculo

Códigos e normas nacionais e internacionais permitem a utilização de métodos simplificados de dimensionamento de estruturas (de concreto, aço, mista ou de alvenaria) em situação de incêndio, desde que comprovados cientificamente. Para o caso de alvenaria estrutural não é diferente, o EN 1996-1-2: 2005 apresenta método de cálculo simplificado, onde a capacidade de carga deve ser determinada considerando as condições de contorno na seção transversal residual da alvenaria para períodos determinados de exposição ao fogo usando o carregamento à temperatura normal. Esse método é válido para paredes e pilares de alvenaria sob exposição ao incêndio-padrão construídas com unidades e combinações de argamassa que foram calibrados com resultados de ensaios realizados. Entretanto, o princípio do método pode ser usado se os resultados da calibração estiverem disponíveis para unidades não cobertas pela norma (EN 1996-1-2: 2005).

Entre os métodos alternativos ao método tabular de projeto que são propostos por diferentes normas nacionais e internacionais, o método simplificado possui uma abordagem mais prática, visto que pode não ter a necessidade de análises numéricas-computacionais mais avançadas que levem em consideração tensões e deformações térmicas que surgem na exposição ao incêndio. O processo de dimensionamento simplificado consiste em determinar a distribuição de temperatura na seção transversal, definindo a seção estruturalmente ineficaz (área com temperatura superior a θ_2) a seção residual (região com temperaturas entre θ_1 e θ_2). Com a seção definida (Figura 6.3), calcula-se a capacidade de carga no estado limite último com a seção residual, verificando se esta capacidade resistente é maior do que a solicitante para a combinação de ações relevante em situação de incêndio. As equações e parâmetros utilizados para o dimensionamento conforme o EN 1996-1-2: 2005 foram apresentados no item 2.3.3 deste trabalho e por simplificação, para evitar a reincidência não serão aqui apresentadas novamente.

Figura 6.3 – Ilustração de áreas da alvenaria em temperaturas até θ_1 , entre θ_1 e θ_2 e áreas estruturalmente ineficazes (acima de θ_2)



Fonte: adaptado EN 1996-1-2: 2005

A distribuição da temperatura ao longo de uma seção de alvenaria e a temperatura na qual a alvenaria se torna ineficaz, em função do tempo de exposição ao fogo, devem ser obtidas a partir dos resultados dos ensaios em laboratório ou de uma base de dados de resultados de ensaios disponível a nível nacional. Na ausência de resultados podem ser usados os valores da Tabela 6.1.

Tabela 6.1 – Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 de acordo com o material

Alvenaria sem revestimento	Valores da constante (c)	Temperatura (°C)	
		θ_1	θ_2
Blocos de agregado denso com argamassa de uso geral	$f d\theta_2 / f d\theta_1$	100	500
Blocos cerâmicos com argamassa de uso geral		100	600
Blocos de silicato de cálcio com argamassa de junta fina		100	500
Blocos de agregado leve com argamassa de uso geral		100	400

Fonte: adaptado EN 1996-1-2 (2005)

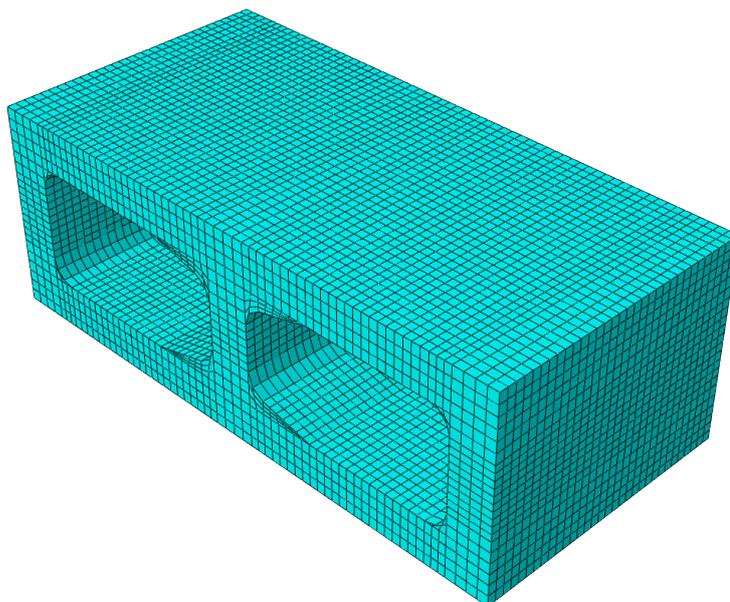
6.2 METODOLOGIA

6.2.1 Modelagem numérica

O pacote de elementos finitos *Abaqus* (2017) foi usado para modelar os blocos de concreto vazados e a distribuição de temperatura na seção transversal a partir das propriedades obtidas experimentalmente e já apresentadas no capítulo 4 deste trabalho. A micromodelagem

térmica da unidade de alvenaria (bloco de concreto vazado) teve como objetivo apresentar um mapeamento das isotermas na seção transversal da unidade; definindo a área da seção transversal estruturalmente ineficaz e a área com resistência residual para cada tempo de exposição ao incêndio-padrão. Áreas estas necessárias para o desenvolvimento do modelo simplificado de cálculo que será apresentado adiante. Os elementos finitos utilizados foram do tipo DC3D8: bloco de transferência linear de calor de 8 nós. Diferentemente de outros trabalhos observados no referencial teórico, optou-se por não simplificar a geometria das unidades de alvenaria, sendo assim, os blocos foram modelados obedecendo a geometria real, considerando a mudança de espessura dos septos ao longo da altura (vazados em tronco cônico) e as mísulas existentes nas paredes do bloco. Após análises de sensibilidade preliminares, o refinamento da malha foi definido de forma que os elementos finitos tivessem dimensões de aproximadamente 6 mm (seis milímetros), conforme observado na Figura 6.4.

Figura 6.4 – Geometria e malha do bloco de concreto vazado analisado



Fonte: Próprio autor

Inicialmente, para garantir que o bloco seja modelado adequadamente usando o MEF proposto, os parâmetros que definem vários recursos do modelo precisam ser calibrados com os valores experimentais. Nesta modelagem foram utilizados os dados experimentais adquiridos nas diferentes instrumentações desenvolvidas na metodologia de ensaio proposta e apresentada no capítulo 3. As temperaturas lidas nas faces dos blocos – Instrumentação C (Figura 3.6) foram impostas às superfícies dos diferentes blocos e as leituras adquiridas no centro das paredes dos blocos – Instrumentação B (Figura 3.5) foram comparadas com os valores obtidos no modelo numérico para assim validá-lo. O principal desafio para completar este processo de calibração

foi que apesar das propriedades térmicas (condutividade térmica e calor específico) do material dos vários blocos (6B, 6C, 6G, 12B, 12C, 12G, 24B, 24C e 24G) terem sido experimentalmente obtidas através da técnica *Hot Disk* (capítulo 4), a mudança dos valores dessas propriedades com a temperatura não foram obtidas experimentalmente. Para sanar essa lacuna, de posse dos valores experimentais em temperatura ambiente, utilizou-se as relações propostas pelo EN 1996-1-2 apresentados na Figura 4.1. Para a mudança de densidade com a temperatura, os valores reais obtidos experimentalmente de cada bloco em cada temperatura foram utilizados (Figura 4.30). Destaca-se a excelente correlação entre os resultados lidos experimentalmente com os modelos numéricos.

Os valores de entrada utilizados para a modelagem térmica de cada bloco são apresentados nas Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4. Ressaltado que os valores de condutividade térmica e calor específico nas temperaturas elevadas obedeceram às relações propostas pelo EN 1992-1-2.

Tabela 6.2 – Densidade para diferentes blocos × temperaturas

Temperatura (°C)	Densidade (kg/m ³)								
	6B	6C	6G	12B	12C	12G	24B	24C	24G
20	2221	2187	2190	2230	2203	2263	2382	2283	2289
100	2191	2170	2150	2209	2186	2232	2315	2241	2251
200	2189	2161	2135	2195	2182	2228	2309	2220	2244
300	2188	2159	2120	2189	2177	2227	2302	2209	2236
400	2177	2159	2110	2176	2162	2210	2293	2205	2229
500	2142	2157	2110	2176	2149	2209	2255	2193	2213
600	2133	2143	2100	2158	2125	2186	2247	2186	2208
700	2071	2091	2080	2121	2084	2157	2221	2150	2151
800	2022		2070	2087	2056	2141	2204	2125	2129

Fonte: Próprio autor

Tabela 6.3 – Condutividade térmica para diferentes blocos × temperaturas

Temperatura (°C)	Condutividade Térmica (W/m·K)								
	6B	6C	6G	12B	12C	12G	24B	24C	24G
20	1.17	1.53	1.45	1.31	1.66	1.68	1.53	1.70	1.65
100	1.07	1.39	1.32	1.19	1.52	1.53	1.40	1.55	1.51
200	0.95	1.24	1.18	1.06	1.35	1.36	1.24	1.38	1.34
300	0.84	1.10	1.04	0.94	1.20	1.21	1.10	1.22	1.19
400	0.75	0.98	0.93	0.83	1.06	1.07	0.98	1.08	1.06
500	0.67	0.87	0.82	0.74	0.94	0.95	0.87	0.96	0.94
600	0.59	0.77	0.73	0.66	0.84	0.85	0.78	0.86	0.84
700	0.53	0.70	0.66	0.59	0.76	0.76	0.70	0.77	0.75
800	0.49	0.63	0.60	0.54	0.69	0.69	0.63	0.70	0.69
1200	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Próprio autor

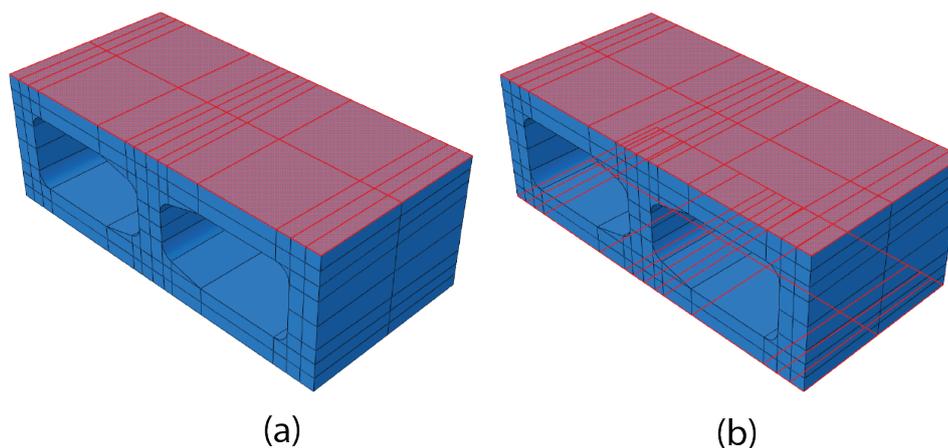
Tabela 6.4 – Calor específico para diferentes blocos × temperaturas

Temperatura (°C)	Calor Específico (J/Kg·K)								
	6B	6C	6G	12B	12C	12G	24B	24C	24G
20	782.4	775.0	756.1	875.8	846.7	865.2	1010.4	989.0	947.0
100	805.9	798.3	778.7	902.1	872.1	891.1	1040.7	1018.7	975.4
140	4694.5	4650.3	4536.4	5254.9	5080.0	5191.1	6062.2	5934.1	5682.1
150	3912.1	3875.2	3780.3	4379.1	4233.3	4325.9	5051.8	4945.1	4735.1
200	2347.3	2325.1	2268.2	2627.5	2540.0	2595.6	3031.1	2967.1	2841.1
400	782.4	775.0	756.1	875.8	846.7	865.2	1010.4	989.0	947.0
1200	782.4	775.0	756.1	875.8	846.7	865.2	1010.4	989.0	947.0

Fonte: Próprio autor

Após ser validado com base em resultados experimentais, o modelo foi utilizado em uma análise paramétrica com o objetivo avaliar a distribuição de temperatura na seção transversal do bloco e, dessa forma, determinar as áreas da seção transversal estruturalmente ineficaz e residual para cada TRRF. Para tanto foi considerado a exposição do incêndio-padrão em uma e duas faces (Figura 6.5).

Figura 6.9 – Faces de exposição ao incêndio-padrão (a) uma face (b) duas faces



Fonte: Próprio autor

Conforme analisado e proposto no Capítulo 5, é possível perceber que a resistência residual dos blocos vazados de concreto brasileiro, se mantêm até 300°C para blocos de agregados silicosos e 400°C para blocos de agregado calcário, e conseguem manter resistência superior a 60% da resistência inicial até os 600°C (Figura 5.22). Deste modo, baseando-se nos resultados dos ensaios nacionais, as temperaturas na qual a alvenaria se torna ineficaz (θ_2) e não sofrem decréscimo de resistência (θ_1) são apresentadas na Tabela 6.5. Como resultado é possível obter as isotermas necessárias para proposta de metodologia de cálculo simplificada.

Tabela 6.5 – Valores das temperaturas θ_1 e θ_2 para blocos de concreto vazado

Tipo de agregado	c ($f_{\theta_1}/f_{\theta_2}$)	Temperatura (°C)	
		θ_1	θ_2
Basalto	0.6	300	600
Calcário		400	600
Gnaisse		300	600

Fonte: Próprio autor

6.2.2 Método simplificado de cálculo

De posse das isothermas obtidas pela modelagem numérica foi possível determinar as áreas de ineficiência estrutural e residuais. Para o emprego do método simplificado de cálculo consiste na adoção das seguintes hipóteses:

- Os valores de cálculo dos esforços solicitantes em situação de incêndio ($S_{d,fi}$) podem ser calculados conforme norma de ação e segurança nas estruturas vigente do país. No caso do Brasil, a ABNT NBR 8681: 2003, já nos países europeus, a (EN 1990: 2002). Eventualmente, por simplificação pode-se adotar valores reduzidos (α) da respectiva solicitação à temperatura ambiente descontado o efeito do vento, 70% no Brasil e 70% ou 65% de acordo com o Eurocode;
- Os valores de cálculo dos esforços resistentes em situação de incêndio de cada elemento podem ser calculados com base na distribuição de temperatura obtida para sua seção transversal conforme o TRRF necessário e considerando exposição ao incêndio-padrão. Essa distribuição de temperatura pode ser obtida na literatura técnica ou calculada em programas específicos de computador;
- Os esforços resistentes podem ser calculados pelos critérios estabelecidos na norma de dimensionamento da estrutura para temperatura ambiente, adotando a resistência em situação de incêndio. No Brasil, para alvenaria estrutural em temperatura ambiente, tem-se ABNT NBR 16868-1, na Europa o Eurocode 6;
- Os esforços resistentes podem ser determinados empregando métodos que consideram a seção transversal reduzida, em situação de incêndio.

Desta forma, seguindo as hipóteses básicas de cálculo expostas, o procedimento para verificação da alvenaria estrutural em situação de incêndio seguiu as recomendações do Eurocode 6 (ver item 2.3.3) empregando as isothermas obtidas na modelagem numérica realizada com base nos dados adquiridos e examinados no capítulo 4 e levando em consideração as perdas de resistências já analisadas no capítulo 5 e propostas conforme apresentado na Figura 5.22.

Para verificar a aplicabilidade do modelo proposto na alvenaria estrutural brasileira, foi retomado o estudo de caso apresentado no item 2.4.1, realizando a verificação da parede mais solicitada no pavimento térreo, considerando-a como uma parede separadora de ambientes, ou seja, exposta ao fogo em apenas um lado (critério REI) e parede não separadora de ambientes, exposta ao fogo nos dois lados (critério R). Quanto a adoção do Eurocode 6, duas análises foram realizadas: no caso A, seguiu-se as recomendações do EN 1996-1-2 (2005) adotando o fator redutor de esbeltez e excentricidade do EN 1996-1-1 (2011); no caso B, uma adaptação das recomendações do EN 1996-1-2 (2005) e do método simplificado de cálculo de alvenaria não armada proposto pela EN 1996-3 (2011), onde a espessura efetiva (t_{ef}) é substituída pela espessura residual (t_{Fr}) para obtenção do fator de redução da capacidade de carga da parede. Essa proposta pretende simplificar o método de cálculo desde que não se tenha prejuízo com a segurança das estruturas.

Na carência de ensaios de paredes carregadas e expostas a incêndio-padrão, utilizou-se o único ensaio encontrado no país para parede com o mesmo bloco estudado neste trabalho. O ensaio com exposição de incêndio-padrão em um dos lados foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT e com resultados apresentados na Tabela 6.6 e já divulgados pela BLOCO BRASIL *et al.* (2021). No ensaio, a parede atendeu o critério I até os 80 minutos, os critérios R não apresentou nenhum problema até os 120 minutos de duração do ensaio. Não foi realizada a análise confrontando os resultados obtidos por esse método simplificado de cálculo com as prescrições do método tabular fornecido pelo EN 1996-1-2 (2005), de forma a verificar a paridade dos métodos. Entende-se, como exposto no capítulo 2, que cada país utiliza materiais e geometrias diferentes em seus blocos. A densidade do material apresentado nas tabelas não condiz com os blocos de concreto vazado brasileiros, além disso, as amplas faixas de valores não permitiriam uma análise significativa.

Tabela 6.6 – Dados do relatório de ensaio parede submetida a incêndio-padrão

Identificação do Ensaio		1 123 380-203
BLOCO	L. × C. (mm)	140 × 390
	Volume vazios	0.45
	Classe de aplicação (f_{bk})	Classe A 12,4 MPa
PAREDE	C. × A. (m)	2,60 × 2,60
	Carga	10.000 kgf/m
	Argamassa assentamento	Industrializada (esp. 10 mm)

REVESTIMENTO		Sem revestimento
RESULTADO	I (min)	80
	E (min)	> 120
	R (min)	> 120

Fonte: adaptado BLOCO BRASIL *et al.* (2021)

6.3 APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados referentes aos modelos numéricos realizados para calibração, os modelos numéricos para determinação das isotermas dos diferentes blocos e o modelo simplificado de cálculo proposto para alvenaria em situação de incêndio, comparando os valores obtidos pelo método alternativo com ensaio disponibilizado.

6.3.1 Validação do modelo numérico

A calibração e validação do modelo numérico é necessária dada a ausência de resultados experimentais de paredes de alvenaria com blocos de concreto instrumentadas de forma que possibilite a obtenção das isotermas em sua seção transversal. Para tanto, conforme mencionado na metodologia deste capítulo, utilizou-se os dados experimentais obtidos a partir da instrumentação dos blocos de concreto vazados (Capítulo 3) juntamente com as propriedades térmicas já apresentadas nas Tabelas 6.2, 6.3 e 6.4; obtidas a partir dos ensaios detalhados nos Capítulos 4 e 5. Optou-se em apresentar os resultados de calibração por meio de tabela, visto que as diferenças obtidas foram relativamente pequenas e dificilmente perceptível por uma trajetória gráfica. Na Tabela 6.7 são apresentados alguns valores das leituras realizadas no ensaio experimental - Instrumentação B (Figura 3.5), bem como os valores já calibrados obtidos no modelo numérico e a diferença de temperatura encontrada entre o modelo numérico e o ensaio experimental. Os valores de todas as temperaturas são apresentados no Apêndice 8.18.

