

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

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS AO ATAQUE DE
SULFATOS: EFEITO DA ADIÇÃO DA NANOSÍLICA**

Rosana Schmalz

São Carlos
2018

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

**DURABILIDADE DE ARGAMASSAS SUBMETIDAS AO ATAQUE DE
SULFATOS: EFEITO DA ADIÇÃO DA NANOSÍLICA**

Rosana Schmalz

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

Coorientador: Dr. Valdecir A. Quarcioni

São Carlos
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

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

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado da candidata Rosana Schmalz, realizada em 28/03/2018:

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar

Prof. Dr. Eduardo Pereira
UEPG

Profa. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
EESC/USP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Eduardo Pereira e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.

Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

*Aos meus pais, Romeu e Gissela,
meus maiores incentivadores.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, mentor de todas as coisas, que fez tudo isso ser possível.

À Professora Fernanda Giannotti, que me acolheu no início deste trabalho e me orientou com tanta dedicação. Obrigada pela confiança, pelas inúmeras reuniões e principalmente pela tranquilidade como conduziu isso tudo.

Aos meus pais Romeu e Gissela, que sempre me incentivaram a buscar conhecimento e por terem me ensinado, por meio dos seus exemplos, que um sonho realizado é consequência de muita dedicação. Obrigada pela liberdade, pela confiança, pelo amor incondicional.

Aos demais familiares, em especial meus avós, Nadir e Onestor, por todo o amor que me deram, por acreditarem em mim e me colocarem em suas orações diariamente.

Ao Carlinhos, meu melhor amigo, meu amor, por ser minha melhor companhia e meu equilíbrio. Obrigada por todas as conversas. Sua ajuda foi fundamental em muitas etapas deste trabalho.

Aos amigos do Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil. A jornada foi mais leve com vocês. Obrigada pela troca de conhecimentos, pelos auxílios nos ensaios e, principalmente, pelos momentos de descontração. Levarei vocês nas melhores lembranças.

Aos demais amigos que trago da infância, da faculdade, da obra. Obrigada por estarem presentes, mesmo que distantes, e por trazerem mais alegria à minha vida.

Aos Professores Alessandra Castro e Eduardo Pereira e ao Pesquisador Valdecir Angelo Quarcioni, pelas valiosas contribuições, que sem dúvida fizeram diferença neste trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da UFSCar, pelo auxílio na realização dos ensaios e pelos momentos de descontração. Um agradecimento especial ao técnico José Roberto, por toda a colaboração e pela companhia diária.

Ao técnico Ricardo Canato, do Laboratório de Sistemas Estruturais (LSE) da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar) e ao pessoal do Laboratório de Estruturas (LE) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), pelo apoio na realização dos ensaios de resistência mecânica.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) e ao Fundo de Apoio ao IPT (FIPT) pela parceria no desenvolvimento dessa pesquisa por meio do Programa

Novos Talentos. E aos colegas do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do IPT, pelo auxílio na realização dos ensaios de durabilidade. Em especial ao técnico Roberto, por todo empenho e parceria.

Às empresas que contribuíram com os materiais utilizados nessa pesquisa: Tecnosil pelo fornecimento da sílica ativa; Holcim Brasil, pelo cimento; e Akzonobel, pela nanosílica.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão do auxílio financeiro durante boa parte do mestrado.

RESUMO

SCHMALZ, Rosana. **Durabilidade de argamassas submetidas ao ataque de sulfatos: efeito da adição da nanosílica**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

A durabilidade é uma das características a serem consideradas nas etapas de projeto e dimensionamento de estruturas de concreto, uma vez que está relacionada com a vida útil das obras. Entre os agentes agressivos mais prejudiciais ao concreto estão os íons sulfato, tanto de origem interna quanto externa, que quando em contato com os produtos de hidratação do cimento, provocam expansão e a fissuração da matriz cimentícia. Com isso, o presente trabalho teve o intuito de produzir materiais cimentícios mais duráveis frente ao ataque de sulfato, com o uso de nanosílica, uma adição mineral com granulometria inferior à sílica ativa, que reage química e fisicamente nas reações de hidratação do cimento. Para isso, foram moldados corpos de prova de argamassa de traço 1:3,20 (cimento:areia), duas relações água/aglomerante (0,40 e 0,50) e 3 teores de nanosílica coloidal (1, 5 e 10%). Além disso, avaliou-se seu efeito combinado com a sílica ativa. Avaliou-se as propriedades mecânicas e físicas das argamassas, por meio de ensaios de resistência mecânica e de absorção de água por capilaridade, e sua durabilidade frente ao ataque de sulfatos, por meio de ensaios de variação dimensional, análises químicas e microscópicas. Os ataques por sulfatos se deram externamente, por meio de imersão dos corpos de prova em solução de sulfato de sódio (10%), e internamente, por meio da utilização de uma água de amassamento contendo sulfatos (3%). Além disso, algumas argamassas foram submetidas à cura térmica a 85°C, com a finalidade verificar a ocorrência de um ataque interno de sulfatos, decorrentes de altas temperaturas. De um modo geral, os resultados obtidos indicaram que a nanosílica contribuiu para o aumento da resistência à compressão e, principalmente, para a redução dos coeficientes de absorção capilar das argamassas, devido aos seus efeitos fíler e pozolânico. Quanto à durabilidade frente ao ataque de sulfatos, de origem externa e interna, não foi possível verificar os efeitos positivos da nanosílica nas argamassas submetidas à cura úmida, uma vez que ao longo dos 91 dias de ensaio não foram observados indícios de expansão decorrentes das reações entre os agentes agressivos e os produtos de hidratação do cimento. Já para as argamassas submetidas à cura térmica, a adição de 10% de nanosílica foi eficiente na mitigação da formação de etringita tardia (DEF), impedindo que ocorresse expansão e fissuração. Por fim, concluiu-se que a adição de nanosílica resulta em efeitos positivos na microestrutura da matriz cimentícia, reduzindo a sua permeabilidade e, conseqüentemente, aumentando sua durabilidade frente aos agentes agressivos.

Palavras-chave: argamassas, durabilidade, ataque por sulfatos, nanosílica.

ABSTRACT

SCHMALZ, Rosana. **Durability of mortars exposed to sulfate attack: nanosilica addition effects**. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

Durability is one of the characteristics to be considered in design and projects of concrete structures as it is related to the useful life of buildings. Among the aggressive agents most damaging to the concrete are sulfate ions, both internal and external, that when in contact with the cement hydration products, cause expansion and cracking of the cementitious matrix. The purpose of this work was to produce more durable cementitious materials against the sulfate attack, with the use of nanosilica, a mineral addition with a lower particle size than the silica fume, which reacts chemically and physically in the hydration reactions of the cement. For this purpose, 1: 3.20 (cement: sand) mortar specimens were tested, two water/binder ratios (0.40 and 0.50) and three colloidal nanosilica contents (1, 5 and 10%). In addition, its effect was evaluated in combination with the silica fume. The mortars mechanical and physical properties were evaluated by means of mechanical strength tests and water absorption by capillarity, and their durability against the sulfate attack by means of dimensional variation tests, chemical and microscopic analyzes. Sulfate attacks were carried out externally, by immersing the test specimens in sodium sulfate solution (10%), and internally by using a sulfate-containing mixing water (3%). In addition, some mortars were subjected to heat cure at 85°C, in order to verify the occurrence of an internal sulfate attack, due to high temperatures. In general, the results indicated that the nanosilica contributed to the increase of the compressive strength and, mainly, to the reduction of the capillary absorption coefficients of the mortars, due to its filler and pozzolanic effects. Regarding the durability against sulfate attack, both external and internal, it was not possible to verify the positive effects of nanosilica on mortars subjected to wet curing, since during the 91 days of the experiment no evidence of expansion was observed. As for mortars subjected to heat curing, the 10% nanosilica addition was efficient in mitigating delayed ettringite formation (DEF), preventing expansion and cracking. Finally, it was concluded that the nanosilica addition results in positive effects on the cementitious matrix microstructure, reducing its permeability and, consequently, increasing its durability against aggressive agents.

Key-words: mortars, durability, sulfate attack, nanosilica.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Consumo de cimento no Brasil. _____	17
Figura 1.2 - Evolução dos custos – Lei de Sitter (SITTER, 1984). _____	18
Figura 2.1 - a) Ponte da Confederação sobre a água (Fonte: http://migre.me/wnbGz) e b) Estrutura da ponte em contato com o gelo (Fonte: http://migre.me/wnbBf). _____	29
Figura 2.2 - Ponte Rion-Antirion, Grécia. Localizada em ambiente marinho e projetada para uma vida útil de 120 anos (Fonte: http://migre.me/wnbP1). _____	30
Figura 2.3 - Porto do Pecém, Ceará. Inserido em uma atmosfera marinha de alta agressividade. (Fonte: http://migre.me/wnbRf). _____	30
Figura 2.4 - Dimensão dos poros relacionados com os mecanismos de transporte de fluidos (HELENE, 1993). _____	32
Figura 2.5 - Relação entre a permeabilidade e a relação água/cimento para pastas de cimento (NEVILLE, 2015). _____	34
Figura 2.6 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (Adaptado de SANCHEZ; SOBOLEV, 2010). _____	37
Figura 2.7 - Reações de hidratação do cimento na presença de nanosilica (SINGH et al., 2013). _____	38
Figura 3.1 - Manifestações do ataque por sulfatos (AL-AMOUDI, 2002). _____	43
Figura 3.2 - Reações químicas envolvendo a gipsita (SOUZA, 2006). _____	47
Figura 3.3 - DEF devido ao ataque por sulfatos de origem externa (Fonte: Adaptado de Collepari, 2003). _____	51
Figura 3.4 - DEF devido ao ataque por sulfatos de origem interna (Fonte: Adaptado de Collepari, 2003). _____	51
Figura 4.1 - Etapas do programa experimental. _____	58
Figura 4.2 - Fluxograma dos ataques por sulfatos submetidos às argamassas. _____	60
Figura 4.3 - Ensaio do Cone de Marsh. _____	62
Figura 4.4 - Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo Método AFREM (CASTRO, 2007). _____	63
Figura 4.5 - Ensaio de miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro após espalhamento. _____	64
Figura 4.6 - Ensaio de resistência à compressão simples. _____	67
Figura 4.7 - Ensaio de absorção de água por capilaridade. _____	68

Figura 4.8 – Relógio comparador de comprimento: a) ajuste com barra-padrão e b) leitura do comprimento do corpo de prova. _____	69
Figura 4.9 - Procedimento de cura para ataque externo de sulfatos. _____	70
Figura 4.10 - Estágios de cura realizados no ataque externo de sulfatos: a) cura inicial úmida; b) cura inicial térmica - posicionamento dos moldes no banho térmico; c) cura inicial térmica a 85°C; d) barras de argamassa posicionadas nos recipientes contendo solução de água saturada com cal; e) cura intermediária; f) cura final em estufa. _____	71
Figura 4.11 - Procedimento de cura para ataque interno de sulfatos. _____	72
Figura 4.12 - Análises microscópicas: a) amostras fixadas sobre os stubs; b) equipamento para aplicação de vácuo e recobrimento das amostras e c) microscópio eletrônico de varredura FEI FEG-QUANTA 400F. _____	73
Figura 4.13 - Amostras para análises químicas: a) seção do corpo de prova de argamassa preparada para análises químicas e b) amostras moídas. _____	74
Figura 5.1- Curva de distribuição granulométrica da areia fina e da areia média. _____	78
Figura 5.2 - Curva de distribuição granulométrica da composição: 50% de areia média e 50% de areia fina. _____	79
Figura 5.3 - Curvas de Log (T) x teor de SP. _____	83
Figura 5.4 - Curva de área de espalhamento x tempo para pastas de CPV ARI. _____	84
Figura 5.5 - Área de espalhamento para as pastas de cimento Portland: a) P4-REF; b) P4-10-0 e b) P4-1-10. _____	85
Figura 5.6 - Argamassas após ensaio de consistência, sem sinais de segregação e exsudação: a) A4-1-0, b) A4-5-0 e c) A4-10-0. _____	86
Figura 5.7 - Corpos de prova rompidos no ensaio de compressão axial. _____	87
Figura 5.8 - Evolução da resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,40. _____	88
Figura 5.9 - Evolução da resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,50. _____	88
Figura 5.10 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 aos 7 e 28 dias. _____	92
Figura 5.11 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 aos 7 e 28 dias. _____	92
Figura 5.12 - Máxima ascensão capilar e índice de absorção capilar das argamassas após 72 horas de ensaio, aos 7 e 28 dias. _____	94
Figura 5.13 - Corpos de prova fraturados após ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) A4-REF; b) A4-1-0; c) A4-5-0; d) A4-10-0 e e) A4-1-10. _____	94
Figura 5.14 - Corpos de prova fraturados após ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) A5-REF; b) A5-1-0; c) A5-5-0; d) A5-10-0 e e) A5-1-10. _____	95

Figura 5.15 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque externo de sulfatos. _____	97
Figura 5.16 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque interno de sulfatos. _____	98
Figura 5.17 - Argamassas submetidas à cura úmida após 91 dias de ensaio: a) sem ataque, b) ataque externo e c) ataque interno. _____	100
Figura 5.18 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura térmica. _____	101
Figura 5.19 - Argamassas submetidas à cura térmica após ataque externo de sulfatos durante 91 dias: a) A4-10-0; b) e c) A4-REF. _____	102
Figura 5.20 - Micrografia da argamassa de referência (A4-REF) submetida à cura úmida: poros preenchidos com portlandita e etringita primária. _____	103
Figura 5.21 - Micrografia da argamassa de referência (A4-REF) submetida à cura úmida: a) zona de transição e b) grão de Hadley. _____	104
Figura 5.22 - Micrografia da argamassa com 10% de nanosílica (A4-10-0) submetida à cura úmida. _____	104
Figura 5.23 - Micrografia da argamassa A4-REF submetida à cura térmica e ao ataque externo de sulfatos: a) agregado envolto por etringita; b) Interface pasta agregado com agulhas de etringita e ponto de análise de EDS; c) e d) etringita presente na interface pasta agregado. _____	105
Figura 5.24 - Espectros de EDS da micrografia da argamassa A4-REF submetida à cura térmica e ao ataque externo de sulfatos, referente à Figura 5.23b. _____	106
Figura 5.25 - Micrografia da argamassa com 10 % de nanosílica (A4-10-0) submetida à cura térmica. _____	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ambiental (CAA) e parâmetros de projeto para o concreto armado, conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). _____	24
Tabela 2.2 - Classes de exposição definidas pela Norma Europeia NP 206-1 (EN, 2007). _____	25
Tabela 2.3 - Valores limites para composição e propriedades do concreto, conforme NP 206-1 (EN, 2007). _____	26
Tabela 2.4 - Classes de agressividade definidas pelo ACI 318-14 (ACI, 2014). _____	27
Tabela 2.5 - Valores limites e requisitos para o concreto em função da classe de agressividade ambiental, conforme o ACI 318-14 (ACI, 2014). _____	28
Tabela 2.6 - Valores de cobrimento da armadura, conforme o ACI 318-14 (ACI, 2014). _____	28
Tabela 2.7 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto de acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014). _____	31
Tabela 2.8 - Períodos mínimos de cura de acordo com a relação a/c e o tipo de cimento (THOMAZ, 2005). _____	35
Tabela 3.1 - Características dos principais tipos de sais selenitosos (SILVA FILHO, 1994). _____	41
Tabela 3.2 - Requisitos para o concreto exposto a soluções contendo sulfatos, conforme NBR 12655:2015 (ABNT, 2015). _____	44
Tabela 3.3 - Comparação entre as normas brasileira e americana para avaliação do ataque por sulfatos. _____	44
Tabela 3.4 - Formação da etringita tardia pelo ataque de sulfatos externos e internos (COLLEPARDI, 2013). _____	50
Tabela 3.5 - Pesquisas brasileiras: dosagem, cura e tipo de ataque por sulfatos. _____	54
Tabela 3.6 - Pesquisas brasileiras: ensaios para avaliação da durabilidade frente ao ataque de sulfatos. _____	55
Tabela 3.7 - Pesquisas recentes sobre o ataque de sulfatos pelo mundo. _____	56
Tabela 4.1 - Ensaios realizados e dimensões dos corpos de prova. _____	66
Tabela 5.1 - Propriedades físicas do CPV ARI. _____	76
Tabela 5.2 - Propriedades químicas do CPV ARI. _____	77
Tabela 5.3 - Características físicas dos agregados miúdos. _____	77
Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica da areia fina. _____	78
Tabela 5.5 - Determinação da composição ideal entre areia fina e areia média. _____	79
Tabela 5.6 - Caracterização da nanosílica. _____	80

Tabela 5.7 - Características físicas e químicas da sílica ativa. _____	80
Tabela 5.8 - Caracterização do aditivo superplastificante. _____	81
Tabela 5.9 - Composição dos traços das pastas. _____	82
Tabela 5.10 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh para as pastas de CPV ARI. ____	82
Tabela 5.11 - Resultados do ensaio de miniabatimento para as pastas de CPV ARI. ____	84
Tabela 5.12 - Composição dos traços de argamassa e consistências obtidas. _____	86
Tabela 5.13 - Resistência à compressão axial das argamassas. _____	87
Tabela 5.14 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 aos 7 e 28 dias. _____	91
Tabela 5.15 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 aos 7 e 28 dias. _____	91
Tabela 5.16 - Argamassas submetidas ao ensaio de variação dimensional. _____	96
Tabela 5.17 - Valores de SO ₃ absorvido pelas argamassas que foram submetidas à cura úmida. _____	100
Tabela 5.18 - Valores de SO ₃ absorvido pelas argamassas que foram submetidas à cura térmica. _____	102

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

AAC	Absorção de Água por Capilaridade
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Água/cimento
ACI	American Concrete Institute
a/agl	Água/aglomerante
AI	Absorção por Imersão
ANOVA	Análise de Variância
ASTM	American Society for Testing and Materials
BET	Brunauer-Emmett-Teller
CCR	Concreto Compactado com Rolo
CPV ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DEF	Formação de Etringita Tardia
DRX	Difração de Raio-X
E_c	Módulo de Elasticidade Estático
E_d	Módulo de Elasticidade Dinâmico
EDS	Espectroscopia por Dispersão de Energia
EIS	Espectroscopia de Impedância Eletroquímica
ESA	Ataque Externo de Sulfatos
f_{cj}	Resistência à Compressão
f_{ct,f}	Resistência à Tração na Flexão
f_{t,D}	Resistência a Tração por Compressão Diametral
FRX	Fluorescência de Raio-X
FTIR	Espectroscopia do Infravermelho com Transformada de Fourier
ISA	Ataque Interno de Sulfatos
IV	Índice de Vazios
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil - Portugal

ME	Massa Específica
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
NP	Norma Portuguesa
PIM	Porosimetria por Intrusão de Mercúrio
RCV	Resíduo de Cerâmica Vermelha
SA	Sílica Ativa
SCA	Sílica da Casca de Arroz
SP	Superplastificante
TG	Termogravimetria

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
1.1 OBJETIVO	21
1.1.1 OBJETIVO GERAL	21
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	21
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	22
2. DURABILIDADE DO CONCRETO	23
2.1 A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO	31
2.2 PERMEABILIDADE DO CONCRETO	32
2.3 INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS	36
3. ATAQUE POR SULFATOS	41
3.1 NORMALIZAÇÃO	43
3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO ATAQUE POR SULFATOS	45
3.2.1 SOLUÇÃO AGRESSIVA	46
3.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO	48
3.2.3 pH	49
3.2.4 TEMPERATURA	49
3.3 A FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA	50
3.4 O ESTUDO DO ATAQUE POR SULFATOS NO BRASIL	53
4. PROGRAMA EXPERIMENTAL	58
4.1 MATERIAIS UTILIZADOS	61
4.2 ENSAIOS EM PASTA	62
4.2.1 CONE DE MARSH	62
4.2.2 MINIABATIMENTO	64
4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS	65
4.4 ENSAIOS EM ARGAMASSA	66
4.4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA	67
4.4.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	67
4.4.1.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	67
4.4.2 DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE SULFATOS	68
4.4.2.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL	68
4.4.2.2 ANÁLISES MICROSCÓPICAS	72
4.4.2.3 ANÁLISES QUÍMICAS	73
4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS	74
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	76
5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	76
5.1.1 CIMENTO	76
5.1.2 AGREGADO MIÚDO	77
5.1.3 NANOSÍLICA	79
5.1.4 SÍLICA ATIVA	80
5.1.5 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE	81
5.2 ENSAIOS EM PASTA	81
5.2.1 CONE DE MARSH	81

5.2.2	MINIABATIMENTO	84
5.3	DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS	85
5.4	ENSAIOS EM ARGAMASSA	87
5.4.1	RESISTÊNCIA MECÂNICA	87
5.4.2	ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE	90
5.4.3	DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE SULFATOS	95
5.4.4	ANÁLISES MICROSCÓPICAS	103
6.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	107
6.1	CONCLUSÕES	107
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
	APÊNDICES	112
	ANEXOS	138

1. INTRODUÇÃO

São frequentes os casos de estruturas de concreto armado que apresentam deterioração excessiva antes do término da vida útil prevista pela NBR 15575:2013 (ABNT, 2013). Entre as causas, pode-se citar erros de projeto, diferenças entre projetado e executado, uso indevido, falta de manutenção da edificação ou do elemento estrutural, entre outros. Diante dessa realidade, torna-se necessário tomar medidas que mudem esse cenário, entre elas, a utilização de materiais de construção mais duráveis, que sofram menos degradação devido às agressões do meio em que se encontram.

O concreto é o material de construção mais consumido na atualidade, cerca de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano, segundo Mehta e Monteiro (2014). Ao reparar ou reconstruir edificações que sofreram degradação contribui-se para o aumento do consumo de cimento e, conseqüentemente, para a emissão de CO₂ no meio ambiente. O gráfico da Figura 1.1 apresenta a série histórica do consumo de cimento no Brasil, de 1950 a 2016, e nota-se o aumento considerável nos últimos anos, decorrente do aquecimento da indústria da construção no país, ultrapassando a marca de 70 milhões de toneladas no ano de 2013.

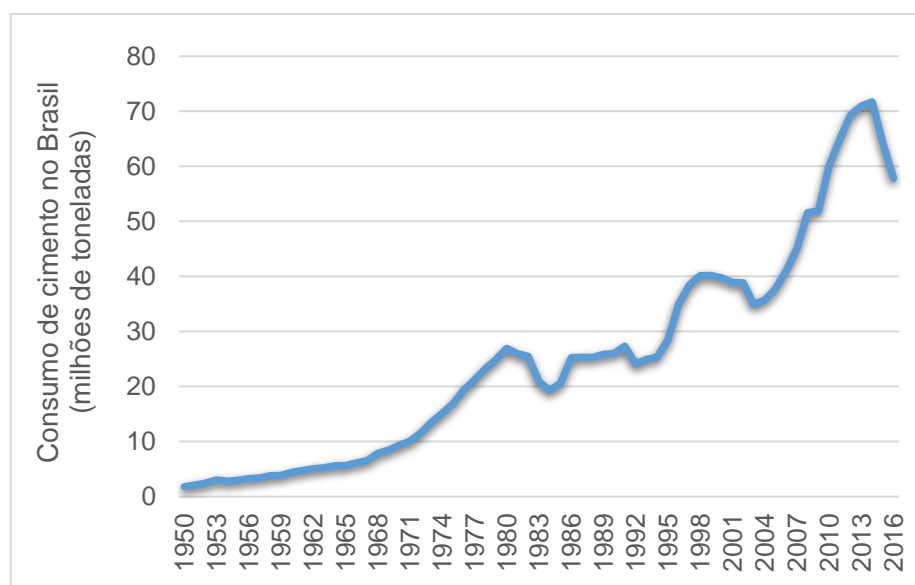


Figura 1.1 - Consumo de cimento no Brasil.
(Fonte: Sindicato Nacional das Indústrias de Cimento)

Além da preocupação em reduzir o consumo de matéria-prima e a geração de CO₂, questões financeiras também justificam a necessidade de se garantir a vida útil das edificações. Ueda e Takewaka (2007) estimaram que cerca de 50% do total dos recursos das indústrias da construção estão sendo aplicados em reparo e manutenção de estruturas existentes.

Sitter (1984) explica que prever as influências do meio e as solicitações atuantes na estrutura ao longo de sua vida útil ainda na fase de concepção é a principal forma de prevenir a deterioração precoce e garantir o desempenho das edificações, além de ser a que demanda menos recurso. A Lei de Sitter ou “Lei dos Cinco” determina a evolução dos custos relativos das intervenções em função da fase em que elas ocorrem (Figura 1.2). Por exemplo, o custo relativo das intervenções ainda na fase de projeto pode ser associado ao número 1 (um); se forem realizadas na fase de execução, o custo pode ser até 5 (cinco) vezes superior; já se forem necessárias manutenções preventivas ou corretivas, os custos podem ser até 25 (vinte e cinco) e 125 (cento e vinte e cinco) vezes superiores ao custo das medidas tomadas em fase de projeto, respectivamente.