Tabela 6.7– Temperaturas obtida nos pontos de medição, na modelagem e a diferença

Tempo (min)	Ensaio							Modelagem							Diferença Ensaio × Modelagem						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	MP1	MP2	MP3	MP4	MP5	MP6	MP7	1	2	3	4	5	6	7
0	25	25	25	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	-	-	-	-1.0	-	-	-
80	105	105	103	100	103	105	105	103	103	103	103	103	103	103	2.3	2.3	0.4	-2.5	0.4	2.3	2.3
176	201	200	199	195	200	201	201	193	193	193	191	193	193	193	8.3	7.3	6.4	3.9	7.4	8.3	8.3
280	303	302	304	301	304	305	303	299	299	299	298	299	299	299	4.1	3.1	5.1	3.0	5.1	6.1	4.1
376	399	397	400	397	399	400	399	397	397	397	396	397	397	397	2.5	0.5	3.5	1.3	2.5	3.5	2.5
480	503	500	504	502	502	504	503	500	500	500	500	500	500	500	2.7	-0.3	3.7	2.4	1.7	3.7	2.7
576	599	596	599	598	597	599	599	596	596	596	594	596	596	596	3.4	0.4	3.4	3.7	1.4	3.4	3.4
680	703	699	703	702	699	703	703	699	699	699	698	699	699	699	3.8	-0.2	3.9	4.2	-0.1	3.8	3.8
784	799	794	799	798	794	798	799	797	797	797	796	797	797	797	2.0	-3.0	2.0	2.0	-3.0	1.0	2.0
792	799	799	799	798	799	798	799	799	799	799	798	799	799	799	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	-0.7	0.3
808	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	799	800	800	800	0.3	0.3	0.3	0.5	0.3	0.3	0.3

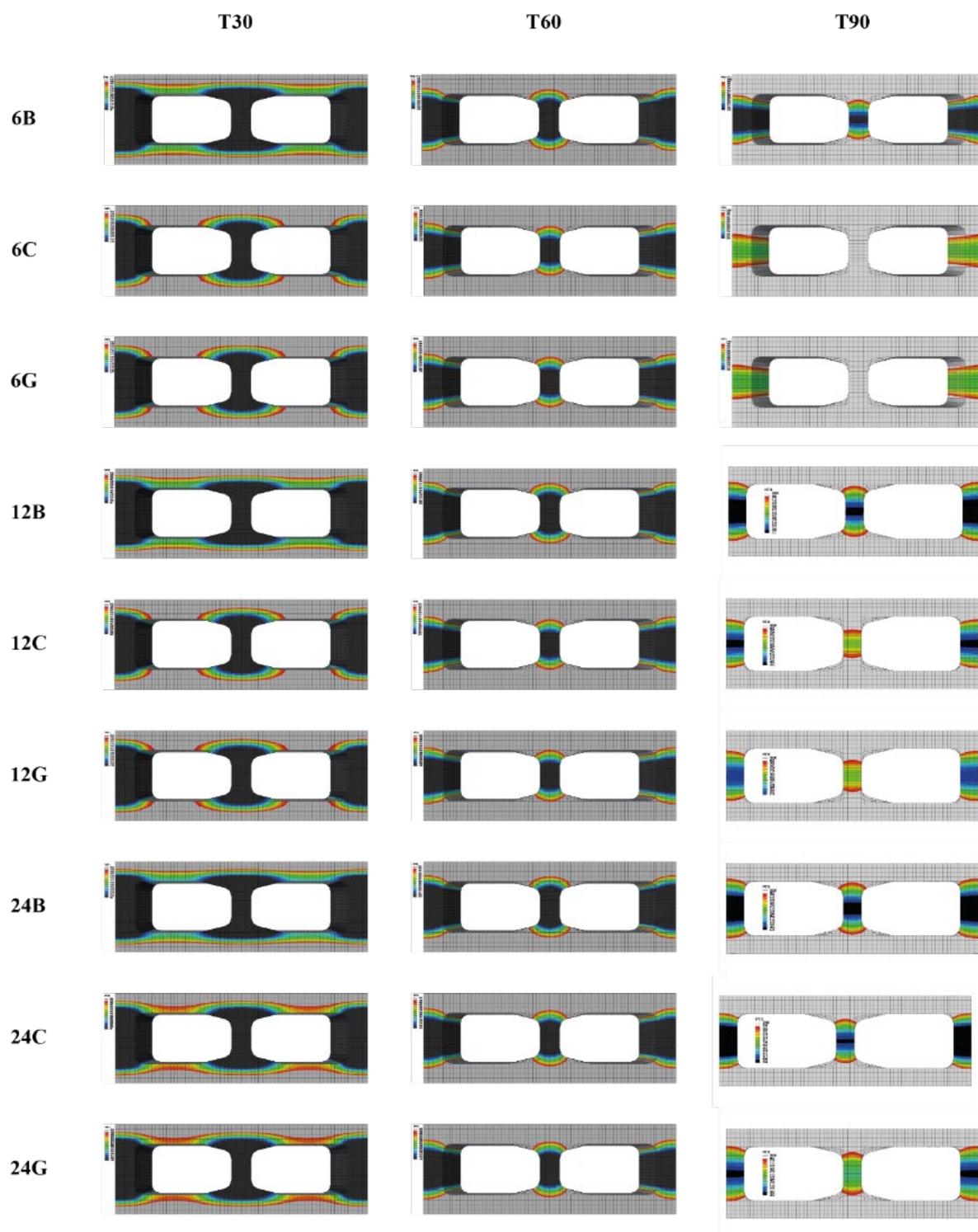
Fonte: próprio autor

Devido à ausência dos parâmetros térmicos em elevadas temperaturas, foram realizados vários modelos variando os parâmetros de condutividade térmica e calor específico seguindo as recomendações da EN 1992-1-2 (2004) e EN 1996-1-2 (2005) para avaliar a sensibilidade do modelo e comparar sua precisão com os dados obtidos nos ensaios experimentais. A adoção das recomendações da EN 1996-1-2 (2005) mostraram-se mais precisas. Ainda que o modelo numérico tenha se apresentado com boa precisão é possível perceber algumas diferenças frente aos valores de ensaio. Apesar de pequenas, essas diferenças são bem aceitáveis visto o grau de temperaturas e as pequenas imprecisões ou imperfeições do bloco, naturalmente encontrados em ensaios experimentais. Observa-se ainda que as maiores diferenças apresentadas se encontram entre 100 e 200°C, acredita-se que a maior diferença nessa faixa de temperatura seja atribuída ao “pico” da mudança no calor específico em função do teor de umidade (Figura 4.2).

6.3.2 Determinação das isotermas

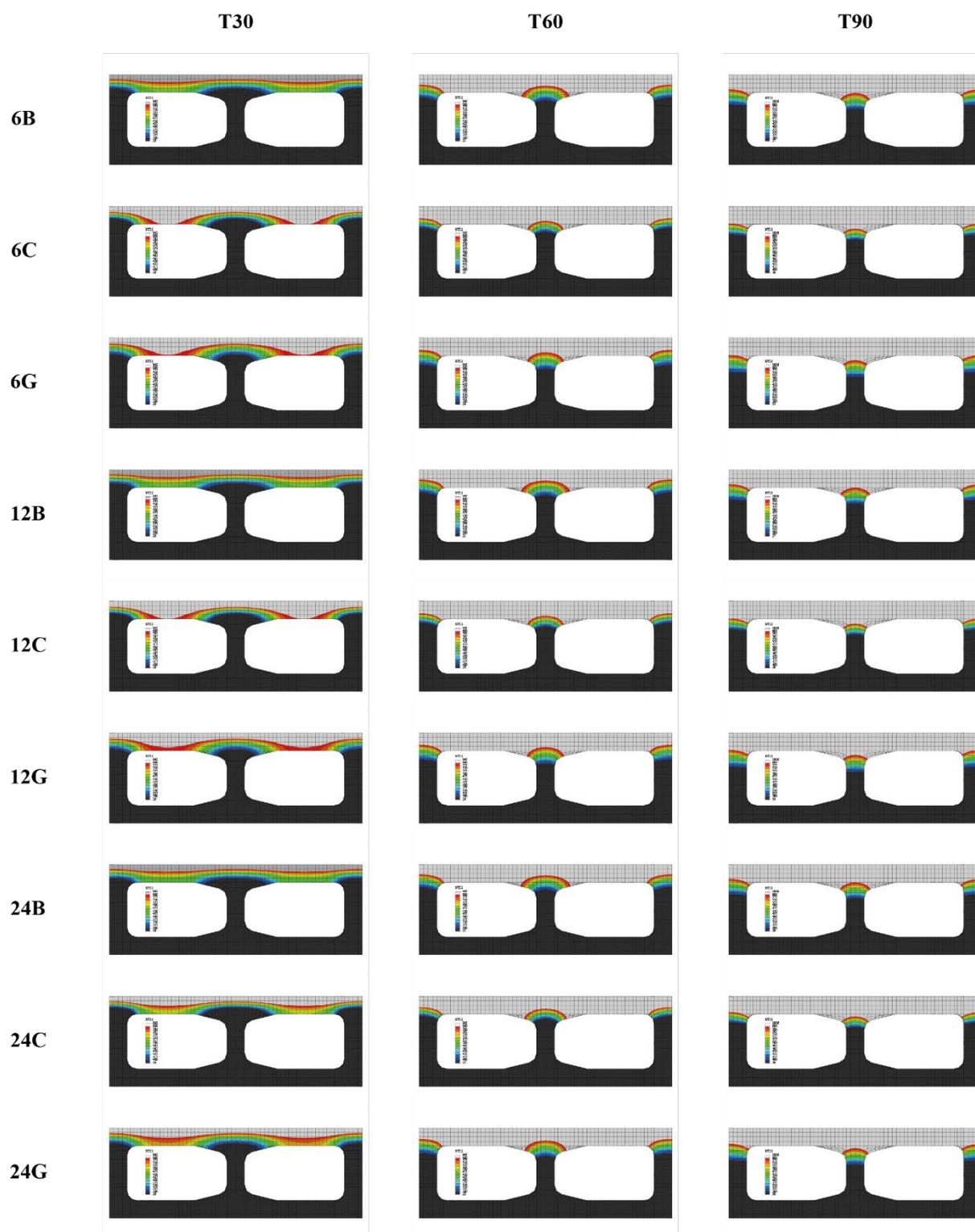
Uma vez que o modelo numérico foi considerado validado, a etapa seguinte foi o desenvolvimento de estudo paramétrico no qual foi avaliada a distribuição de temperatura na seção transversal da unidade com a variação do tipo de agregado, resistência do bloco e a exposição de incêndio-padrão em ambos os lados (critério R) ou em apenas um lado (critério REI), para os diferentes tempos desejados (T30, T60 e T90). Nas Figura 6.6 e 6.7 são apresentadas as isotermas obtidas para cada tipo de bloco nos diferentes TRF estudados. A região na cor cinza representa a área ineficaz, ou seja, região que superou a temperatura θ_2 (600°C), a região colorida representa a área com temperatura entre θ_1 e θ_2 , e a região na cor preta representa a área que matem sua resistência original, temperatura abaixo de θ_1 (300°C para blocos com agregado silicoso e 400°C para blocos com agregado calcário). É importante ressaltar que as análises foram realizadas sem consideração de nenhum tipo de revestimento.

Figura 6.6 – Isothermas para exposição ao incêndio-padrão em duas faces



Fonte: Próprio autor

Figura 6.7 – Isotermas para exposição ao incêndio-padrão em um lado



Fonte: Próprio autor

Os resultados obtidos considerando incêndio-padrão nos dois lados são apresentados nas Tabela 6.8 a 6.10. Nas tabelas é possível observar para cada tipo de bloco estudado a área da seção transversal que se torna ineficaz, a área com resistência residual e a área que não sofreu

nenhum dano quanto a sua resistência. Além disso, para simplificação dos cálculos que serão realizados em item posterior, também é apresentado um coeficiente ponderado (k) que toma em consideração a área da seção transversal do bloco com sua respectiva resistência residual ($f_d\theta_1 A\theta_1 + f_d\theta_2 A\theta_2$).

Tabela 6.8 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T30 - fogo em ambos)

		T30						
Bloco	$A_{inefetiva}$		$A_{\theta 2}$		$A_{\theta 1}$		k	
	cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%		
Ambos os lados	6B	76.0	25.5%	126.7	42.5%	95.4	32.0%	0.575
	6C	127.9	42.9%	71.7	24.0%	98.5	33.1%	0.475
	6G	122.8	41.2%	97.6	32.7%	77.7	26.1%	0.457
	12B	73.4	24.6%	128.2	43.0%	96.5	32.4%	0.582
	12C	123.9	41.6%	74.5	25.0%	99.8	33.5%	0.485
	12G	112.6	37.8%	106.2	35.6%	79.3	26.6%	0.480
	24B	70.4	23.6%	128.6	43.1%	99.1	33.2%	0.591
	24C	87.5	29.4%	98.5	33.0%	112.1	37.6%	0.574
	24G	89.5	30.0%	121.7	40.8%	86.9	29.1%	0.536

Tabela 6.9 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T60 - fogo em ambos)

		T60						
Bloco	$A_{inefetiva}$		$A_{\theta 2}$		$A_{\theta 1}$		k	
	cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%		
Ambos os lados	6B	195.4	65.5%	52.2	17.5%	50.6	17.0%	0.275
	6C	211.8	71.0%	33.7	11.3%	52.6	17.6%	0.244
	6G	211.5	70.9%	48.4	16.2%	38.3	12.8%	0.226
	12B	194.2	65.2%	52.6	17.6%	51.2	17.2%	0.278
	12C	211.8	71.0%	33.2	11.1%	53.1	17.8%	0.245
	12G	210.2	70.5%	48.5	16.3%	39.4	13.2%	0.230
	24B	192.5	64.6%	53.1	17.8%	52.5	17.6%	0.283
	24C	202.5	67.9%	35.9	12.1%	59.7	20.0%	0.273
	24G	203.3	68.2%	49.7	16.7%	45.1	15.1%	0.251

Fonte: próprio autor

Tabela 6.10 – Áreas da seção transversal e coeficiente de resistência ponderado (T90 - fogo em ambos)

Bloco		T90						k
		A _{inefetiva}		A _{θ2}		A _{θ1}		
		cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%	
Ambos os lados	6B	226.5	76.0%	51.0	17.1%	20.6	6.9%	0.172
	6C	246.7	82.7%	51.4	17.3%	0.0	0.0%	0.104
	6G	245.1	82.2%	53.0	17.8%	0.0	0.0%	0.107
	12B	225.6	75.7%	49.0	16.4%	23.5	7.9%	0.178
	12C	245.9	82.5%	45.8	15.4%	6.4	2.1%	0.114
	12G	243.0	81.5%	55.1	18.5%	0.0	0.0%	0.111
	24B	224.1	75.2%	46.7	15.7%	27.3	9.2%	0.186
	24C	233.0	78.2%	37.4	12.5%	27.7	9.3%	0.168
	24G	233.9	78.5%	58.2	19.5%	6.0	2.0%	0.137

Fonte: próprio autor

Na consideração de incêndio-padrão de apenas um lado, faz-se necessário considerar o diferencial de temperaturas na seção transversal do bloco, que provocará na parede uma excentricidade produzida pelas dilatações térmicas divergentes em cada face do bloco. Com esse propósito, o (EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION, 2005) leva em consideração o t_{Fr} , que é a espessura da seção transversal cuja temperatura não excedeu a temperatura θ_2 , considerado o valor de 600°C neste trabalho. Os resultados alcançados atendendo ao incêndio-padrão em apenas um dos lados são apresentados nas Tabelas 6.11 a 6.13.

Tabela 6.11 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T30 - fogo um lado)

Bloco		T30						k	t _{Fr} (mm)
		A _{inefetiva}		A _{θ2}		A _{θ1}			
		cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%		
Um lado	6B	37.2	12.5%	64.0	21.5%	197.0	66.1%	0.789	130
	6C	63.0	21.1%	36.2	12.1%	198.9	66.7%	0.740	124
	6G	58.6	19.7%	50.5	16.9%	189.0	63.4%	0.736	125
	12B	34.0	11.4%	65.5	22.0%	198.7	66.6%	0.798	131
	12C	60.7	20.4%	37.2	12.5%	200.2	67.2%	0.747	124
	12G	56.3	18.9%	52.7	17.7%	189.2	63.5%	0.741	126
	24B	32.6	10.9%	65.5	22.0%	200.0	67.1%	0.803	132
	24C	43.9	14.7%	49.0	16.4%	205.2	68.8%	0.787	129
	24G	42.3	14.2%	62.2	20.9%	193.6	64.9%	0.775	129

Fonte: próprio autor

Tabela 6.12 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T60 - fogo um lado)

Um lado		T60							
		A _{inefetiva}		A ₀₂		A ₀₁		k	t _{Fr} (mm)
		cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%		
6B	96.4	32.3%	26.0	8.7%	175.8	59.0%	0.642	115	
6C	104.8	35.1%	16.4	5.5%	176.9	59.3%	0.627	113	
6G	104.3	35.0%	23.4	7.8%	170.5	57.2%	0.619	113	
12B	96.1	32.2%	26.1	8.8%	175.9	59.0%	0.643	115	
12C	104.6	35.1%	16.4	5.5%	177.1	59.4%	0.627	113	
12G	103.4	34.7%	23.7	7.9%	171.0	57.4%	0.621	113	
24B	94.4	31.7%	26.8	9.0%	176.9	59.3%	0.647	116	
24C	100.1	33.6%	17.7	5.9%	180.3	60.5%	0.640	114	
24G	100.6	33.7%	24.5	8.2%	173.1	58.0%	0.630	114	

Fonte: próprio autor

Tabela 6.13 – Áreas da seção transversal, coeficiente e espessura residual (T90 - fogo um lado)

Um lado		T90							
		A _{inefetiva}		A ₀₂		A ₀₁		k	t _{Fr} (mm)
		cm ²	%	cm ²	%	cm ²	%		
6B	110.7	37.1%	20.6	6.9%	166.8	56.0%	0.601	112	
6C	116.3	39.0%	13.7	4.6%	168.1	56.4%	0.591	110	
6G	115.9	38.9%	21.3	7.1%	161.0	54.0%	0.583	110	
12B	110.6	37.1%	20.7	6.9%	166.8	56.0%	0.601	112	
12C	115.7	38.8%	13.5	4.5%	168.9	56.7%	0.594	110	
12G	115.7	38.8%	21.2	7.1%	161.2	54.1%	0.583	110	
24B	110.0	36.9%	20.7	6.9%	167.4	56.2%	0.603	112	
24C	113.7	38.2%	13.5	4.5%	170.9	57.3%	0.600	111	
24G	113.4	38.0%	20.7	6.9%	164.0	55.0%	0.592	111	

Fonte: próprio autor

Analisando os resultados obtidos é possível perceber que o modelo numérico foi capaz de identificar a influência do tipo de agregado e da resistência de cada tipo de bloco. Em geral, os blocos com agregado de basalto obtiveram uma melhor relação de área e resistência residual quando submetidos ao incêndio-padrão em um ou dois lados e a mudança de resistência para um bloco com o mesmo tipo de agregado trouxe melhoras, mas não muito significativas.

Observando os valores encontrados quando considerado fogo-padrão em ambos os lados é possível perceber que o agregado basalto teve influência mais significativa para os blocos com resistência nominal até 12 MPa e tempo de resistência ao fogo de 30 minutos (T30), os blocos com agregado de calcário e gnisso alcançaram valores semelhantes. Apesar de existir uma melhora no comportamento com o aumento da classe de resistência para um mesmo tipo de agregado, esta melhora não foi significativa, corroborando com o apresentado no Capítulo

5. Ainda sobre incêndio-padrão em ambos os lados, observa-se que com o acréscimo do tempo (T60 e T90) a perda de área e capacidade portante foi fortemente comprometida e tipo de agregado ou resistência nominal do bloco fez pouca diferença na resistência residual.

Verificando os dados obtidos para incêndio-padrão em apenas um lado também se verifica um comportamento levemente superior alcançado pelo agregado basalto, além disso, a classe de resistência pouco influencia no comportamento residual, principalmente para os tempos e classe de resistência maiores. Também foi possível confirmar, que após o tempo de resistência ao fogo de 60 minutos, a perda da capacidade portante residual diminui de forma mais lenta, devido à baixa condutividade do concreto e a característica da curva de incêndio-padrão que tende a crescer de maneira mais branda.

Comparando-se a incidência de fogo-padrão em um e dois lados é possível perceber o quão agressivo o incêndio pode ser aos blocos de concreto. Entretanto, devido à baixa condutividade do material, os blocos de concreto apresentam bom comportamento como material isolante, isso é mais facilmente confirmado quando se averigua a espessura residual (t_{Fr}) dos blocos. Para o caso mais crítico 30 milímetros de concreto foram suficientes para retardar os efeitos deletérios do incêndio para o tempo de resistência ao fogo de 90 minutos.

6.3.3 Método das isotermas

6.3.3.1 Análise de parede do estudo de caso

Com a obtenção das isotermas e consequente definição das áreas da seção transversal (ineficaz, com resistência residual e que não sofreu danos quanto a sua resistência), bem como a espessura residual para cada tempo de resistência proposto; foi verificada a aplicabilidade do método simplificado de cálculo baseado nas isotermas propostas neste trabalho sem consideração de revestimento. Para efeito didático, a investigação consistiu na análise da parede mais solicitada no pavimento térreo de um edifício de 12 pavimentos, tipicamente encontrado no país, mesmo estudo de caso apresentado no item 2.4.1 desta tese. É importante lembrar que, em situação real de projeto, todas as paredes devem ser verificadas conforme suas características, funções e carregamento. No estudo de caso, após dimensionamento da parede em situação ambiente, foram prescritos blocos de 12 MPa (área bruta). A análise considerou o caso em que a parede é separadora de ambientes, ou seja, exposta ao fogo em apenas um lado (critério REI) e no caso em que a mesma parede não seja separadora de ambientes, exposta ao fogo nos dois lados (critério R).

Para a primeira análise (Caso 1A), adotou-se os blocos prescritos no estudo de caso 12 MPa (área bruta) e com as propriedades geométricas dos blocos estudados neste trabalho,

resultando numa resistência na área líquida de 22 MPa. Adotou-se ainda, argamassa de 8 MPa, conforme sugestão do Anexo F, da ABNT NBR 16868-1 (2020). Na Tabela 6.14 são apresentados os valores das tensões de cálculo resistentes e solicitadas para cada tipo de bloco adotando-se o critério das isothermas propostos na modelagem numérica deste trabalho e seguindo os procedimentos de cálculos propostos pela EN 1996-1-2 (2005) e (EN 1996-1-1 (2011). É válido ressaltar que por se tratar de parede central com lajes simétricas de ambos os lados, no andar térreo, onde a força normal é bem mais significativa que o momento fletor, foi adotada a excentricidade mínima prescrita em norma ($0,05t_e$). Na Tabela 6.14, os valores de tensões se encontram em megapascal (MPa) e o indicativo “OK” é atribuído ao caso em que $R_{d,fi} \geq S_{d,fi}$, caso contrário atribui-se o valor de “NÃO”. Também é apresentado as relações entre S_d/R_d para temperatura ambiente, α (relação entre $S_{d,fi}/S_d$), μ_0 (relação de $S_{d,fi}/R_d$) e relação entre $R_{d,fi}/S_{d,fi}$. Relações estas, fundamentais para as análises futuras.

Tabela 6.14 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 1A)

		S_d/R_d	α	μ_0												
		0.74	0.62	0.46												
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90					
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$				
	12B	2.96	2.20	1.37	1.61	1.17	OK	1.21	0.88	NÃO	1.11	0.81	NÃO			
	12C				1.58	1.15	OK	1.27	0.93	NÃO	1.19	0.86	NÃO			
12G	1.36				0.99	NÃO	1.05	0.77	NÃO	0.97	0.70	NÃO				
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90					
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$				
	12B	2.96	2.20	1.37	1.72	1.25	OK	0.82	0.60	NÃO	0.53	0.38	NÃO			
	12C				1.43	1.05	OK	0.72	0.53	NÃO	0.34	0.25	NÃO			
12G	1.42				1.03	OK	0.68	0.50	NÃO	0.33	0.24	NÃO				

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Para as mesmas características de bloco e argamassa, os resultados apresentados na Tabela 6.15 (Caso 1B) diferem-se somente pela adoção de uma proposta adaptada para utilizar o fator de redução da capacidade de carga simplificado (ϕ_s), apresentada no EN 1996-3 (2011), substituindo a espessura efetiva (t_e) pela espessura residual (t_{Fr}). A intenção desta substituição, que não se encontra no Eurocode 6, foi tornar a verificação mais simples e rápida em conferências prévias. Comparando-se os valores do Caso 1A e Caso 1B, é possível perceber que, em geral, o método adaptado e simplificado apresentou-se mais conservador, o que é característico de processos sintetizados. Para o método simplificado adaptado, verificou-se menores relações $R_{d,fi}/S_{d,fi}$, o que foi suficiente para não atender o TRF de 30 minutos para fogo em ambos os lados.

Tabela 6.15 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 1B)

		S_d/R_d	α	μ_0	Simplificado								
		0.97	0.62	0.61									
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90		
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$	
Um lado	12B	2.26	2.20	1.37	1.71	1.25	OK	1.20	0.87	NÃO	1.08	0.78	NÃO
	12C				1.52	1.11	OK	1.14	0.83	NÃO	1.04	0.75	NÃO
	12G				1.53	1.12	OK	1.13	0.82	NÃO	1.02	0.74	NÃO
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90		
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$	
Dois lados	12B	2.26	2.20	1.37	1.25	0.91	NÃO	0.52	0.38	NÃO	0.32	0.23	NÃO
	12C				0.99	0.72	NÃO	0.44	0.32	NÃO	0.20	0.14	NÃO
	12G				0.99	0.72	NÃO	0.42	0.30	NÃO	0.19	0.14	NÃO

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Apesar da geometria dos blocos de concreto brasileiros serem bastante semelhantes e com dimensões padrões mínimos estabelecidos pela ABNT NBR 6136 (2016) é muito comum obter pequenas diferenças nos volumes e formatos dos furos. Além disso, há a falsa ideia de que o ensaio realizado para um fabricante específico pode ser adotado para qualquer outro fabricante sem observância à diferença de geometria. Isto posto, para os Casos 2A e 2B, adotou-se o mesmo bloco prescrito no estudo de caso (12 MPa – área bruta), porém com a geometria de outro fabricante, o que resultou numa resistência na área líquida de 24 MPa. A resistência da argamassa foi mantida em 8 MPa. Os resultados obtidos considerando os procedimentos de cálculos do Caso A são apresentados na Tabela 6.16. Quando se compara os Casos 1A e 2A, observa-se que a pequena diferença da geometria, que resultou no ganho de aproximadamente 2 MPa na área líquida para o Caso 2A, foi capaz de proporcionar ao bloco do tipo 12G o atendimento ao critério de fogo de apenas um lado não observado no Caso 1A.

Tabela 6.16 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 2A)

S_d/R_d		α	μ_0												
0.70		0.62	0.44												
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
	12B	3.15	2.20	1.37	1.71	1.25	OK	1.29	0.94	NÃO	1.18	0.86	NÃO		
	12C				1.68	1.22	OK	1.35	0.98	NÃO	1.26	0.92	NÃO		
	12G				1.44	1.05	OK	1.12	0.82	NÃO	1.03	0.75	NÃO		
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
	12B	3.15	2.20	1.37	1.83	1.33	OK	0.87	0.64	NÃO	0.56	0.41	NÃO		
	12C				1.53	1.11	OK	0.77	0.56	NÃO	0.36	0.26	NÃO		
	12G				1.51	1.10	OK	0.72	0.53	NÃO	0.35	0.25	NÃO		

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Seguindo as mesmas características do exemplo anterior: blocos de 24 MPa – área líquida e argamassa de 8 MPa, é apresentado na Tabela 6.17 os resultados adquiridos adotando-se a proposta de um fator de redução da capacidade de carga simplificado e adaptado. As observações realizadas entre os Casos 1A e 1B também são válidas para a comparação dos Casos 2A e 2B.

Tabela 6.17 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 2B)

S_d/R_d		α	μ_0	Simplificado											
0.91		0.62	0.57												
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
	12B	2.41	2.20	1.37	1.82	1.33	OK	1.27	0.93	NÃO	1.14	0.83	NÃO		
	12C				1.61	1.18	OK	1.21	0.88	NÃO	1.10	0.80	NÃO		
	12G				1.63	1.19	OK	1.20	0.87	NÃO	1.08	0.79	NÃO		
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
	12B	2.41	2.20	1.37	1.33	0.97	NÃO	0.55	0.40	NÃO	0.34	0.25	NÃO		
	12C				1.05	0.76	NÃO	0.47	0.34	NÃO	0.21	0.15	NÃO		
	12G				1.05	0.77	NÃO	0.44	0.32	NÃO	0.21	0.15	NÃO		

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Uma terceira análise é proposta (Caso 3A e 3B) considerando bloco de 24 MPa (área líquida) e, agora, argamassa de 10 MPa, valor este também coerente visto que obedece às relações entre resistências de blocos e argamassas sugeridas pela literatura. Os valores de dimensionamento para essa consideração são apresentados na Tabela 6.18, onde se percebe que com esta combinação de bloco e argamassa é possível atender o critério REI para um tempo de

resistência ao fogo de 60 minutos se for utilizado blocos com agregado de basalto ou calcário. Os resultados para o Caso 3B (método simplificado) são expostos na Tabela 6.19 apresentando-se novamente como mais conservador com exceção do TRF 30 minutos no critério REI.

Tabela 6.18 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 3A)

S_d/R_d		α	μ_0												
0.65		0.62	0.41												
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
Um lado	12B	3.36	2.20	1.37	1.83	1.33	OK	1.38	1.00	OK	1.26	0.92	NÃO		
	12C				1.79	1.31	OK	1.44	1.05	OK	1.35	0.98	NÃO		
	12G				1.54	1.13	OK	1.20	0.87	NÃO	1.10	0.80	NÃO		
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
Dois lados	12B	3.36	2.20	1.37	1.96	1.43	OK	0.94	0.68	NÃO	0.60	0.44	NÃO		
	12C				1.63	1.19	OK	0.82	0.60	NÃO	0.38	0.28	NÃO		
	12G				1.61	1.18	OK	0.77	0.56	NÃO	0.37	0.27	NÃO		

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Tabela 6.19 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (Caso 3B)

S_d/R_d		α	μ_0	Simplificado											
0.86		0.62	0.53												
Um lado	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
Um lado	12B	2.57	2.20	1.37	1.95	1.42	OK	1.36	0.99	NÃO	1.22	0.89	NÃO		
	12C				1.73	1.26	OK	1.29	0.94	NÃO	1.18	0.86	NÃO		
	12G				1.74	1.27	OK	1.28	0.93	NÃO	1.16	0.84	NÃO		
Dois lados	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90				
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			
Dois lados	12B	2.57	2.20	1.37	1.42	1.03	OK	0.59	0.43	NÃO	0.36	0.26	NÃO		
	12C				1.12	0.82	NÃO	0.51	0.37	NÃO	0.23	0.16	NÃO		
	12G				1.13	0.82	NÃO	0.47	0.35	NÃO	0.22	0.16	NÃO		

Fonte: próprio autor

Uma outra observação interessante diz respeito à excentricidade provocada pelo incêndio em um só lado. Apesar das análises terem considerado uma excentricidade mínima em temperatura ambiente, a excentricidade no critério REI é bastante influenciada pela esbeltez da parede, a espessura residual e as diferentes dilatações térmica que variam conforme o tipo de agregado empregado no bloco.

De maneira geral, o método das isotermas apresentou-se de forma coerente, com correlações evidentes entre resistência e solicitação, proporcional ao tempo e à condição de exposição ao fogo. Além disso, a análise paramétrica evidencia que o comportamento da

alvenaria em situação de incêndio depende de todos os seus elementos constituintes (argamassa, bloco, revestimento...), sendo sua geometria e nível de carregamento essencial para determinação de sua resistência em situação de incêndio. Do mesmo modo que, a simplificação de coeficientes redutores apesar de facilitar o dimensionamento de paredes em situação de incêndio, pode proporcionar o não atendimento do critério pretendido. Sugere-se que a verificação simplificada e adaptada, seja feita para verificações rápidas e práticas, caso o critério atendido não seja atendido, utiliza-se a verificação completa conforme sugerido pelo EN 1996-1-2 (2005).

6.3.3.2 Comparação com o método tabular do EN 1996-1-2 (2005)

A Tabela N.B.3.2 do EN 1996-1-2 (2005) é apresentada para estabelecer o critério REI em paredes simples (uma folha) para blocos de concreto. O tipo de furo e volume de vazio dos blocos de concreto brasileiros os classificam como pertencentes ao Grupo 2. Além disso, essa tabela determina uma variação de densidade para blocos de concreto com agregado denso entre 720 e 1650 kg/m³ (área bruta), o que é coerente para os blocos brasileiros que possuem densidade entre 2000 e 2400 kg/m³, considerando-se ainda que os blocos brasileiros possuem entre 40% a 50% de vazios.

Para essa averiguação, faz-se necessário conhecer o coeficiente μ_0 , que é a relação entre a solicitação em situação de incêndio e a resistente em temperatura ambiente ($S_{d,fi}/R_d$). Com a linha da tabela identificada, os valores de espessura sugerida para cada TRF são indicados. Observa-se que valores encontrados pelo método das isothermas, encontram-se no intervalo de espessura para cada TRF, porém o método das isothermas apresentou-se mais conservador, visto que a espessura da parede é mais próxima do limite superior apresentado na faixa de espessura proposta pelo Eurocode 6.

Para o critério R, incêndio-padrão em ambas as faces da parede. Identifica-se a Tabela N.B.3.3 como a mais adequada. Paredes simples (uma folha) para blocos de concreto, Grupo 2. A densidade para blocos de concreto com agregado denso varia entre 1400 e 2000 kg/m³, o que não atende aos blocos estruturais de 12 MPa. Observa-se que pelo método das isothermas, os blocos de 14 cm sem nenhum revestimento suportam apenas um tempo de 30 minutos enquanto pelo método tabular essa espessura de bloco não atenderia. Isso é explicado devido métodos tabulares sem geralmente mais conservadores que métodos analíticos. Entretanto, para os demais TRFs os valores mostraram-se coerente com os valores tabulares propostos pelo Eurocode 6.

Analisando o Eurocode 6 e o método proposto nesse trabalho entende-se o motivo da existência das amplas faixas de espessuras prescritas. Os diferentes materiais associados com as variadas combinações possíveis, entre resistência e geometria de blocos e argamassa, interferem significativamente no resultado da parede. É válido alertar, que a utilização conforme orienta os corpos de bombeiro do país, deve ser realizada com cautela, já que as amplas faixas encontradas no Eurocode 6 podem representar blocos com geometria diferentes, recomendando-se, portanto, por segurança, adotar o limite superior da faixa proposta. Alerta-se, ainda, que a futura versão da EN 1996-1-2, que se encontra em consulta pública, é adotado os valores dos limites inferiores dos intervalos de espessura propostos na EN 1996-1-2: 2005. Os valores são válidos quando não existem anexos nacionais que consideram as características sociais, ambientais, legislativas e de materiais das construções na região. Entretanto, como já comentando, deve-se ter cautela ao utilizar as tabelas do Eurocode 6 para os padrões construtivos do Brasil. Além disso, de acordo com o método proposto no trabalho, a adoção equivocada por algum projetista no país desses limites inferiores de espessura, demonstram-se inseguros.

6.3.3.3 Comparação com ensaio 1.123.380-203 (IPT)

A falta de um método tabular, mesmo que internacional, com paredes de alvenaria construídas com blocos de concretos nos mesmos padrões dos blocos brasileiros impôs a busca por ensaios de paredes carregadas e expostas a incêndio-padrão com os referidos blocos. Desse modo, um único ensaio foi encontrado no país para parede com o mesmo bloco estudado neste trabalho. Os resultados de ensaio são apresentados na Tabela 6.6 e foram utilizados para comparar com o dimensionamento pelo método das isotermas e com resultados apresentados na Tabela 6.20 para o mesmo nível de carregamento utilizado em ensaio.

Tabela 6.20 – Resultado das tensões resistentes e solicitadas para cada TRF (carregamento de ensaio)

Um lado	S_d/R_d	α	μ_0															
	0.23	1.00	0.23	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90			T120	
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		
	12G	3.01	0.70	0.70	1.46	2.08	OK	1.15	1.63	OK	1.06	1.51	OK	1.02	1.46	OK		

Um lado	S_d/R_d	α	μ_0	Simplificado														
	0.30	1.00	0.30	Bloco	Ambiente		$S_{d,fi}$	T30			T60			T90			T120	
		R_d	S_d		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$			$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		$R_{d,fi}$	$R_{d,fi}/S_{d,fi}$		
	12G	2.35	0.70	0.70	1.60	2.29	OK	1.20	1.71	OK	1.08	1.55	OK	1.04	1.49	OK		

*valores em MPa

Fonte: próprio autor

Constata-se que assim como no resultado de ensaio, para o critério de resistência, a parede atende ao TRF de 120 minutos pelo dimensionamento pelo método das isotermas. É possível perceber que o nível de carregamento usado no ensaio está aquém dos valores habituais das edificações, o que estabelece uma relação $R_{d,fi}/S_{d,fi}$ bastante ampla mesmo para tempos de resistência ao fogo elevadas. Entretanto, no ensaio, o critério I foi o determinante, corroborando as observações de (RUSSO; SCIARRETTA, 2016), que afirmam ser o critério de resistência ao fogo (I) o modo de falha mais frequente de paredes de alvenaria estrutural em situação de incêndio, incluindo tijolos maciços e blocos vazados.

6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi demonstrado a modelagem numérica a partir da utilização dos parâmetros obtidos nos ensaios realizados em capítulos anteriores e proposto um método de cálculo alternativo aos métodos tabulares, considerando a distribuição de temperatura e redução de resistência na seção transversal do bloco sem a consideração de revestimento. A partir dos resultados desta investigação, pode ser extraídas as seguintes conclusões principais:

Os parâmetros obtidos nos ensaios realizados nos capítulos anteriores foram fundamentais para a exatidão e acurácia do modelo numérico realizado, onde a conformidade dos resultados foi fortemente identificada mesmo que os parâmetros térmicos em elevadas temperaturas (condutividade térmica e calor específico), não tenham sido obtidos experimentalmente e sim corrigidos pelas relações propostas pelo EN 1996-1-2;

Os blocos com agregado basalto, apresentaram comportamento relativamente superior aos demais agregados, apesar de tratar de um agregado silicoso, sua baixa condutividade térmica retardou a perda de resistência em sua seção transversal. Quanto a classe de resistência pouca interferência foi observada no comportamento residual, principalmente para tempos de resistência ao fogo maiores de 60 minutos e classes de resistência maiores que 12 MPa. Observa-se ainda que, na consideração de fogo exposto a apenas um lado, as diferenças entre resistências tendem a diminuir com elevação do tempo devido o comportamento da curva de incêndio-padrão e a baixa condutividade do concreto. Essa baixa condutividade é responsável por proporcionar ao bloco de concreto um bom comportamento como material isolante, uma vez que se observa que pequenas espessuras são tornadas ineficazes mesmo com grandes tempos de exposição ao fogo. Para ocorrência de fogo em ambos os lados, a agressividade do incêndio é bastante forte o que provoca uma rápida redução da capacidade resistente dos blocos de concreto.

O método das isotermas com os parâmetros propostos apresentou-se bem coerente para as variadas análises realizadas. Sob o mesmo ponto de vista, essas análises paramétricas realizadas foram capazes de comprovar que o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio depende do desempenho resistente a elevadas temperaturas de cada um de seus elementos (blocos, argamassa, revestimento...) isoladamente e em conjunto. A geometria do bloco e o nível de carregamento são fatores que exercem forte influência no comportamento da parede de alvenaria estrutural. A utilização de coeficientes redutores simplificados torna o dimensionamento mais acessível dispondo ainda de uma maior segurança.

A utilização de métodos tabulares internacionais é interessante, porém, muito cuidado deve ser tomado, visto que muitas vezes são utilizadas diferentes metodologias de ensaios, propriedades de blocos, argamassas, geometrias e até mesmo diferentes processos construtivos. Quando comparado ao método das isotermas apresentado neste trabalho percebeu-se que os blocos de concreto vazados brasileiros sem revestimento, quanto ao critério REI, atendem ao TRF de 30 minutos podendo chegar a TRF de 60 minutos, dependendo do tipo de agregado e combinação com argamassa. Para o critério R, pelo método proposto o TRF de 30 minutos seria atendido pelo método mais refinado ou utilizando o método simplificado adaptando algumas combinações de blocos e argamassa.

A comparação com o ensaio realizado com incêndio-padrão em parede de alvenaria construída com o mesmo bloco estudado serviu para demonstrar a importância de evidenciar as propriedades físicas (geometria, volume de vazios), mecânicas e o tipo de agregado utilizado nos blocos. Além disso, é evidente que a utilização de blocos de um fabricante não deve ser estendida aos demais sem observância dessas propriedades. O nível de carregamento para determinação da resistência portante da parede deve ser coerente com os níveis de carregamentos habituais das estruturas em alvenaria estrutural. Assim como, é importante lembrar que em ensaios realizados em laboratório geralmente a carga aplicada é centralizada e as excentricidades naturais dos carregamentos não são representadas no teste.

Vale ressaltar ainda que todas essas análises foram realizadas sem a consideração de revestimento. É sabido que o revestimento representa uma forte contribuição para a resistência ao fogo de paredes estruturais, entretanto a falta de dados sobre suas propriedades térmicas, sua aderência e comportamento em elevadas temperaturas impossibilitou a consideração de sua contribuição neste trabalho.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho propôs avaliar, experimentalmente e numericamente, blocos de concreto para alvenaria estrutural sob elevadas temperaturas, visando contribuir com relevantes informações para projeto de alvenaria estrutural em situação de incêndio, haja vista a inexistência de norma de dimensionamento para essa situação no país.