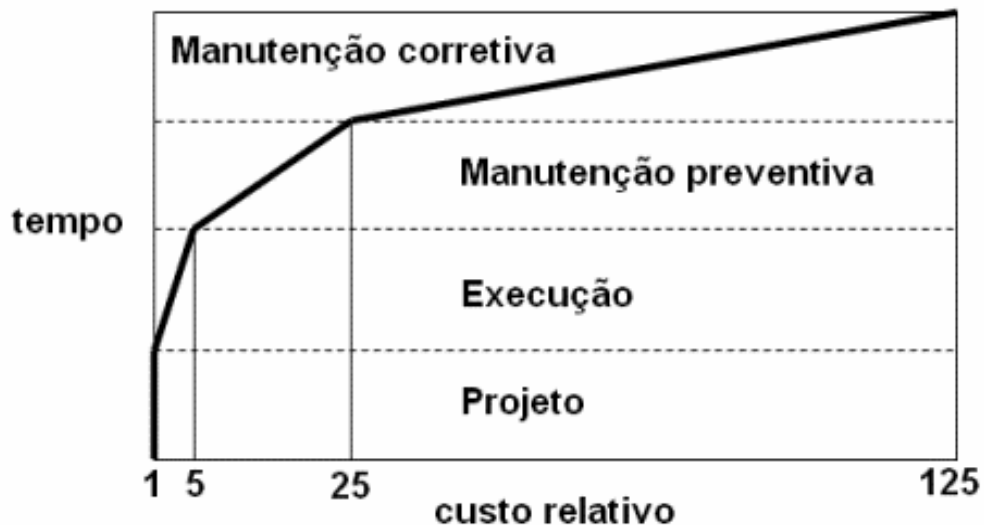


Figura 1.2 - Evolução dos custos – Lei de Sitter (SITTER, 1984).

Outra questão que deve ser considerada é a gestão dos resíduos oriundos das reformas, demolições e reconstruções dessas edificações. A Prefeitura Municipal de São Paulo, por meio do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PGIRS, 2014) estimou que a geração diária de resíduos da construção civil (RCC) na capital paulistana é de aproximadamente 20 mil toneladas. Esse grande volume de resíduos gerados, na maioria das vezes, é disposto de forma irregular em terrenos baldios e margens de rios, acarretando problemas ambientais e de saúde pública.

Sendo assim, a questão da vida útil das edificações ganha relevância, devendo os projetistas e construtores buscarem estruturas não apenas com desempenho mecânico elevado, mas também com durabilidade adequada ao ambiente em que estão inseridas.

Em relação às estruturas de concreto armado, a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) relaciona os principais mecanismos de deterioração, classificando-os em: deterioradores do concreto, deterioradores da armadura e deterioradores de estrutura como um todo. Boa parte das pesquisas com foco em durabilidade estão voltadas à prevenção da corrosão de armaduras, causadas pela carbonatação e pelo ataque de cloretos, devido à sua relevância para a vida útil das edificações de concreto armado. Entretanto, outros agentes deterioradores também devem ser estudados, como é o caso do ataque por sulfatos.

Esse tipo de ataque se manifesta na forma de reações expansivas, que leva o concreto à fissuração, podendo culminar em perda de massa e de resistência mecânica. Além disso, tal fissuração favorece o desenvolvimento de outros mecanismos de degradação, uma vez que o acesso de outros agentes agressivos ao interior do concreto é facilitado.

Os sulfatos estão presentes na água do mar, no lençol freático, água de pântanos (decomposição de matéria orgânica), esgotos, efluentes industriais, chuvas ácidas, entre outros (SOUZA, 2006). Além das fontes externas, é possível que a contaminação se dê por fontes internas, quando os sulfatos estão presentes no cimento, quando são usados agregados contaminados, entre outros (ESCADEILLAS; HORNAIN, 2014).

Neville (2015) explica que os sulfatos em estado sólido não atacam concreto e que a reação com os produtos de hidratação do cimento só ocorre quando estão em forma de solução, ou seja, na presença de água. Além da dissolução dos íons, a água é considerada o principal fator relacionado aos problemas de durabilidade do concreto, uma vez que atua não só como um agente de degradação física nos sólidos porosos, mas também como transporte de íons agressivos, tornando-se fonte de degradação química (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Silva (2006) afirma que o movimento de fluidos, sejam eles líquidos ou gasosos, dentro do concreto é determinante para sua durabilidade, fazendo com que o tamanho, o volume e a continuidade dos poros sejam fatores essenciais para garantir a vida útil e a qualidade das edificações. Diante disso, é essencial a busca por concretos com baixa permeabilidade e menor índice de vazios, a fim de dificultar o fluxo de água no interior da estrutura, diminuindo a presença de íons agressivos, sua movimentação e, conseqüentemente, o processo de degradação da estrutura de concreto.

A redução da permeabilidade dos materiais cimentícios pode se dar por meio do uso de adições minerais, as quais, devido aos seus efeitos fíler e/ou pozolânicos, são capazes de refinar a microestrutura da matriz cimentícia e reduzir o calor de hidratação do cimento. Dessa

forma, a ocorrência de fissuras de origem interna é mitigada e, como consequência, tem-se melhorias nas características mecânicas e físicas do concreto (DAL MOLIN, 2011).

A nanosílica é uma dessas adições minerais que surgiram na era da nanociência, onde os fenômenos ocorrem numa escala na qual a matéria apresenta um comportamento especial, predominando os efeitos das altíssimas superfícies e interfaces. A incorporação de nano materiais permite o aumento das superfícies de contato e da reatividade, gerando várias vantagens em termos de reforço e de eficiência, abrindo novas perspectivas na possibilidade de criar materiais, dispositivos e sistemas com novas funções e propriedades (GLEIZE, 2007).

Li et al. (2017) explica que assim como a sílica ativa, a nanosílica possui efeitos físicos e químicos, porém, devido à nano-escala das suas partículas e, conseqüentemente, maior área superficial, esta tem maior reatividade pozolânica. Ambas, sendo muito mais finas do que o cimento, tendem a ser eficazes no preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento, aumentando a densidade de empacotamento dos materiais cimentícios.

A adição de sílica ativa e nanosílica nos materiais à base de cimento, como argamassas e concretos, podem trazer melhorias tanto no estado fresco, evitando a segregação e a exsudação devido ao aumento de coesão, quanto no estado endurecido, densificando a zona de transição entre a pasta e os agregados, diminuindo a porosidade e elevando a resistência mecânica.

É consenso na literatura que o uso da sílica ativa como adição mineral é capaz de melhorar o desempenho do material cimentício. No entanto, quanto à nanosílica, muitos pesquisadores ainda buscam entender melhor sua influência, mediante estudos de trabalhabilidade, resistência mecânica e durabilidade frente a diferentes agentes agressivos. Outra variável importante no estudo da adição de nanosílica aos materiais cimentícios é a forma como ela está disponível no mercado. Grande parte das pesquisas estudaram a nanosílica em forma de pó, em suspensão coloidal ou ainda dispersas em aditivos químicos.

Coelho et al. (2008) estudaram a influência da nanosílica nas propriedades mecânicas e físicas de concretos e obtiveram melhora nos valores de resistência à tração na flexão e redução da absorção de água por capilaridade à medida que se aumentava o teor de nanosílica adicionado à mistura. Berra et al. (2012) estudaram seus efeitos na trabalhabilidade e na resistência à compressão de pastas e não obtiveram resultados positivos em relação à adição, o que, segundo os autores, deve-se às dificuldades encontradas para sua dispersão e homogeneização da mistura.

Quanto à durabilidade, Delgado et al. (2012) afirmam que a incorporação de nanosílica na mistura, juntamente com sílica ativa, é uma opção viável e econômica, que reduz a permeabilidade e aumenta a durabilidade de concretos frente à ação de cloretos. Do mesmo

modo, Lim e Mondal (2015) concluíram que o uso de nanosílica contribui para a redução dos efeitos da carbonatação do concreto, diminuindo a perda de massa e a profundidade de alcance dos agentes agressivos no material cimentício.

A obtenção de concretos de alto desempenho usando nanosílica em conjunto com outros materiais, como a escória de cobre (CHITHRA; SENTHIL KUMAR; CHINNARAJU, 2016), a cinza do bagaço da cana (JOSHAGAHANI; MOEINI, 2017) e a própria sílica ativa, a fim de explorar o efeito sinérgico existente entre as duas adições (PATTALI; MATHEW, 2017; LI et al., 2017), também é foco de pesquisas recentes.

De um modo geral, as pesquisas envolvendo a utilização de nanosílica avaliam as propriedades mecânicas e físicas dos materiais cimentícios e os parâmetros de durabilidade frente à agentes agressivos iniciadores do processo de corrosão de armaduras, como a carbonatação e o ataque por cloretos. Entretanto, pouco se sabe sobre a sua influência na durabilidade de matrizes cimentícias quando submetidas ao ataque de sulfatos, o que motiva e justifica o desenvolvimento do presente trabalho.

Acredita-se que a nanosílica pode mitigar o ataque por sulfatos por meio da redução da permeabilidade, dificultando o ingresso dos agentes agressivos para o interior do concreto. Além disso, considerando que uma das formas de ataque por sulfato de sódio é por meio de reações com o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), as reações pozolânicas da nanosílica melhorariam a durabilidade dos materiais cimentícios frente a este ataque.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 OBJETIVO GERAL

O trabalho tem como objetivo geral o estudo da durabilidade de argamassas de cimento Portland com adição de nanosílica coloidal e sílica ativa quando submetidas ao ataque de sulfato de sódio, tanto de origem interna quanto de origem externa.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar a influência da adição de nanosílica coloidal e seu efeito combinado com a sílica ativa nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas;

- Avaliar a durabilidade das argamassas com adição de nanosílica e sílica ativa quando submetidas ao ataque de sulfato de sódio de origem externa e de origem interna;
- Verificar a ocorrência de um ataque interno de sulfatos decorrentes de altas temperaturas oriundas da cura térmica;
- Verificar a formação da etringita tardia nos diferentes tipos de ataque por sulfatos e qual a sua contribuição para a fissuração da matriz cimentícia;
- Determinar o teor ideal de nanosílica coloidal a ser utilizado a fim de melhorar a durabilidade de matrizes cimentícias frente ao ataque de sulfatos.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

A dissertação está dividida em 6 capítulos.

No primeiro capítulo foi apresentada uma introdução ao tema, abordando sua importância e justificativa, bem como os objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo discorre sobre a durabilidade do concreto, mecanismos de deterioração, a importância da permeabilidade e a influência das adições minerais nos materiais cimentícios.

O capítulo três trata do ataque por sulfatos ao concreto e dos fatores que o influenciam, além das particularidades da formação da etringita tardia. Por fim, apresenta-se um levantamento das pesquisas sobre o ataque de sulfatos no Brasil.

No quarto capítulo apresenta-se o programa experimental, com a descrição dos materiais utilizados, os ensaios realizados e as respectivas metodologias.

O quinto capítulo traz os resultados obtidos nos ensaios, acompanhados de análises e discussão.

Por fim, o capítulo seis contém as conclusões da pesquisa, as sugestões para trabalhos futuros e as transferências ao meio técnico.

2. DURABILIDADE DO CONCRETO

Por muito tempo, quando se falava em estruturas de concreto armado a característica mais relevante era a resistência à compressão. Entretanto, devido às recorrentes situações de degradação precoce das estruturas, tornou-se necessário que a sua durabilidade seja levada em consideração.

Segundo a NBR 15575:2013 (ABNT, 2013), a durabilidade é a capacidade da edificação e de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção especificadas. A norma cita ainda que a durabilidade de um produto se extingue quando ele deixa de cumprir as funções que lhe foram atribuídas, seja pela degradação que o leva a um estado insatisfatório de desempenho ou por sua obsolescência funcional.

A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) define durabilidade como a capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto. Portanto, deve-se levar em conta a interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção.

Mather (2004) explica que a durabilidade não é um atributo do concreto em geral, e sim de um concreto específico sujeito a ambientes específicos. Para o autor, um concreto durável é aquele que atinge a vida útil desejada, sem custos excessivos de manutenção devido à degradação, no ambiente previsto para sua inserção.

Para que a durabilidade de uma estrutura seja garantida, pode-se definir as características do concreto em função da agressividade do meio no qual ela se encontra, aperfeiçoando suas propriedades a fim de adaptá-las à vida útil desejada. Entre essas características pode-se citar: consumo mínimo de cimento, máxima relação água/cimento (a/c), cobrimento mínimo das armaduras etc. (ROUGEAU; GUIRAUD, 2014).

A NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) estabelece alguns parâmetros para o projeto de estruturas de concreto armado, em função do tipo de ambiente em que estão inseridas, como pode ser visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classes de agressividade ambiental (CAA) e parâmetros de projeto para o concreto armado, conforme NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).

Parâmetros de projeto	Classe de agressividade ambiental			
	I	II	III	IV
Agressividade	Fraca	Moderada	Forte	Muito Forte
Classificação	Rural/ Submersa	Urbana	Marinha/ Industrial	Industrial/ Respingos de Maré
Risco de Deterioração	Insignificante	Pequeno	Grande	Elevado
Relação a/c	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50
Classe do Concreto	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
Cobrimento – viga e pilar (mm)	25	30	40	50
Cobrimento - laje (mm)	20	25	35	45

Internacionalmente, a norma europeia NP 206-1 (EN, 2007) define seis classes de exposição do concreto armado em função do agente agressivo presente no ambiente no qual ele se manterá em serviço (Tabela 2.2). Para cada classe, são estabelecidos os valores limites para a composição e propriedades do concreto, a saber: a máxima relação a/c; a classe mínima de resistência; o consumo mínimo de cimento por metro cúbico de concreto, o cobrimento mínimo das armaduras, o máximo teor de ar incorporado, além de algumas recomendações adicionais (Tabela 2.3).

Como pode ser visto, a norma brasileira classifica os ambientes de uma forma mais geral, em função da sua localização apenas, como: rural, urbana, submersa, industrial, marinha e com respingos de maré. Já a norma europeia é mais específica e classifica as situações de agressividade em função do fenômeno deteriorador a que está sujeita a estrutura. Desse modo, é possível estabelecer os parâmetros e propriedades de forma mais objetiva, como é o caso do teor de mínimo de ar incorporado, que é previsto apenas para concretos submetidos à ação do gelo/degelo e os valores mínimos de cobrimento, previstos apenas para os ambientes onde é possível a ocorrência de corrosão das armaduras, além de impor requisitos adicionais para cada tipo de agente agressivo.

Tabela 2.2 - Classes de exposição definidas pela Norma Europeia NP 206-1 (EN, 2007).

Classe	Descrição do ambiente
1. Sem risco de corrosão ou ataque	
X0	Para concreto não armado: todas as exposições, exceto ao gelo/degelo, à abrasão ou ao ataque químico; Para concreto armado: ambiente muito seco.
2. Corrosão induzida por carbonatação	
XC1	Seco ou permanentemente úmido.
XC2	Úmido, raramente seco.
XC3	Moderadamente úmido.
XC4	Ciclicamente úmido e seco.
3. Corrosão induzida por cloretos não provenientes da água do mar	
XD1	Moderadamente úmido.
XD2	Úmido, raramente seco.
XD3	Ciclicamente úmido e seco.
4. Corrosão induzida por cloretos da água do mar	
XS1	Ar transportando sais marinhos, mas sem contato direto com a água do mar.
XS2	Submersão permanente.
XS3	Zonas de marés e de respingos.
5. Ataque por gelo/degelo com ou sem produtos descongelantes	
XF1	Moderadamente saturado de água, sem produtos descongelantes
XF2	Moderadamente saturado de água, com produtos descongelantes
XF3	Fortemente saturado, sem produtos descongelantes
XF4	Fortemente saturado, com produtos descongelantes
6. Ataque químico	
XA1	Ligeiramente agressivo, de acordo com as características químicas das águas e solos
XA2	Moderadamente agressivo, de acordo com as características químicas das águas e solos
XA3	Fortemente agressivo, de acordo com as características químicas das águas e solos

Tabela 2.3 - Valores limites para composição e propriedades do concreto, conforme NP 206-1 (EN, 2007).

Classe	Máxima relação a/c	Classe de resistência	Consumo mínimo de cimento (kg/m ³)	Cobrimento Mínimo (mm) ¹	Mínimo teor de ar incorporado (%)	Outros Requisitos
X0	*	C12/15	*	*	*	*
XC1	0,65	C20/25	260	25	*	*
XC2	0,60	C25/30	280	35	*	*
XC3	0,55	C30/37	280	35	*	*
XC4	0,50	C30/37	300	40	*	*
XD1	0,55	C30/37	300	45	*	*
XD2	0,55	C30/37	300	50	*	*
XD3	0,45	C35/45	320	55	*	*
XS1	0,50	C30/37	300	45	*	*
XS2	0,45	C35/45	320	50	*	*
XS3	0,45	C35/45	340	55	*	*
XF1	0,55	C30/37	300	*	*	Agregados com resistência suficiente ao gelo/degelo
XF2	0,55	C25/30	300	*	4,0	
XF3	0,50	C30/37	320	*	4,0	
XF4	0,45	C30/37	340	*	4,0	
XA1	0,55	C30/37	300	*	*	*
XA2	0,50	C30/37	320	*	*	Cimento Resistente à sulfatos
XA3	0,45	C35/45	360	*	*	

* Valores não especificados pelas Normas.

¹ Valores de cobrimento estipulados pela Especificação LNEC E 464:2005.

De forma similar, nos Estados Unidos o ACI 318-14 (ACI, 2014) estabelece quatro categorias de exposição que afetam a durabilidade do concreto, como mostra a Tabela 2.4. Porém, ele classifica os ambientes de uma forma menos específica que a europeia, como é o caso da corrosão, uma vez que não faz distinção entre os processos envolvidos na corrosão das armaduras, seja a carbonatação ou o ataque dos íons cloreto.

Tabela 2.4 - Classes de agressividade definidas pelo ACI 318-14 (ACI, 2014).

Categoria	Classe	Condição	
Gelo e degelo (F)	F0	Concreto não exposto a ciclos de gelo e degelo	
	F1	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição limitada à água	
	F2	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição frequente à água	
	F3	Concreto exposto a ciclos de gelo e degelo com exposição frequente à água e a produtos químicos de degelo	
Sulfatos (S)		Concentração de sulfatos no solo (% por massa)	Concentração de sulfato dissolvido na água (ppm)
	S0	$SO_4^{-2} < 0,10$	$SO_4^{-2} < 150$
	S1	$0,10 \leq SO_4^{-2} < 0,20$	$150 \leq SO_4^{-2} < 1500$ ou água do mar
	S2	$0,20 \leq SO_4^{-2} < 2,00$	$1500 \leq SO_4^{-2} < 10000$
	S3	$SO_4^{-2} > 2,00$	$SO_4^{-2} > 10000$
Em contato com a água (W)	W0	Concreto seco; concreto em contato com a água, porém com baixa permeabilidade não requerida	
	W1	Concreto em contato com a água com baixa permeabilidade requerida	
Proteção à corrosão de armaduras	C0	Concreto seco ou protegido de umidade	
	C1	Concreto exposto à umidade, mas sem fontes externas de cloretos	
	C2	Concreto exposto à umidade e com fontes externas de cloretos, provenientes de produtos químicos do degelo, sal, água salgada, água do mar e respingos dessas fontes.	

Para cada classe de exposição, são estabelecidos os parâmetros e características do concreto, além dos requisitos adicionais, como relacionados na Tabela 2.5. Os valores para o cobrimento das armaduras são estabelecidos apenas para a categoria C de agressividade e variam conforme o tipo de exposição do concreto ao solo e às intempéries, o elemento estrutural e o diâmetro das armaduras utilizadas, conforme Tabela 2.6.

Tabela 2.5 - Valores limites e requisitos para o concreto em função da classe de agressividade ambiental, conforme o ACI 318-14 (ACI, 2014).

Classe	Máxima relação a/c	Resistência mínima à compressão (psi)	Ar incorporado (%)	Outros requisitos
F0	*	2500	*	*
F1	0,55	3500	3,5 – 6,0	*
F2	0,45	4500	4,5 – 7,5	*
F3	0,40/0,45	5000/4500	4,5 – 7,5	Limites nos materiais cimentícios de cinzas volantes, sílica ativa, escória e outros.
S0	*	2500	*	Estabelece-se os tipos de cimento e permite ou não a presença de cloreto de cálcio nas misturas
S1	0,50	4000	*	
S2	0,45	4500	*	
S3	0,45	4500	*	
W0	*	2500	*	*
W1	0,50	4000	*	*
C0	*	2500	**	Teor máximo de íons cloreto no concreto
C1	*	2500	**	
C2	0,40	2500	**	

* Valores não especificados pelas Normas.

** Ver Tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Valores de cobrimento da armadura, conforme o ACI 318-14 (ACI, 2014).

Exposição do concreto	Elemento estrutural	Características das armaduras	Cobrimento (mm)
Moldado contra o solo e permanentemente em contato com ele	Todos	Todas	76
Expostos ao tempo ou em contato com o solo	Todos	Φ19,1 mm - Φ57,3 mm	50
		Φ15,9 e malhas	38
Não expostos ao tempo ou em contato com o solo	Lajes, vigas e paredes	Φ43 mm – Φ 57,3 mm	38
	Vigas e pilares	Até Φ36 mm	19
	Vigas e pilares	Estribos, espirais, aros	38

Portanto, como mostrado, tanto as especificações brasileiras quanto as internacionais, salvo suas particularidades, estabelecem critérios que tornam possível a definição das características ideais do concreto para cada tipo de edificação, garantindo a durabilidade adequada diante do meio agressivo em que se encontra. Esses parâmetros devem ser

obedecidos para que a obra atinja a vida útil mínima exigida ou ainda que sejam projetadas obras com vida útil elevada.

Baroghel-Bouny, Cussigh e Rougeau (2014) citam exemplos de edificações que foram projetadas com essa finalidade, como a Ponte da Confederação no Canadá (também conhecida como Ponte da Ilha Prince Edward) que teve seu projeto desenvolvido a partir das condições de exposição da estrutura. Inaugurada em 1997, a ponte foi dimensionada para uma vida útil de 100 anos, levando em consideração o risco de corrosão de armaduras e o risco da ação da abrasão do gelo na base de seu apoio. Para isso, foi usado um concreto com resistência à compressão superior a 90 MPa, com uso de agregados altamente resistentes e sílica ativa. A Figura 2.1 retrata a ponte sob a ação de gelo e degelo.

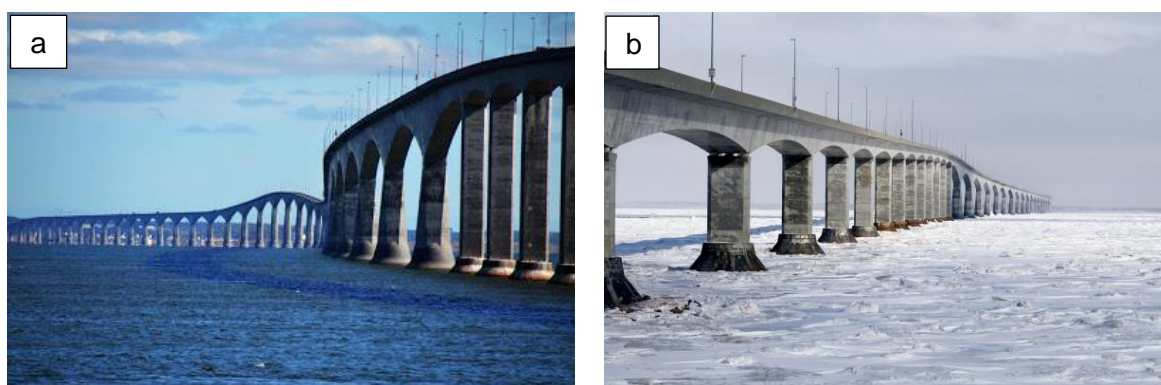


Figura 2.1 - a) Ponte da Confederação sobre a água (Fonte: <http://migre.me/wnbGz>) e b) Estrutura da ponte em contato com o gelo (Fonte: <http://migre.me/wnbBf>).

Outro exemplo citado pelos autores é a ponte de Rion-Antirion, na Grécia (Figura 2.2), localizada em ambiente marinho e projetada para uma vida útil de 120 anos, tempo necessário para a concentração de íons cloreto atingir um nível crítico nas primeiras camadas da armadura. Para isso, foi empregado um concreto de alto desempenho, com resistência à compressão entre 45 e 55 MPa, com adição de altos teores de escória de alto-forno e relação a/c inferior a 0,40.

No Brasil, pode-se citar como exemplo a obra do Porto do Pecém (Figura 2.3), no estado do Ceará, o qual está inserido em uma atmosfera marinha de alta agressividade. Fatores como temperatura média em torno de 29°C e umidade relativa do ar superior a 78% aceleram as reações químicas, que são agravadas pelos elevados teores de íons cloreto e pela forte ação dos ventos, que facilita a movimentação dos agentes agressivos. Diante disso, optou-se pelo uso de um concreto de alto desempenho, com resistência à compressão de 50 MPa e com adição de sílica ativa, a fim de minimizar a ação das intempéries, garantindo maior durabilidade, ou seja, maior vida útil à obra (PAMPLONA; TORRES, 2003).



Figura 2.2 - Ponte Rion-Antirion, Grécia. Localizada em ambiente marinho e projetada para uma vida útil de 120 anos (Fonte: <http://migre.me/wnbP1>).



Figura 2.3 - Porto do Pecém, Ceará. Inserido em uma atmosfera marinha de alta agressividade. (Fonte: <http://migre.me/wnbRf>).

Os exemplos citados retratam a importância do estudo da edificação e do ambiente em que será inserida, permitindo prever as condições do meio e sua agressividade à estrutura. Dessa forma, pode-se aumentar a durabilidade e vida útil das estruturas a partir de parâmetros e características do concreto, bem como pelo emprego de adições minerais, as quais exercem grande influência nas propriedades físicas e mecânicas do concreto (assunto que será detalhado no item 2.3).

2.1 A DETERIORAÇÃO DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO

Neville (2015) explica que a durabilidade inadequada do concreto se manifesta pela deterioração e pode ocorrer tanto devido a fatores externos quanto internos a ele. As ações de deterioração podem ser físicas, que englobam os efeitos da temperatura, dilatação térmica, ciclos de gelo e degelo; químicas, caracterizadas pela ação de íons agressivos, como os cloretos, sulfatos e gás carbônico; e mecânicas, que incluem ações como impacto, abrasão, erosão e cavitação. O autor cita ainda que pode haver sinergia entre as ações, ou seja, o processo de deterioração do concreto raramente será decorrente de uma única causa.

De um modo geral, a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) relaciona os principais mecanismos de deterioração da estrutura de concreto, separando-os em três grupos: os relativos ao concreto em si; os relativos apenas à armadura; e os deterioradores da estrutura como um todo, como pode ser visto na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Mecanismos de envelhecimento e deterioração das estruturas de concreto de acordo com a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014).

Deterioradores do concreto	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Lixiviação, responsável por dissolver e carrear os compostos hidratados da pasta de cimento por ação de águas puras, carbônicas agressivas, ácidas e outras; ▪ Expansão por sulfatos, devido à ação de águas ou solos contaminados com sulfatos, que causam reações expansivas e fissuram a matriz cimentícia; ▪ Reação álcali-agregado, uma reação expansiva decorrente da reação dos álcalis do concreto com agregados reativos, na presença de umidade.
Deterioradores da armadura	<p>Corrosão iniciada por:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Carbonatação, quando o CO₂ presente na atmosfera penetra o concreto, despassivando a armadura; ▪ Ação de cloretos, quando o teor do íon-cloro está elevado e rompe a camada de passivação do aço. <p>Obs.: ambos necessitam de umidade para ocorrer</p>
Deterioradores da estrutura como um todo	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ações mecânicas; ▪ Movimentações de origem térmica; ▪ Impactos; ▪ Ações cíclicas; ▪ Retração; ▪ Fluência; ▪ Relaxação etc.

Nota-se que para os mecanismos deterioradores relativos ao concreto e às armaduras a presença da água é determinante, e sabe-se que quanto maior a facilidade com que ela penetra nos sólidos porosos, maior a velocidade de degradação da estrutura.

Como citado por Mehta e Monteiro (2014), a água é um agente fundamental tanto para a criação quanto para a degradação de muitos materiais naturais, caracterizando-se como o principal fator relacionado aos problemas de durabilidade do concreto. Ela atua não só como causadora de processos físicos de degradação nos sólidos porosos, mas também como veículo de transporte para íons agressivos, tornando-se fonte de processos químicos de degradação.

2.2 PERMEABILIDADE DO CONCRETO

A permeabilidade é o principal fator influenciador na durabilidade do concreto, e pode ser entendida como a facilidade com que os fluidos – sejam eles líquidos ou gasosos – podem penetrar e se movimentar no seu interior. Assim, o tamanho e o volume dos poros, bem como sua continuidade são fatores essenciais para garantir a vida útil e a qualidade das edificações (SILVA, 2006).

Helene (1993) cita que a penetração dos íons cloreto na estrutura de concreto pode se dar de diferentes formas, por meio de mecanismos como ascensão capilar, difusão, permeabilidade, entre outras. A Figura 2.4 ilustra a influência da dimensão dos poros nos diferentes mecanismos de transporte de fluidos no interior do concreto.

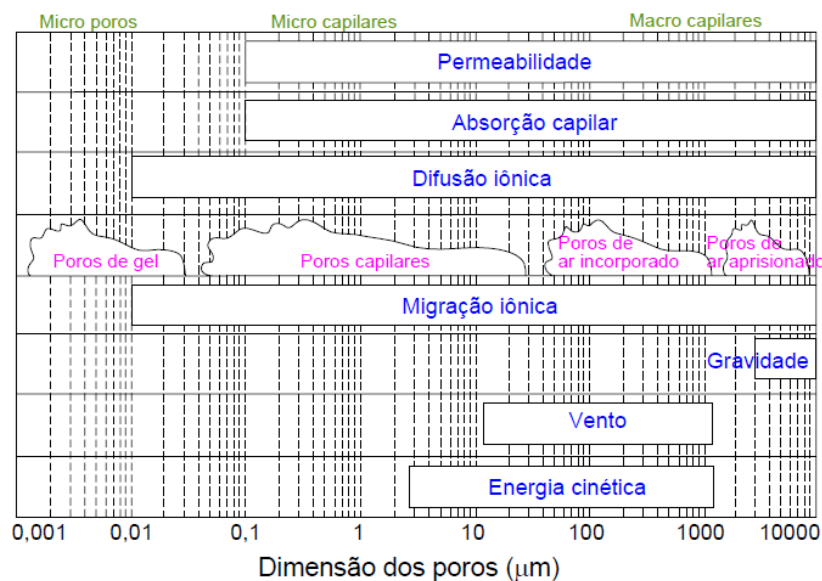


Figura 2.4 - Dimensão dos poros relacionados com os mecanismos de transporte de fluidos (HELENE, 1993).

É importante a distinção entre porosidade e permeabilidade, uma vez que existem diferentes tipos de poros e nem todos contribuem para a permeabilidade. Porosidade é a

proporção do volume total de poros e, caso seja elevada e os poros se intercomunicarem, a permeabilidade é elevada, devido ao fácil transporte de fluidos através do concreto. Entretanto, caso esses poros sejam descontínuos ou, de outra forma, ineficazes para o transporte, o concreto tem baixa permeabilidade, mesmo que sua porosidade seja elevada (NEVILLE, 2015).

Assim, fica clara a importância da busca por concretos com menor índice de vazios e poros desconectados, que resultam em uma baixa permeabilidade. Pode-se, então, dificultar o fluxo de água no interior da estrutura, diminuindo a presença de íons agressivos, sua movimentação e, conseqüentemente, o processo de degradação da estrutura de concreto.

Entre os fatores que influenciam o sistema de distribuição dos poros do concreto, estão: relação a/c, cura, aditivos químicos e adições minerais (PAULON; KIRCHHEIM, 2011), os quais são detalhados a seguir.

- *Relação a/c*

Neville (2015) explica que a permeabilidade da pasta de cimento varia com a evolução da hidratação. Quando a pasta está fresca, o fluxo de água é controlado pela dimensão, forma e concentração das partículas originais de cimento. Com o progresso da hidratação, o gel preenche os poros anteriormente preenchidos com água e, devido ao seu tamanho aproximadamente 2 vezes maior que o volume do cimento não hidratado, faz com que a permeabilidade da pasta diminua. Portanto, quanto menor for a relação a/c, menor a quantidade de poros vazios e menor a permeabilidade do material.

Silva Filho (1994) comparou a influência de diferentes relações a/c (0,28; 0,43 e 0,67) na porosidade de concretos por meio do ensaio de absorção por imersão. A absorção média aos 28 dias foi 4,1% e 4,2% para os concretos de relação a/c igual a 0,28 e 0,43, respectivamente, enquanto que para a relação a/c igual a 0,63, a absorção média foi de 5,1%. O índice de vazios também foi calculado e os resultados obtidos foram 9,8%, 10,1% e 11,8% para os concretos de relação a/c igual a 0,28, 0,43 e 0,67, respectivamente.

Os resultados são coerentes com o que é citado por Neville (2015), que diz que a permeabilidade aumenta significativamente em pastas de cimento hidratadas cujas relações a/c são maiores que 0,40 (Figura 2.5). Esse aumento traz conseqüências ao material quanto à sua durabilidade, pois o acesso de agentes agressivos ao seu interior é facilitado.

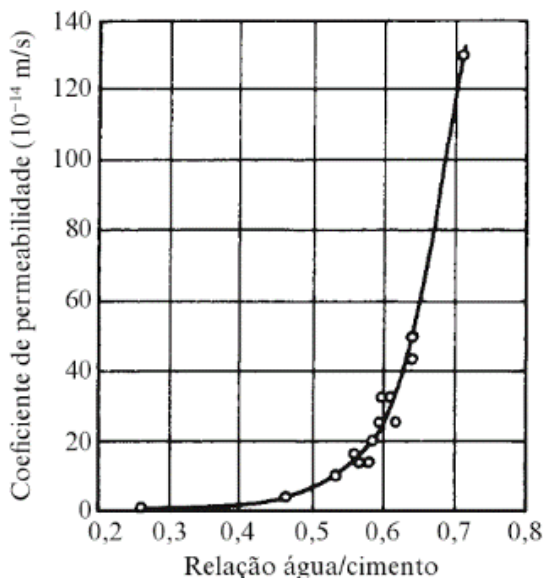


Figura 2.5 - Relação entre a permeabilidade e a relação água/cimento para pastas de cimento (NEVILLE, 2015).

Como já apresentado anteriormente na Tabela 2.1, a NBR 6118:2014 (ABNT, 2014) estabelece valores máximos de relação a/c para a composição de concretos entre 0,45 e 0,65, conforme a classe de agressividade ambiental. Já o ACI 318-14:2014 limita os valores entre 0,40 e 0,55, também variando conforme a agressividade do meio.

- *Cura*

Neville (2015) define a cura como sendo o conjunto de procedimentos adotados para promover a hidratação do cimento, baseados no controle da temperatura e da saída e entrada de água do concreto. O objetivo é mantê-lo saturado, ou mais próximo disso, até que os espaços originalmente preenchidos por água no estado fresco tenham sido preenchidos pelos produtos da hidratação do cimento. Além disso, Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a adoção de um processo apropriado de cura é determinante para a redução no volume de vazios da matriz cimentícia. Ambos os fatores são essenciais para o controle da permeabilidade do concreto.

A NBR 14931:2004 (ABNT, 2004) determina que a cura é um processo essencial ao concreto e deve ser mantida até que ele atinja o endurecimento satisfatório, justificando que, associada à proteção adequada, ela evita a perda de água pela superfície exposta, assegura uma superfície com resistência adequada e durável, e deve ser mantida nos elementos estruturais até que atinjam uma resistência à compressão mínima de 15 MPa.

O processo de cura deve ser iniciado quando se inicia a hidratação do cimento, o que ocorre de duas a três horas após o lançamento do concreto dependendo do tempo de pega de mesmo, e deve ser mantido até um prazo mínimo de 7 dias. A duração varia de acordo

com as características geométricas da peça concretada, condições climáticas, relação a/c e tipo de cimento (THOMAZ, 2005). Para os dois últimos, o autor apresenta os períodos mínimos de cura, conforme Tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Períodos mínimos de cura de acordo com a relação a/c e o tipo de cimento (THOMAZ, 2005).

Tipo de Cimento	Período mínimo de cura (em dias) para as relações a/c			
	0,35	0,55	0,65	0,70
CP I e CP II - 32	2	3	7	10
CP IV 32 (POZ)	2	3	7	10
CP III 32 (AF)	2	5	7	10
CP I e CP II 40	2	3	5	5
CP V (ARI)	2	3	5	5

Além da convencional cura úmida, tem-se a cura térmica que, segundo Salvador Filho (2001), surgiu para otimizar os processos construtivos com o objetivo principal de conferir resistência suficiente ao concreto nas primeiras idades, permitindo seu manuseio. Esse tipo de cura gera vantagens operacionais e econômicas, sobretudo para os fabricantes de peças pré-moldadas, devido à possibilidade de rápida desforma, redução do tempo de cura e, conseqüentemente, redução da área de estoque e aumento da rotatividade dos moldes.

Entretanto, o ganho de resistência que ocorre nas primeiras idades não se mantém a longo prazo, havendo uma diminuição da mesma. Para Melo (2000), essa perda de resistência à compressão se dá pelo enfraquecimento da interface pasta-agregado devido à formação de produtos hidratados com baixo desempenho mecânico, como o hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2) e a etringita secundária, ambos favorecidos pela cura térmica com ciclos longos.

Aparentemente, a rápida hidratação inicial, provocada pelas elevadas temperaturas durante a cura térmica, forma produtos de pior estrutura física. Devido à elevada velocidade das reações, não há tempo suficiente para que ocorra uma precipitação uniforme no espaço intersticial, ocasionando uma alta concentração de produtos de hidratação na proximidade das partículas em hidratação. Essa distribuição não uniforme afeta negativamente a resistência, uma vez que áreas mais fracas diminuem a resistência de toda a matriz cimentícia (NEVILLE, 2015).

Além disso, o autor cita que em temperaturas mais elevadas, a solubilidade do sulfato de cálcio (gipsita), presente no cimento como regulador de pega, é reduzida, de modo que parte dele possa não reagir com o aluminato tricálcico (C_3A). Essa reação pode ocorrer mais

tarde, causando uma reação expansiva conhecida como ataque por sulfatos, assunto que será abordado no item 3.3.

2.3 INFLUÊNCIA DAS ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais silicosos insolúveis finamente moídos, de fontes naturais ou de subprodutos industriais, que são adicionados ao concreto em quantidades maiores que os aditivos químicos, conferindo efeitos físicos imediatos no concreto e efeitos químicos que podem demorar dias ou meses para se manifestarem (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Dal Molin (2011) classifica as adições minerais em três grupos, de acordo com sua ação físico-química: materiais pozolânicos, tais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz e o metacaulim, que reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio e formam compostos com propriedades cimentantes; materiais cimentantes, tais como escória granulada de alto-forno, que também formam compostos cimentantes, porém sem a necessidade da presença do hidróxido de cálcio; e o fíler, que age fisicamente promovendo um refinamento da estrutura de poros e alterando a microestrutura da zona de transição.

Considerada como uma superpozolana, a sílica ativa é um subproduto do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico, constituída de partículas com diâmetro médio de 0,1 e 0,2 μm , sendo mais fina que as partículas do cimento Portland, conferindo a ela, além do efeito pozolânico, também o efeito fíler (DAL MOLIN, 2011). Essa combinação de efeitos propicia uma melhora na microestrutura dos materiais à base de cimento, diminuindo a porosidade e a permeabilidade, densificando a pasta de cimento e melhorando as características da zona de transição pasta-agregado, o que aumenta o desempenho dos concretos e argamassas, tanto sob o ponto de vista de durabilidade, como das propriedades mecânicas (VIEIRA et al., 2007).

Atualmente, além da sílica ativa, tem-se estudado a utilização da nanosílica. Delgado et al. (2012) afirmam que seu tamanho varia de 3 a 150 nm e que a nanoescala das partículas faz com que mais átomos fiquem localizados na sua superfície, aumentando a área de superfície exposta, resultando em um aumento significativo na sua reatividade química. A Figura 2.6 ilustra a relação entre o tamanho e a área superficial das partículas de diferentes materiais, tais como aglomerantes, agregados e adições.

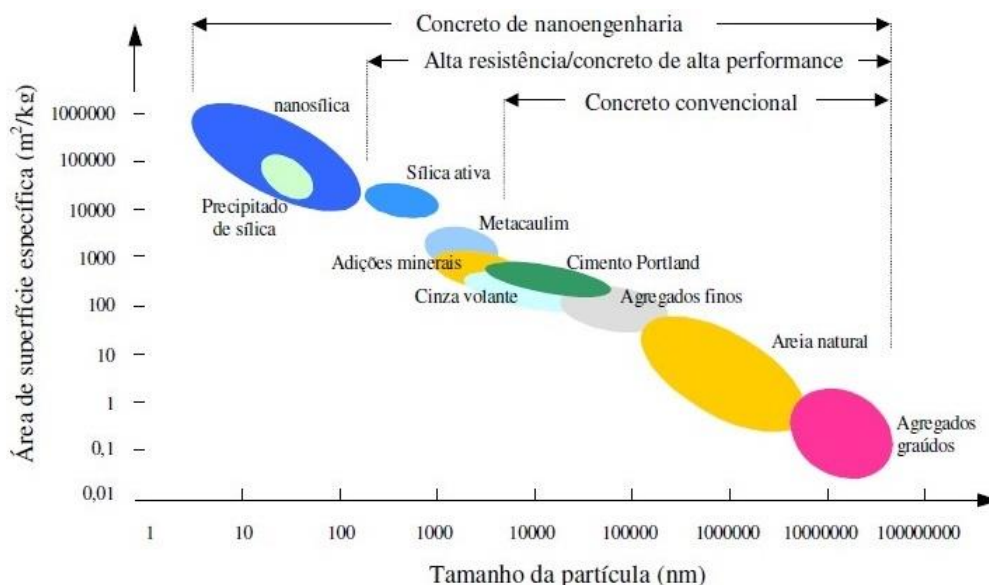


Figura 2.6 - Relação entre o tamanho e a área superficial da partícula (Adaptado de SANCHEZ; SOBOLEV, 2010).

A nanosílica está presente no mercado como uma adição que pode ser misturada ao concreto a fim de melhorar suas propriedades no estado endurecido. Por ser mais fina que a sílica ativa, a nanosílica tem maior área superficial e maior reatividade pozolânica e ambas, sendo muito mais finas do que o cimento, tendem a ser eficazes no preenchimento dos vazios entre os grãos de cimento, aumentando a densidade de empacotamento dos materiais cimentícios (Li et al., 2017).

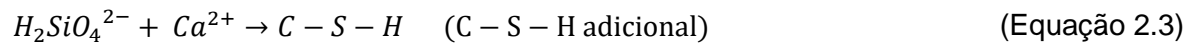
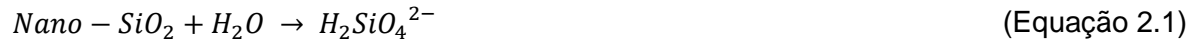
A alta área superficial das partículas de nanosílica faz com que elas adsorvam grande quantidade de água, o que, em composições com relação a/agl fixa, diminui a quantidade de água de amassamento disponível e reduz a consistência das misturas, devido ao ganho de coesão (VERA-AGULLO et al., 2009; SENFF et al., 2009).

Essa redução da trabalhabilidade pode ser compensada com o uso de aditivos superplastificantes (SP), que são aditivos redutores de água de alta eficiência e quando são adsorvidos nas partículas de cimento conferem carga negativa, ajudando a diminuir a tensão superficial da água circundante e elevando a fluidez do sistema (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Apesar dos efeitos adversos da nanosílica nas propriedades em estado fresco dos materiais à base de cimento, a sua adição preenche os vazios e torna a estrutura do cimento mais densa, acelerando o processo de hidratação devido ao efeito pozolânico e aumentando a resistência à compressão (VERA-AGULLO et al., 2009).

Singh et al. (2013) explicam que na presença de nanosílica há dois possíveis mecanismos de reação durante a hidratação do cimento: as reações pozolânicas e as reações de nucleação. Nas reações pozolânicas, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$, formado durante a hidratação e que

pouco contribui para o desenvolvimento de resistência da matriz cimentícia, reage com a nanosílica gerando C-S-H adicional, que por sua vez é a fase mais importante na determinação das propriedades da pasta (Equações 2.1 a 2.3).



As reações de nucleação também estão relacionadas à formação de C-S-H adicional, com a particularidade de que essas partículas se espalham na água entre as partículas de cimento e contribuem para a formação de uma fase C-S-H mais compacta. Dessa forma, a formação da fase C-S-H não está mais limitada à superfície do grão de cimento, como no C_3S puro, mas passa a ocorrer também nos poros (SINGH et al., 2013).

A Figura 2.7 ilustra a diferença da fase C-S-H em um concreto tradicional e em um concreto que recebeu adição de nanosílica.

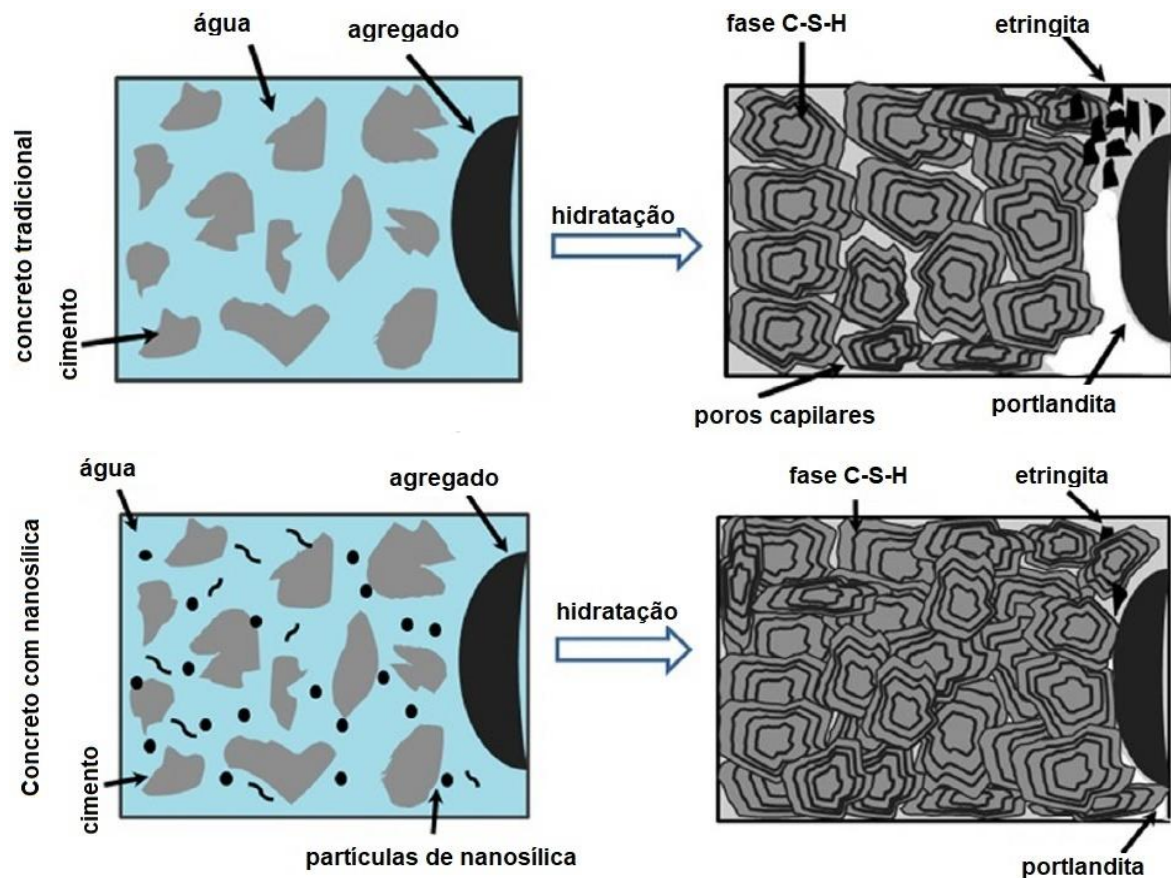


Figura 2.7 - Reações de hidratação do cimento na presença de nanosílica (SINGH et al., 2013).

A utilização da nanosílica tem sido amplamente estudada nos últimos anos, tanto de forma isolada quanto combinada com a sílica ativa, que já se consagrou com uma adição mineral que traz efeitos positivos aos materiais cimentícios.

Ji (2005) avaliou a influência da adição da nanosílica na permeabilidade à água e na microestrutura de concretos. Os resultados dos ensaios apontaram que a substituição de 3,5% do cimento por nanosílica culminaram em um concreto menos permeável, com uma redução de 65 mm na profundidade de penetração da água. Além disso, foram observadas mudanças na sua microestrutura, tornando-se mais uniforme e compacta. O autor explica que tais mudanças se devem ao fato de a nanosílica reagir com o CH e gerar C-S-H adicional, fazendo com que a zona de transição entre a pasta de cimento e os agregados se torne mais densa. Tais fatores conferem maior resistência mecânica e indica um possível aumento na durabilidade do concreto.

Essa teoria é confirmada por Qing et al. (2007), que pesquisaram a influência da sílica ativa e da nanosílica em pastas como substituição parcial do cimento. As mesmas foram acionadas em teores variados e isoladamente, não levando em consideração seu efeito combinado. Os resultados obtidos indicaram que os ganhos de resistência foram maiores nas primeiras idades quando adicionada nanosílica em comparação à sílica ativa; já aos 60 dias, a sílica ativa também promoveu aumento significativo em relação ao concreto sem adições. A resistência da zona de transição entre pasta e agregado também foi avaliada e concluiu-se que a adição de 5% nanosílica contribuiu para um aumento de 87% em relação ao traço referência, enquanto para o mesmo teor de sílica ativa, houve um acréscimo de apenas 22%. Essa diferença de comportamento é atribuída a maior atividade pozolânica da nanosílica em relação a sílica ativa, fazendo com que o CH seja consumido bem como a redução no tamanho dos seus cristais, melhorando a estrutura da zona de transição de forma mais efetiva.

Os efeitos de uma nanosílica em pó nas propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos de alta resistência foram avaliados por meio de substituições parciais de 1 e 2% de cimento. Foram observadas melhoras significativas para o teor de 2% diante dos ensaios de penetração de cloretos e absorção de água, efeitos decorrentes da alta área superficial, o que efetivamente estimula tanto o efeito pozolânico quanto o efeito de fíler sobre a matriz cimentícia (GANESH et al., 2016).

Ghafoori, Batilov e Najimi (2016) avaliaram a influência da adição de nanosílica e sílica ativa em pó na durabilidade de argamassas frente ao ataque de sulfatos, por meio de ensaios de variação dimensional, resistência à compressão e perda de massa. Os autores substituíram o cimento pelas adições nos teores de 1,5 a 6,0%, isoladamente, e concluíram que a nanosílica em pó tem efeito inferior se comparado à sílica ativa devido à aglomeração

das partículas, o que dificultou a dispersão e limitou seus efeitos na microestrutura das argamassas. Entretanto, os autores testaram também uma solução aquosa de nanosílica e os resultados obtidos indicaram que esta é mais eficaz que a nanosílica e a sílica ativa em pó.

Uma nanosílica coloidal foi utilizada por Joshaghani e Moeini (2017) em argamassas que foram submetidas a ensaios mecânicos e de durabilidade. Os resultados indicaram que 6% de nanosílica usada em substituição ao cimento melhoraram em 60% a resistência à compressão aos 90 dias se comparadas às argamassas compostas de cimento apenas. Além disso, o mesmo teor reduziu cerca de 80% os coeficientes de migração de cloretos para argamassas de mesma idade.