É importante evidenciar que em virtude da ausência de informações sobre os blocos de concreto vazados, tipicamente utilizados no país, foi gerada a necessidade de regressar a análises preliminares, como a correta caracterização do material utilizando metodologia e ensaios adequados. Sendo possível apresentar dados, parâmetros e por conseguinte modelos e métodos de cálculos alternativos aos ensaios onerosos de paredes de alvenaria estrutural submetidas à incêndio-padrão.

7.1 CONCLUSÕES

Em virtude do formato adotado neste trabalho, onde cada capítulo apresenta um tema com metodologia, resultados, análises e conclusões próprias. Um compilado enumerado das principais conclusões são apresentadas a seguir.

Quanto ao uso de códigos e normas internacionais para projeto de alvenaria estrutural brasileira em situação de incêndio, conclui-se que:

- O código americano, ACI/TMS 216.1 (2014), concentra-se na observação de critério de isolamento (I) e estanqueidade (E), apresentando-se como o código mais conservador entre os analisados. Sua consideração para diferentes tipos de revestimentos é bem detalhada, levando-se em consideração a contribuição desse revestimento para lado exposto ou não ao incêndio. Por outro lado, os tipos de revestimento, espessuras e até mesmo metodologia de aplicação apresentados em suas tabelas não são comuns na construção civil brasileira;
- A norma australiana, AS 3700 (2018), considera o critério de suporte de carga (R) para incidência de fogo em apenas um lado e baseia a satisfação desse critério na esbeltez da parede sem considerar a excentricidade provocada pelo incêndio. Adotando as espessuras dos blocos e o pé-direito entre 2,50 m a 3,00 m das construções brasileiras, esse parâmetro propicia o atendimento do critério para

todas as paredes com apoios nas bordas verticais. Quanto ao critério de isolamento (I), a norma em questão não considera a contribuição do revestimento nas faces expostas ao fogo, além disso, de acordo com essa norma e diferentemente das demais, os blocos de concreto apresentam melhor isolamento que blocos cerâmicos, o que provavelmente é atribuído à geometria e tipo de material utilizado. O critério de estanqueidade (E) é atendido no caso dos outros critérios sejam satisfeitos;

- O EN 1996-1-2 (2005), que atualmente se encontra em processo de consulta pública, divulga um método tabular robusto, para diferentes critérios de atendimento, materiais, resistência, densidade e níveis de carregamento da parede. Contudo, deve ser utilizado com cautela visto que é percebido amplas faixas de espessuras, devido aos diferentes parâmetros determinados nacionalmente. É interessante perceber que no novo texto de norma, que está submetido à consulta pública, foram atribuídos os valores inferiores das faixas, indicando que na ausência de anexos nacionais esses valores podem ser utilizados. Dessa forma, a utilização do novo Eurocode 6 na alvenaria estrutural do Brasil, pode ser contra a segurança, no caso de adoção inequívoca por parte de algum projetista no país;
- Faz-se necessário, reafirmar que o uso de normas internacionais no contexto brasileiro pode guiar o comportamento da alvenaria em situação de incêndio, porém uma análise cautelosa deve ser tomada devido às diferenças entre as propriedades dos materiais que podem conduzir para um dimensionamento errôneo e inseguro.

Com base nos resultados obtidos no estabelecimento de uma metodologia de ensaio para determinação das propriedades mecânicas de blocos de concreto em altas temperaturas conclui-se que:

- A padronização de ensaios de caracterização dos blocos vazados de concreto se faz necessária visto a disparidade de resultados encontrados que podem ser atribuídos às diferenças significativas entre os métodos de testes utilizados;
- Para caracterização do material utilizado nos blocos vazados de concreto, faz-se necessária, a quantidade mínima de seis corpos-de-prova, em tamanho natural tomados diretamente do fornecedor e com idade mínima de 90 dias. Além disso, recomenda-se que a amostra deve ser armazenada durante no mínimo 14 dias

dentro do laboratório com temperatura de $24 \pm 8^\circ\text{C}$, UR < 80% antes da realização do ensaio; e que no momento do ensaio deve ser utilizado forro mineral para o capeamento dos blocos;

- Antes da realização dos ensaios, o forno utilizado deve ser avaliado, verificando se há equidade de temperatura em todo o volume interno do material do bloco ao final do período de aquecimento. De forma que seja demonstrado, ainda, que independente da taxa de aquecimento empregada, a distribuição das amostras no interior do forno se apresente adequada e, também, o equipamento empregado no aquecimento das amostras se mostre eficaz neste processo de aquecimento uniforme;

Frente aos ensaios e análises das propriedades térmicas e físicas dos blocos de concreto vazados, pode-se concluir que:

- A perda de massa dos concretos é afetada pela natureza mineralógica dos agregados a partir do aquecimento de 300°C para materiais silicosos e 400°C para materiais calcáreos. Após 600°C , a perda de massa dos blocos de concretos aumenta, principalmente nos blocos com agregado calcário, devido a saída do CO_2 da descarbonatação da calcita;
- A densidade dos blocos de concreto diminui enquanto a porosidade dos concretos aumenta com a temperatura. Não sendo observada influência significativa da natureza do agregado na diminuição da densidade ou no aumento da porosidade com a elevação da temperatura;
- A condutividade térmica, difusividade e dilatação térmica dos concretos estão fortemente ligadas à dos agregados. Para uma mesma composição química de agregados, o grau de cristalinidade de seus minerais rege as propriedades térmicas e sua evolução com a temperatura. Assim como o que acontece para o concreto moldado úmido, os concretos com agregado de basalto obtiveram menor condutividade térmica, seguido pelos blocos com agregado de gnaiss e calcário, respectivamente. A estrutura macrocristalina do quartzo dos agregados de quartzitos pode promover a redução mais forte da condutividade térmica. Apesar da coerência com os intervalos de valores evidenciados na literatura para concreto plástico, o concreto seco aferiu valores inferiores de condutividade térmica, significando que a adoção dos valores de literatura estaria a favor da segurança

numa eventual análise com modelagem numérica. A compacidade da pasta de cimento afeta ligeiramente os valores de condutividade térmica. A difusividade e térmica dos blocos de concretos varia diferentemente com os três tipos de agregados em uma tendência semelhante à da condutividade e inversa à dilatação térmica;

- O calor específico dos blocos de concretos não depende da natureza dos agregados, sendo mais fortemente influenciado pelo teor de umidade das amostras de concreto.

Fundamentado nos testes experimentais e estudos acerca das propriedades mecânicas dos blocos de concreto analisados, conclui-se que:

- Quanto ao tipo agregado observou-se que este transfere aos blocos comportamentos diferentes frente a elevadas temperaturas. Blocos com agregados do tipo gnaiss e basalto tiveram comportamento semelhantes, porém os blocos com agregado de calcário, apesar de obterem um acréscimo de resistência a partir de 100°C, e manter a resistência residual até os 400°C, após os 600°C um declínio abrupto da resistência foi observado;
- Quanto ao fator resistência residual dos blocos, não foram observadas diferenças significativas no comportamento das diferentes resistências de blocos em vista da temperatura. Blocos com um mesmo tipo de agregado, tiveram desempenhos semelhantes independente da classe de resistência do bloco. Entretanto, bloco de maiores resistência dos agregados basalto e gnaiss ainda possuíam uma pequena resistência residual aos 800°C;
- Foi observado uma deterioração tardia da resistência residual dos blocos de concreto quando comparados com o concreto plástico, percebendo-se que os blocos fabricados com concreto seco, possuem uma resistência residual à compressão maior nas faixas até 400° C e menor após os 700°C;
- Uma curva específica da resistência residual a compressão para blocos de concreto vazados é proposta, visto as diferenças observadas quando comparadas com as curvas de normas para o material concreto. Sobre essa recomendação é o importante ressaltar que a curva é sugerida a partir dos trabalhos existentes até o momento, assim, visto o reduzido número de pesquisas com esse tipo de bloco

acredita-se que esse comportamento poderá sofrer pequenas alterações com a inclusão de mais dados de estudos futuros;

- Relativo ao módulo de elasticidade dos blocos, observou-se que a exposição a altas temperaturas afetam de forma mais intensa a deformabilidade do material que sua resistência, as curvas residuais do módulo de elasticidade são mais declinadas que as de resistência residuais e independem do tipo de agregado ou da resistência dos blocos, assim como ocorre no concreto moldado úmido.

A partir dos modelos numéricos validados e parametrizados, seguindo com proposta de método alternativo de dimensionamento da alvenaria a partir da consideração das distribuições de temperaturas e respectiva redução de áreas efetivas na seção transversal dos blocos, foi possível concluir que:

- Os parâmetros obtidos nos ensaios realizados nos capítulos anteriores foram fundamentais para a exatidão e acurácia do modelo numérico realizado, onde a conformidade dos resultados foi fortemente identificada;
- Os blocos com agregado basalto, apresentaram comportamento relativamente superior aos demais agregados, apesar de tratar de um agregado silicoso, sua baixa condutividade térmica retardou a perda de resistência em sua seção transversal. Quanto a classe de resistência, assim como observado nos ensaios experimentais, a pouca interferência foi observada no comportamento residual dos modelos numéricos, principalmente para tempos de resistência ao fogo maiores de 60 minutos e classes de resistência maiores que 12 MPa.
- Observa-se ainda que, na consideração de fogo exposto a apenas um lado, as diferenças entre resistências tendem a diminuir com elevação do tempo devido o comportamento da curva de incêndio-padrão e a baixa condutividade do concreto. A baixa condutividade é responsável por proporcionar ao bloco de concreto um bom comportamento como material isolante, uma vez que se observa que pequenas espessuras são tornadas ineficazes mesmo com grandes tempos de exposição ao fogo. Para ocorrência de fogo em ambos os lados, a agressividade do incêndio é bastante forte o que provoca uma rápida redução da capacidade resistente dos blocos de concreto;
- O método das isotermas com os parâmetros propostos apresentou-se bem coerente para avaliar a alvenaria em situação de incêndio. Sob o mesmo ponto de vista, as

análises foram capazes de comprovar que o comportamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio depende do desempenho resistente a elevadas temperaturas de cada um de seus elementos isoladamente e em conjunto. A geometria do bloco e o nível de carregamento são fatores que exercem forte influência no comportamento da parede de alvenaria estrutural. A utilização de coeficientes redutores simplificados torna o dimensionamento mais acessível dispondo ainda de maior segurança;

- Comparado o método tabular do EN 1996-1-2 ao método das isotermas apresentado neste trabalho percebeu-se que os valores obtidos para o critério REI estavam em concordância com os valores superiores das faixas propostas pelo método tabular europeu. Para o critério R, os valores de TRF propostos foram análogos, com exceção do tempo de 30 minutos que conforme método das isotermas seria na maioria das considerações atendido pelos blocos de 140 milímetros.
- A comparação com o ensaio realizado com incêndio-padrão em parede de alvenaria construída com o mesmo bloco estudado serviu para demonstrar a importância de evidenciar as propriedades físicas (geometria, volume de vazios), mecânicas e o tipo de agregado utilizado nos blocos. Além disso, cabe alertar que a utilização de blocos de um fabricante não deve ser estendida aos demais sem observância dessas propriedades. O nível de carregamento para determinação da adequação estrutural da parede deve ser coerente com os níveis de carregamentos habituais das estruturas em alvenaria estrutural. Assim como, é importante lembrar que em ensaios realizados em laboratório geralmente a carga aplicada é centralizada e as excentricidades naturais dos carregamentos não são representados em teste.

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho faz parte de uma série de trabalhos sobre alvenaria em situação de incêndio que em desenvolvimento pelo grupo de pesquisadores da Universidade Federal de São Carlos – UFSCar e Universidade de Campinas – Unicamp. Para trabalhos futuros sugere-se:

- Ensaiar paredes submetidas a incêndio-padrão, com diferentes combinações de elementos e com carregamentos mais representativos avaliando, se possível, as mudanças de condições de contorno que ocorrem em situação de incêndio;
- Evoluir o modelo numérico de blocos considerando, propriedades térmicas em elevadas temperaturas e a influência do ar presente nos vazados dos blocos;
- Determinar as propriedades térmicas e avaliar experimentalmente a resistência mecânica residual de argamassas de assentamento e revestimento, grautes e prismas para alvenaria estrutural em blocos de concreto, com combinações de elementos típicas do mercado nacional;
- Avaliar a aderência entre elementos sob elevada temperatura, levando em consideração o comportamento das interfaces entre eles;
- Ampliar as investigações numéricas em blocos e prismas, com e sem revestimento, considerando a distribuição de calor na seção transversal e os fluídos nos vazados;
- Com parâmetros bem definidos e validados com ensaios padrão realizados em laboratório, avaliar estruturas completas através de modelos avançados de cálculo, considerando a deformabilidade e tensões que ocorrem na estrutura submetida a incêndio;
- Investigar o comportamento dos materiais de alvenaria pós-fogo sob a perspectiva de reparo e reutilização.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMS, M. S. Compressive strength of concrete at temperatures to 1600F. *Em: TEMPERATURE AND CONCRETE*. Detroit: ACI SP-25, 1971. p. 33–58.

ADBRI MASONRY PTY LTD. **Fire resistance and sound insulation**. New South Wales: [s. n.], 2018. 2018.

AL-HADHRAMI, L. M.; AHMAD, A. Assessment of thermal performance of different types of masonry bricks used in Saudi Arabia. **Applied Thermal Engineering**, [s. l.], v. 29, n. 5–6, p. 1123–1130, 2009.

AL-SIBAHY, A.; EDWARDS, R. Behaviour of masonry wallettes made from a new concrete formulation under combination of axial compression load and heat exposure: Experimental approach. **Engineering Structures**, [s. l.], v. 48, p. 193–204, 2013.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE; THE MASONRY SOCIETY. ACI/TMS 216.1: Code requirements for determining fire resistance of concrete and masonry construction assemblies. **ACI/TMS**: Farmington Hills, p. 28, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C90-16a: Standard specification for loadbearing concrete masonry units. **ASTM International**: p. 5, 2016.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C140/C140M: Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units. **ASTM International**: p. 1–27, 2021a.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C150/C150M: Standard specification for portland cement. **ASTM International**: p. 9, 2021b.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E119 – 20: Fire Tests of Building Construction and Materials. **ASTM International**: p. 1–36, 2020.

ANDREINI, M.; CACIOLAI, M.; LA MENDOLA, S.; MAZZIOTTI, L.; SASSU, M.; MENDOLA, S. La; MAZZIOTTI, L.; SASSU, M. Mechanical behavior of masonry materials at high temperatures. **Fire and Materials**, [s. l.], v. 39, n. 1, p. 41–57, 2015.

ANDREINI, M.; SASSU, M. Mechanical behaviour of full unit masonry panels under fire action. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 46, n. 7, p. 440–450, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE BLOCOS DE CONCRETO - BLOCO BRASIL; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND - ABCP; SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE PRODUTOS DE CIMENTO - SINAPROCIM. **Manual de desempenho - Alvenaria com blocos de concreto**. São Paulo: Bloco Brasil, 2021. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 238, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6136: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Requisitos. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 10, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7190-1: Projeto de estruturas de madeira - Parte 1: Critérios de dimensionamento**. Rio de Janeiro: [s. n.], 2022. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 8681: Ações e segurança nas estruturas. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 18, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 12118: Blocos vazados de concreto simples para alvenaria - Métodos de ensaio. **ABNT**: Rio de Janeiro, 2013a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14323: Projeto de estruturas de aço e de estruturas mistas de aço e concreto de edifícios em situação de incêndio. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 66, 2013b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14432: Exigências de resistência ao fogo de elementos construtivos de edificações - Procedimento. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 14, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15200: Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio. **ABNT**: Rio de Janeiro, p. 48, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16868-1: Alvenaria Estrutural - Parte 1: Projeto. **ABNT**: Rio de Janeiro, 2020a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16868-2: Alvenaria Estrutural - Parte 2: Execução e controle de obras. **ABNT**: Rio de Janeiro, 2020b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 16868-3: Alvenaria Estrutural - Parte 3: Métodos de ensaio. **ABNT**: Rio de Janeiro, 2020c.

AUSTRALIAN STANDARD. **AS 1530.4: Methods for fire tests on building materials, components and structures Part 4: Fire-resistance tests for elements of construction**. Sidney: 2014.

AYALA, F. R. R. Mechanical properties and structural behaviour of masonry at elevated temperatures. **University of Manchester, Faculty of Engineering and Physical Sciences**, [s. l.], v. PhD Civil, n. uk-ac-man-scw:120795, p. 294, 2010.

BAILEY, C. Structural fire design: core or specialist subject?. **Structural Engineer**, [s. l.], v. 82, n. 9, p. 32–38, 2004.

BAZANT, Z. P.; KAPLAN, M. F. **Concrete at high temperatures: material properties and mathematical models**. Harlow: Longman, 1996. 1996.

BOŠNJAK, J.; GAMBARELLI, S.; SHARMA, A.; MEŠKOVIĆ, A. Experimental and numerical studies on masonry after exposure to elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 230, 2020.

BRASIL. **Lei No. 13.425, de 30 de março de 2017**. Brasília, DF: 2017.

CANADIAN STANDARDS ASSOCIATION. **CS S304: Design of masonry structures**. CSA Group, 2014.

CASTELLOTE, M.; ALONSO, C.; ANDRADE, C.; TURRILLAS, X.; CAMPO, J. Composition and microstructural changes of cement pastes upon heating, as studied by neutron diffraction. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 9, p. 1633–1644, 2004.

COSTA, C. N. **Estruturas de concreto em situação de incêndio**. 2002. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo 2002.

DASSAULT SYSTEMES SIMULIA CORP. **Abaqus**. Versão 2017. Providence, RI, USA: [s. n.], 2017.

DAWARE, A.; NASER, M. Z. Fire performance of masonry under various testing methods. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 289, p. 123183, 2021.

DEMIREL, B.; KELEŞTEMUR, O. Effect of elevated temperature on the mechanical properties of concrete produced with finely ground pumice and silica fume. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 45, n. 6–8, p. 385–391, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Cadastro Nacional de Produtores de Brita - Ano base 2015**. Brasília: DNPM, 2018. 2018.

DHANASEKAR, M.; CHANDRASEKARAN, V.; GRUBITS, S. J. A numerical model for the thermal bowing of masonry walls. *Em: 10TH INTERNATIONAL BRICK MASONRY CONFERENCE*, 1994, Calgary. **Anais [...]**. Calgary: [s. n.], 1994. p. 1093–1102.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 771-3: Specification for masonry units - Part 3: Aggregate concrete masonry units. **BSI Standards Publication**: Brussels, p. 46, 2011a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 772-1: Methods of test for masonry units - Part 1: Determination of compressive strength. **BSI Standards Publication**: Brussels, n. EN 772-1:2011 + A1:2015, p. 13, 2011b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1745: Masonry and masonry products - Methods for determining thermal properties. **BSI Standards Publication**: Brussels, p. 76, 2012.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1990: Basis of structural design. **Eurocode 0**: Brussels, 1, 2002a.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1991-1-2: Actions on structures - Part 1-2: General actions - Actions on structures exposed to fire. **Eurocode 1**: Brussels, 1, 2002b.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1992-1-2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. **Eurocode 2**: Brussels, 1, p. 97, 2004.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1996-1-1: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. **Eurocode 6**: 54, p. 18–20, 2011c.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1996-1-2: Design of masonry structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design. **Eurocode 6**: Brussels, p. 83, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN 1996-3: Design of masonry structures - Part 3: Simplified calculation methods for unreinforced masonry structures. **Eurocode 6**: 54, p. 18–20, 2011d.

FERNANDES, I. D. **Blocos & pavers - produção e controle de qualidade**. 8. ed. São Paulo: Treino Assessoria e Treinamentos Empresariais Ltda, 2019. 2019.

FERNANDES, B.; GIL, A. M.; BOLINA, F. L.; TUTIKIAN, B. F. Microstructure of concrete subjected to elevated temperatures: physico-chemical changes and analysis techniques. **Ibracon Structures and Material Journal**, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 838–863, 2017.

FORTES, E. S.; PEREIRA, I. P.; PARSEKIAN, G. A.; SILVA, O.; POLPO, A.; CRISTINA, T.; DIAS, M. Evaluating the possibility of using dry materials to replace cement paste capping on concrete block testing. *Em*: 12TH CANADIAN MASONRY SYMPOSIUM, 2013, Vancouver. **Anais [...]**. Vancouver: 12th CMS, 2013. p. 4–10.