Além de estudados isoladamente, os efeitos da sílica ativa e nanosílica foram avaliados de forma simultânea nas propriedades mecânicas e na microestrutura de argamassas. Os pesquisadores concluíram que o efeito combinado das duas adições tem efeitos mais significativos que se utilizados separadamente, sugerindo que a nanosílica não deve ser utilizada sozinha e sim em conjunto com a sílica ativa para explorar ao máximo a sinergia entre elas (Li et al., 2017).

Uma nanosílica dispersa em superplastificante foi adicionada em argamassas de cimento em diferentes teores, as quais foram submetidas a ensaios de resistência à compressão e absorção de água por capilaridade. Os resultados obtidos indicaram que a adição de nanosílica não trouxe efeitos positivos ao desempenho das argamassas quanto às propriedades analisadas. Entretanto, ao combinar nanosílica e sílica ativa, obteve-se desempenho melhor que as argamassas de referência (SCHMALZ; FERREIRA; QUARCIONI, 2017).

Como pode ser visto, ainda existe uma falta de consenso quanto ao real efeito da nanosílica nas propriedades mecânicas e físicas dos compósitos cimentícios, especialmente considerando as diferentes formas do material presente no mercado. Sendo assim, o presente trabalho tem como objetivo principal estudar a influência de uma solução aquosa de nanosílica coloidal sobre argamassas de cimento Portland, avaliando propriedades mecânicas e físicas e parâmetros de durabilidade frente ao ataque de sulfatos.

3. ATAQUE POR SULFATOS

Os sulfatos estão presentes na água do mar, nas águas subterrâneas e nos esgotos industriais e, geralmente, se manifestam em áreas planas, onde os sais se acumularam ao longo do tempo sem serem carregados por fluxos de água subterrâneos (SILVA FILHO, 1994). Os tipos de sulfatos mais conhecidos e as respectivas informações sobre aparência, solubilidade, origem e nível de agressividade estão apresentadas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Características dos principais tipos de sais selenitosos (SILVA FILHO, 1994).

Tipo	Cátion	Cor	Solubilidade	Origem	Agressividade
K ₂ SO ₄	Potássio	branca	baixa	água do mar e água subterrânea	elevada
NH ₄ SO ₄	Amônia	branca	alta	Fábrica de explosivos, coque, indústrias químicas e águas subterrâneas	elevada
Na ₂ SO ₄	Sódio	branca	alta	indústrias químicas, leite de mar e água do mar	elevada
CaSO ₄	Cálcio	branca	baixa	água subterrânea e escória de carbono	elevada
MgSO ₄	Magnésio	branca	alta	água do mar e água subterrânea	elevada
CuSO ₄	Cobre	branca	alta	conservação de madeiras e galvanotecnia	elevada
FeSO ₄ / Fe ₂ SO ₄	Ferro	verde/ branca	alta	desinfetante, tinturaria e tratamento de água	elevada
ZnSO ₄	Zinco	branca	baixa	indústrias químicas e tinturaria	média
KAlSO ₄	Potássio/ Alumínio	branca	baixa	indústrias químicas	média
PbSO ₄	Chumbo	branca	muito baixa	indústrias químicas	reduzida
CoSO ₄	Cobalto	vermelha	baixa	-	reduzida
NiSO ₄	Níquel	verde	baixa	indústrias químicas	reduzida

Os sulfatos de sódio, cálcio e magnésio são considerados os mais importantes para o estudo do ataque ao concreto devido à sua abundância na natureza, geralmente presentes nos solos e lençóis freáticos, e agressividade. Vale ressaltar que os sais em estado sólido não atacam o concreto e a reação química com a pasta de cimento hidratada só ocorre quando eles estão na forma de solução (SILVA FILHO, 1994; NEVILLE, 2015).

O ataque por sulfatos ao concreto é considerado um mecanismo deteriorador e caracteriza-se por ser uma reação físico-química expansiva causadora de fissuração na matriz cimentícia. Esse tipo de ataque pode se dar de duas formas: de origem externa e de origem interna ao concreto.

No ataque externo de sulfato (*External Sulfate Attack – ESA*), o sulfato que entra no concreto é proveniente do meio ambiente (solos, águas de infiltração, ambientes industriais e urbanos, obras de saneamento) e reage com os produtos de hidratação do cimento, gerando reações expansivas.

Já no ataque interno de sulfatos (*Internal Sulfate Attack – ISA*) não há penetração de sulfatos do meio ambiente no concreto. Nesse tipo de ataque, os agentes agressivos são decorrentes do controlador de pega adicionado ao cimento (gipsita), de sulfatos alcalinos presentes no clínquer ou, ainda, da utilização de agregados contaminados por sulfatos de origem natural ou artificial (ESCADEILLAS; HORNAIN, 2014).

Scrivener e Skalny (2005) citam uma outra forma de ISA, observada em concretos e argamassas que experimentaram temperaturas elevadas durante a cura, seja pela aplicação externa de calor como na cura a vapor, ou do aumento da temperatura interna devido ao calor evoluído durante a hidratação.

De um modo geral, as reações químicas entre os íons sulfato e os compostos hidratados do cimento podem se manifestar nas estruturas de concreto por meio de diferentes mecanismos: redução progressiva de resistência, rigidez e massa (Figura 3.1a) e expansão e fissuração (Figura 3.1b). Há ainda um terceiro tipo de manifestação menos relatado na literatura e que consiste na descamação da superfície em camadas sucessivas, denominado de cascas de cebola (Figura 3.1c) (AL-AMOUDI, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A redução progressiva de resistência, rigidez e massa é resultante da perda de coesão dos produtos de hidratação do cimento, associado à formação de gipsita. Já a expansão da matriz é decorrente da formação de cristais de trissulfoaluminatos de cálcio hidratados, também denominados de etringita, que tem como consequência a fissuração e o lascamento das camadas superficiais (GOMIDES, 2001).

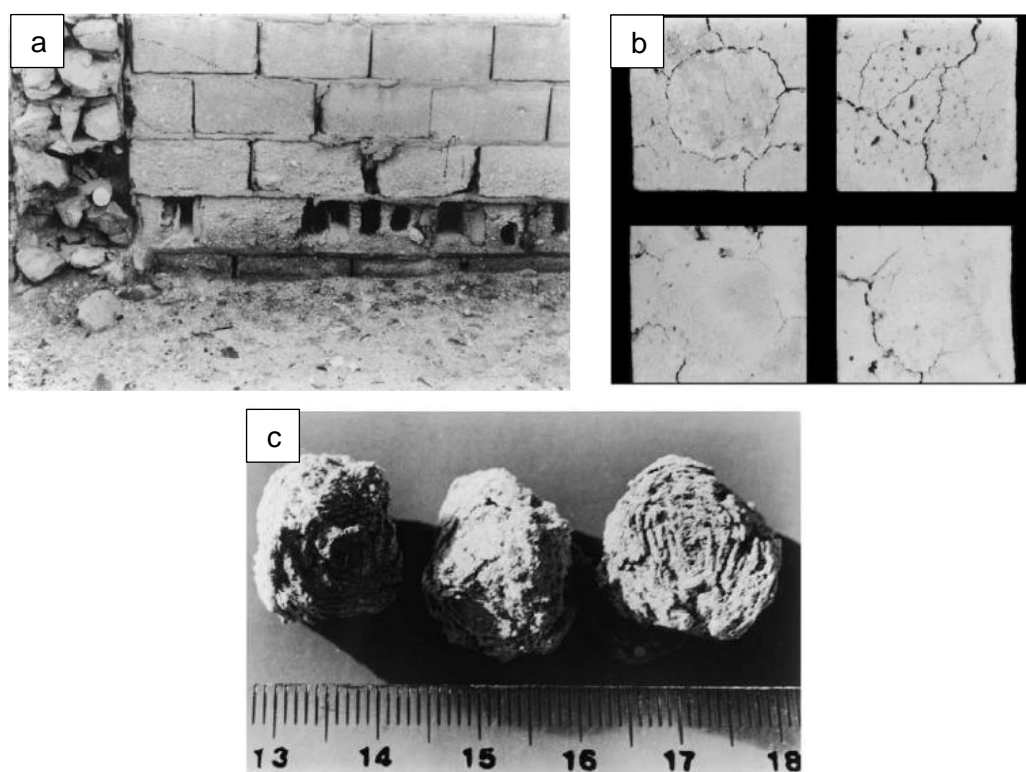


Figura 3.1 - Manifestações do ataque por sulfatos (AL-AMOUDI, 2002).

O ataque por sulfatos pode se manifestar também com a formação de taumasita, que ocorre em condições de baixa temperatura (abaixo de 15°C) e é resultado da conversão do C-S-H, na presença de sulfatos, carbonatos e umidade, no composto $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 15\text{H}_2\text{O}$. A formação da taumasita causa degradação progressiva da superfície do concreto, transformando a pasta de cimento endurecida em uma massa não coesa (IRASSAR, 2009; NEVILLE, 2015).

3.1 NORMALIZAÇÃO

A NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) estabelece os requisitos para o concreto exposto à ação dos íons sulfatos. Os valores ideais para a relação a/c e para a resistência do concreto variam conforme a concentração de sulfatos presentes na água e nos solos (Tabela 3.2). Quanto à água de amassamento, a NBR 15900-1:2009 (ABNT, 2009) limita o teor de sulfato, expresso como SO_4^{2-} , em 2000 mg/l.

Tabela 3.2 - Requisitos para o concreto exposto a soluções contendo sulfatos, conforme NBR 12655:2015 (ABNT, 2015).

Condição de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO ₄) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO ₄) presente na água (ppm)	Máxima relação a/c	f _{ck} mínimo (MPa)
Fraca	0,00 a 0,10	0 a 150	*	*
Moderada	0,10 a 0,20	150 a 1500	0,50	35
Severa	Acima de 0,20	Acima de 1500	0,45	40

* Para condições fracas de exposição a sulfatos, utilizar a tabela 1 da NBR 12655:2015 (ABNT, 2015), considerando apenas a classe de agressividade ambiental.
(Fonte: Adaptado de ABNT NBR 12655:2015)

Em relação à avaliação do ataque por sulfatos de origem externa em materiais cimentícios, a norma brasileira NBR 13583:2014 (ABNT, 2014) estabelece o ensaio de variação dimensional em barras de argamassa, semelhante a norma americana ASTM C1012/C1012M – 18a (ASTM, 2018). A Tabela 3.3 traz um resumo das especificações de ensaio de cada norma.

Tabela 3.3 - Comparação entre as normas brasileira e americana para avaliação do ataque por sulfatos.

Especificação	NBR 13583:2014	ASTM C1012/C1012M – 18a
Traço	1:3,20	1:2,75
Relação a/agl	0,60	0,49
Dimensão do CP (mm)	25 x 25 x 285	25 x 25 x 285
Cura inicial	Ao ar por 48 horas	Imersas em água a (35 ± 3) °C por 24 horas
Cura Intermediária	Imersão em água saturada com cal por 12 dias	Imersão em água saturada com cal a (23 ± 2) °C até atingir resistência à compressão de 20 MPa.
Cura Final Ataque por sulfatos	Dois grupos: I - Imersão em água saturada com cal (referência) II - Imersão em solução de sulfato de sódio (10%). Ambos a (40 ± 2) °C	Imersão em solução de sulfato de sódio (5%) a (23 ± 2) °C
Tempo de exposição	42 dias	365 dias

Nota-se, que as diferenças entre as duas normas vão desde a composição dos traços, até os procedimentos de ataque, soluções com diferentes concentrações, temperaturas e duração dos ensaios.

A norma americana estabelece uma menor relação a/agl (0,49) em comparação com a norma brasileira (0,60), o que pode influenciar significativamente os resultados dos ensaios, uma vez que a permeabilidade do material cimentício está relacionada com a quantidade de água utilizada nas misturas. Atahan e Dikme (2011) comentam que a permeabilidade é a propriedade mais importante no caso do ataque externo de sulfatos, pois influencia na penetração dos íons sulfato no material, seja ele argamassa ou concreto.

Em contrapartida, a ASTM C1012 (ASTM, 2018) prolonga o tempo de exposição por 365 dias, enquanto que a NBR 13583:2014 (ABNT, 2014) estabelece apenas 42 dias. O maior tempo de ensaio contribui para a obtenção de uma série de dados mais consistentes e possibilita a confirmação da tendência das argamassas expandirem ou não. Isso foi feito por alguns pesquisadores que optaram por estender os ensaios, acompanhando as variações dimensionais das argamassas por cerca de 180 dias (SHARKAWI; ABD-ELATY; KHALIFA, 2018), 360 dias (ATAHAN; DIKME, 2011; BULATOVIC et al., 2017), 420 dias (MA et al., 2018), 550 dias (GHAFOORI; BATILOV; NAJIMI, 2016) e até 1000 dias (ZHANG; OLEK; DIAMOND, 2002; ATAHAN; ARSLAN, 2016).

Por fim, as normas ainda determinam a expressão dos resultados de formas distintas. A norma brasileira expressa os resultados na forma de expansão resultante, dada pela diferença entre a expansão média da argamassa submetida ao ataque por sulfatos e a expansão média da argamassa mantida em água com cal, em porcentagem (ABNT NBR 13583, 2014) Enquanto que para a norma americana os resultados devem ser expressos apenas pela expansão média das argamassas imersas na solução agressiva de sulfato de sódio (ASTM C1012, 2018). Essa distinção leva, acima de tudo, a valores de expansão de ordens de grandeza diferentes, o que limita ainda mais as comparações com os resultados publicados internacionalmente, obtidos com base na norma americana.

Vale ressaltar que não existem normas que especifiquem ensaios para avaliação de ataque por sulfatos de origem interna, acarretando a dificuldade de comparação entre as pesquisas realizadas.

3.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO ATAQUE POR SULFATOS

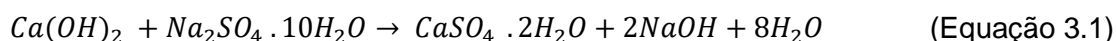
Além das variáveis e especificações impostas pelas normas, outros fatores podem influenciar no comportamento dos materiais cimentícios frente ao ataque dos íons sulfato, a saber: solução agressiva, tipo de cimento utilizado na mistura, pH da solução e a temperatura que o concreto é submetido. Estes serão abordados individualmente a seguir.

3.2.1 SOLUÇÃO AGRESSIVA

A intensidade e a natureza do ataque variam conforme o cátion associado ao radical SO_4^{2-} (Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} etc.). Os sulfatos de cálcio, sódio e magnésio são apresentados nesse trabalho devido à sua elevada agressividade e abundância no meio ambiente, como citado anteriormente e mostrado na Tabela 3.1.

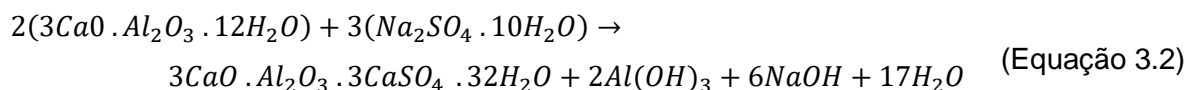
- Sulfato de sódio

De acordo com Costa (2004), o sulfato de sódio é cerca de 20 vezes mais solúvel que o sulfato de cálcio. Quando em elevadas concentrações (> 8000 ppm), reage com o CH, formando a gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), também conhecido por sulfato de cálcio hidratado, e devido ao aumento de volume, causa expansão e fissuração da matriz cimentícia (Equação 3.1). Como subproduto da reação, tem-se o hidróxido de sódio, que mantém a alta alcalinidade do sistema e assegura a estabilidade do principal produto de hidratação do cimento, o C-S-H, impedindo sua decomposição (MEHTA; MONTEIRO, 2014).



Os autores afirmam ainda que foram observados casos em que a deterioração da pasta de cimento Portland pela formação da gipsita se dá através de um processo que primeiro leva à redução do pH do sistema, perda de rigidez e resistência, seguida de expansão e fissuração e, por fim, pela transformação do concreto em uma massa não coesa.

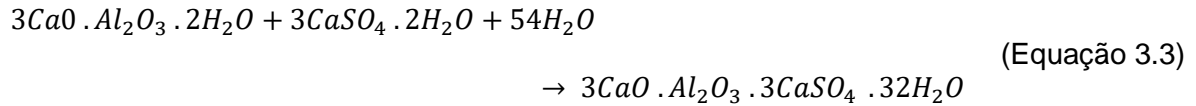
Já quando em concentrações inferiores a 1000 ppm SO_4/l , reage com o aluminato de cálcio hidratado, formando a etringita e o hidróxido de sódio (Equação 3.2). As consequências ao concreto são as mesmas: expansão e fissuração.



- Sulfato de cálcio

O sulfato de cálcio (CaSO_4), presente na natureza tanto na forma anidra quanto na forma hidratada ($\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), apesar de possuir baixa solubilidade é bastante agressivo ao concreto. Essa agressividade é decorrente da formação da etringita, produto da reação da gipsita com o aluminato tricálcico (C_3A) (Equação 3.3), que possui volume 2,5 vezes maior

que o C_3A , caracterizando uma reação expansiva (SILVA FILHO, 1994). Essa expansão na matriz cimentícia gera fissuração e, conseqüentemente, aumenta a permeabilidade do concreto, acelerando o processo de degradação.



Dentro desse contexto, Souza (2006) explica que durante a hidratação do cimento Portland, há a formação de etringita, originada da reação da gipsita (presente no cimento como regulador de pega) com os aluminatos, a qual é gradativamente convertida em monossulfoaluminato de cálcio após o consumo de toda a gipsita contida na mistura. Entretanto, quando o material cimentício já endurecido entra em contato com os sulfatos presentes no meio ambiente, o equilíbrio é alterado e o monossulfoaluminato tende a retornar ao seu estado inicial, formando a etringita, como ilustra a Figura 3.2.

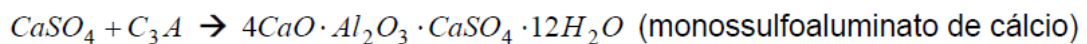
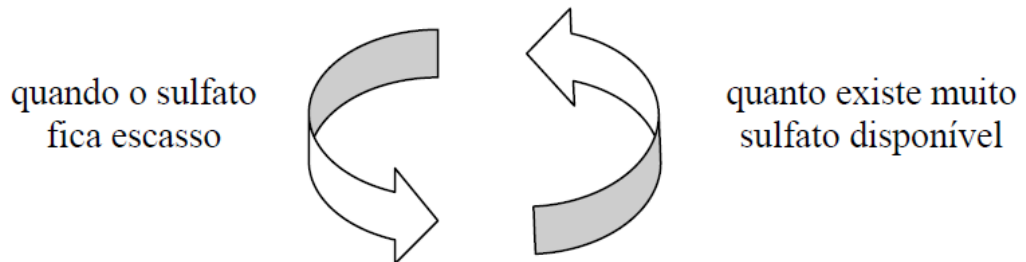
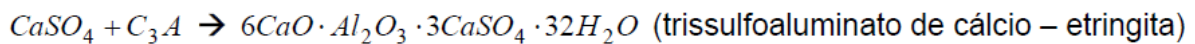
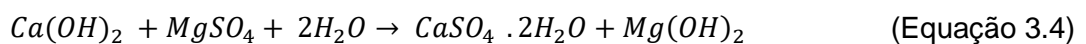


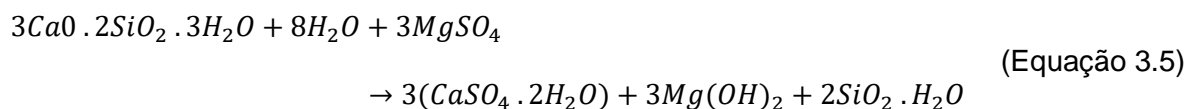
Figura 3.2 - Reações químicas envolvendo a gipsita (SOUZA, 2006).

- Sulfato de magnésio

Trinta e cinco vezes mais solúvel que o sulfato de cálcio e considerado o sulfato mais agressivo ao concreto, o sulfato de magnésio provoca uma reação química que envolve tanto o ânion SO_4^{2-} quanto o cátion Mg^{2+} . Ambos reagem com o CH formando uma camada superficial composta de gipsita e brucita ($Mg(OH)_2$) (SOUZA, 2006). A reação está descrita na Equação 3.4.



Santhanam, Cohen e Olek (2001) explicam que o processo de formação da brucita consome uma grande quantidade de CH que, ao se esgotar, reduz o pH da solução contida nos poros. Para elevar novamente o pH e manter a estabilidade, o C-S-H libera CH na solução, descalcificando-se e levando à consequente perda da estrutura cimentícia. Com a desestabilização, o C-S-H reage com o sulfato de magnésio, dando origem à gipsita, hidróxido de magnésio e o gel de sílica, como mostra a Equação 3.5.



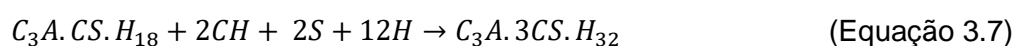
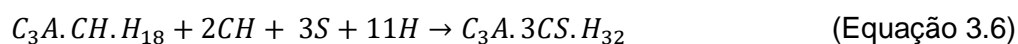
Em casos de ataque avançado, o cátion Ca^+ é completamente substituído pelo Mg^{2+} , levando à formação de silicato hidratado de magnésio (M-S-H), que é considerado um material não cimentício (BONEM; COHEN, 1992).

Dessa forma, o sulfato de magnésio agride o concreto na forma de expansão e fissuração, devido à formação da gipsita, e sob forma de perda de resistência por dissolução do C-S-H. Neville (2015) cita ainda a possibilidade de ocorrer reação entre o hidróxido de magnésio e o gel de sílica, também deterioradora do concreto.

3.2.2 COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO CIMENTO

A composição química do cimento utilizado na mistura pode influenciar no ataque por sulfatos. De acordo com Silva Filho (1994), deve-se procurar limitar o teor de C_3A , pois embora a reação expansiva deste componente não seja a única a ocorrer durante o processo agressivo, ele ainda é o fator mais relevante na resistência do cimento Portland comum ao ataque de sulfatos.

Mehta e Monteiro (2014) explicam que em cimentos Portland com mais de 5% de C_3A , a alumina predominará sob forma de monossulfato hidratado ($C_3A \cdot CS \cdot H_{18}$), e acima de 8% sob forma de *hidrogarnet* ($C_3A \cdot CH \cdot H_{18}$). Quando a pasta de cimento hidratada entra em contato com os íons sulfato, devido à presença de hidróxido de cálcio, ambos os hidratados que contém alumina se convertem em etringita ($C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$), como mostram as equações 3.6 e 3.7 apresentadas a seguir.



Al-Amoudi (2002) salienta que os cimentos com baixo teor de C_3A geralmente têm uma relação C_3S/C_2S mais elevada e esse aumento no teor de C_3S gera uma quantidade significativamente maior de CH, que por sua vez pode combinar com os íons sulfato levando à formação de gipsita, como discutido anteriormente.

3.2.3 pH

Estudos indicam que o pH da solução contendo sulfatos influencia na agressividade do ataque. Alguns pesquisadores analisaram como se dá essa influência e os resultados indicaram que uma redução no pH também reduz a resistência ao ataque por sulfatos, aumentando a expansão do concreto (BROWN, 1981; FERRARIS et al., 1997).

Irassar (2009) afirma que o pH é considerado um fator importante nos ensaios de resistência a sulfatos, uma vez que pode alterar as fases predominantes de ataque, especialmente a formação de gesso a partir do CH. A medida que todo o CH é consumido, o C-S-H se decompõe na tentativa de elevar o pH da solução dos poros e, conseqüentemente, tem-se a perda de coesão e de rigidez da matriz cimentícia.

Como já citado no item 3.2.1, a alta alcalinidade do sistema é essencial para a estabilidade do C-S-H e a redução no pH permite que o C-S-H seja atacado pelo sulfato de magnésio, tornando este tipo de ataque ainda mais agressivo.

3.2.4 TEMPERATURA

A temperatura está associada ao controle da velocidade das reações químicas. Gomides (2001) explica que um aumento de $10^{\circ}C$ na temperatura faz com que essa velocidade dobre, em função da maior mobilidade adquirida pelos íons e molécula, aumentando, conseqüentemente, a velocidade de transporte da substância agressiva pelos poros do concreto.

Além do aumento na velocidade das reações químicas, a temperatura também influencia na estabilidade da etringita, a qual, em temperaturas acima de $65^{\circ}C$, decompõe-se e forma monossulfato hidratado. Essa reação libera íons sulfato que são adsorvidos pelo C-S-H, formando, então, a etringita secundária, a qual é responsável pela expansão e fissuração do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Esse assunto será aprofundado no item a seguir.

3.3 A FORMAÇÃO DA ETRINGITA TARDIA

A etringita, ou trissulfoaluminato de cálcio, é um produto de hidratação do cimento resultante da reação da gipsita com os aluminatos. Quando formada de modo homogêneo e ainda durante o estágio plástico da mistura de concreto não causa tensões nocivas ao concreto. Por outro lado, quando a etringita se forma após alguns meses ou anos, causa uma expansão heterogênea em um concreto já endurecido, resultando em fissuração e lascamento (COLLEPARDI, 2003).

De acordo com Taylor, Famy e Scrivenier (2001), a formação da etringita tardia (DEF – *Delayed Ettringite Formation*) é definida como a formação da etringita no material cimentício por um processo que se inicia após seu completo endurecimento, com a particularidade de os sulfatos não serem de origem externa. Em estudos desenvolvidos pelos pesquisadores, foi observada sua ocorrência em concretos que foram submetidos a altas temperaturas (acima de 70°C).

Para Collepardi (2003), o termo DEF refere-se à formação tardia da etringita de um modo geral e, portanto, devem ser consideradas ambas as fontes de sulfato, interna ou externa, desde que o fenômeno ocorra. Na Tabela 3.4 o autor apresenta a DEF proveniente dos dois tipos de ataque.