GNANAKRISHNAN, N.; LAWATHER, R. Some aspects of the fire performance of single leaf masonry construction. *Em*: 2TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON FIRE ENGINEERING FOR BUILDING STRUCTURES AND SAFETY, 1989, Melbourne. **Anais [...]**. Melbourne: The Institution of Engineers, 1989. p. 93–99.

HAGER, I. Behaviour of cement concrete at high temperature. **Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences**, [s. l.], v. 61, n. 1, p. 145–154, 2013.

HAMMER, T. A. **Spalling reduction through material design**. Trondheim: report 6.2, HSC Phase 3, SINTEF-report nr STF70 A95024, 1995. 1995.

HANDOO, S. K.; AGARWAL, S.; AGARWAL, S. K. Physicochemical, mineralogical, and morphological characteristics of concrete exposed to elevated temperatures. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 32, n. 7, p. 1009–1018, 2002.

HARMATHY, T. Z.; ALLEN, L. W. Thermal performance of concrete masonry walls in fire. **Fire Technology**, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 142–148, 1972.

HARMATHY, T. Z.; ALLEN, L. W. Thermal Properties of Selected Masonry Unit Concretes. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 70, n. 2, p. 132–142, 1973.

HARMATHY, T. Z.; BERNDT, J. E. Hydrated Portland Cement and Lightweight Concrete at Elevated Temperatures. **ACI Journal Proceedings**, [s. l.], v. 63, n. 1, p. 93–112, 1966.

HELENE, P. **Parecer Técnico PhD 324/2019 - Edifício Wilton Paes de Almeida**. São Paulo: PhD Engenharia, 2019.

HENDRY, A. W.; SINHA, B. P.; DAVIES, S. R. **Design of Masonry Structures**. 3. ed. London: Taylor & Francis, 2004. 2004.

HERTZ, K. Analyses of concrete structures exposed to fire part 1-2. **Lecture Notes**, [s. l.], p. 1–55, 2007.

HURLEY, M. J. **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering**. 5. ed. Greenbelt: Springer, 2015.

INGHAM, J. P. Application of petrographic examination techniques to the assessment of fire-damaged concrete and masonry structures. **Materials Characterization**, [s. l.], v. 60, n. 7, p. 700–709, 2009.

INGHAM, J. Forensic engineering of fire-damaged structures. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Civil Engineering**, [s. l.], v. 162, n. 5, p. 12–17, 2009.

INTERNACIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 834-1: Fire resistance tests - elements of building construction - Part 1: General requirements. **ISO**: Geneva, 1999.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 22007-2: Plastics — Determination of thermal conductivity and thermal diffusivity — Part 2: Transient plane heat source (hot disc) method. **ISO**: Geneva, p. 17, 2008.

KHOURY, G. A. Effect of fire on concrete and concrete structures. **Progress in Structural Engineering and Materials**, [s. l.], v. 2, n. 4, p. 429–447, 2000.

KLEEMAN, P. W.; PAGE, A. W. **A study of the in-situ properties of capping materials used in compression tests. Report 040.06.1989**. Newcastle: Dept of Civil Engineering & Surveying, 1989.

KLEEMAN, P. W.; PAGE, A. W. The in-situ properties of packing materials used in compression tests. **Masonry International**, [s. l.], v. 4, n. 2, p. 68–74, 1990.

KODUR, K. R.; DWAIKAT, M. M. S.; DWAIKAT, M. B. High-temperature properties of concrete for fire resistance modeling of structures. **ACI Materials Journal**, [s. l.], v. 105, n. 5, p. 517–527, 2008.

KODUR, V. K. R.; HARMATHY, T. Z. Properties of building materials. *Em*: HURLEY, M; GOTTUK, D; HALL JHARADA, K; KULIGOWSKI, E; PUCHOVSKY, M; TORERO, J; WATTS, J; WIECZOREK, C (org.). **SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Fifth Edition**. New York: Springer, 2016. p. 277–324.

LA SENA, H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a construção civil. *Em*: RODRIGUES, Antônio Fernando da Silva (org.). **Economia Mineral do Brasil**. Brasília: DNPM, 2009. p. 602–635.

LEAL, D. F.; DUPIM, R. H.; MUNAIAR NETO, J.; CORRÊA, M. R. S. Experimental investigation on structural concrete masonry in fire: emphasis on the thermal behavior and residual strength. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 1–16, 2021.

LEITE, H. A. L.; MORENO JÚNIOR, A. L.; TORRES, D. L. Dimensionamento da alvenaria estrutural em situação de incêndio: contribuição à futura normatização nacional. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 89–107, 2016.

LIMA, M. C.; NETO, M. J. B. Duas catástrofes históricas: O Grande Incêndio de Londres e o Terramoto de Lisboa de 1755 - efeitos no Património Artístico e atitudes de recuperação. **Conservar Património**, [s. l.], v. 25, n. 25, p. 37–41, 2017.

LOURENÇO, P. B. **Computational strategies for masonry structures**. 1996. 220 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Delft University of Technology, Delft 1996.

MA, Q.; GUO, R.; ZHAO, Z.; LIN, Z.; HE, K. Mechanical properties of concrete at high temperature-A review. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 93, p. 371–383, 2015.

MEDEIROS, W. A.; PARSEKIAN, G. A.; MORENO JR., A. L. Critical analysis of the use of international codes and standards to design Brazilian structural masonry in fire situation. **International Journal of Masonry Research and Innovation**, [s. l.], v. 6, n. 3, p. 285–304, 2021.

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.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4th ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014a. 2014.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014b. 2014.v. 2.

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**, [s. l.], v. 16, n. 2, p. 236–253, 2012.

NADJAI, A.; O’GARA, M.; ALI, F.; JURGEN, R. Compartment masonry walls in fire situations. **Fire Technology**, [s. l.], v. 42, n. 3, p. 211–231, 2006.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F. Finite element modelling of compartment masonry walls in fire. **Computers and Structures**, [s. l.], v. 81, n. 18–19, p. 1923–1930, 2003a.

NADJAI, A.; O’GARRA, M.; ALI, F. A.; LAVERTY, D. A numerical model for the behaviour of masonry under elevated temperatures. **Fire and Materials**, [s. l.], v. 27, n. 4, p. 163–182, 2003b.

NASER, M. Z. Properties and material models for common construction materials at elevated temperatures. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 215, p. 192–206, 2019.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Fire Protection Handbook**. 20. ed. Quincy: NFPA, 2008. 2008.

NETINGER, I.; KESEGIC, I.; GULJAS, I. The effect of high temperatures on the mechanical properties of concrete made with different types of aggregates. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 46, n. 7, p. 425–430, 2011.

NETINGER, I.; VAREVAC, D.; BJEGOVIĆ, D.; MORIĆ, D. Effect of high temperature on properties of steel slag aggregate concrete. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 59, p. 1–7, 2013.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 2016.

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of clay hollow-brick masonry walls during fire. Part 1: Experimental analysis. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 52, p. 55–64, 2012.

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F. Behavior of hollow clay brick masonry walls during fire. Part 2: 3D finite element modeling and spalling assessment. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 66, p. 35–45, 2014.

NGUYEN, T. D.; MEFTAH, F.; CHAMMAS, R.; MEBARKI, A. The behaviour of masonry walls subjected to fire: Modelling and parametrical studies in the case of hollow burnt-clay bricks. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 44, n. 4, p. 629–641, 2009.

ONO, R. Parâmetros para garantia da qualidade do projeto de segurança contra incêndio em edifícios altos. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 97–13, 2007.

PAGE, A. W.; KLEEMAN, P. W. The influence of capping material and platen restraint on the failure of hollow masonry units and prisms. *Em: PROCEEDINGS OF THE NINTH INTERNATIONAL BRICK & BLOCK MASONRY CONFERENCE, 1991, Berlim. Anais [...]. Berlim: [s. n.], 1991. p. 662–670.*

PARSEKIAN, G. A.; CHRISTOFORO, A. L.; MAZZÚ, A. D. E.; DALFRÉ, G. M. Humidity and specimen preparation procedure: influence on compressive strength of concrete blocks. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 14, n. 2, p. 1–10, 2021.

PARSEKIAN, G. A.; HAMID, A. A.; DRYSDALE, R. G. **Comportamento e dimensionamento de alvenaria estrutural**. 2. ed. São Carlos: EdUFSCar, 2013. 2013.

PARSEKIAN, G. A.; MEDEIROS, W. A.; SIPP, G. High-rise concrete and clay block masonry building in Brazil. **Mauerwerk**, [s. l.], v. 22, n. 4, p. 260–272, 2018.

POÇAS, J. P. M. **Estudo do comportamento térmico e mecânico em paredes de alvenaria**. 2008. 181 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Porto, Porto 2008.

POLÍCIA MILITAR DO ESTADO DE SÃO PAULO. Instrução Técnica N° 08 - Segurança estrutural contra incêndio. **Corpo de Bombeiros**: São Paulo, Brasil, p. 11, 2019.

POPE, H.; ZALOK, E. Geometry Effects on the Fire Resistance Rating of Masonry. **The Masonry Society**, [s. l.], v. 38, n. 1, p. 122, 2020.

POPE, H.; ZALOK, E. The Effect of Fire Temperatures on the Mechanical Performance of Concrete Masonry Materials. *Em: 13TH NORTH AMERICAN MASONRY CONFERENCE, 2019, Salt Lake City. Anais [...]. Salt Lake City: TMS, 2019. p. 252–264.*

RAZAFINJATO, R. N.; EAUCOUR, A. L.; HEBERT, R. L.; LEDESERT, B.; BODET, R.; NOUMOWE, A. High temperature behaviour of a wide petrographic range of siliceous and calcareous aggregates for concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 123, p. 261–273, 2016.

RIGÃO, A. O. **Comportamento de pequenas paredes de alvenaria estrutural frente a altas temperaturas**. 2012. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 2012.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures-modelling and application Part 11: Relaxation. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 40, n. 5, p. 449–458, 2007a.

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**, [s. l.], v. 40, p. 841–853, 2007b.

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**, [s. l.], v. 40, p. 855–864, 2007c.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. Recommendation of RILEM TC 200-HTC: mechanical concrete properties at high temperatures-Modelling and applications Part 10: Restraint stress. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 38, n. 284, p. 913–919, 2005.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 3: Compressive strength for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 28, p. 410–414, 1995.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 4: Tensile strength for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 33, n. May, p. 219–223, 2000a.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 5: Modulus of elasticity for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 37, n. 2, p. 139–144, 2004.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 6: Thermal strain. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 30, n. March, p. 17–21, 1997.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 7: Transient Creep for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 31, n. June, p. 290–295, 1998.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 8: Steady-state creep and creep recovery for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 33, n. February, p. 6–13, 2000b.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE. RILEM TC 129-MHT: Test methods for mechanical properties of concrete at high temperatures - Part 9: Shrinkage for service and accident conditions. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 33, n. May, p. 224–228, 2000c.

RODOVALHO, F. S.; CORRÊA, M. R. S. Thermal simulation of prisms with concrete blocks in a fire situation. **Ibracon Structures and Material Journal**, [s. l.], v. 12, n. 3, 2019.

ROSEMANN, F. **Resistência ao fogo de paredes de alvenaria estrutural de blocos cerâmicos pelo critério de isolamento térmico**. 2011. 138 f. Dissertação - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis 2011.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Masonry exposed to high temperatures: Mechanical behaviour and properties - An overview. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 55, p. 69–86, 2013.

RUSSO, S.; SCIARRETTA, F. Numeric research on the mechanical properties of different masonry units during and after fire. **Brick and Block Masonry**, [s. l.], p. 999–1006, 2016.

SCHNEIDER, U. Concrete at high temperatures - A general review. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 13, n. 1, p. 55–68, 1988.

SEITO, A. I.; GILL, A. A.; PANNONI, F. D.; ONO, R.; BENTO, S.; CARLO, U. Del; PIGNATTA, V. **A segurança contra incêndio no Brasil**. São Paulo: Projeto Editora, 2008. 2008.

SILVA, V. P. **Projeto de estruturas de concreto em situação de incêndio: Conforme ABNT NBR 15200-2012**. 2ªed. São Paulo: Blucher, 2016. 2016.

SOLLERO, M. B. S.; JUNIOR, A. L. M.; COSTA, C. N. Residual mechanical strength of concrete exposed to high temperatures – international standardization and influence of coarse aggregates. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 287, p. 122843, 2021.

SOUZA, A. A. A. de; MORENO JR, A. L. The effect of high temperatures on concrete compression strength, tensile strength and deformation modulus. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, [s. l.], v. 3, n. 4, p. 432–448, 2010.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **AS 1530.4: Methods for fire tests on building materials, components and structures. Part 4: Fire-resistance test of elements of construction**. Sydney: 2014.

STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA. **AS 3700: Masonry structures**. Sydney: 2018.

XING, Z.; BEAUCOUR, A. L.; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDESERT, B. Aggregate's influence on thermophysical concrete properties at elevated temperature. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 95, p. 18–28, 2015.

XING, Z.; BEAUCOUR, A. L.; HEBERT, R.; NOUMOWE, A.; LEDESERT, B. Influence of the nature of aggregates on the behaviour of concrete subjected to elevated temperature. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 41, n. 4, p. 392–402, 2011.

XING, Z.; HÉBERT, R.; BEAUCOUR, A. L.; LEDÉSERT, B.; NOUMOWÉ, A. Influence of chemical and mineralogical composition of concrete aggregates on their behaviour at elevated temperature. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, [s. l.], v. 47, n. 11, p. 1921–1940, 2014.

YU, X.; TAO, Z.; SONG, T. Y. Material properties of concrete with different types of aggregates. *Em: 23RD AUSTRALASIAN CONFERENCE ON THE MECHANICS OF STRUCTURES AND MATERIALS*, 2014, Byron Bay. **Anais [...]**. Byron Bay: [s. n.], 2014. p. 231–236.

8. APÊNDICES

8.1 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – AREIA

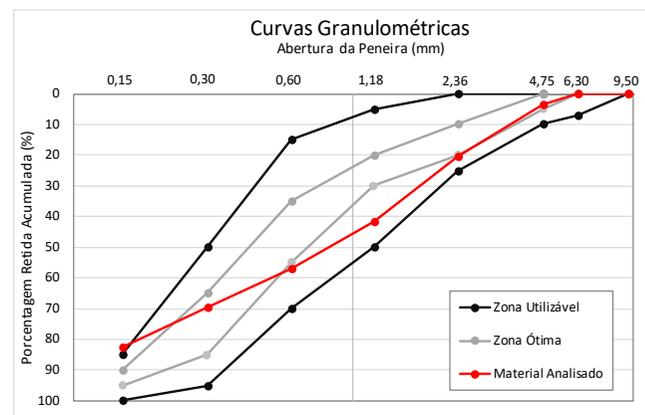
Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003										
DADOS DAS AMOSTRAS		A) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
		B) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
Peneira N°	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Massa retida acumulada (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0
1/4"	6,30	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00	0	0
4	4,75	16,3	19,5	3,3	3,9	3,3	3,9	0,63	4	4
8	2,36	86,5	82,5	17,3	16,5	20,6	20,4	0,80	17	20
16	1,18	106,3	103,8	21,3	20,8	41,8	41,2	0,49	21	41
30	0,60	76,3	77,7	15,3	15,5	57,1	56,7	0,28	15	57
50	0,30	63,6	63,1	12,7	12,6	69,8	69,3	0,08	13	70
100	0,15	64,1	66,4	12,8	13,3	82,6	82,6	0,47	13	83
Fundo	Fundo	87,0	86,9	17,4	17,4	100,0	100,0	0,02	17	100,00
Total		500,0	499,9	100,0	100,0	-	-	0	100	-

*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	4,75	Módulo de Finura	2,75
--------------------------------	------	------------------	------

Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo - ABNT NBR 7211: 2009					
Peneira N°	Abertura (mm)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
		Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
3/8"	9,50	0	0	0	0
1/4"	6,30	0	0	0	7
4	4,75	0	0	5	10
8	2,36	0	10	20	25
16	1,18	5	20	30	50
30	0,60	15	35	55	70
50	0,30	50	65	85	95
100	0,15	85	90	95	100

NOTAS:
 1) O Módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 2) O Módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 3) O Módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.



8.2 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO BASALTO

Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003

DADOS DAS AMOSTRAS

A) Massa inicial seca (g) = 1000

Data de ensaio: **23/fev**

B) Massa inicial seca (g) = 1000

Data de ensaio: **23/fev**

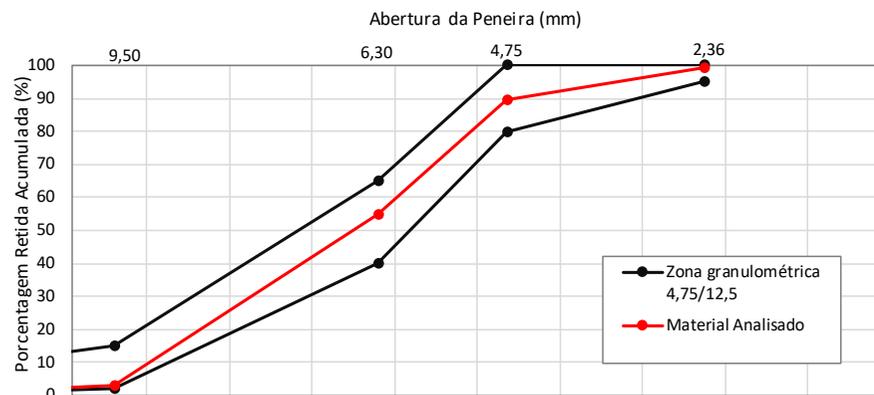
Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	34,68	23,80	3,5	2,4	1,09	3	3
1/4"	6,30	528,07	510,40	52,8	51,0	1,77	52	55
4	4,75	327,60	362,81	32,8	36,3	3,52	35	89
8	2,36	96,60	97,64	9,7	9,8	0,10	10	99
16	1,18	1,15	0,69	0,1	0,1	0,05	0	99
30	0,60	0,50	0,07	0,1	0,0	0,04	0	99
50	0,30	0,60	0,12	0,1	0,0	0,05	0	99
100	0,15	0,78	0,15	0,1	0,0	0,06	0	99
Fundo	Fundo	9,95	4,30	1,0	0,4	0,57	1	100
Total		999,93	999,98	100,0	100,0	0,00	100	-

*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	9,5	Módulo de Finura	6,43
---------------------------------------	------------	-------------------------	-------------

Zonas granulométricas do agregado graúdo - ABNT NBR 7211: 2009

Peneira Nº	Abertura (mm)	Zona 4,75/12,5	
		Limite Inferior	Limite Superior
1/2"	12,50	0	5
3/8"	9,50	2	15
1/4"	6,30	40	65
4	4,75	80	100
8	2,36	95	100
NOTAS:	Deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais.		



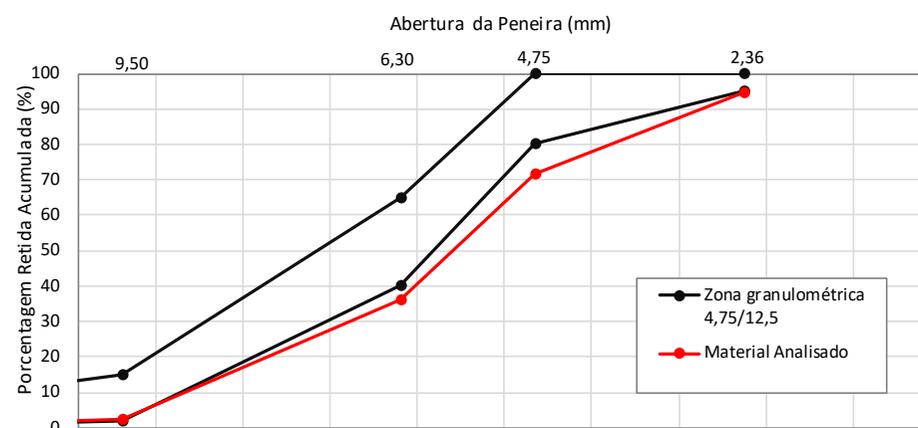
8.3 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO CALCÁRIO

Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003								
DADOS DAS AMOSTRAS		A) Massa inicial seca (g) = 1000				Data de ensaio: 23/fev		
		B) Massa inicial seca (g) = 1000				Data de ensaio: 23/fev		
Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	18,80	32,35	1,9	3,2	1,36	3	3
1/4"	6,30	353,30	315,44	35,3	31,6	3,79	33	36
4	4,75	358,45	349,97	35,9	35,0	0,85	35	71
8	2,36	215,14	248,54	21,5	24,9	3,34	23	95
16	1,18	11,74	10,09	1,2	1,0	0,17	1	96
30	0,60	2,50	2,82	0,3	0,3	0,03	0	96
50	0,30	2,10	2,20	0,2	0,2	0,01	0	96
100	0,15	2,99	2,72	0,3	0,3	0,03	0	97
Fundo	Fundo	34,45	35,37	3,4	3,5	0,09	3	100
Total		999,47	999,50	100,0	100,0	0,00	100	-

*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	9,5	Módulo de Finura	5,89
--------------------------------	-----	------------------	------

Zonas granulométricas do agregado graúdo - ABNT NBR 7211: 2009			
Peneira Nº	Abertura (mm)	Zona 4,75/12,5	
		Limite Inferior	Limite Superior
1/2"	12,50	0	5
3/8"	9,50	2	15
1/4"	6,30	40	65
4	4,75	80	100
8	2,36	95	100
NOTAS:	Deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais.		



8.4 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PEDRISCO GNAISSE

Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003

DADOS DAS AMOSTRAS

A) Massa inicial seca (g) = 1000

Data de ensaio: 23/fev

B) Massa inicial seca (g) = 1000

Data de ensaio: 23/fev

Peneira N°	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	10,22	13,04	1,0	1,3	0,28	1	1
1/4"	6,30	139,35	112,94	13,9	11,3	2,64	13	14
4	4,75	230,99	204,36	23,1	20,4	2,66	22	36
8	2,36	344,93	360,94	34,5	36,1	1,60	35	71
16	1,18	145,85	166,97	14,6	16,7	2,11	16	86
30	0,60	60,36	68,75	6,0	6,9	0,84	6	93
50	0,30	22,20	25,87	2,2	2,6	0,37	2	95
100	0,15	16,27	17,47	1,6	1,7	0,12	2	97
Fundo	Fundo	29,82	29,64	3,0	3,0	0,02	3	100
Total		999,99	999,98	100,0	100,0	0,00	100	-

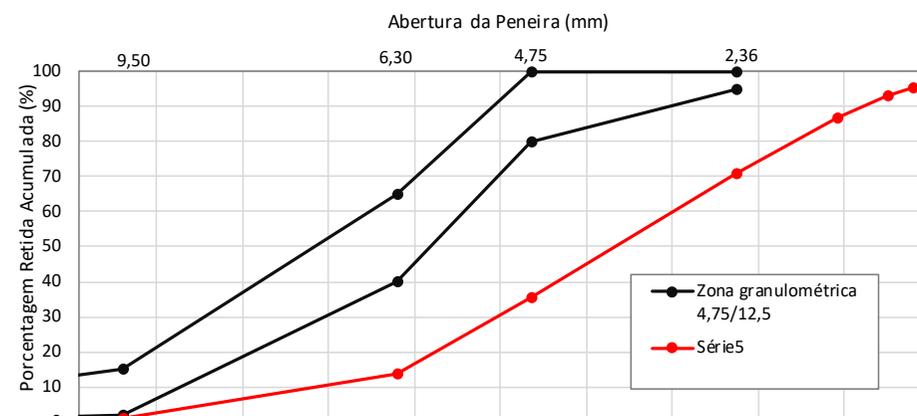
*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	9,5	Módulo de Finura	4,93
--------------------------------	-----	------------------	------

Zonas granulométricas do agregado graúdo - ABNT NBR 7211: 2009

Peneira N°	Abertura (mm)	Zona 4,75/12,5	
		Limite Inferior	Limite Superior
1/2"	12,50	0	5
3/8"	9,50	2	15
1/4"	6,30	40	65
4	4,75	80	100
8	2,36	95	100

NOTAS: Deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais.



8.5 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA BASALTO

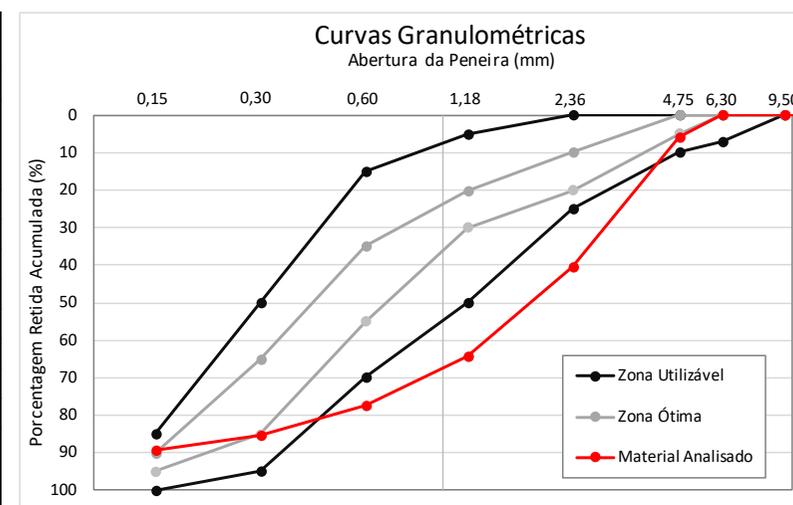
Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003										
DADOS DAS AMOSTRAS		A) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
		B) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Massa retida acumulada (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
4	4,75	31,90	26,11	6,38	5,22	6,4	5,2	1,16	6	6
8	2,36	165,73	178,66	33,15	35,74	39,5	41,0	2,59	34	40
16	1,18	121,59	119,24	24,32	23,85	63,8	64,8	0,47	24	64
30	0,60	67,32	62,69	13,47	12,54	77,3	77,4	0,92	13	77
50	0,30	39,86	39,57	7,97	7,92	85,3	85,3	0,06	8	85
100	0,15	19,37	18,97	3,87	3,79	89,2	89,1	0,08	4	89
Fundo	Fundo	54,19	54,67	10,84	10,94	100,0	100,0	0,10	11	100,00
Total		499,96	499,91	100,00	100,00	-	-	0	100	-

*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	4,75	Módulo de Finura	3,62
---------------------------------------	-------------	-------------------------	-------------

Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo - ABNT NBR 7211: 2009					
Peneira Nº	Abertura (mm)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
		Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
3/8"	9,50	0	0	0	0
1/4"	6,30	0	0	0	7
4	4,75	0	0	5	10
8	2,36	0	10	20	25
16	1,18	5	20	30	50
30	0,60	15	35	55	70
50	0,30	50	65	85	95
100	0,15	85	90	95	100

1) O Módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 2) O Módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 3) O Módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.



8.6 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA CALCÁRIO

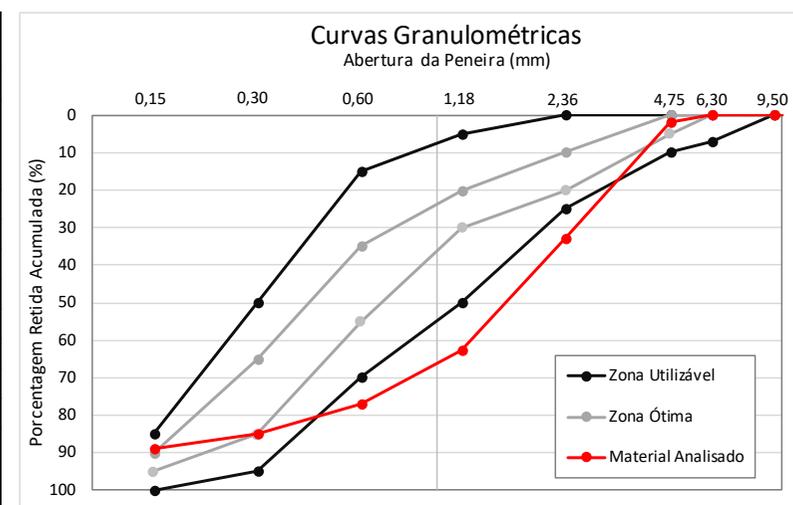
Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003										
DADOS DAS AMOSTRAS		A) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
		B) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Massa retida acumulada (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
4	4,75	8,30	11,06	1,66	2,21	1,7	2,2	0,55	2	2
8	2,36	144,29	163,94	28,86	32,79	30,5	35,0	3,93	31	33
16	1,18	150,75	147,01	30,15	29,41	60,7	64,4	0,75	30	63
30	0,60	76,85	68,59	15,37	13,72	76,0	78,1	1,65	15	77
50	0,30	40,93	35,78	8,19	7,16	84,2	85,3	1,03	8	85
100	0,15	22,55	20,26	4,51	4,05	88,7	89,3	0,46	4	89
Fundo	Fundo	56,29	53,29	11,26	10,66	100,0	100,0	0,60	11	100,00
Total		499,96	499,93	100,00	100,00	-	-	0	100	-

*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	4,75	Módulo de Finura	3,48
---------------------------------------	-------------	-------------------------	-------------

Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo - ABNT NBR 7211: 2009					
Peneira Nº	Abertura (mm)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
		Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
3/8"	9,50	0	0	0	0
1/4"	6,30	0	0	0	7
4	4,75	0	0	5	10
8	2,36	0	10	20	25
16	1,18	5	20	30	50
30	0,60	15	35	55	70
50	0,30	50	65	85	95
100	0,15	85	90	95	100

1) O Módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
 2) O Módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
 3) O Módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.



8.7 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA – PÓ DE PEDRA GNAISSE

Determinação da Composição Granulométrica - ABNT NBR NM 248: 2003										
DADOS DAS AMOSTRAS		A) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
		B) Massa inicial seca (g) = 500				Data de ensaio: 21/fev				
Peneira Nº	Abertura (mm)	Massa retida (g)		Massa retida (%)		Massa retida acumulada (%)		*Variação (%)	Massa retida média (%)	Massa retida acumulada média (%)
		Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B	Amostra A	Amostra B			
1/2"	12,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
3/8"	9,50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
1/4"	6,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0	0,0	0,00	0	0
4	4,75	4,16	3,72	0,83	0,74	0,8	0,7	0,09	1	1
8	2,36	60,23	58,57	12,05	11,72	12,9	12,5	0,33	12	13
16	1,18	97,09	96,57	19,42	19,32	32,3	31,8	0,10	19	32
30	0,60	79,08	77,66	15,82	15,53	48,1	47,3	0,28	16	48
50	0,30	72,83	74,99	14,57	15,00	62,7	62,3	0,43	15	62
100	0,15	79,36	80,71	15,87	16,14	78,6	78,5	0,27	16	79
Fundo	Fundo	107,21	107,73	21,44	21,55	100,0	100,0	0,10	21	100,00
Total		499,96	499,95	100,00	100,00	-	-	0	100	-

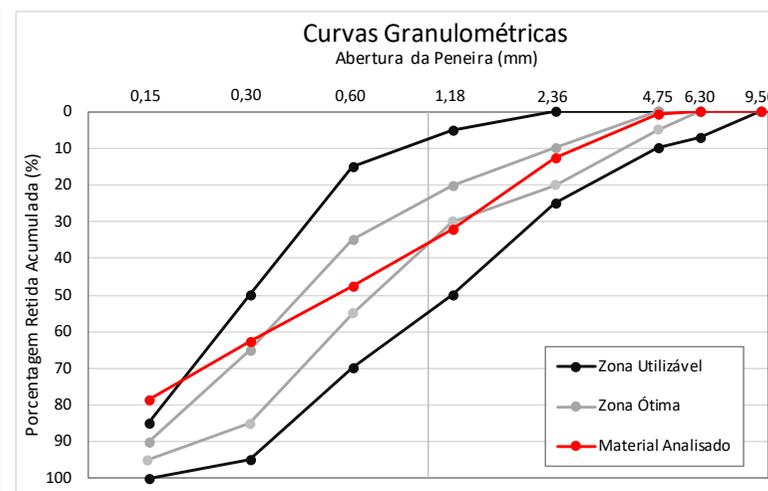
*Os valores de porcentagem retida individualmente não devem diferir mais que 4% entre si. Caso isto ocorra, repetir o peneiramento.

Dimensão Máxima Característica	4,75	Módulo de Finura	2,34
---------------------------------------	-------------	-------------------------	-------------

Limites da distribuição granulométrica do agregado miúdo - ABNT NBR 7211: 2009					
Peneira Nº	Abertura (mm)	Limites Inferiores		Limites Superiores	
		Zona Utilizável	Zona Ótima	Zona Ótima	Zona Utilizável
3/8"	9,50	0	0	0	0
1/4"	6,30	0	0	0	7
4	4,75	0	0	5	10
8	2,36	0	10	20	25
16	1,18	5	20	30	50
30	0,60	15	35	55	70
50	0,30	50	65	85	95
100	0,15	85	90	95	100

NOTAS:

- 1) O Módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.
- 2) O Módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.
- 3) O Módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.



8.8 FICHA TÉCNICA – ADITIVO (PRODUÇÃO BLOCOS)

PRODUTO: CQ PLAST PM 500

Nome do Produto: CQ Plast PM 5000**Código interno:** 700012**Empresa Fabricante:** Camargo Distribuidora de Produtos Químicos Ltda.**Natureza química:** Mistura.**Nome químico ou comum:** Tensoativo.**Ingredientes ou impurezas que contribuem para o perigo:**

Nome Químico	CAS	Faixa de Concentração (%)
Hidróxido de Sódio 50%	1310-73-2	< 5%

Estado físico: Líquido Amarelado.**Odor:** Característico.**pH (25°):** 13.**Ponto de fusão:** Não disponível.**Ponto de ebulição:** > 100° C.**Ponto de fulgor:** Não disponível.**Taxa de evaporação:** Não disponível.**Inflamabilidade:** Não inflamável.**Limite inferior de inflamabilidade ou explosividade:** Não disponível.**Limite superior de inflamabilidade ou explosividade:** Não disponível.**Pressão de vapor:** Não disponível.**Densidade de vapor:** Não disponível.**Densidade:** 1,03 g/cm³**Solubilidade em água:** Solúvel.**Coefficiente de partição n-octanol/água:** Não disponível.**Temperatura de auto-ignição:** Não disponível.**Temperatura de decomposição:** Não disponível.**Viscosidade (25 °C):** 35 a 65s em Copo Ford 4.

8.9 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA BASALTO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118:2013

CP1								CP2								CP3							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
139,73	191,03	389,40	24,64	25,67	43,13	148,13	80,48	139,78	190,44	389,20	24,24	25,27	43,44	148,31	81,41	140,62	190,73	389,42	25,96	26,30	45,84	149,36	79,71
139,61	190,90	389,10	26,75	25,78	43,14	148,51	80,49	139,59	190,29	389,10	24,11	25,39	42,99	148,43	80,25	141,49	191,11	389,02	27,06	25,99	43,98	148,53	79,76
139,69	190,13	389,20	25,56	25,11	42,44			139,90	190,96	389,06	24,45	25,72	43,20			140,56	191,89	389,30	25,50	26,85	43,01		
			25,55	43,81							25,51	43,15							25,20	44,62			
139,68	190,69	389,23	25,65	25,53	43,13	148,32	80,48	139,76	190,56	389,12	24,27	25,47	43,19	148,37	80,83	140,89	191,24	389,25	26,17	26,09	44,36	148,95	79,74

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	139,68	190,69	389,23	25,65	25,53	43,13	148,32	80,48
BL02	139,76	190,56	389,12	24,27	25,47	43,19	148,37	80,83
BL03	140,89	191,24	389,25	26,17	26,09	44,36	148,95	79,74
BL04	139,64	186,89	388,96	25,42	25,28	43,42	148,23	80,36
BL05	140,08	188,22	389,37	26,07	25,95	43,63	148,84	79,57
BL06	139,77	188,80	389,66	26,06	26,37	43,99	149,17	79,17
Bloco Médio	140	189	389	26	26	44	149	80

CP4								CP5								CP6							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{min} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
139,58	187,53	389,30	24,54	25,18	43,01	148,07	80,35	139,88	187,59	389,40	25,31	26,10	44,02	149,26	79,59	139,72	188,56	389,80	25,53	26,08	45,07	149,42	78,86
139,73	186,02	388,70	26,04	24,94	45,50	148,39	80,36	140,47	187,87	389,24	26,84	26,03	43,53	148,41	79,55	139,81	188,11	389,84	27,02	26,10	42,95	148,91	79,47
139,60	187,13	388,88	25,68	25,68	43,01			139,90	189,20	389,48	26,05	26,58	42,03			139,77	189,73	389,34	25,63	26,48	43,74		
			25,32	42,14							25,10	44,95							26,81	44,20			
139,64	186,89	388,96	25,42	25,28	43,42	148,23	80,36	140,08	188,22	389,37	26,07	25,95	43,63	148,84	79,57	139,77	188,80	389,66	26,06	26,37	43,99	149,17	79,17

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	12,350
BL 02	12,520
BL 03	12,360
Média	12,410
1ª pesagem	
BL 01	12,150
BL 02	12,310
BL 03	12,140
Média	12,200
Variação	
BL 01	1,62
BL 02	1,68
BL 03	1,78
2ª pesagem	
BL 01	12,145
BL 02	12,310
BL 03	12,140
Média	12,198
Variação	
BL 01	0,04
BL 02	0,00
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	7,390
BL 02	7,650
BL 03	7,520
Média	7,520
Água	
temp.	20°C
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,020
BL 02	13,165
BL 03	12,995
Média	13,060

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
* AA (%)	
BL 01	7,205
BL 02	6,946
BL 03	7,043
Média	7,064

ÁREA LÍQUIDA	
* A _{liq} (mm ²)	
BL 01	29778,66
BL 02	29170,40
BL 03	28958,83
Média	29302,63

UMIDADE RELATIVA	
* U _r (%)	
BL 01	23,43
BL 02	24,56
BL 03	25,73
Média	24,57

8.10 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA CALCÁRIO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118: 2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)
139,84	191,82	391,38	24,68	25,12	42,95	149,41	80,40	138,76	188,96	390,18	25,32	24,97	41,54	148,25	79,84	140,41	190,04	390,20	25,43	25,95	42,72	149,46	80,46
140,80	191,29	391,78	26,62	25,99	44,35	149,54	79,85	139,03	189,47	390,14	25,38	24,73	43,45	148,74	80,13	140,11	190,43	390,90	26,10	26,13	43,85	148,50	79,46
140,44	192,62	391,08	25,60	26,27	43,41			139,39	191,17	390,10	24,28	25,17	41,71			140,40	190,91	390,00	24,39	24,13	44,49		
			26,59	44,57							24,90	43,20								26,54	43,45		
140,36	191,91	391,41	25,63	25,99	43,82	149,48	80,13	139,06	189,87	390,14	24,99	24,94	42,48	148,50	79,99	140,31	190,46	390,37	25,31	25,69	43,63	148,98	79,96

CP4							CP5							CP6									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)
139,74	190,87	390,00	25,34	25,41	41,70	148,94	80,61	139,74	193,38	389,10	25,47	25,24	43,29	148,41	80,96	139,61	191,24	389,82	25,22	24,78	43,40	148,48	81,24
139,57	189,53	389,82	25,88	24,74	44,05	149,17	80,19	139,55	192,92	389,30	25,30	25,33	43,26	148,38	80,56	139,87	191,27	389,66	24,85	25,81	41,24	148,02	81,39
139,63	189,88	390,40	23,53	25,14	42,58			139,72	193,42	389,60	24,53	25,43	41,84			139,93	191,84	389,70	23,76	25,12	40,93		
			25,24	43,11							25,32	44,66								25,13	43,88		
139,65	190,09	390,07	24,92	25,13	42,86	149,06	80,40	139,67	193,24	389,33	25,10	25,33	43,26	148,40	80,76	139,80	191,45	389,73	24,61	25,21	42,36	148,25	81,32

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F _j (mm)	F _i (mm)
BL01	140,36	191,91	391,41	25,63	25,99	43,82	149,48	80,13
BL02	139,06	189,87	390,14	24,99	24,94	42,48	148,50	79,99
BL03	140,31	190,46	390,37	25,31	25,69	43,63	148,98	79,96
BL04	139,65	190,09	390,07	24,92	25,13	42,86	149,06	80,40
BL05	139,67	193,24	389,33	25,10	25,33	43,26	148,40	80,76
BL06	139,80	191,45	389,73	24,61	25,21	42,36	148,25	81,32
Bloco Médio	140	191	390	25	25	43	149	80