Tabela 3.4 - Formação da etringita tardia pelo ataque de sulfatos externos e internos (COLLEPARDI, 2013).

Ataque externo de sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ocorre quando um sulfato presente na água ou no solo penetra na estrutura de concreto; ▪ Ocorre em concretos permeáveis; ▪ Ocorre em ambientes úmidos que favorecem a difusão do SO_4^{2-} na solução aquosa contida nos poros capilares do concreto.
Ataque interno de sulfatos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ocorre em ambientes livres de sulfatos, devido à presença de sulfatos em agregados contaminados com gipsita ou devido à decomposição térmica da etringita; ▪ É favorecido por microfissuras preliminares onde pode ocorrer o depósito de cristais de etringita; ▪ Ocorre em ambientes úmidos que favorecem a difusão do SO_4^{2-} e outros íons reativos através de poros capilares saturados com água.

Collepardi (2003) explica que para que ocorra o ataque por sulfatos de origem externa devem ser cumpridas três condições: concreto com alta permeabilidade, ambiente rico em sulfatos e a presença de água, as quais devem ocorrer de forma sistêmica, conforme ilustrado na Figura 3.3, sendo que cada círculo corresponde a uma das três condições. Na ausência de uma delas a DEF pode não ocorrer, enquanto a área central, onde os três círculos se

sobrepõem, representa uma situação de alto risco de ocorrência de DEF por ataque de sulfatos externos.

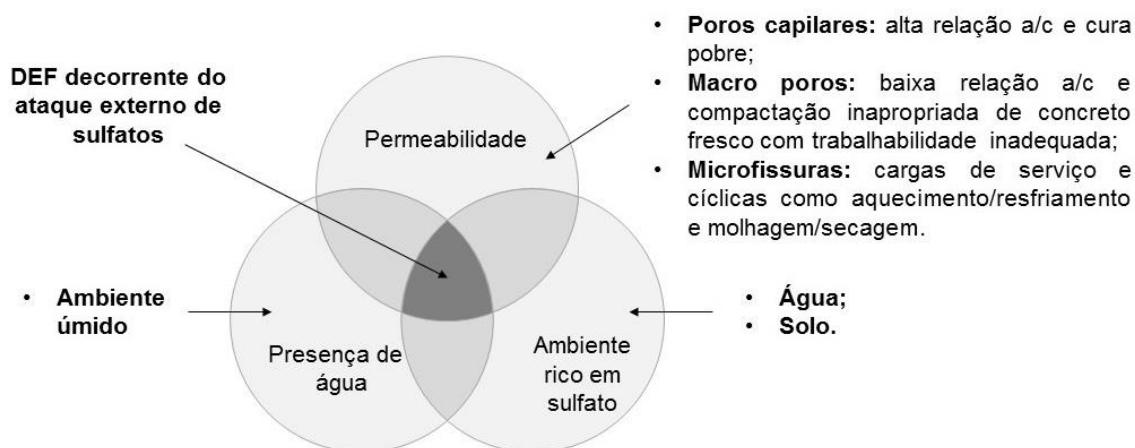


Figura 3.3 - DEF devido ao ataque por sulfatos de origem externa (Fonte: Adaptado de Collepari, 2003).

Do mesmo modo, para que a DEF devido ao ataque de sulfatos de origem interna ocorra, é necessária a ocorrência simultânea de três condições: microfissuração, liberação tardia de sulfato e presença de água, como ilustra a Figura 3.4.

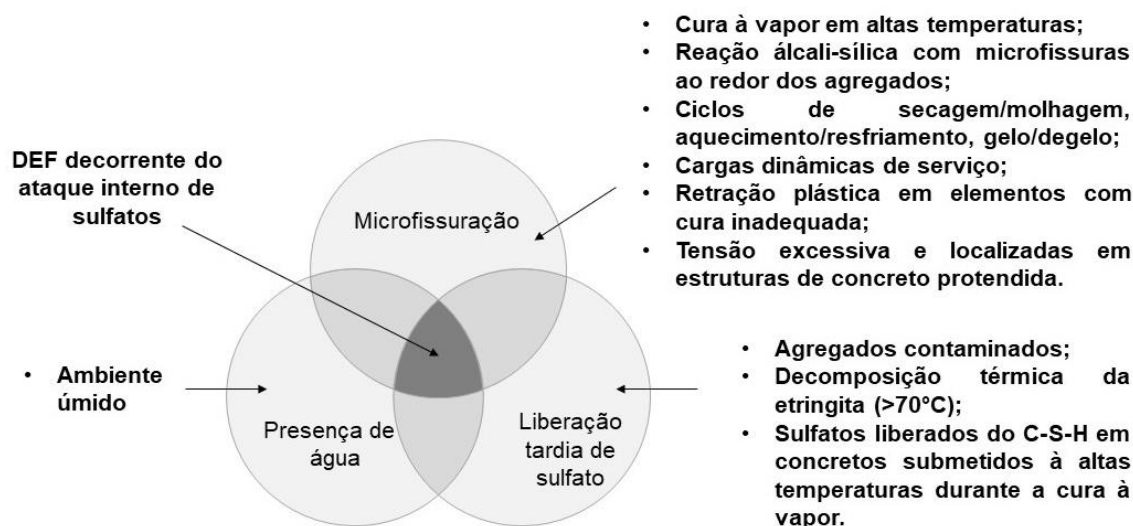


Figura 3.4 - DEF devido ao ataque por sulfatos de origem interna (Fonte: Adaptado de Collepari, 2003).

Nota-se que o autor considera como uma das fontes internas de sulfato, a decomposição térmica da etringita, que nesse caso refere-se à etringita primária, formada durante a hidratação do cimento. Devido à sua instabilidade em temperaturas acima de 65-70°C, ela se decompõe e forma monossulfato hidratado ($C_3A.CS.H_{18}$). Essa conversão libera

íons sulfato que são adsorvidos pelo C-S-H. Posteriormente, esses íons são desorvidos e forma-se então uma nova etringita (etringita secundária ou etringita tardia), causando expansão e fissuração, como explicam Mehta e Monteiro (2014).

As elevadas temperaturas podem ser provenientes tanto de processos de cura térmica, comumente utilizada em elementos pré-moldados, quanto do próprio calor de hidratação gerado no lançamento de grande quantidade de concreto, quando a dissipação natural não for adequada (NEVILLE, 2015).

Scrivener e Skalny (2005) citam esse fenômeno como uma terceira forma de ISA, o ataque interno de sulfatos induzido por altas temperaturas (*heat induced internal sulfate attack*), e explicam que se trata de um ataque sulfático induzido sem a inserção de sulfatos de origens externas no concreto. Nesse caso, a formação da etringita, que geralmente ocorre no concreto curado à temperatura ambiente, é adiada devido à exposição a temperaturas excessivas (acima de 70°C) durante os primeiros estágios de cura, tanto como resultado de cura térmica ou alto calor de hidratação, ou ainda de ambos. O desenvolvimento tardio da etringita pode levar à expansão e à fissuração do concreto.

Os casos de DEF que ganharam destaque na literatura foram os dormentes de estradas de ferro, como estudado por Sahu e Thaulow (2004). Os autores concluíram que a fissuração decorrente da DEF pode ocorrer mesmo sob temperaturas inferiores a 60°C e pode estar relacionada a combinação de alguns fatores, tais como: alto consumo de cimento por metro cúbico de concreto, cimento com alta área superficial e altos teores de sulfatos no cimento.

Os dormentes também foram objeto de estudo de Lee et al. (2005). Os autores concluíram que a utilização de agregados contaminados com pirita levou à degradação precoce (vida útil inferior a 16 anos) dos elementos de concreto. A oxidação da pirita aumentou o teor de enxofre presente nas misturas, levando à formação de etringita tardia. Porém, os autores ressaltam que nem todos os cristais de etringita encontrados estavam associados com as massas oxidadas de pirita, levantando a hipótese de fontes externas de sulfatos terem contribuído para a DEF.

Zhang, Olek e Diamond (2002) estudaram a ocorrência de DEF em argamassas preparadas a partir de cimentos com diferentes teores de SO₃ e diferentes temperaturas de cura. Expansões significativas ocorreram apenas em argamassas submetidas a altas temperaturas (85°C) por 6 horas e feitas com cimentos com elevados teores de SO₃ (4,7 e 5,0%). As argamassas contendo os cimentos com teor de SO₃ entre 3,7 e 4,0%, considerados teores limites, apresentaram expansões modestas, a partir de 500 dias de ensaio. Já as argamassas de cimentos com baixos teores de SO₃ (até 3%) e aquelas submetidas a

processos de cura convencionais e de cura térmica a 55°C não apresentaram expansões ou qualquer evidência de DEF após 900 dias de ensaio. Os autores concluíram, portanto, que o alto teor de SO₃ no cimento, bem como a temperatura a que são expostos os materiais cimentícios são fatores significativos para a ocorrência da DEF.

Diante das controvérsias acerca das causas que levam à formação da etringita tardia em materiais cimentícios, o presente trabalho tem, como um dos objetivos, avaliar a possibilidade da formação de etringita tardia em argamassas, diante de diferentes condições: ataque externo de sulfatos, ataque interno de sulfatos e submetidas à cura térmica a altas temperaturas.

3.4 O ESTUDO DO ATAQUE POR SULFATOS NO BRASIL

No que diz respeito ao estudo do ataque por sulfatos, principalmente o ataque de origem externa, as pesquisas brasileiras apresentam uma grande variação nos parâmetros de dosagem, condições de cura e de exposição ao agente agressivo, bem como nos ensaios realizados para análise das consequências do ataque. Essa grande variabilidade influencia nos resultados e aumenta as dificuldades de comparação entre elas.

As Tabelas 3.5 e 3.6 relacionam algumas pesquisas desenvolvidas no Brasil, mostrando as variações entre elas. A primeira apresenta as variáveis relativas à dosagem, métodos de cura e as condições de exposição ao ataque de sulfatos, enquanto a segunda relaciona os ensaios realizados para avaliar a durabilidade do compósito cimentício, seja ele argamassa ou concreto.

Embora tenha ganhado relevância no Brasil nos anos 1990 com as investigações de Silva Filho (1994), o ataque por sulfatos tem sido estudado pelo mundo desde os anos 1980, como mostram as pesquisas de Brown (1981), Mehta (1983), Cohen e Bentur (1988). O interesse pelo assunto tem continuado até os dias de hoje, como mostra a Tabela 3.7 que relaciona algumas das pesquisas mais recentes sobre o tema em diversos países.

Tabela 3.5 - Pesquisas brasileiras: dosagem, cura e tipo de ataque por sulfatos.

Referência	Dosagem			Cura		Condição de agressão		
	Cimento	a/agl	Adições	Tipo	Tempo	Tipo	Solução	Tempo
Silva Filho (1994)	CP I CP IV	0,28, 0,43 0,67	SA: 0, 5 e 10%	Úmida	28 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (5%)	120 dias
Moura (2000)	CP I-S	0,40, 0,50 0,60	Escória de Cobre: 0 e 20%	Úmida	28 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (5%)	450 dias
Gomides (2001)	CP II-F-32	Variada (CCR)	SA: 0 e 10%	Úmida	70 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (5%)	130 dias
Centurione, Kihara e Battagin (2003)	CP IV-32 CP II-Z-32 CP II-F-32	0,60	-	Ao ar + imersão	48 h + 12 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (10%)	42 dias
Costa (2004)	CP II-E-32 CP III-32-RS CP IV-32	0,67 0,42	-	Ao ar	24 h	Ciclos: 1 dia (imersão) x 3 dias (secagem)	MgSO ₄ (10 e 50g/l)	180 dias
Linhares (2010)	CP II-E CP II-F	0,35, 0,48 0,70	SA: 5 e 10% Metacaulim: 5 e 10%	Úmida + Imersão	24 h + 28 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (5%)	105 dias
Rheinheimer e Khoe (2013)	CP IV CP III CP V-ARI-RS CP II-Z	0,60	-	Ao ar + imersão	48 h + 12 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (10%)	42 dias
Cesário e Silva (2014)	CP V	0,65	-	Ao ar	24 h	Imersão	MgSO ₄ , Na ₂ SO ₄ e FeSO ₄ (1500 mg/l)	182 dias
Bragança (2014)	CP II-Z-32 CP IV-32	0,60	Nano-Fe ₃ O ₄ : 1% Agregado contaminado	Úmida	28 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (10%)	42 dias
						Ciclos: 8h (imersão) x 16 h (secagem)	SO ₂ (2%)	270 dias
Hoppe Filho et al. (2015)	CP V-ARI	0,60	Fíler, SCA, SA, metacaulim e RCV	Ao ar + imersão	48 h + 12 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (10%)	42 dias
Pereira (2015)	CP II-F-32	0,60	Pirita:0, 1, 5 e 10% Agregado contaminado	Ao ar + imersão	48 h + 12 dias	Imersão	Na ₂ SO ₄ (10%) H ₂ O ₂ (5 e 10%)	42 dias
						Ciclos: 1 dia (imersão) x 6 dias (secagem)	H ₂ O ₂ (5%)	42 dias
						Envelhecimento natural (ataque interno)		360 dias

Tabela 3.6 - Pesquisas brasileiras: ensaios para avaliação da durabilidade frente ao ataque de sulfatos.

Referência	Material	Ensaio para avaliar o efeito do sulfato			
		Ensaio	Idade de exposição	Dimensão do corpo de prova	
Silva Filho (1994)	Argamassa	$f_{ct,f}$	14, 56 e 120 dias	10x10x60 mm	
		Expansão linear	7, 14, 28, 56 e 120 dias		
Moura (2000)	Concreto	f_{cj} , $f_{ct,f}$, Avaliação visual	120 dias	ø10x20 cm e 40x40x160 mm	
		Perda de massa e Avaliação visual	90 a 450 dias - mensalmente		
Gomides (2001)	Concreto	$f_{ct,f}$ e MEV	450 dias	40x40x160 mm	
		f_{cj}	21, 84 e 130 dias		ø15x30 cm
		Expansão linear	7 a 130 dias - semanalmente		
Centurione, Kihara e Battagin (2003)	Argamassa	MEV e DRX	130 dias	ø15x30 cm	
		Varição dimensional	7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias		
Costa (2004)	Concreto	Ultrassom, E_d , f_{cj} , PIM, Análise química, MEV	28, 90 e 180 dias	ø10x20 cm	
Linhares (2010)	Argamassa	Varição dimensional	7, 14, 21, 28, 56, 91 e 105 dias	25x25x285 mm	
Rheinheimer e Khoe (2013)	Argamassa	Varição dimensional	14, 28 e 42 dias	25x25x285 mm	
	Concreto	f_{cj} e MEV	Testemunhos	Ø73x108 cm	
Cesário e Silva (2014)	Concreto	f_{cj}	7, 28, 84, 139 e 182 dias	ø10x20 cm	
		MEV, DRX, pH	182 dias		
Bragança (2014)	Argamassa	Varição dimensional	14, 28 e 42 dias	25x25x285 mm	
		MEV, EDS	42 dias		
	Argamassa Armada	Voltametria cíclica, MEV, EDS, Porosimetria BET	≈ 300 dias	40x90x100 mm	
		EIS	28, 93, 205, 264 e 322 dias		
Concreto Armado	Voltametria cíclica, TG, DRX, MEV, EDS, FTIR, TG	≈ 300 dias	50x90x100 mm		
	EIS	28, 91, 170, 205 e 300 dias			
Hoppe Filho et al. (2015)	Argamassa	Varição dimensional	14, 28 e 42 dias	25x25x285 mm	
Pereira (2015)	Argamassa	Varição dimensional	7, 14, 21, 28, 35 e 42 dias	25x25x285 mm	
		PIM, DRX, FRX, MEV, EDS	42 dias		
	Concreto	f_{cj} , $f_{t,D}$, E_c , E_d , AAC, AI, IV, ME, DRX, FRX, MEV, EDS, Espectroscopia Raman, PIM	28, 120, 240 e 360 dias	ø10x20 cm	
		Permeabilidade		ø15x30 cm	

Tabela 3.7 - Pesquisas recentes sobre o ataque de sulfatos pelo mundo.

Autores	Título do trabalho	País
Ikumi et al. (2016)	Metodologia simplificada para avaliar o ataque externo de sulfatos em estruturas de concreto	Espanha
Campos, López e Aguado (2016)	Modelo de reação-difusão para o ataque interno de sulfato no concreto	Brasil/ Espanha
Song, Chen e Jiang (2016)	Um modelo de tensão interna expansiva do concreto sob ataque de sulfatos	China
Chen, Qian e Song (2016)	Um novo modelo químico-mecânico de dano em concretos sob ataque de sulfatos	China
Ustabaş e Erdoğan (2016)	Desempenho de argamassas incorporadas com cinzas volantes, fumos de sílica, escória de alto forno a diferentes temperaturas em solução de sulfato de magnésio	Turquia
Ghafoori, Batilov e Najimi (2016)	Resistência ao sulfato de argamassas contendo nanosílica e sílica ativa	EUA
Mostofinejad, Nosouhian, Nazari-Monfared (2016)	Influência da concentração do sulfato de magnésio na durabilidade do concreto contendo sílica ativa, escória e pó de calcário por meio de índices de durabilidade	Irã
Jiang e Niu (2016)	Estudo da deterioração do concreto exposto a diferentes soluções de sulfato em ciclos de secagem-molhagem	China
Atahan e Arslan (2016)	Maior durabilidade das argamassas de cimento expostas ao ataque de sulfato externo: o papel das nano & micro adições.	Turquia
Arel e Thomas (2017)	Os efeitos da adição de nano e micropartículas na durabilidade e nas propriedades mecânicas de argamassas expostas a ataques de sulfatos internos e externos	Turquia
Cefis e Comi (2017)	Modelagem químico-mecânica do ataque de sulfatos externos ao concreto	Itália
Tennich, Ouezdou e Kallel (2017)	Comportamento do concreto auto adensável feito com resíduos de mármore e azulejos exposto ao ataque externo de sulfatos	Tunísia/ Arábia Saudita
Wang et al. (2017)	Durabilidade do concreto contendo cinzas volante e sílica ativa contra gelo-degelo combinado com ataque de sulfatos	China/ Inglaterra
Massad et al. (2017)	A geometria e o tamanho dos agregados influenciam o mecanismo de ataque externo de sulfatos?	França
Bulatovic et al. (2017)	Avaliação da resistência ao sulfato de concretos com agregados reciclados e naturais	Sérvia
Zhutovsky e Hooton (2017)	Testes acelerados de materiais cimentícios para resistência ao ataque físico de sulfatos	Israel/ Canadá
Piasta (2017)	Análise do ataque de carbonatos e sulfatos nas estruturas de concreto	Polônia
Yu e Zhang (2018)	Modelagem numérica da deterioração mecânica de argamassas de cimento sob ataque externo de sulfatos	Austrália
Ma et al. (2018)	Expansão e degradação da pasta de cimento em solução de sulfato de sódio	Holanda/ China

Nota-se que as pesquisas realizadas atualmente têm estudado tanto o ataque por sulfatos de origem interna quanto externa, buscando avaliar o comportamento de argamassas e concretos com incorporação de outros materiais, como a cinza volante, sílica ativa, nanosílica, escória de alto-forno e resíduos de mármore e azulejos. Além disso, algumas pesquisas têm como objetivo o desenvolvimento de metodologias alternativas e modelagens numéricas para avaliar esses tipos de ataques.

Diante disso, acredita-se que são necessárias contribuições ao estudo do ataque de sulfatos aos materiais cimentícios, principalmente quando se faz uso de adições, que é o objetivo deste trabalho.

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A fim de atender aos objetivos propostos para o presente trabalho, o programa experimental analisa a influência da nanosílica e do seu efeito combinado com a sílica ativa nas características mecânicas e físicas das argamassas de cimento Portland, além de estudar sua durabilidade frente ao ataque de sulfatos, tanto de origem interna como de origem externa.

O organograma da Figura 4.1 descreve as quatro etapas do programa experimental e os ensaios realizados em cada etapa, sendo eles: caracterização dos materiais, ensaios em pasta no estado fresco, definição dos traços e ensaios em argamassa no estado endurecido.

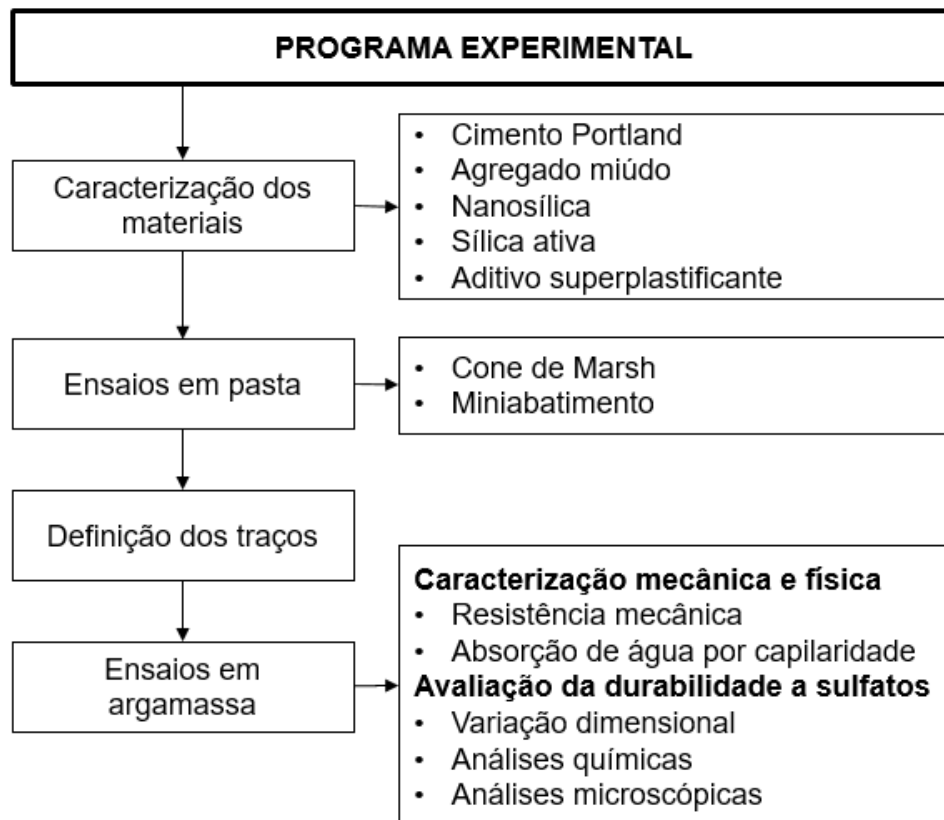


Figura 4.1 - Etapas do programa experimental.

A primeira etapa consistiu na caracterização física e química dos materiais utilizados nas misturas: cimento Portland, agregado miúdo, nanosílica, sílica ativa e aditivo superplastificante.

Na sequência, foram realizados ensaios em pasta no estado fresco para verificar a compatibilidade entre os materiais utilizados, especialmente entre os aglomerantes (cimento, nanosílica e sílica ativa) e o aditivo químico.

A terceira etapa consistiu na definição dos traços, mediante ensaios com argamassas no estado fresco, onde foram verificadas as consistências das misturas e a definição do teor de aditivo a ser utilizado em cada composição.

Após a definição dos traços, deu-se início à quarta etapa do programa experimental que avaliou as argamassas no estado endurecido, a qual foi dividida em duas fases. Na primeira fase, realizou-se a caracterização mecânica e física das argamassas, por meio de ensaios de resistência à compressão simples e de absorção de água por capilaridade. Diante dos resultados obtidos, foram selecionadas as argamassas com melhor desempenho para realização da segunda fase, que consistiu nos ensaios de durabilidade frente ao ataque de sulfatos de origem interna e externa.

As argamassas selecionadas foram divididas em dois grupos: o primeiro foi preparado com água pura, enquanto que para o segundo, a água utilizada nas misturas foi uma solução de 3% de sulfato de sódio (Na_2SO_4), caracterizando o ataque de origem interna. Após a moldagem, os corpos de prova foram novamente divididos em dois grupos e submetidos a tipos de cura diferentes, cura úmida e cura térmica, sendo esta uma variável importante para o estudo da formação da etringita tardia.

Na sequência, as argamassas que não tiveram sulfato incorporado à mistura (0%) foram imersas em duas soluções distintas, sendo uma solução de água e cal e outra de sulfato de sódio, caracterizando a referência e o ataque externo de sulfatos, respectivamente. O outro grupo, que teve 3% de sulfato incorporado, foi imerso apenas na solução de água com cal. Desse modo, o estudo dos ataques se dá de forma isolada e não pela superposição dos efeitos.

A Figura 4.2 resume, em forma de fluxograma, as diferentes condições de ensaio que foram atribuídas às argamassas e quais os tipos de ataque decorrentes dessas condições: ataque externo de sulfatos (ESA), ataque interno de sulfatos (ISA) e formação de etringita tardia decorrentes de altas temperaturas.

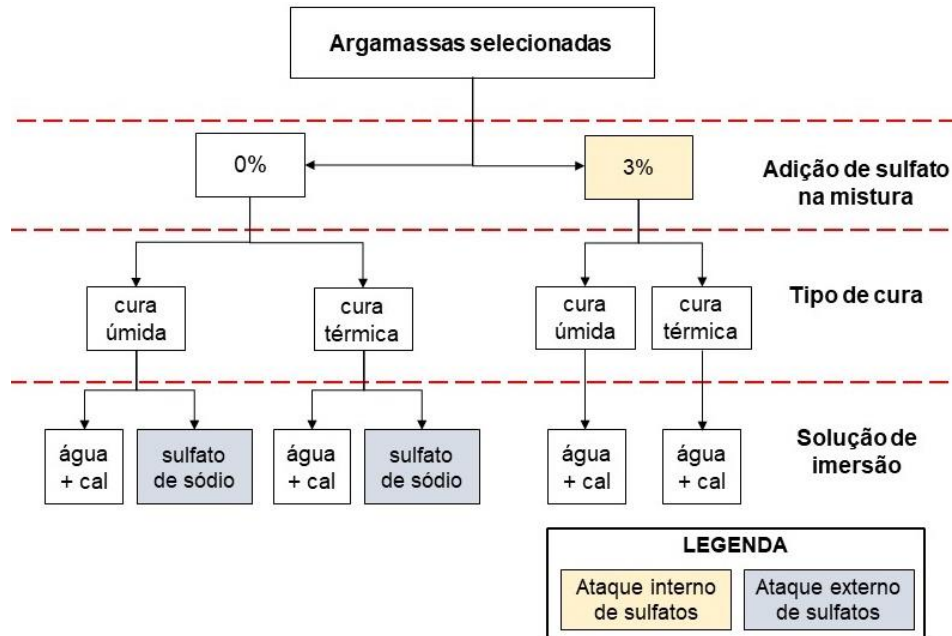


Figura 4.2 - Fluxograma dos ataques por sulfatos submetidos às argamassas.

Para o desenvolvimento de todo programa experimental contou-se com o apoio do grupo de pesquisa do Laboratório de Materiais e Componentes (LMC) da Universidade Federal de São Carlos, do Laboratório de Estruturas (LE) da Escola de Engenharia de São Carlos – USP e do Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, no âmbito do Programa *Novos Talentos*.

Definição das variáveis

Para avaliar a influência das adições, variou-se o teor de nanosílica adicionado nas misturas em 0%, 1%, 5% e 10% em relação à massa de aglomerante e o teor de sílica ativa em 0% e 10%. Além disso, foram definidas duas relações a/agl para a moldagem das argamassas: 0,40 e 0,50. O traço 1:3,20 (cimento:agregado miúdo) manteve-se fixo para todas as misturas e foi baseado na NBR 13583:2014 (ABNT, 2014).

Devido à combinação dos materiais e suas dosagens, foram estudados vários traços de pastas e argamassas. Para facilitar o entendimento ao longo do trabalho, estes foram codificados da seguinte forma mR-N-S, onde:

- m - Tipo de mistura - A = Argamassa / P = Pasta
- R - Relação a/agl - 4 = 0,40 / 5 = 0,50
- N - Nanosílica - Teor (%) de substituição de aglomerante (em massa)
- S - Sílica Ativa - Teor (%) de substituição de cimento (em volume)

Portanto, um traço com nomenclatura A4-1-10 trata-se de uma argamassa com relação a/agl igual a 0,40, teor de nanosílica de 1% e 10% de sílica ativa. Já os traços de referência são identificados como mR-REF.

4.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento do programa experimental, foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland, agregado miúdo, nanosílica, sílica ativa e aditivo superplastificante e água.

O cimento Portland utilizado foi o de alta resistência inicial CPV ARI e sua caracterização física e química foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção Civil no Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), com base nas exigências da NBR 5733:1991 (ABNT, 1991).

O agregado miúdo foi composto por areia fina e areia média, caracterizadas fisicamente quanto à massa específica, conforme NBR NM 52:2009 (ABNT, 2009); massa unitária seca e solta e massa unitária compactada, conforme NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006); absorção de água, conforme NBR NM 30:2001 (ABNT, 2001); material pulverulento, conforme NBR NM 46:2003 (ABNT, 2003) e impurezas orgânicas, conforme NBR NM 49:2001 (ABNT, 2001).

A distribuição granulométrica das areias foi realizada conforme especificações da NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003), de onde foi possível a determinação do módulo de finura e o diâmetro máximo característico do agregado.

A fim de se obter a máxima compacidade entre as areias, realizou-se a composição entre os agregados, seguindo o método proposto por Helene e Terzian (1992). Para cada composição indicada a amostra foi homogeneizada e teve sua massa unitária em estado compactado determinada, conforme NBR NM 45:2003 (ABNT, 2003).

As caracterizações físicas e químicas da nanosílica, sílica ativa e do aditivo superplastificante foram fornecidas pelos respectivos fabricantes.

A água utilizada no desenvolvimento do programa experimental foi proveniente da rede de abastecimento local, exceto para os ensaios de durabilidade frente ao ataque de sulfatos, onde utilizou-se água deionizada.

4.2 ENSAIOS EM PASTA

A compatibilidade entre o aditivo superplastificante (SP) e os aglomerantes utilizados na mistura (sílica ativa e nanosílica) foi estudada por meio dos ensaios em pasta: Cone de Marsh e miniabatimento.

4.2.1 CONE DE MARSH

A fim de verificar a compatibilidade entre o SP e os aglomerantes, realizou-se o ensaio do Cone de Marsh baseado na NBR 7681:2013 (ABNT, 2013), que avalia o comportamento das pastas no decorrer do tempo, quanto à sua fluidez.

Para a realização do ensaio foram necessários acessórios como funil metálico, proveta graduada e cronômetro, e seguindo o seguinte procedimento: após umedecimento do funil e com sua saída obstruída, despejou-se cerca de 1 litro da mistura no mesmo; liberou-se a saída e cronometrou-se o tempo necessário para que 500 ml da mistura escoassem para a proveta. Realizou-se a leitura no tempo de 10 minutos após o contato do cimento com a água (Figura 4.3).



Figura 4.3 - Ensaio do Cone de Marsh.

Por meio desse ensaio pode-se determinar o ponto de saturação do aditivo, ou seja, o teor ótimo para um escoamento adequado, a partir do qual seus efeitos não são mais significativos. Sendo assim, para cada pasta, variou-se o teor de aditivo SP (com incrementos de 0,1%) e com os valores de tempo obtidos (T) foi possível a plotagem das curvas de $\log(T)$ versus teor de aditivo.

A partir das curvas geradas encontrou-se o ponto de saturação que, de acordo com o método AFREM proposto por De Larrard et al. (1997), é aquele onde uma reta com inclinação de 2:5 tangencia a curva obtida, como ilustrado na Figura 4.4.

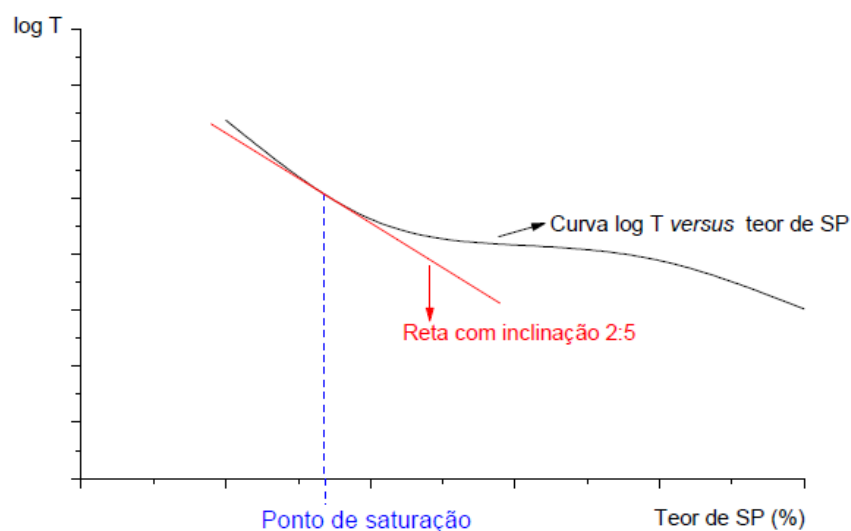


Figura 4.4 - Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante pelo Método AFREM (CASTRO, 2007).

Optou-se por realizar o ensaio de Cone de Marsh para os casos mais críticos, ou seja, aqueles que demandavam maior teor de SP. Portanto, foi utilizada a menor relação a/agl (0,40) e para as adições, utilizaram-se os máximos teores previstos para o desenvolvimento do programa experimental, além do traço de referência (0% de adições). Ressalta-se que quando utilizada, a sílica ativa foi previamente homogeneizada com o cimento.

Desse modo, foram ensaiadas três composições de pasta e para cada uma delas variou-se o aditivo SP em 4 teores:

- Cimento + aditivo SP (0,30 a 0,70%) + água (Referência);
- Cimento + 10% de nanosílica + aditivo SP (2,20 a 2,60%) + água;
- Cimento + 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa + aditivo SP (0,80 a 1,20%) + água.

Os materiais foram misturados seguindo o procedimento definido por Castro (2007) para pastas de CPV ARI:

- Umedeceu-se a cuba e adicionou-se o cimento, 50% do aditivo SP ou nanosílica e 90% da água;
- Ligou-se a argamassadeira, deixando bater por 1 minuto em velocidade baixa;
- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e o fundo por 1 minuto;
- Ligou-se a argamassadeira, deixando bater por 1 minuto em velocidade baixa;
- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e adicionar 50% do aditivo SP ou nanosílica e 10% da água, até completar mais 1 minuto;
- Ligou-se a argamassadeira, deixando bater por 30 segundos em velocidade baixa e aumentou-se para velocidade alta, deixando bater por 2 minutos e 30 segundos.

O tempo total de mistura foi de 7 minutos e as condições laboratoriais tanto para a mistura quanto para a realização do ensaio foram: temperatura de aproximadamente 25°C e umidade relativa em torno de 60%.

4.2.2 **MINIABATIMENTO**

Também conhecido como *Mini-Slump* ou ensaio de Kanro, o ensaio de miniabatimento foi realizado para determinar a consistência de pastas de cimento com SP. Foi utilizado um molde tronco-cônico sobre uma placa de vidro nivelada, o qual foi preenchido com a pasta de cimento e, após retirar o excesso de material (Figura 4.5a), o molde foi levantado suave e verticalmente, permitindo que a mistura se espalhasse sobre a placa. Após o espalhamento, foram determinados dois diâmetros perpendiculares com auxílio de um paquímetro, a partir dos quais pode-se obter o diâmetro médio e área de espalhamento correspondente (Figura 4.5b). A manutenção do abatimento foi verificada após 10, 30, 40 e 60 minutos do contato do cimento com a água.

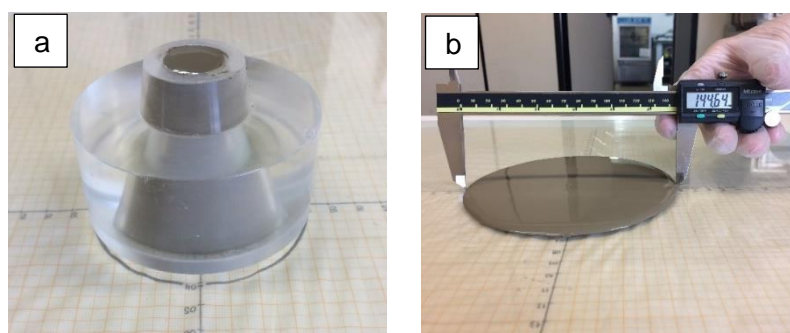


Figura 4.5 - Ensaio de miniabatimento: a) molde preenchido com a pasta e b) medição do diâmetro após espalhamento.

O ensaio de miniabatimento foi realizado para as mesmas composições de pastas definidas para o ensaio do Cone de Marsh, citadas no item 4.2.1. Entretanto, para cada composição, utilizou-se apenas o respectivo teor ótimo de SP.

O procedimento de mistura e as condições laboratoriais durante os ensaios foram os mesmos descritos para o ensaio do Cone de Marsh.

4.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS E MOLDAGEM DAS ARGAMASSAS

Para a definição dos traços das argamassas, estabeleceu-se:

- Traço 1:3,20 (cimento:agregado miúdo);
- Relação a/agl igual a 0,40 e 0,50;
- Nanosílica, teores de 0%, 1%, 5% e 10% de substituição aos aglomerantes. A substituição foi feita em massa seguindo a recomendação do fabricante;
- Sílica ativa, teores de 0% e 10% de substituição volumétrica ao cimento, previamente homogeneizada com o cimento.

O teor de SP utilizado em cada mistura foi definido mediante a verificação da consistência das argamassas, conforme NBR 13276:2016 (ABNT, 2016), sendo adotada uma consistência de (230 ± 10) mm.

Os materiais foram misturados de acordo com o seguinte procedimento:

- Umedeceu-se a cuba e adicionou-se as areias, ligou-se a argamassadeira deixando homogeneizar por 1 minuto;
- Adicionou-se 90% da água, deixando bater por 1 minuto;
- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos;
- Ligou-se novamente e adicionou-se o cimento e a sílica ativa, previamente homogeneizados, deixando bater por 1 minuto;
- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos;
- Ligou-se novamente e adicionou-se o SP e 10% da água, deixando bater por 1 minuto;
- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos;
- Ligou-se novamente, deixando bater por 2 minutos;
- Adicionou-se lentamente a nanosílica, deixando bater por 2 minutos;

- Desligou-se a argamassadeira para raspar as laterais e o fundo por 30 segundos;
- Ligou-se novamente, deixando bater por 1 minuto.

O tempo total de mistura foi de 11 minutos e as condições laboratoriais foram: temperatura de aproximadamente 25°C e umidade relativa em torno de 60%. Após a mistura, foram moldados corpos de prova cilíndricos e prismáticos, variando de acordo com o ensaio a ser realizado no estado endurecido, como mostra a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaio realizados e dimensões dos corpos de prova.

Ensaio	Dimensão do CP	
	Cilíndrico	Prismático
Resistência à compressão	φ 50 x 100 mm	-
Absorção de água por capilaridade	φ 50 x 100 mm	-
Varição dimensional	-	25 x 25 x 285 mm
Análises microscópicas	-	25 x 25 x 285 mm

Os corpos de prova cilíndricos foram moldados conforme NBR 7215:1996 (ABNT, 1996) e permaneceram em ambiente de laboratório por 24 horas, com umidade relativa em torno de 60% e temperatura aproximada de 25°C. Em seguida foram desmoldados e levados à cura úmida, onde permaneceram até as idades previstas nos ensaios, detalhados nos itens 4.4.1 e 4.4.1.2.

Para os corpos de prova prismáticos, seguiu-se as especificações da NBR 13583:2014 (ABNT, 2014) quanto à moldagem, desmoldagem e processos de cura, onde permaneceram até as idades previstas nos ensaios, detalhados no item 4.4.2.

4.4 ENSAIOS EM ARGAMASSA

Os ensaios com argamassas no estado endurecido têm como finalidade caracterizá-las quanto à suas características mecânicas e físicas, além de avaliar sua durabilidade frente ao ataque de sulfatos de origem interna e externa.

4.4.1 CARACTERIZAÇÃO MECÂNICA E FÍSICA

4.4.1.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

A caracterização mecânica das argamassas foi feita por meio do ensaio de resistência à compressão axial, segundo NBR 5739:2007 (ABNT, 2007), nas idades de 1, 7 e 28 dias (Figura 4.6). Para cada idade foram moldados três corpos de prova cilíndricos, que permaneceram em cura úmida até as idades de ruptura. Antes da realização do ensaio os corpos de prova foram retificados para garantir que a carga aplicada fosse uniformemente distribuída.



Figura 4.6 - Ensaio de resistência à compressão simples.

4.4.1.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Considerando que a absorção de água é um dos parâmetros utilizados para avaliação indireta da durabilidade do material, realizou-se o ensaio de absorção de água por capilaridade nas argamassas aos 7 e 28 dias, conforme especificações da NBR 9779:2012 (ABNT, 2012).

Para isso, foram moldados três corpos de prova cilíndricos para cada idade. Ao atingir a idade especificada, os corpos de prova foram retirados da câmara úmida e levados à estufa para secagem à temperatura de $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ até obterem massa constante e, então, a massa seca foi determinada à temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Na sequência, os corpos de prova foram posicionados em recipientes com água, sobre suportes metálicos, de modo que a água não ultrapassasse o limite de 5 mm acima da sua face inferior, evitando o contato com outras superfícies (Figura 4.7).

Os corpos de prova permaneceram em contato com a água durante 72 horas e a temperatura do ambiente foi mantida em (23 ± 2) °C durante todo o período do ensaio. Foram realizadas pesagens para determinação da massa saturada das argamassas após 3h, 6h, 24h, 48h e 72h do início do ensaio. Após a última pesagem, os corpos de prova foram rompidos no ensaio de tração por compressão diametral, apenas para que fosse possível realizar a leitura da ascensão capilar máxima, a qual se deu com auxílio de um paquímetro.

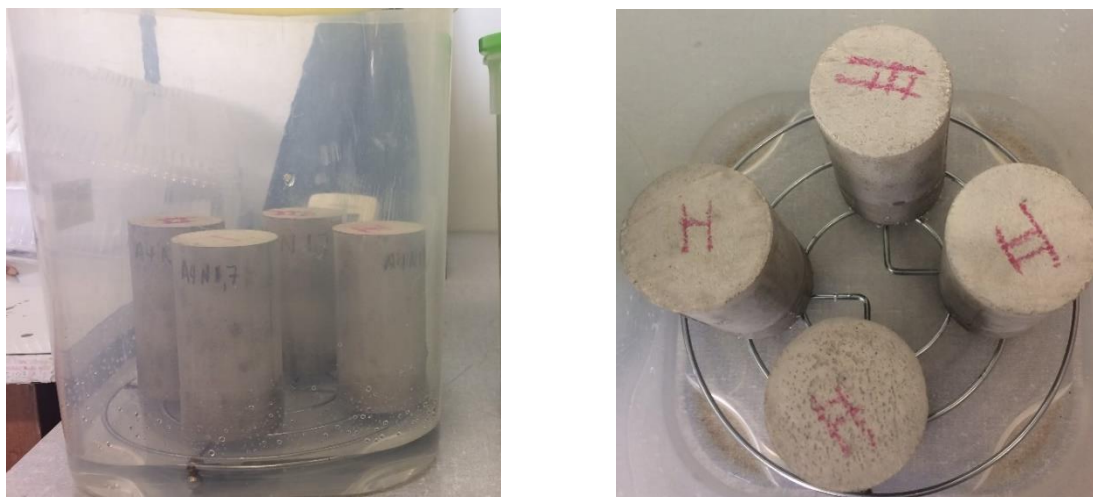


Figura 4.7 - Ensaio de absorção de água por capilaridade.

Os índices de absorção de água por capilaridade podem ser calculados a partir da diferença entre a massa saturada determinada em cada pesagem e a massa seca do corpo de prova determinada no início do ensaio, dividida pela área da seção transversal do corpo de prova.

4.4.2 DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE SULFATOS

Para o estudo da durabilidade frente ao ataque de sulfatos de origem interna e externa, foram realizados ensaios de variação dimensional, análises químicas quantitativas do teor de sulfatos presentes nas misturas e análises microscópicas das argamassas após o ataque.

4.4.2.1 VARIAÇÃO DIMENSIONAL

As reações químicas dos íons sulfato com os produtos de hidratação do cimento se manifestam, entre outros mecanismos, na forma de expansão seguida de fissuração. Diante disso, a NBR 13583:2014 (ABNT, 2014) especifica o ensaio de variação dimensional com barras de argamassa para avaliação da durabilidade do material frente a esse tipo de ataque.

O ensaio consiste em submeter as barras de argamassa ao agente agressivo durante um determinado período e realizar leituras do seu comprimento ao longo do tempo com auxílio

de um relógio comparador de comprimento, o qual foi ajustado por meio de uma barra-padrão antes e depois da leitura de cada grupo de corpos de prova (Figura 4.8a).

Antes de se iniciarem os ataques, foram realizadas as leituras iniciais (L_i) do comprimento de cada barra. Na sequência, as argamassas foram submetidas ao ataque de sulfatos durante 91 dias e as leituras dos comprimentos foram realizadas nas idades de 14, 28, 42 e 91 dias, contadas a partir do instante em que se iniciaram as condições de exposição à solução agressiva (Figura 4.8b).

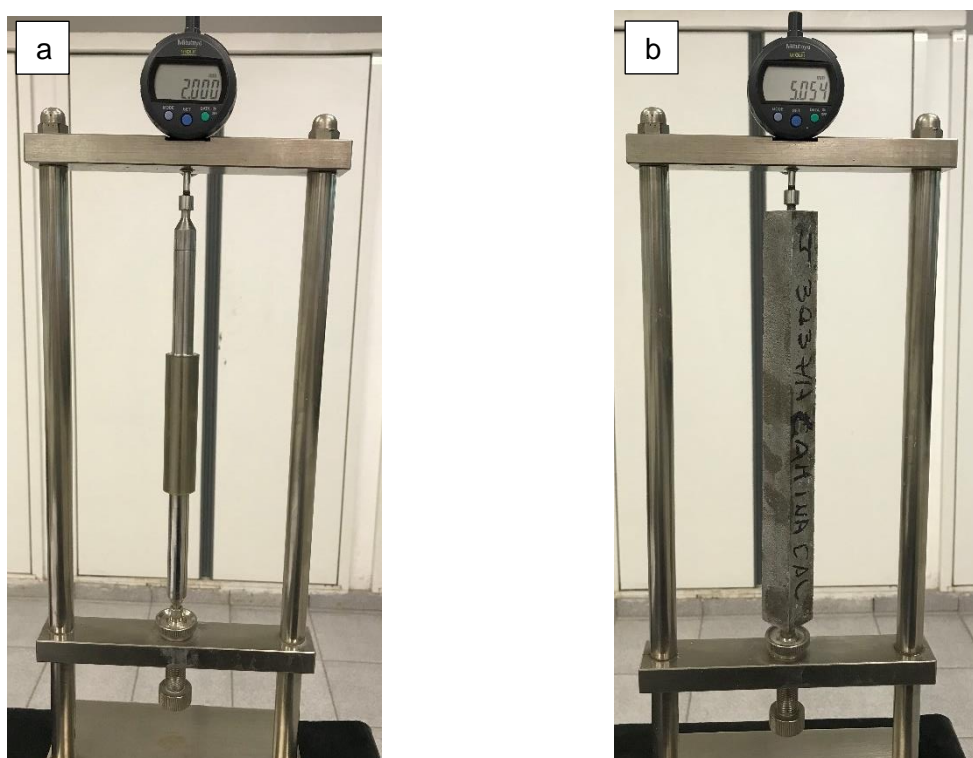


Figura 4.8 – Relógio comparador de comprimento: a) ajuste com barra-padrão e b) leitura do comprimento do corpo de prova.

Como já citado, o presente trabalho abrange o ataque por sulfatos tanto de origem externa, quando os íons agressivos estão presentes no meio, quanto de origem interna, quando os materiais utilizados na mistura contêm sulfatos. Além disso, foram investigadas também as reações sulfáticas internas decorrentes das altas temperaturas, como as que podem ocorrer nos processos de cura térmica (acima de 70°C).

4.4.2.1.1 Ataque por sulfatos de origem externa

Para o ataque por sulfatos de origem externa foram moldados 16 corpos de prova prismáticos para cada traço e, então, submetidos ao procedimento descrito na NBR

13583:2014 (ABNT, 2014), o qual compreende 3 estágios de cura: I – cura inicial, II – cura intermediária e III – cura final.

Os corpos de prova foram divididos em dois grupos de 8 corpos de prova e cada grupo teve um tipo de cura inicial distinto: cura úmida (Estágio I.u) e cura térmica (Estágio I.t), conforme o esquema ilustrado na **Figura 4.9**.

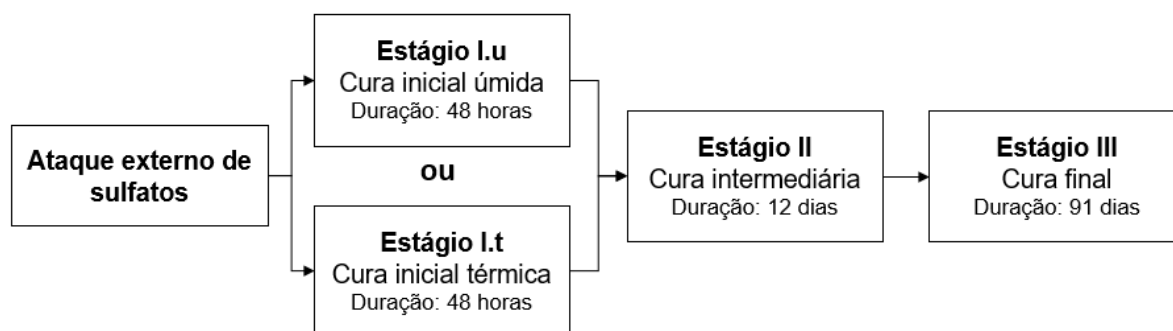


Figura 4.9 - Procedimento de cura para ataque externo de sulfatos.

Os 3 estágios de cura a que foram submetidas as barras de argamassa são:

Estágio I.u – Cura inicial úmida: ainda nos moldes, 8 corpos de prova foram levados à câmara úmida com a face superior protegida de respingos, onde permaneceram por 48 h (Figura 4.10a). Após esse período, os corpos de prova foram desmoldados e iniciou-se o estágio II.

Estágio I.t – Cura inicial térmica: ainda nos moldes, 8 corpos de prova foram submetidos à (Figuras 4.10b e 4.10c):

- i. Pré-cura em câmara úmida à 25°C, por 4 horas a partir da hora da moldagem;
- ii. Aquecimento em banho térmico em solução de água saturada com cal, a uma taxa de 25°C/h até atingir 85°C;
- iii. Cura térmica à 85°C durante 4 horas;
- iv. Resfriamento a uma taxa de -25°C/h até atingir 25°C;
- v. Repouso em imersão à 25°C, até completarem 24h de moldagem.

Findado o processo, os corpos de prova foram desmoldados e levados à câmara úmida por mais 24 horas, até o início do estágio II.

Estágio II – Cura intermediária: após desmoldados, os dois grupos de corpos de prova foram imersos em recipientes contendo água saturada com cal, onde permaneceram por 12 dias à temperatura de (23 ± 2) °C (Figuras 4.10d e 4.10e).