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa (m)	
BL 01	12,425
BL 02	12,625
BL 03	12,315
Média	12,455
1ª pesagem	
BL 01	12,225
BL 02	12,415
BL 03	12,105
Média	12,248
Variação	
BL 01	1,61
BL 02	1,66
BL 03	1,71
2ª pesagem	
BL 01	12,220
BL 02	12,415
BL 03	12,105
Média	12,247
Variação	
BL 01	0,04
BL 02	0,00
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	7,365
BL 02	7,515
BL 03	7,345
Média	7,408
Água	
temp.	20
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,040
BL 02	13,185
BL 03	12,845
Média	13,023

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
* AA (%)	
BL 01	6,710
BL 02	6,202
BL 03	6,113
Média	6,342

ÁREA LÍQUIDA	
* A _{liq} (mm ²)	
BL 01	29738,94
BL 02	29712,74
BL 03	28821,88
Média	29424,52

UMIDADE RELATIVA	
* U _r (%)	
BL 01	25,00
BL 02	27,27
BL 03	28,38
Média	26,88

8.11 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 6 MPA GNAISSE

Análise dimensional - ABNT NBR 12118:2013

CP1								CP2								CP3							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)
139,97	189,84	390,60	26,51	26,06	42,08	148,76	79,09	139,94	189,85	390,30	25,84	25,34	42,61	148,98	80,05	140,38	190,50	391,00	26,08	25,18	43,88	148,07	79,37
140,64	189,55	390,90	27,20	25,42	42,32	149,78	80,03	139,57	189,70	391,50	26,14	26,23	44,76	149,75	78,90	140,04	190,85	391,10	27,80	24,52	46,90	147,25	80,64
140,61	189,77	390,10	25,90	25,27	41,26			139,75	190,28	391,00	25,89	25,42	45,02			140,13	190,61	391,38	26,40	26,19	45,70		
			26,02	44,27							24,67	44,05							25,07	43,53			
140,41	189,72	390,53	26,54	25,69	42,48	149,27	79,56	139,75	189,94	390,93	25,96	25,42	44,11	149,37	79,48	140,18	190,65	391,16	26,76	25,24	45,00	147,66	80,01

CP4								CP5								CP6							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)
140,33	188,76	390,60	26,33	24,78	42,81	148,48	79,85	140,41	189,28	391,20	26,27	24,74	44,02	147,98	79,69	140,91	187,81	389,20	25,54	27,05	44,69	148,84	78,71
139,95	187,24	390,80	27,26	24,23	45,36	147,74	80,73	139,95	189,14	390,60	27,56	25,48	43,80	147,40	80,49	141,19	189,87	389,00	25,81	25,37	44,48	147,63	79,90
139,85	187,71	390,70	26,09	25,25	45,31			140,03	189,85	390,20	26,54	24,78	43,37			140,96	190,27	389,22	26,14	25,88	44,13		
			25,80	42,50							24,46	44,90						25,48	42,16				
140,04	187,90	390,70	26,56	25,02	44,00	148,11	80,29	140,13	189,42	390,67	26,79	24,87	44,02	147,69	80,09	141,02	189,32	389,14	25,83	25,95	43,87	148,24	79,31

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _i (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F _i (mm)	F _s (mm)
BL01	140,41	189,72	390,53	26,54	25,69	42,48	149,27	79,56
BL02	139,75	189,94	390,93	25,96	25,42	44,11	149,37	79,48
BL03	140,18	190,65	391,16	26,76	25,24	45,00	147,66	80,01
BL04	140,04	187,90	390,70	26,56	25,02	44,00	148,11	80,29
BL05	140,13	189,42	390,67	26,79	24,87	44,02	147,69	80,09
BL06	141,02	189,32	389,14	25,83	25,95	43,87	148,24	79,31
Bloco Médio	140	189	391	26	25	44	148	80

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa (m)	
BL 01	12,225
BL 02	12,115
BL 03	12,125
Média	12,155
1ª pesagem	
BL 01	12,010
BL 02	11,885
BL 03	11,885
Média	11,927
Variação	
BL 01	1,76
BL 02	1,90
BL 03	1,98
2ª pesagem	
BL 01	12,005
BL 02	11,885
BL 03	11,885
Média	11,925
Variação	
BL 01	0,04
BL 02	0,00
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	7,100
BL 02	7,030
BL 03	7,030
Média	7,053
Água	
temp.	20
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	12,805
BL 02	12,660
BL 03	12,655
Média	12,707

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	6,664
BL 02	6,521
BL 03	6,479
Média	6,554

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{líq} (mm ²)	
BL 01	30160,68
BL 02	29764,17
BL 03	29737,74
Média	29887,53

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	27,50
BL 02	29,68
BL 03	31,17
Média	29,45

8.12 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA BASALTO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118: 2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
141,35	189,45	391,36	25,27	26,90	44,08	149,11	79,86	139,67	189,32	391,00	25,06	27,50	42,61	148,67	79,03	139,99	188,71	391,50	25,64	26,66	42,83	147,75	78,26
141,16	188,75	392,10	26,01	26,43	41,17	149,36	79,41	140,34	189,09	390,90	26,06	25,02	42,43	148,39	79,11	139,96	188,71	391,92	25,85	26,50	40,95	148,18	80,11
140,24	188,81	392,56	25,23	25,38	42,60			140,43	191,88	390,60	25,64	26,07	44,05			139,67	186,66	392,16	25,37	25,16	43,40		
			26,65	41,80							26,39	44,00							26,98	43,51			
140,92	189,00	392,01	25,50	26,34	42,41	149,24	79,64	140,15	190,10	390,83	25,59	26,25	43,27	148,53	79,07	139,87	188,03	391,86	25,62	26,33	42,67	147,97	79,19

CP4							CP5							CP6										
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	
140,32	189,64	390,78	25,64	25,20	43,71	148,30	78,87	140,29	186,42	390,74	24,69	28,80	46,46	148,64	79,20	140,26	191,74	390,70	24,92	26,65	41,79	148,32	79,58	
140,33	189,91	391,14	25,84	26,94	42,15	148,98	79,53	139,95	187,78	390,80	26,61	26,35	43,86	148,66	78,52	140,00	191,95	390,46	26,09	25,81		148,41	78,70	
140,15	189,15	391,60	25,18	26,14	43,57			139,40	189,64	391,00	25,52	26,26	44,47			140,13	192,84	391,00	26,59	28,30				
			27,12	45,45							27,40	44,50								28,31				
140,27	189,57	391,17	25,55	26,35	43,72	148,64	79,20	139,88	187,95	390,85	25,61	27,20	44,82	148,65	78,86	140,13	192,18	390,72	25,87	27,27	41,79	148,37	79,14	

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	140,92	189,00	392,01	25,50	26,34	42,41	149,24	79,64
BL02	140,15	190,10	390,83	25,59	26,25	43,27	148,53	79,07
BL03	139,87	188,03	391,86	25,62	26,33	42,67	147,97	79,19
BL04	140,27	189,57	391,17	25,55	26,35	43,72	148,64	79,20
BL05	139,88	187,95	390,85	25,61	27,20	44,82	148,65	78,86
BL06	140,13	192,18	390,72	25,87	27,27	41,79	148,37	79,14
Bloco Médio	140	189	391	26	27	43	149	79

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	13,245
BL 02	12,525
BL 03	12,780
Média	12,85
1ª pesagem	
BL 01	12,910
BL 02	12,200
BL 03	12,450
Média	12,520
Variação	
BL 01	2,53
BL 02	2,59
BL 03	2,58
2ª pesagem	
BL 01	12,910
BL 02	12,200
BL 03	12,445
Média	12,518
Variação	
BL 01	0,00
BL 02	0,00
BL 03	0,04

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrotática	
BL 01	7,935
BL 02	7,425
BL 03	7,605
Média	7,655
Água	
temp.	20°C
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,710
BL 02	13,065
BL 03	13,295
Média	13,357

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	6,197
BL 02	7,090
BL 03	6,830
Média	6,706

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{liq} (mm ²)	
BL 01	30534,59
BL 02	29820,80
BL 03	30085,17
Média	30146,85

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	41,87
BL 02	37,57
BL 03	39,41
Média	39,62

8.13 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA CALCÁRIO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118:2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)
141,10	189,71	390,80	25,38	27,23	42,23	148,47	78,91	140,54	190,37	390,46	26,03	27,25	43,78	148,27	79,61	142,91	189,80	391,08	26,64	27,25	44,12	146,99	78,54
140,88	189,21	391,08	26,15	26,25	42,85	147,35	79,57	140,89	189,53	390,50	26,28	27,98	46,89	146,96	78,69	141,28	188,58	390,70	26,42	28,38	45,19	147,83	80,27
140,76	188,55	391,48	25,37	25,52	44,57			141,15	190,35	390,54	26,20	26,94	43,98			140,64	188,80	390,84	25,83	28,88	44,55		
				27,75	43,53							28,84	44,39							27,50	45,83		
140,91	189,16	391,12	25,63	26,69	43,30	147,91	79,24	140,86	190,08	390,50	26,17	27,75	44,76	147,62	79,15	141,61	189,06	390,87	26,30	28,00	44,92	147,41	79,41

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)
BL01	140,91	189,16	391,12	25,63	26,69	43,30	147,91	79,24
BL02	140,86	190,08	390,50	26,17	27,75	44,76	147,62	79,15
BL03	141,61	189,06	390,87	26,30	28,00	44,92	147,41	79,41
BL04	140,94	191,63	390,23	29,36	27,21	44,06	147,00	80,78
BL05	141,68	185,45	391,72	25,76	27,98	45,00	147,81	80,56
BL06	141,11	189,81	390,80	25,87	27,77	45,07	148,42	80,42
Bloco Médio	141	189	391	27	28	45	148	80

CP4							CP5							CP6									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mis} (mm)	F _i (mm)	F _c (mm)
141,52	191,56	390,60	26,43	28,15	43,74	146,67	81,09	141,84	186,14	391,10	25,80	29,97	46,10	149,23	80,62	140,70	190,58	390,84	26,11	27,03	44,92	149,16	80,52
140,67	191,12	389,76	36,31	27,58	45,29	147,32	80,47	140,94	185,44	392,30	26,52	27,28	44,62	146,39	80,50	141,37	189,73	390,58	26,55	26,93	44,35	147,67	80,32
140,62	192,20	390,32	25,33	25,98	43,90			142,25	184,78	391,76	24,96	27,77	45,00			141,26	189,13	390,98	24,94	27,52	45,85		
				27,12	43,31							26,90	44,28							29,59	45,17		
140,94	191,63	390,23	29,36	27,21	44,06	147,00	80,78	141,68	185,45	391,72	25,76	27,98	45,00	147,81	80,56	141,11	189,81	390,80	25,87	27,77	45,07	148,42	80,42

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	12,975
BL 02	13,180
BL 03	12,735
Média	12,96
1ª pesagem	
BL 01	12,650
BL 02	12,845
BL 03	12,435
Média	12,643
Variação	
BL 01	2,50
BL 02	2,54
BL 03	2,36
2ª pesagem	
BL 01	12,650
BL 02	12,845
BL 03	12,435
Média	12,643
Variação	
BL 01	0,00
BL 02	0,00
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	7,580
BL 02	7,715
BL 03	7,425
Média	7,573
Água	
temp.	20°C
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,460
BL 02	13,595
BL 03	13,185
Média	13,41

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
* AA (%)	
BL 01	6,403
BL 02	5,839
BL 03	6,031
Média	6,091

ÁREA LÍQUIDA	
* A _{líq} (mm ²)	
BL 01	31134,23
BL 02	31134,23
BL 03	30498,83
Média	30922,43

UMIDADE RELATIVA	
* U _r (%)	
BL 01	40,12
BL 02	44,67
BL 03	40,00
Média	41,60

8.14 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 12 MPA GNAISSE

Análise dimensional - ABNT NBR 12118:2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,48	190,68	391,68	26,01	25,76	41,77	146,50	80,77	140,71	189,67	389,98	26,31	25,11	43,02	147,13	80,82	141,12	190,95	390,28	24,99	26,63	42,82	147,28	80,44
140,61	190,73	391,58	26,30	27,40	42,24	147,38	80,51	140,78	188,16	389,36	26,85	25,60	41,91	147,31	81,14	141,28	190,19	390,18	26,12	26,32	43,66	146,98	80,12
140,67	190,91	391,10	25,31	25,91	42,69			140,40	188,14	389,48	26,56	28,54	44,22			140,79	190,49	390,30	26,37	27,47	42,74		
			26,34	44,02							28,26	45,28								25,93	44,12		
140,59	190,77	391,45	25,87	26,35	42,68	146,94	80,64	140,63	188,66	389,61	26,57	26,88	43,61	147,22	80,98	141,06	190,54	390,25	25,83	26,59	43,34	147,13	80,28

CP4							CP5							CP6									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,01	189,74	390,80	26,54	27,05	44,21	147,23	79,06	140,01	191,71	390,90	26,91	28,88	44,76	147,13	79,40	140,71	189,52	389,92	26,33	26,08	44,14	146,76	79,90
139,58	189,05	390,10	25,33	28,40	44,24	146,57	79,43	139,76	190,77	390,72	25,22	27,50	43,78	146,83	77,92	140,79	189,94	390,02	26,28	27,64	43,87	147,33	79,46
139,43	189,30	391,00	27,50	27,97	45,83			139,83	189,83	391,00	27,94	27,12	44,91			140,34	189,45	390,50	25,77	28,57	44,02		
			26,74	46,45							28,40	46,11								26,79	45,48		
139,67	189,36	390,63	26,46	27,54	45,50	146,90	79,25	139,87	190,77	390,87	26,69	27,98	44,89	146,98	78,66	140,61	189,64	390,15	26,13	27,27	44,38	147,05	79,68

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{máx} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	140,59	190,77	391,45	25,87	26,35	42,68	146,94	80,64
BL02	140,63	188,66	389,61	26,57	26,88	43,61	147,22	80,98
BL03	141,06	190,54	390,25	25,83	26,59	43,34	147,13	80,28
BL04	139,67	189,36	390,63	26,46	27,54	45,50	146,90	79,25
BL05	139,87	190,77	390,87	26,69	27,98	44,89	146,98	78,66
BL06	140,61	189,64	390,15	26,13	27,27	44,38	147,05	79,68
Bloco Médio	140	190	390	26	27	44	147	80

MASSA SECA (m ₁)	
* 24h na estufa; variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	13,345
BL 02	13,340
BL 03	13,050
Média	13,245
1ª pesagem	
BL 01	13,055
BL 02	13,005
BL 03	12,745
Média	12,935
2ª pesagem	
BL 01	13,055
BL 02	13,005
BL 03	12,745
Média	12,94
Variação	
BL 01	2,17
BL 02	2,51
BL 03	2,34
Variação	
BL 01	0,00
BL 02	0,00
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	7,865
BL 02	7,860
BL 03	7,670
Média	7,798
Água	
temp.	20°C
γ	0,9982

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,750
BL 02	13,690
BL 03	13,445
Média	13,628

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	5,324
BL 02	5,267
BL 03	5,492
Média	5,361

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{líq} (mm ²)	
BL 01	31036,30
BL 02	30746,25
BL 03	30456,19
Média	30746,25

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	41,73
BL 02	48,91
BL 03	43,57
Média	44,73

8.15 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA BASALTO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118: 2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,23	191,78	390,26	24,90	27,06	42,19	148,44	79,51	141,18	190,31	390,70	26,38	28,09	45,46	146,56	79,95	139,95	191,08	390,80	24,77	25,93	43,08	148,27	79,21
139,43	191,58	390,72	26,17	26,45	45,64	147,85	79,77	141,49	190,16	391,02	26,19	28,39	44,31	148,18	79,61	139,96	191,78	390,40	26,01	25,94	44,45	147,05	79,90
140,21	191,97	391,02	26,31	28,39	46,74			141,23	190,63	390,80	25,88	28,01	43,30			140,24	191,65	390,50	26,59	27,93	45,25		
			28,21	42,81							27,73	44,81						26,76	45,20				
139,96	191,78	390,67	25,79	27,53	44,35	148,15	79,64	141,30	190,37	390,84	26,15	28,06	44,47	147,37	79,78	140,05	191,50	390,57	25,79	26,64	44,50	147,66	79,56

CP4							CP5							CP6									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,38	189,13	391,10	25,64	26,66	44,35	148,53	80,43	142,40	193,51	391,48	26,63	27,38	43,27	145,48	81,06	140,44	191,74	391,07	24,99	26,98	41,15	148,52	79,66
140,64	188,03	391,08	26,26	24,62	42,05	147,63	80,51	140,54	191,62	391,70	26,20	26,41	44,10	148,19	79,77	140,17	192,01	392,00	26,15	28,30	43,77	148,45	79,36
140,84	187,81	391,30	25,32	27,32	44,73			140,77	191,87	391,72	25,35	28,04	44,09			140,55	193,42	392,06	26,75	25,95	45,24		
			26,25	43,02							28,15	43,88						27,79	43,77				
140,62	188,32	391,16	25,74	26,21	43,54	148,08	80,47	141,24	192,33	391,63	26,06	27,50	43,84	146,84	80,42	140,39	192,39	391,71	25,96	27,26	43,48	148,49	79,51

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{média} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	139,96	191,78	390,67	25,79	27,53	44,35	148,15	79,64
BL02	141,30	190,37	390,84	26,15	28,06	44,47	147,37	79,78
BL03	140,05	191,50	390,57	25,79	26,64	44,50	147,66	79,56
BL04	140,62	188,32	391,16	25,74	26,21	43,54	148,08	80,47
BL05	141,24	192,33	391,63	26,06	27,50	43,84	146,84	80,42
BL06	140,39	192,39	391,71	25,96	27,26	43,48	148,49	79,51
Bloco Médio	141	191	391	26	27	44	148	80

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	14,490
BL 02	14,025
BL 03	14,295
Média	14,270
1ª pesagem	
BL 01	14,100
BL 02	13,610
BL 03	13,825
Média	13,845
Variação	
BL 01	2,69
BL 02	2,96
BL 03	3,29
2ª pesagem	
BL 01	14,095
BL 02	13,610
BL 03	13,820
Média	13,842
Variação	
BL 01	0,04
BL 02	0,00
BL 03	0,04

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	8,710
BL 02	8,390
BL 03	8,535
Média	8,545
Água	
temp.	18°C
γ	0,9985

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	14,710
BL 02	14,300
BL 03	14,495
Média	14,502

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	4,363
BL 02	5,070
BL 03	4,884
Média	4,772

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{líq} (mm ²)	
BL 01	31440,52
BL 02	30968,91
BL 03	31230,92
Média	31213,45

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	64,23
BL 02	60,14
BL 03	70,37
Média	64,91

8.16 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA CALCÁRIO

Análise dimensional - ABNT NBR 12118:2013

CP1								CP2								CP3							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
139,78	190,73	392,70	27,19	28,56	43,96	147,61	78,99	140,31	188,33	391,80	25,53	27,74	43,21	148,12	81,90	140,20	187,93	391,60	25,32	26,32	43,90	147,53	79,71
140,20	190,58	392,30	26,95	27,29	43,97	148,77	78,61	140,37	187,46	392,00	26,43	29,56	44,94	149,15	79,64	140,09	187,33	391,62	26,74	26,75	44,06	148,88	80,84
140,80	190,64	392,26	25,74	27,86	42,92			141,69	188,06	391,70	25,00	28,12	46,33			142,91	186,24	391,48	24,83	29,34	43,93		
				38,72	45,23							26,20	44,86							27,29	44,77		
140,26	190,65	392,42	26,63	30,61	44,02	148,19	78,80	140,79	187,95	391,83	25,65	27,91	44,84	148,64	80,77	141,07	187,17	391,57	25,63	27,43	44,17	148,21	80,28

CP4								CP5								CP6							
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
141,63	187,87	390,70	26,08	27,58	45,12	147,75	79,39	141,30	188,52	391,40	26,36	27,97	43,44	147,59	78,89	141,82	187,11	391,40	26,27	28,07	44,43	148,37	80,95
141,66	188,13	390,90	26,63	28,03	44,70	148,36	78,70	141,66	188,11	390,98	26,45	28,52	43,97	147,90	81,90	141,07	188,15	390,98	26,44	28,76	46,65	147,30	78,92
141,13	187,83	390,70	26,56	28,27	44,88			141,70	189,47	391,02	26,54	27,76	44,52			141,44	187,47	390,38	26,58	28,40	45,28		
				28,83	44,72							27,67	44,63							28,30	45,28		
141,47	187,94	390,77	26,42	28,18	44,86	148,06	79,05	141,55	188,70	391,13	26,45	27,98	44,14	147,75	80,40	141,44	187,58	390,89	26,43	28,38	45,41	147,84	79,94