Estágio III – Cura final: cada grupo de 8 corpos de prova foi subdividido em dois grupos de 4 corpos de prova e acondicionados em dois recipientes diferentes: um contendo água saturada com cal, caracterizando as amostras de referência; outro contendo uma solução agressiva de sulfato de sódio (Na_2SO_4) com concentração de 10%, preparada conforme especificações da NBR 13583:2014 (ABNT, 2014), caracterizando o ataque externo de sulfatos. Ambos os recipientes foram mantidos em estufa sob regime de temperatura constante de $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ ao longo de todo o período determinado para o ensaio (Figura 4.10f).



Figura 4.10 - Estágios de cura realizados no ataque externo de sulfatos: a) cura inicial úmida; b) cura inicial térmica - posicionamento dos moldes no banho térmico; c) cura inicial térmica a 85°C ; d) barras de argamassa posicionadas nos recipientes contendo solução de água saturada com cal; e) cura intermediária; f) cura final em estufa.

4.4.2.1.2 Ataque por sulfatos de origem interna

O ataque por sulfatos de origem interna diferencia-se do de origem externa ainda durante as moldagens, uma vez que foi utilizada uma solução de 3% de sulfato de sódio como água de amassamento nas misturas, o que resulta em 2% de íons sulfatos presentes na solução, ou seja, 20 g/l. Como já citado, a NBR 15900:2009 (ABNT, 2009) estabelece que o teor de sulfato na água, expresso em SO_4^{2-} , não deve exceder 2 g/l. Optou-se por extrapolar este teor para maximizar os possíveis efeitos deletérios e facilitar o entendimento dos mecanismos deste tipo de ataque.

Foram moldados 8 corpos de prova prismáticos para cada traço, os quais foram divididos em dois grupos de 4 corpos de prova e cada grupo teve um tipo de cura inicial distinto (cura úmida ou cura térmica), seguido pela cura intermediária idêntica para ambos os grupos, conforme descrito no item 4.4.2.1.1.

Como não se objetivava o estudo dos ataques interno e externo ocorrendo simultaneamente, o *Estágio III - cura final*, descrito anteriormente, foi adaptado e denominado de *Estágio III.int.*, que é definido como:

Estágio III.int. – Cura final: cada grupo de 4 corpos de prova foi acondicionado em um recipiente contendo água saturada com cal, mantidos em estufa sob regime de temperatura constante de $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$ ao longo de todo o período determinado para o ensaio.

A Figura 4.11 ilustra a sequência dos procedimentos de cura para o ataque interno de sulfatos.

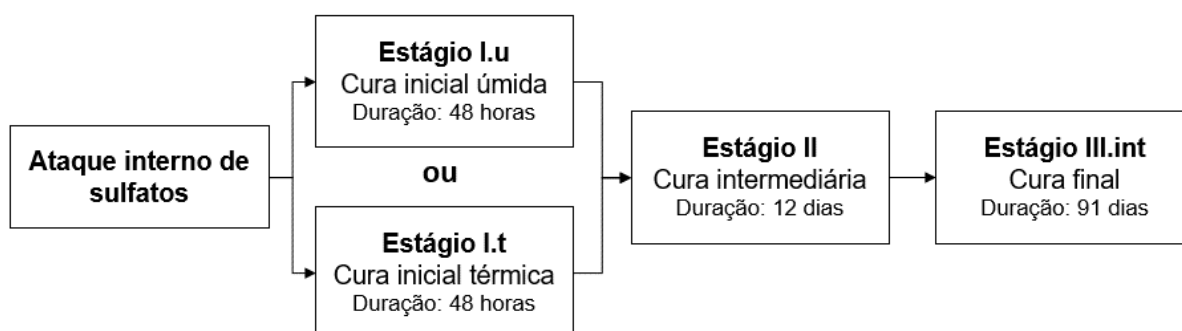


Figura 4.11 - Procedimento de cura para ataque interno de sulfatos.

4.4.2.2 ANÁLISES MICROSCÓPICAS

Com base nos resultados obtidos no ensaio de variação dimensional após 91 dias de ataque, as argamassas foram selecionadas para serem analisadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), com o objetivo de avaliar a formação dos produtos expansivos decorrentes das reações químicas entre os sulfatos e os produtos de hidratação do cimento.

Em alguns casos foram realizadas análises por espectroscopia de energia dispersiva (EDS), para confirmação das composições químicas dos produtos observados. As amostras foram preparadas e fixadas sobre suportes metálicos (*stubs*) com fitas de carbono (Figura 4.12a). Em seguida foram submetidas à vácuo e recobertas por deposição de íons metálicos de ouro, a fim de torná-las condutoras, condição necessária para a interação entre o feixe eletrônico do equipamento e as amostras (Figura 4.12b).

O equipamento utilizado foi o FEI FEG-QUANTA 400F (Figura 4.12c) e as análises foram feitas por detectores de elétrons secundários (ETD) e detectores de elétrons retroespalhados (BSED).

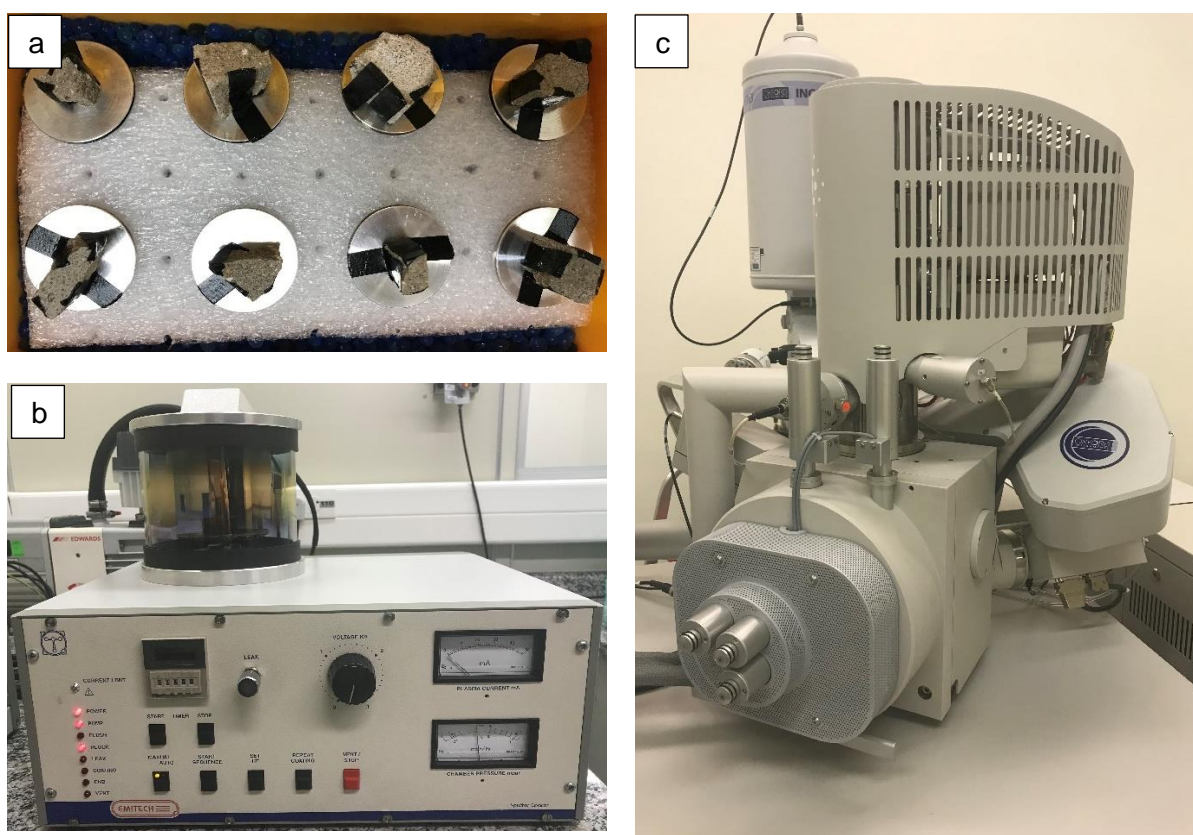


Figura 4.12 - Análises microscópicas: a) amostras fixadas sobre os *stubs*; b) equipamento para aplicação de vácuo e recobrimento das amostras e c) microscópio eletrônico de varredura FEI FEG-QUANTA 400F.

4.4.2.3 ANÁLISES QUÍMICAS

Como complementação dos ensaios, além das análises microscópicas, foram realizadas análises químicas das amostras selecionadas, a fim de quantificar o ingresso dos íons sulfatos provenientes do meio externo para o interior dos corpos de prova. As análises foram feitas com base no Método IPT de reconstituição de traço de argamassa (QUARCIONI,

1998). Foram obtidos valores de perda ao fogo, resíduo insolúvel e SO_3 , além do cálculo do percentual de SO_3 em relação ao ligante.

Vale ressaltar que devido às dimensões reduzidas da seção transversal dos corpos de prova (25 x 25 mm) não foi possível quantificar o SO_3 para diferentes profundidades de penetração. Assim, as amostras foram obtidas da moagem de toda a seção dos corpos de prova (Figura 4.13).

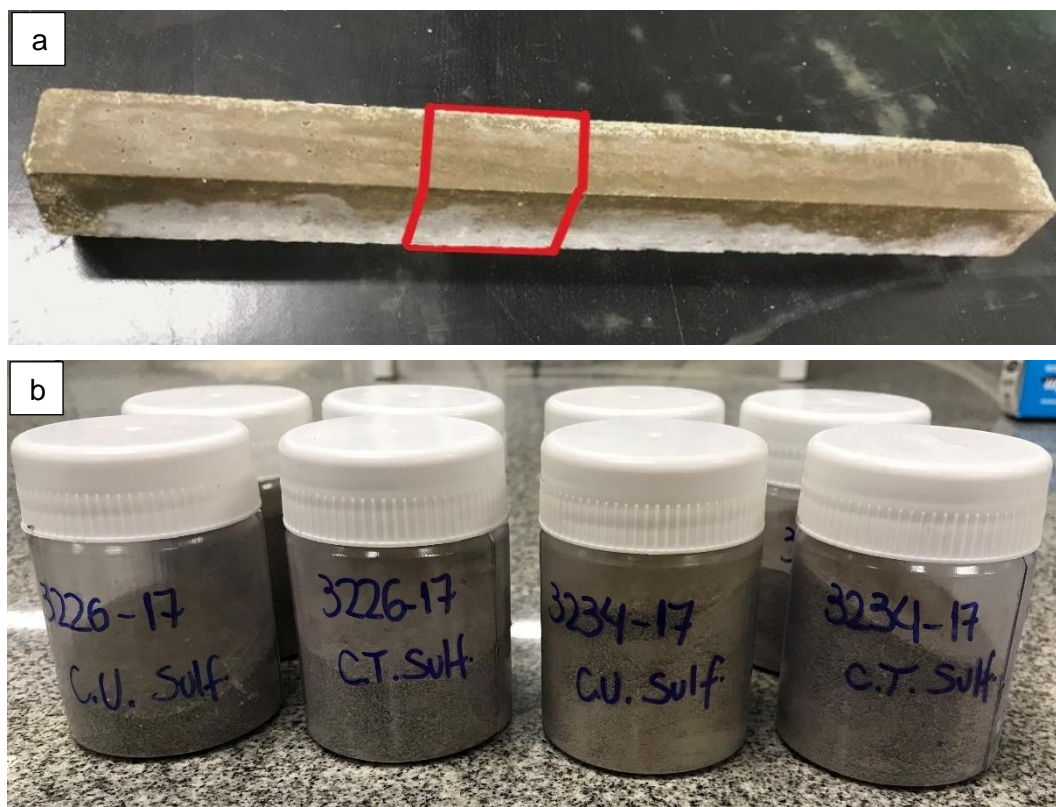


Figura 4.13 - Amostras para análises químicas: a) seção do corpo de prova de argamassa preparada para análises químicas e b) amostras moídas.

4.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dos ensaios de caracterização mecânica e física das argamassas foram tratados estatisticamente por meio de Análise da Variância (ANOVA) e posteriormente submetidos ao teste de Tukey.

A Análise da Variância é um método que compara três ou mais variáveis independentes (amostras) e permite determinar se há diferenças significativas entre essas amostras, do ponto de vista estatístico. Resumidamente, a ANOVA consiste em testar duas hipóteses, a hipótese nula H_0 , que afirma se as médias entre as populações são idênticas, e a hipótese alternativa H_1 , que afirma que há diferença significativa entre elas.

A decisão de aceitar ou não H_0 é baseada na comparação entre os valores de $F_{\text{calculado}}$ e $F_{\text{crítico}}$ (tabelado). Se $F_{\text{calculado}} < F_{\text{crítico}}$, aceita-se H_0 e assume-se que não há diferenças significativas entre as médias das amostras. Se $F_{\text{calculado}} > F_{\text{crítico}}$, rejeita-se H_0 e assume-se que existem diferenças significativas em pelo menos um par de médias das populações. Outra forma de testar H_0 é comparando o p-valor com o α (nível de significância adotado no início da análise). Se o p-valor $< \alpha$, rejeita-se H_0 e assume-se que as médias entre as populações possuem diferenças significativas.

Após concluir se existem ou não diferenças significativas, realizou-se o teste de Tukey apenas para os casos onde H_0 foi rejeitado. Este teste consiste em testar as médias amostrais duas a duas e verificar entre quais populações existem essas diferenças.

Ambas as análises foram realizadas com auxílio do software OriginLab com nível de significância $\alpha = 5\%$.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos dos ensaios realizados: caracterização dos materiais; ensaios em pasta no estado fresco; definição dos traços de argamassa e ensaios com argamassas, compreendendo a caracterização física e química e avaliação da sua durabilidade frente ao ataque de sulfatos de origem interna e externa.

5.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

5.1.1 CIMENTO

O cimento utilizado nesse programa experimental foi o CPV ARI, fabricado pela Holcim do Brasil S.A. As caracterizações física e química estão apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2 e certificam que o material está em conformidade com o especificado pela NBR 5733:1991 (ABNT, 1991).

Tabela 5.1 - Propriedades físicas do CPV ARI.

Características e Propriedades		Valores obtidos	Limites NBR 5733:1991
Massa específica		3,12 g/cm ³	*
Início de pega		135 min	> 120 min
Fim de pega		210 min	< 600 min
Água para pasta de consistência normal		31,5 %	*
Finura	Retido 75µm (#200)	0,1 %	< 6,0 %
	Área Específica ¹	473 m ² /kg	> 300 m ² /kg
Resistência à compressão (f _{cj})	1 dia	27,5 MPa	> 14,0 MPa
	3 dias	42,0 MPa	> 24,0 MPa
	7 dias	48,7 MPa	> 34,0 MPa
	28 dias	52,2 MPa	*

¹ Determinada a partir do método de Blaine.

* Valores limites não especificados pela NBR 5733:1991 (ABNT, 1991).

Tabela 5.2 - Propriedades químicas do CPV ARI.

Componentes	Valores obtidos (% em massa)	Limites NBR 5733:1991 (% em massa)
Perda ao fogo (PF)	3,79	< 4,5 %
Anidrido silícico (SiO ₂)	19,17	*
Óxido de cálcio (CaO)	63,97	*
Óxido de magnésio (MgO)	0,61	< 6,5 %
Óxido férrico (Fe ₂ O ₃)	3,21	*
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	5,03	*
Anidrido sulfúrico (SO ₃)	2,84	< 3,5 %
Óxido de sódio (Na ₂ O)	0,06	*
Óxido de potássio (K ₂ O)	0,61	*
Equivalente alcalino (em Na ₂ O)	0,46 ¹	*
Óxido de cálcio livre (CaO)	1,76	*
Resíduo insolúvel (RI)	0,85	< 1,0 %
Anidrido carbônico (CO ₂)	2,38	< 3,0 %

¹ A NBR 15577:2008 (ABNT, 2008) limita o teor de Equivalente Alcalino (em Na₂O) em 0,6%.

* Valores limites não especificados pela NBR 5733:1991 (ABNT, 1991).

5.1.2 AGREGADO MIÚDO

O agregado miúdo utilizado foi composto por dois tipos de areia, areia fina e areia média, ambas comercializadas na cidade de São Carlos – SP e caracterizadas fisicamente conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Características físicas dos agregados miúdos.

Características	Areia Fina	Areia Média
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,60
Massa unitária seca e solta (kg/m ³)	1504,86	1623,42
Massa unitária compactada (kg/m ³)	1704,34	1682,02
Absorção de água (%)	0,34	0,46
Material pulverulento (%)	1,33	0,35
Impurezas orgânicas	Solução mais clara que a padrão	Solução mais clara que a padrão

O ensaio para determinação da distribuição granulométrica foi realizado conforme a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003). Após o peneiramento com agitador mecânico, obteve-se o

resultado a partir da média de duas amostras, conforme apresentado na Tabela 5.4 e as curvas de distribuição granulométrica estão ilustradas na Figura 5.1.

Tabela 5.4 - Distribuição granulométrica da areia fina.

Peneira (mm)	Areia Fina		Areia Média	
	% Retida	% Acumulada	% Retida	% Acumulada
6,3	0,00	0,00	0,00	0,00
4,8	0,00	0,00	0,00	0,00
2,4	0,10	0,10	2,01	2,01
1,2	0,34	0,44	10,26	12,27
0,6	0,40	0,84	22,95	35,22
0,3	39,76	40,60	31,25	66,47
0,15	50,02	90,62	28,35	94,82
Fundo	9,38	100,00	5,18	100,00

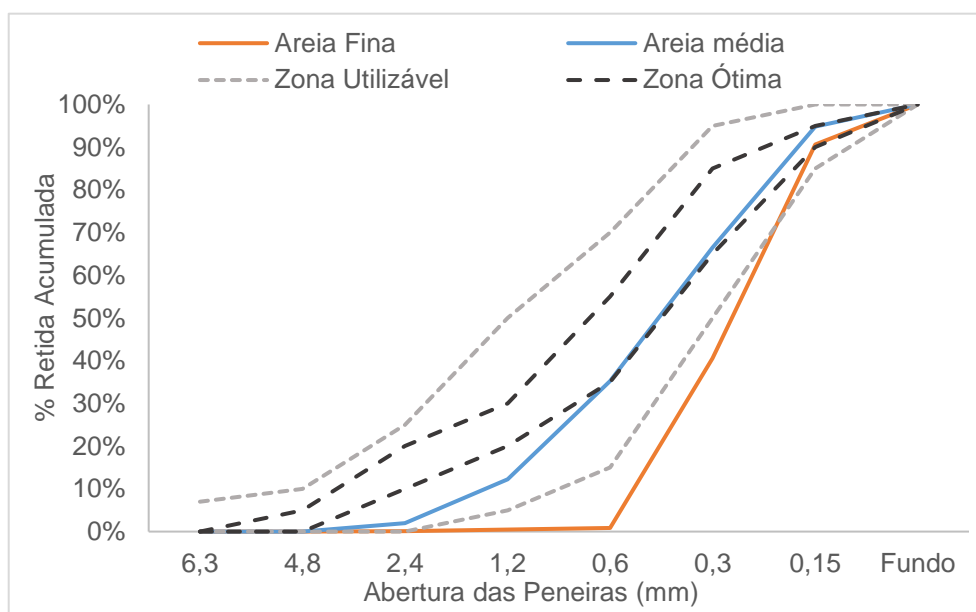


Figura 5.1- Curva de distribuição granulométrica da areia fina e da areia média.

O módulo de finura e o diâmetro máximo característico das areias foram determinados conforme NBR NM 248:2003 (2003) e os valores obtidos foram: 1,32 e 0,6 mm, respectivamente, para a areia fina, e 2,11 e 2,4 mm, respectivamente, para a areia média.

A composição ideal entre as duas areias foi determinada mediante o ensaio de massa unitária em estado compactado. A Tabela 5.5 apresenta os resultados e nota-se que a composição ideal é de 50% de areia média e 50% de areia fina, cuja massa unitária é máxima e, conseqüentemente, possui menor índice de vazios.

Tabela 5.5 - Determinação da composição ideal entre areia fina e areia média.

Composição AM /AF (%)	Quantidade de AM (kg)	Quantidade de AF (kg)	Acréscimo de AF (kg)	Massa de agregado (kg)	M.U. Compactada (kg/dm ³)
100/0	10,00	-	-	4,88	1,623
90/10	10,00	1,11	1,11	4,96	1,655
80/20	10,00	2,50	1,39	5,02	1,674
70/30	10,00	4,29	1,79	5,05	1,684
60/40	10,00	6,67	2,38	5,08	1,693
50/50	10,00	10,00	3,33	5,08	1,694
40/60	10,00	15,00	5,00	5,07	1,692

Obs.: Volume do recipiente utilizado para realização do ensaio = 3 dm³

Diante disso, foi gerada uma nova curva de distribuição granulométrica e constatou-se que a composição está dentro da zona utilizável estipulada pela NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) (Figura 5.2), apresentando módulo de finura e diâmetro máximo de agregado iguais à 1,82 e 2,4 mm, respectivamente.

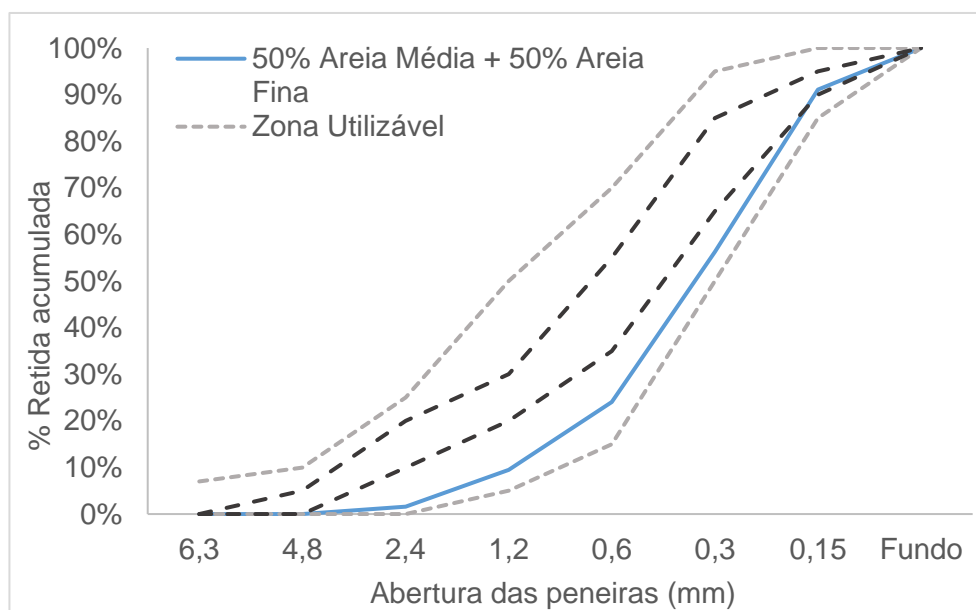


Figura 5.2 - Curva de distribuição granulométrica da composição: 50% de areia média e 50% de areia fina.

5.1.3 NANOSÍLICA

A nanosílica utilizada no presente trabalho é uma solução aquosa de sílica coloidal, comercializada pela AkzoNobel com o nome de Levasil CB8. As principais características

físicas e químicas estão relacionadas na Tabela 5.6 e a ficha técnica do fabricante está apresentada no Anexo A.

Tabela 5.6 - Caracterização da nanosílica.

Produto	Levasil CB8
Aspecto	Líquido branco
Massa específica (g/cm ³)	1,4
Sílica (%)	50
pH	9,5
Viscosidade (v)	8

Fonte: AkzoNobel.

O teor máximo recomendado pelo fabricante é de 10% em relação ao total de aglomerantes. Deve-se considerar nos cálculos apenas a porcentagem de sílica presente no produto, ou seja, para cada 10 g de Levasil CB8 adicionado à mistura, tem-se 5 g de sílica atuando na mistura, sendo os outros 5 g de água.

Durante as dosagens, foram feitas as devidas correções nos traços, descontando a massa de sílica da massa total de aglomerante (cimento e sílica ativa), bem como a massa de água da quantidade de água de amassamento.

5.1.4 SÍLICA ATIVA

A sílica ativa utilizada nas misturas é fabricada pela Dow Corning Silício do Brasil, cujas características físicas e químicas estão relacionadas na Tabela 5.7. O certificado de análise fornecido pelo fabricante está apresentado no Anexo B.

Tabela 5.7 - Características físicas e químicas da sílica ativa.

Características físicas		Características químicas	
Densidade (g/cm ³)	2,10	Equivalente alcalino em Na ₂ O (%)	0,7
		Perda ao fogo (%)	3,7
pH	7,9	SiO ₂ (%)	93,0
		Na ₂ O (%)	0,2
Umidade (%)	0,1	Fe ₂ O ₃ (%)	0,5
		CaO (%)	0,5
Retido 45 mm (# 325) (%)	3,7	MgO (%)	0,4
		Al ₂ O ₃ (%)	0,2
		K ₂ O	0,9

Fonte: Dow Corning Silício do Brasil.

5.1.5 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Foi utilizado o aditivo superplastificante MasterGlenium® Sky 150, à base de éter policarboxílico modificado, com especificações conforme Tabela 5.8. A ficha técnica do fabricante está apresentada no Anexo C.

Tabela 5.8 - Caracterização do aditivo superplastificante.

Produto	MasterGlenium® Sky 150
Aspecto	Líquido branco turvo
pH	7,5 – 9,5
Densidade (g/cm ³)	1,055 – 1,085
Sólidos (%)	28,0 – 31,0

Fonte: BASF S.A.

A dosagem recomendada pelo fabricante varia entre 0,2 e 1,2% em relação à massa de aglomerante.