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e _c (mm)	e _s (mm)	r _{mi} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	140,26	190,65	392,42	26,63	30,61	44,02	148,19	78,80
BL02	140,79	187,95	391,83	25,65	27,91	44,84	148,64	80,77
BL03	141,07	187,17	391,57	25,63	27,43	44,17	148,21	80,28
BL04	141,47	187,94	390,77	26,42	28,18	44,86	148,06	79,05
BL05	141,55	188,70	391,13	26,45	27,98	44,14	147,75	80,40
BL06	141,44	187,58	390,89	26,43	28,38	45,41	147,84	79,94
Bloco Médio	141	188	391	26	28	45	148	80

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	13,735
BL 02	13,640
BL 03	13,740
Média	13,705
1ª pesagem	
BL 01	13,340
BL 02	13,225
BL 03	13,360
Média	13,308
2ª pesagem	
BL 01	13,335
BL 02	13,215
BL 03	13,350
Média	13,300
Variação	
BL 01	2,88
BL 02	3,04
BL 03	2,77
Variação	
BL 01	0,04
BL 02	0,08
BL 03	0,07

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	8,110
BL 02	8,025
BL 03	8,140
Média	8,092
Água	
temp.	18°C
γ	0,9985

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	14,020
BL 02	13,920
BL 03	13,920
Média	13,953

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	5,137
BL 02	5,335
BL 03	4,270
Média	4,914

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{líq} (mm ²)	
BL 01	31426,78
BL 02	31347,02
BL 03	30735,50
Média	31169,77

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	58,39
BL 02	60,28
BL 03	68,42
Média	62,37

8.17 CARACTERIZAÇÃO BLOCOS – 24 MPA GNAISSE

Análise dimensional - ABNT NBR 12118: 2013

CP1							CP2							CP3									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,50	191,35	390,98	26,72	26,68	43,67	146,76	79,95	142,18	188,11	391,40	26,22	26,38	44,64	146,38	80,45	140,16	189,20	391,08	26,07	26,33	43,15	146,40	80,08
140,13	190,43	390,74	27,34	27,11	43,80	148,27	79,07	141,57	188,43	391,08	26,51	27,97	44,24	146,26	79,69	139,59	190,31	391,16	26,02	26,69	43,18	147,06	79,68
140,50	190,49	390,60	25,48	26,88	43,68			140,70	188,09	391,00	26,54	27,76	43,36			139,90	188,73	390,80	25,51	26,20	43,11		
			26,88	43,82							27,10	44,24							26,85	43,33			
140,38	190,76	390,77	26,51	26,89	43,74	147,52	79,51	141,48	188,21	391,16	26,42	27,30	44,12	146,32	80,07	139,88	189,41	391,01	25,87	26,52	43,19	146,73	79,88

	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
BL01	140,38	190,76	390,77	26,51	26,89	43,74	147,52	79,51
BL02	141,48	188,21	391,16	26,42	27,30	44,12	146,32	80,07
BL03	139,88	189,41	391,01	25,87	26,52	43,19	146,73	79,88
BL04	141,65	189,25	392,24	25,90	26,76	43,98	146,52	80,21
BL05	139,16	188,04	391,50	25,85	26,16	44,17	146,32	79,69
BL06	141,08	188,87	392,52	25,78	26,81	43,61	146,95	79,81
Bloco Médio	141	189	392	26	27	44	147	80

CP4							CP5							CP6									
L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)	L(mm)	H(mm)	C(mm)	e ₁ (mm)	e ₂ (mm)	r _{mis} (mm)	F ₁ (mm)	F ₂ (mm)
140,96	188,72	392,10	25,80	26,72	44,67	146,22	80,79	139,45	188,88	391,78	26,20	26,12	45,16	146,29	79,04	140,38	189,61	392,60	25,99	27,39	44,47	146,85	80,25
141,93	189,03	392,30	25,83	27,29	43,82	146,81	79,63	138,69	188,77	391,54	26,24	45,44	146,34	80,33	141,13	188,77	392,36	25,63	26,58	42,91	147,04	79,36	
142,06	190,01	392,32	26,06	25,95	43,39			139,33	186,46	391,18	25,32	26,09	42,11			141,73	188,23	392,60	25,71	27,16	42,90		
			27,06	44,05							26,20	43,95							26,11	44,17			
141,65	189,25	392,24	25,90	26,76	43,98	146,52	80,21	139,16	188,04	391,50	25,85	26,16	44,17	146,32	79,69	141,08	188,87	392,52	25,78	26,81	43,61	146,95	79,81

MASSA SECA (m ₁)	
* variação máxima de 0,5%	
Antes da estufa	
BL 01	13,635
BL 02	13,850
BL 03	13,360
Média	13,615
1ª pesagem	
BL 01	13,250
BL 02	13,445
BL 03	12,945
Média	13,213
2ª pesagem	
BL 01	13,250
BL 02	13,440
BL 03	12,945
Média	13,212
Variação	
BL 01	2,82
BL 02	2,92
BL 03	3,11
Variação	
BL 01	0,00
BL 02	0,04
BL 03	0,00

MASSA APARENTE (m ₃)	
* Após 24h imerso e pesado em balança hidrostática	
BL 01	8,020
BL 02	8,155
BL 03	7,810
Média	7,995
Água	
temp.	18°C
γ	0,9985

MASSA SATURADA (m ₂)	
* Após 24h imerso e drenado por 60 seg	
BL 01	13,890
BL 02	14,080
BL 03	13,600
Média	13,857

ABSORÇÃO DE ÁGUA	
*AA (%)	
BL 01	4,830
BL 02	4,762
BL 03	5,060
Média	4,884

ÁREA LÍQUIDA	
*A _{líq} (mm ²)	
BL 01	31088,81
BL 02	31380,10
BL 03	30665,11
Média	31044,67

UMIDADE RELATIVA	
*U _r (%)	
BL 01	60,16
BL 02	64,06
BL 03	63,36
Média	62,53

8.18 LEITURAS DE TEMPERATURA E RESULTADO DE MODELAGEM

Tempo (min)	Ensaio							Modelagem							Diferença Ensaio × Modelagem						
	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	M.P1	M.P2	M.P3	M.P4	M.P5	M.P6	M.P7	1	2	3	4	5	6	7
0	25	25	25	24	25	25	25	25	25	25	25	25	25	25	-	-	-	1.0	-	-	-
8	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33	0.5	0.5	0.5	0.0	0.5	0.5	0.5
16	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	41	0.2	0.2	0.2	0.1	0.2	0.2	0.2
24	48	48	48	47	48	48	48	48	48	48	48	48	48	48	0.3	0.3	0.3	1.1	0.3	0.3	0.3
32	56	56	56	55	56	56	56	56	56	56	56	56	56	56	0.1	0.1	0.1	0.9	0.1	0.1	0.1
40	65	65	64	63	64	65	65	64	64	64	64	64	64	64	0.9	0.9	0.0	0.9	0.0	0.9	0.9
48	73	73	72	71	72	73	73	72	72	72	72	72	72	72	1.0	1.0	0.0	0.8	0.0	1.0	1.0
56	81	81	80	79	80	81	81	80	80	80	80	80	80	80	1.0	1.0	0.0	0.8	0.0	1.0	1.0
64	89	89	87	87	88	89	89	88	88	88	88	88	88	88	1.0	1.0	1.0	0.8	0.0	1.0	1.0
72	97	97	96	95	96	97	97	96	96	96	96	96	96	96	1.0	1.0	0.1	0.8	0.1	1.0	1.0
80	105	105	103	100	103	105	105	103	103	103	103	103	103	103	2.3	2.3	0.4	2.5	0.4	2.3	2.3
88	110	110	110	107	110	110	110	109	109	109	109	109	109	109	0.8	0.8	0.8	2.0	0.8	0.8	0.8
96	116	116	116	116	116	116	116	116	116	116	115	116	116	116	0.5	0.5	0.5	0.9	0.5	0.5	0.5
104	122	122	122	122	122	122	122	122	122	122	121	122	122	122	0.0	0.0	0.1	0.6	0.1	0.0	0.0
112	129	129	129	128	129	129	129	128	128	128	128	128	128	128	0.5	0.5	0.6	0.2	0.6	0.5	0.5
120	135	135	135	135	135	135	135	135	135	135	134	135	135	135	0.1	0.1	0.1	0.8	0.1	0.1	0.1
128	143	143	143	142	143	143	143	142	142	142	141	142	142	142	1.1	1.1	1.2	1.1	1.2	1.1	1.1
136	152	152	152	151	152	152	152	150	150	150	149	150	150	150	2.1	2.1	2.1	2.3	2.1	2.1	2.1
144	162	162	162	160	162	162	162	158	158	158	157	158	158	158	3.7	3.7	3.8	3.1	3.8	3.7	3.7
152	171	171	171	170	171	171	171	167	167	167	165	167	167	167	4.2	4.2	4.3	4.7	4.3	4.2	4.2
160	181	181	181	179	181	181	181	175	175	175	174	175	175	175	5.6	5.6	5.7	5.2	5.7	5.6	5.6
168	191	191	190	189	190	191	191	184	184	184	182	184	184	184	7.0	7.0	6.1	6.5	6.1	7.0	7.0
176	201	200	199	195	200	201	201	193	193	193	191	193	193	193	8.3	7.3	6.4	3.9	7.4	8.3	8.3
184	207	207	207	205	207	207	207	201	201	201	200	201	201	201	5.6	5.6	5.7	5.1	5.7	5.6	5.6
192	215	215	215	214	215	215	215	210	210	210	208	210	210	210	5.3	5.3	5.4	5.7	5.4	5.3	5.3

200	223	223	223	222	223	223	223	218	218	218	217	218	218	218	5.1	5.1	5.1	5.4	5.1	5.1	5.1
208	231	231	231	229	231	231	231	226	226	226	225	226	226	226	4.9	4.9	5.0	4.2	5.0	4.9	4.9
216	239	239	239	238	239	239	239	234	234	234	233	234	234	234	4.8	4.8	4.8	5.0	4.8	4.8	4.8
224	247	247	247	246	247	247	247	242	242	242	241	242	242	242	4.6	4.6	4.7	4.8	4.7	4.6	4.6
232	255	255	255	254	255	255	255	251	251	250	249	250	251	251	4.5	4.5	4.5	4.6	4.5	4.5	4.5
240	263	263	263	262	263	263	263	259	259	259	258	259	259	259	4.3	4.3	4.4	4.5	4.4	4.3	4.3
248	270	270	270	269	270	270	270	267	267	267	266	267	267	267	3.2	3.2	3.3	3.3	3.3	3.2	3.2
256	278	278	278	277	278	278	278	275	275	275	273	275	275	275	3.3	3.3	3.4	3.7	3.4	3.3	3.3
264	286	286	286	285	286	286	286	283	283	283	281	283	283	283	3.3	3.3	3.4	3.8	3.4	3.3	3.3
272	294	294	294	293	294	294	294	291	291	291	289	291	291	291	3.2	3.2	3.3	3.8	3.3	3.2	3.2
280	303	302	304	301	304	305	303	299	299	299	298	299	299	299	4.1	3.1	5.1	3.0	5.1	6.1	4.1
288	311	311	311	310	311	311	311	307	307	307	306	307	307	307	4.0	4.0	4.0	3.6	4.0	4.0	4.0
296	319	319	319	318	319	319	319	315	315	315	315	315	315	315	3.8	3.8	3.8	3.3	3.8	3.8	3.8
304	327	327	327	326	327	327	327	323	323	323	323	323	323	323	3.6	3.6	3.7	3.1	3.7	3.6	3.6
312	335	335	335	335	335	335	335	332	332	332	331	332	332	332	3.4	3.4	3.5	3.9	3.5	3.4	3.4
320	343	343	343	343	343	343	343	340	340	340	339	340	340	340	3.3	3.3	3.3	3.7	3.3	3.3	3.3
328	351	351	351	351	351	351	351	348	348	348	347	348	348	348	3.1	3.1	3.1	3.5	3.1	3.1	3.1
336	359	359	359	359	359	359	359	356	356	356	355	356	356	356	3.2	3.2	3.3	4.0	3.3	3.2	3.2
344	367	367	367	366	367	367	367	364	364	364	363	364	364	364	3.2	3.2	3.2	3.0	3.2	3.2	3.2
352	375	375	375	375	375	375	375	372	372	372	371	372	372	372	3.0	3.0	3.1	3.9	3.1	3.0	3.0
360	384	384	384	383	384	384	384	380	380	380	379	380	380	380	3.8	3.8	3.9	3.7	3.9	3.8	3.8
368	392	392	392	391	392	392	392	388	388	388	388	388	388	388	3.7	3.7	3.7	3.5	3.7	3.7	3.7
376	399	397	400	397	399	400	399	397	397	397	396	397	397	397	2.5	0.5	3.5	1.3	2.5	3.5	2.5
384	408	408	408	407	408	408	408	405	405	405	404	405	405	405	3.4	3.4	3.4	3.1	3.4	3.4	3.4
392	416	416	416	415	416	416	416	413	413	413	412	413	413	413	3.4	3.4	3.4	3.1	3.4	3.4	3.4
400	424	424	424	423	424	424	424	421	421	421	420	421	421	421	3.4	3.4	3.4	3.1	3.4	3.4	3.4
408	432	432	432	431	432	432	432	429	429	429	428	429	429	429	3.4	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.4
416	440	440	440	439	440	440	440	437	437	437	436	437	437	437	3.4	3.4	3.4	3.2	3.4	3.4	3.4
424	447	447	447	447	447	447	447	445	445	445	444	445	445	445	2.4	2.4	2.5	3.2	2.5	2.4	2.4

432	455	455	455	455	455	455	455	453	453	453	452	453	453	453	2.5	2.5	2.5	3.2	2.5	2.5	2.5
440	463	463	463	463	463	463	463	460	460	460	460	460	460	460	2.5	2.5	2.5	3.3	2.5	2.5	2.5
448	471	471	471	471	471	471	471	468	468	468	468	468	468	468	2.5	2.5	2.6	3.3	2.6	2.5	2.5
456	478	478	478	479	478	478	478	476	476	476	476	476	476	476	1.6	1.6	1.6	3.3	1.6	1.6	1.6
464	486	486	486	487	486	486	486	484	484	484	484	484	484	484	1.6	1.6	1.6	3.4	1.6	1.6	1.6
472	494	494	494	495	494	494	494	492	492	492	492	492	492	492	1.6	1.6	1.6	3.4	1.6	1.6	1.6
480	503	500	504	502	502	504	503	500	500	500	500	500	500	500	2.7	0.3	3.7	2.4	1.7	3.7	2.7
488	511	509	509	510	510	511	511	508	508	508	508	508	508	508	2.7	0.7	0.7	2.5	1.7	2.7	2.7
496	519	517	517	518	517	519	519	516	516	516	516	516	516	516	2.7	0.7	0.7	2.5	0.7	2.7	2.7
504	527	525	525	526	525	527	527	524	524	524	523	524	524	524	2.7	0.7	0.8	2.5	0.8	2.7	2.7
512	535	533	534	534	533	535	535	532	532	532	531	532	532	532	2.8	0.8	1.8	2.5	0.8	2.8	2.8
520	543	541	542	542	541	543	543	540	540	540	539	540	540	540	2.8	0.8	1.8	2.6	0.8	2.8	2.8
528	551	549	550	550	549	551	551	548	548	548	547	548	548	548	2.8	0.8	1.8	2.6	0.8	2.8	2.8
536	559	557	558	558	557	559	559	556	556	556	555	556	556	556	2.8	0.8	1.9	2.6	0.9	2.8	2.8
544	567	565	566	566	565	567	567	564	564	564	563	564	564	564	2.9	0.9	1.9	2.7	0.9	2.9	2.9
552	575	573	574	574	573	575	575	572	572	572	571	572	572	572	2.9	0.9	1.9	2.7	0.9	2.9	2.9
560	583	581	582	582	581	583	583	580	580	580	579	580	580	580	2.9	0.9	1.9	2.7	0.9	2.9	2.9
568	591	588	589	590	589	591	591	588	588	588	587	588	588	588	3.3	0.3	1.3	3.4	1.3	3.3	3.3
576	599	596	599	598	597	599	599	596	596	596	594	596	596	596	3.4	0.4	3.4	3.7	1.4	3.4	3.4
584	607	604	607	606	604	607	607	604	604	603	602	603	604	604	3.5	0.5	3.5	3.8	0.5	3.5	3.5
592	615	612	615	614	612	615	615	611	611	611	610	611	611	611	3.5	0.5	3.5	3.8	0.5	3.5	3.5
600	623	620	623	622	620	623	623	619	619	619	618	619	619	619	3.5	0.5	3.6	3.8	0.6	3.5	3.5
608	631	628	631	630	628	631	631	627	627	627	626	627	627	627	3.6	0.6	3.6	3.9	0.6	3.6	3.6
616	639	636	639	638	636	639	639	635	635	635	634	635	635	635	3.6	0.6	3.6	3.9	0.6	3.6	3.6
624	647	644	647	646	644	647	647	643	643	643	642	643	643	643	3.6	0.6	3.7	3.9	0.7	3.6	3.6
632	655	652	655	654	652	655	655	651	651	651	650	651	651	651	3.7	0.7	3.7	4.0	0.7	3.7	3.7
640	663	660	663	662	660	663	663	659	659	659	658	659	659	659	3.7	0.7	3.7	4.0	0.7	3.7	3.7
648	671	668	671	670	668	671	671	667	667	667	666	667	667	667	3.7	0.7	3.7	4.0	0.7	3.7	3.7
656	679	676	679	678	676	679	679	675	675	675	674	675	675	675	3.7	0.7	3.8	4.1	0.8	3.7	3.7

664	687	684	687	686	684	687	687	683	683	683	682	683	683	683	3.8	0.8	3.8	4.1	0.8	3.8	3.8
672	695	692	695	694	692	695	695	691	691	691	690	691	691	691	3.8	0.8	3.8	4.1	0.8	3.8	3.8
680	703	699	703	702	699	703	703	699	699	699	698	699	699	699	3.8	-0.2	3.9	4.2	-0.1	3.8	3.8
688	709	708	709	708	708	709	709	707	707	707	706	707	707	707	2.2	1.2	2.2	2.2	1.2	2.2	2.2
696	717	716	717	716	716	717	717	715	715	715	714	715	715	715	2.3	1.3	2.4	2.2	1.4	2.3	2.3
704	725	724	725	724	724	725	725	723	723	723	722	723	723	723	2.4	1.4	2.4	2.3	1.4	2.4	2.4
712	733	732	733	732	732	733	733	731	731	731	730	731	731	731	2.4	1.4	2.5	2.3	1.5	2.4	2.4
720	741	740	741	740	740	741	741	739	739	739	738	739	739	739	2.5	1.5	2.5	2.3	1.5	2.5	2.5
728	749	748	749	748	748	749	749	747	747	746	746	746	747	747	2.5	1.5	2.5	2.4	1.5	2.5	2.5
736	757	756	757	755	756	757	757	754	754	754	753	754	754	754	2.8	1.8	2.9	2.0	1.9	2.8	2.8
744	765	764	765	763	764	765	765	762	762	762	761	762	762	762	3.0	2.0	3.0	2.3	2.0	3.0	3.0
752	773	772	773	771	772	773	773	770	770	770	769	770	770	770	3.1	2.1	3.1	2.4	2.1	3.1	3.1
760	780	779	780	779	779	780	780	778	778	778	777	778	778	778	2.1	1.1	2.1	2.4	1.1	2.1	2.1
768	788	787	788	787	787	788	788	786	786	786	785	786	786	786	2.1	1.1	2.2	2.5	1.2	2.1	2.1
776	796	794	795	796	794	796	796	794	794	794	792	794	794	794	2.2	0.2	1.2	3.5	0.2	2.2	2.2
784	799	794	799	798	794	798	799	797	797	797	796	797	797	797	2.0	-3.0	2.0	2.0	-3.0	1.0	2.0
792	799	799	799	798	799	798	799	799	799	799	798	799	799	799	0.3	0.3	0.3	0.1	0.3	-0.7	0.3
800	800	800	800	799	800	800	800	799	799	799	799	799	799	799	0.8	0.8	0.8	0.4	0.8	0.8	0.8
808	800	800	800	800	800	800	800	800	800	800	799	800	800	800	0.3	0.3	0.3	-0.5	0.3	0.3	0.3