5.2 ENSAIOS EM PASTA

5.2.1 CONE DE MARSH

Como já citado, o ensaio de Cone de Marsh foi realizado apenas para os casos que demandavam maior teor de SP. Portanto, todas as pastas tinham relação a/agl igual a 0,40 e foram ensaiadas três composições (referência, com 10% de nanosílica e com 1% de nanosílica + 10% de sílica ativa) e para cada uma delas foram analisados 4 teores de aditivos. As proporções dos materiais utilizados nas pastas estão apresentadas na Tabela 5.9.

Os cálculos dos materiais foram feitos da seguinte forma:

- Sílica ativa: teor (%) em substituição volumétrica ao cimento;
- Nanosílica: teor (%) em relação ao composto cimento + sílica ativa, substituindo a massa de cimento.
- Aditivo SP: teor (%) em relação à massa total dos aglomerantes (cimento + sílica ativa + nanosílica);
- Água: conforme a relação a/agl, porém com o devido desconto da massa de água proveniente da nanosílica (solução de sílica coloidal). Vale ressaltar que a massa de água contida no material é igual à massa de nanosílica, uma vez que a solução tem 50% de sílica, conforme ficha técnica do fabricante.

Tabela 5.9 - Composição dos traços das pastas.

Pastas	Materiais (g)				
	Cimento	Sílica ativa	Nanosílica	SP (%)*	Água
P4-REF	1000,0	-	-	0,3	400,0
	1000,0	-	-	0,4	400,0
	1000,0	-	-	0,5	400,0
	1000,0	-	-	0,6	400,0
	1000,0	-	-	0,7	400,0
P4-10-0	900,0	-	100,0	2,2	300,0
	900,0	-	100,0	2,3	300,0
	900,0	-	100,0	2,4	300,0
	900,0	-	100,0	2,5	300,0
	900,0	-	100,0	2,6	300,0
P4-1-10	890,3	67,3	9,7	0,8	377,2
	890,3	67,3	9,7	0,9	377,2
	890,3	67,3	9,7	1,0	377,2
	890,3	67,3	9,7	1,1	377,2
	890,3	67,3	9,7	1,2	377,2

* em relação à massa de aglomerante.

Os tempos (T), em segundos, e os valores de Log (T) obtidos do ensaio aos 10 minutos após o contato da água com o cimento estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 - Resultados do ensaio do Cone de Marsh para as pastas de CPV ARI.

Pasta	P4-REF				
Teor de SP (%)	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
T(s)	20,56	15,56	13,97	12,81	13,65
Log (T)	1,313	1,192	1,145	1,108	1,135
Pasta	P4-10-0				
Teor de SP (%)	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6
T(s)	25,69	16,59	16,50	14,44	14,00
Log (T)	1,410	1,220	1,176	1,160	1,143
Pasta	P4-1-10				
Teor de SP (%)	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
T(s)	22,63	21,22	19,12	18,03	18,57
Log (T)	1,355	1,327	1,281	1,256	1,269

As curvas de $\log(T)$ versus teor de SP para todas as misturas, para o tempo de 10 minutos após o contato do cimento com água, estão ilustradas na Figura 5.3. Com elas, e por meio do método AFREM, foi possível determinar o ponto de saturação do SP para cada tipo de mistura, que foram: 0,58% para as pastas de referência (P4-REF); 2,34% para as pastas com 10% de nanosílica (P4-10-0) e 1,07% para as pastas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa.

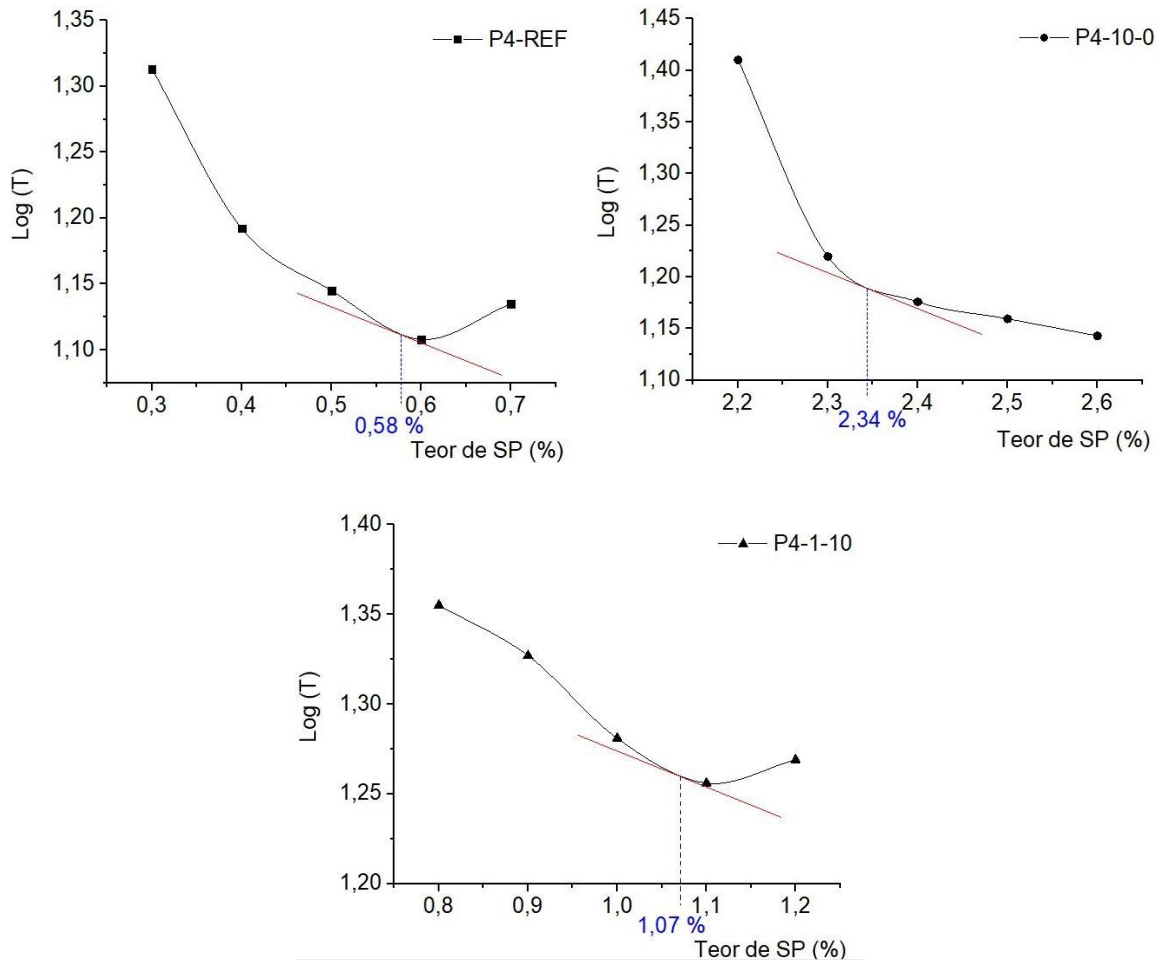


Figura 5.3 - Curvas de $\log(T)$ x teor de SP.

Nota-se que ambas as pastas que receberam adição de nanosílica e sílica ativa obtiveram resultados de teor ideal de SP maiores que a pasta de referência. Esse comportamento era esperado, uma vez que ao aumentar a quantidade de finos na mistura, aumenta-se a demanda por água e, como a relação a/agl é mantida constante, o teor ideal de SP é maior.

Ao comparar as pastas com adições, observa-se que o teor ideal de SP para a pasta com 10% de nanosílica (P4-10-0) foi cerca de 2,2 vezes o teor ideal para a pasta com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa (P4-1-10). Esses resultados se devem à maior área superficial da nanosílica, se comparada à sílica ativa.

5.2.2 MINIABATIMENTO

O ensaio de miniabatimento foi realizado para as mesmas pastas ensaiadas no Cone de Marsh, porém usou-se apenas os respectivos teores ótimos de aditivo SP, definidos no item 5.2.1. Mediu-se as áreas de espalhamento após 10, 30, 40 e 60 minutos do primeiro contato do cimento com água. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.11 e as curvas de espalhamento *versus* tempo para as misturas estão ilustradas na Figura 5.4.

Tabela 5.11 - Resultados do ensaio de miniabatimento para as pastas de CPV ARI.

Tempo	Área de espalhamento (cm ²)		
	P4-REF SP = 0,58%	P4-10-0 SP = 2,34%	P4-1-10 SP = 1,07%
10'	259,54	166,63	176,10
30'	202,55	161,19	129,77
40'	205,99	161,73	118,74
60'	173,57	152,06	106,31

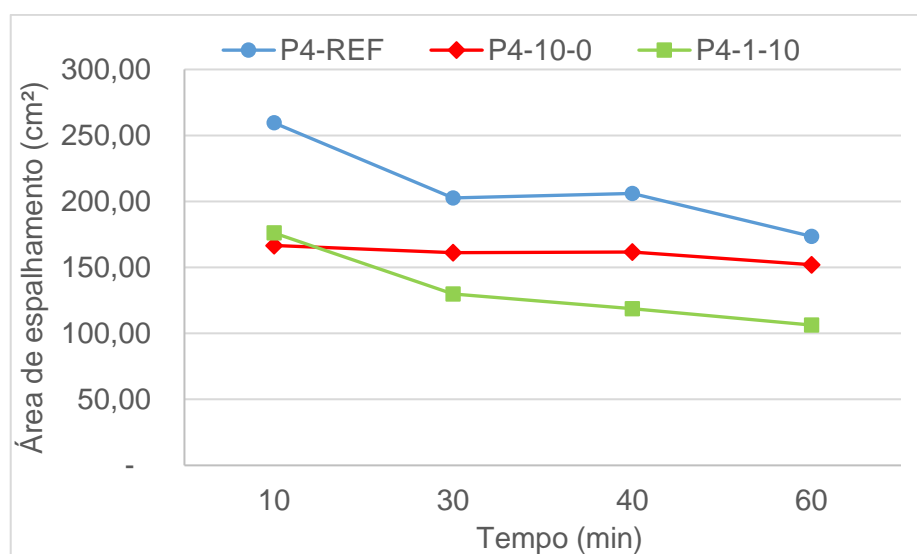


Figura 5.4 - Curva de área de espalhamento x tempo para pastas de CPV ARI.

Ao adicionar nanosílica e sílica ativa nas misturas tem-se uma perda no espalhamento, refletindo uma diminuição da trabalhabilidade, mesmo que tenham sido utilizados os teores ideais de SP para cada composição (Figura 5.5). Isso se deve ao aumento na coesão das misturas, provocado pela alta área superficial da nanosílica e da sílica ativa. Além disso, por serem mais finas que o cimento, ambas tendem a ser eficazes no preenchimento de vazios entre os grãos de cimento, aumentando a densidade de empacotamento dos materiais cimentícios, como explica Li et al. (2017).

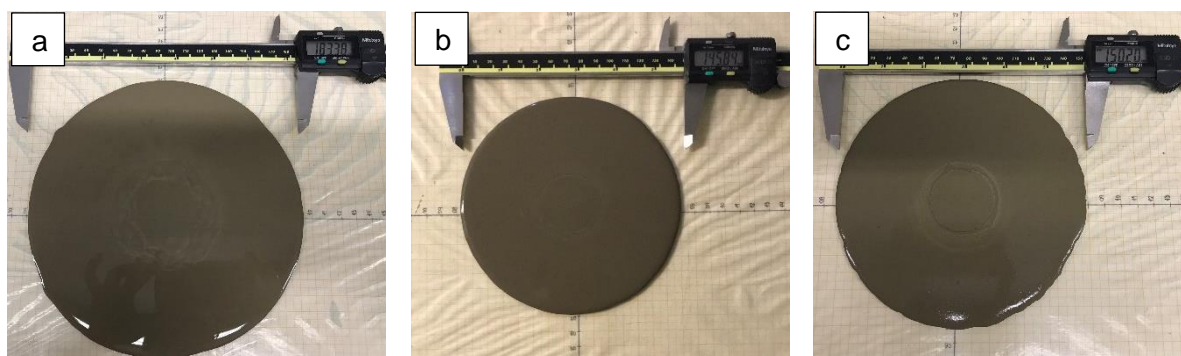


Figura 5.5 - Área de espalhamento para as pastas de cimento Portland: a) P4-REF; b) P4-10-0 e b) P4-1-10.

Vale ressaltar que a pasta contendo 10% de nanosílica teve consistência praticamente constante durante os 60 minutos de ensaio, diferentemente das outras pastas analisadas (P4-REF e P4-1-10), que apresentaram queda na consistência nos primeiros 30 minutos. Esses resultados sugerem que o SP age de forma distinta na presença da nanosílica em comparação aos outros aglomerantes utilizados, no entanto se faz necessário a realização de ensaios complementares para obtenção de conclusões.

5.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

Para as misturas de argamassa, foram estabelecidos os seguintes valores: proporção 1: 3,20 (cimento: agregado miúdo), relação a/agl de 0,40 e 0,50, teor de nanosílica de 0, 1, 5 e 10%, e teor de sílica ativa de 0 e 10%. Os teores de SP utilizados em cada mistura foram determinados a partir da verificação da consistência da argamassa, de acordo com NBR 13276:2016 (ABNT, 2016), cujo espalhamento foi fixado em (230 ± 10) mm, a fim de proporcionar mistura e compactação adequada dos corpos de prova.

Como citado no item 5.1.3, a nanosílica utilizada é uma solução aquosa onde 50% da massa total é de sílica e considera-se apenas a porcentagem de sílica para definição dos traços. Além disso, devem ser feitas as correções no traço, descontando a massa de nanosílica da massa de cimento, bem como a massa de água da massa de água de amassamento.

A Tabela 5.12 mostram a composição dos traços e os valores de consistência obtidos para os mesmos, lembrando que as argamassas do tipo A4 e A5 tem relação a/agl de 0,40 e 0,50, respectivamente. Os teores de SP necessários para que as argamassas atingissem o espalhamento estipulado de (230 ± 10) mm foram superiores aos teores ideais encontrados

pelo ensaio de Cone de Marsh (item 5.2.1). Entretanto, não foram observados sinais de exsudação e segregação nas argamassas preparadas, como pode ser visto na Figura 5.6.

Tabela 5.12 - Composição dos traços de argamassa e consistências obtidas.

Argamassas	Materiais (g)						Água	Consistência (mm)
	Cimento	A.F.	A.M.	S	N	SP (%)*		
A4-REF	1.000,0	1.600,0	1.600,0	-	-	1,0	400,0	238
A4-1-0	990,0	1.600,0	1.600,0	-	10,0	1,5	390,0	238
A4-5-0	950,0	1.600,0	1.600,0	-	50,0	2,5	350,0	223
A4-10-0	900,0	1.600,0	1.600,0	-	100,0	4,5	300,0	223
A4-1-10	890,3	1.600,0	1.600,0	67,3	9,7	2,3	377,3	230
A5-REF	1.000,0	1.600,0	1.600,0	-	-	0,2	500,0	228
A5-1-0	990,0	1.600,0	1.600,0	-	10,0	0,3	490,0	240
A5-5-0	950,0	1.600,0	1.600,0	-	50,0	0,8	450,0	228
A5-10-0	900,0	1.600,0	1.600,0	-	100,0	1,8	400,0	220
A5-1-10	890,3	1.600,0	1.600,0	67,3	9,7	0,6	474,0	235

* em relação à massa de aglomerante.

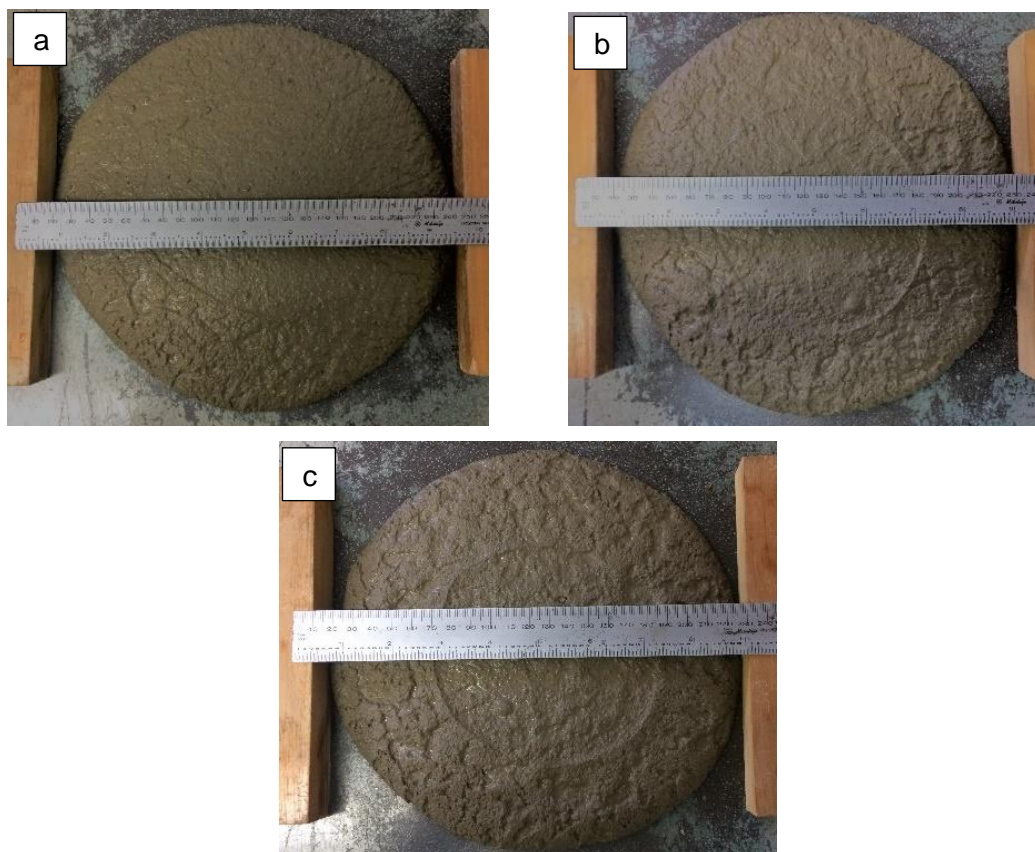


Figura 5.6 - Argamassas após ensaio de consistência, sem sinais de segregação e exsudação: a) A4-1-0, b) A4-5-0 e c) A4-10-0.

5.4 ENSAIOS EM ARGAMASSA

5.4.1 RESISTÊNCIA MECÂNICA

A resistência mecânica das argamassas foi avaliada por meio do ensaio de resistência à compressão axial e os valores médios obtidos estão apresentados na Tabela 5.13, bem como o desvio-padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV). Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados estão apresentados no Apêndice A.

Tabela 5.13 - Resistência à compressão axial das argamassas.

Argamassas	1 dia			7 dias			28 dias		
	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)	Média (MPa)	DP (MPa)	CV (%)
A4-REF	30,2	0,9	3,07%	61,4	0,8	1,35%	67,0	2,4	3,51%
A4-1-0	28,2	1,3	4,69%	58,2	0,2	0,41%	70,6	2,0	2,78%
A4-5-0	25,6	0,8	2,22%	59,0	2,0	3,32%	71,3	2,6	3,66%
A4-10-0	23,4	0,8	3,50%	56,1	1,0	1,72%	71,2	3,0	4,18%
A4-1-10	25,1	0,5	2,09%	59,4	1,6	2,67%	72,1	1,2	1,63%
A5-REF	20,6	0,8	4,00%	40,6	1,6	3,89%	43,9	3,5	7,96%
A5-1-0	21,5	1,0	4,52%	41,0	0,5	1,28%	46,5	0,9	1,97%
A5-5-0	22,3	0,6	2,59%	45,5	1,8	3,94%	55,6	5,2	9,45%
A5-10-0	21,4	0,8	3,94%	51,2	0,7	1,33%	64,1	3,5	5,40%
A5-1-10	20,2	0,9	4,21%	44,8	1,6	3,50%	56,6	1,4	2,45%

A Figura 5.7 ilustra os corpos de prova rompidos no ensaio de resistência à compressão axial e pode-se notar que a ruptura ocorreu de forma cônica.



Figura 5.7 - Corpos de prova rompidos no ensaio de compressão axial.

As Figuras 5.8 e 5.9 representam a evolução da resistência média das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 e 0,50, respectivamente, ao longo dos dias.

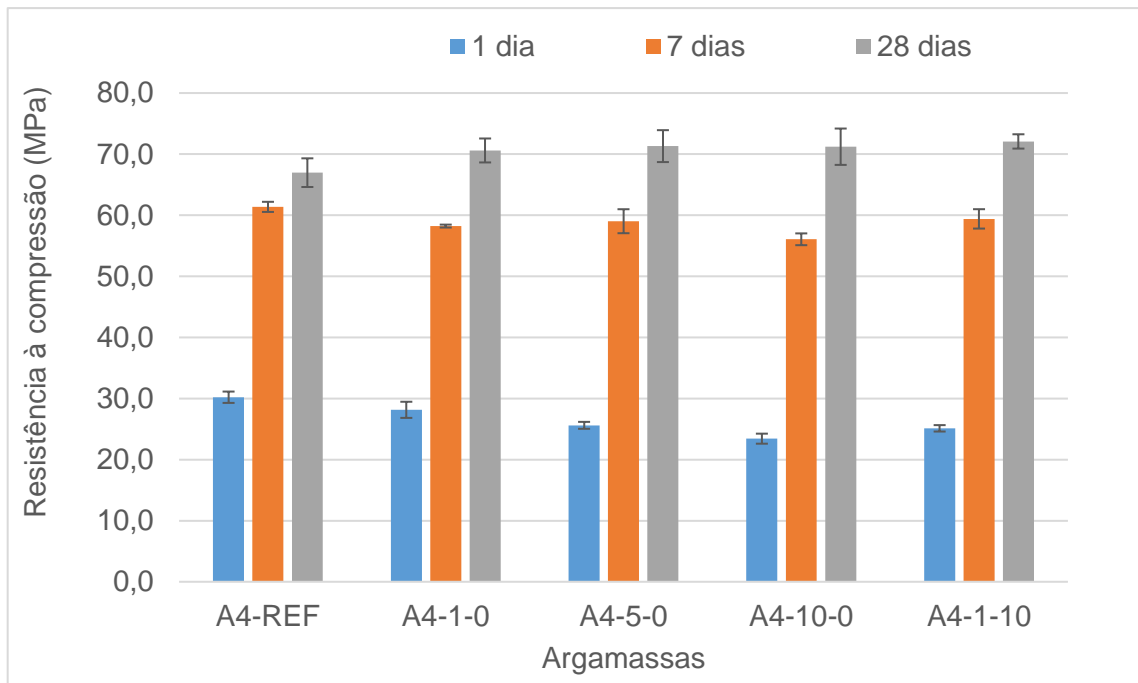


Figura 5.8 - Evolução da resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,40.

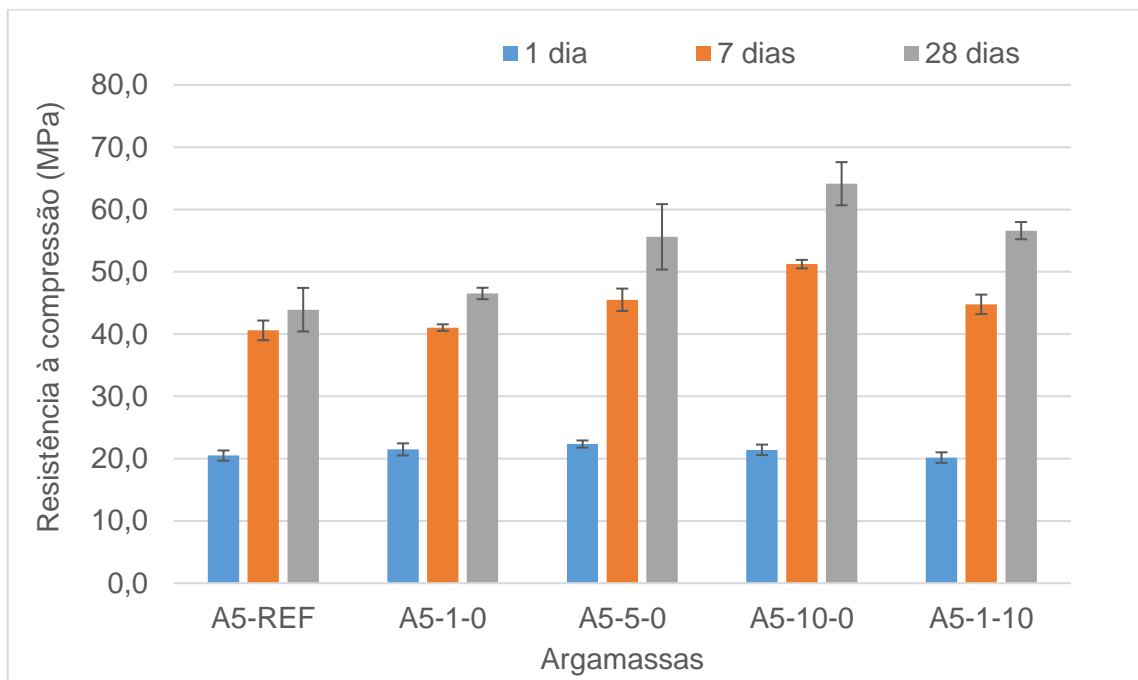


Figura 5.9 - Evolução da resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,50.

Para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40, a adição de nanosílica e sílica ativa não se mostrou eficiente para o aumento da resistência à compressão para as idades analisadas. Aos 1 e 7 dias, a análise de variância (ANOVA) indicou que existem diferenças significativas entre as amostras com e sem adições, porém o maior valor médio obtido foi para as argamassas de referência (A4-REF).

Aos 28 dias, as argamassas com adições tiveram um desempenho melhor, entretanto, para um teor de 10% de nanosílica (A4-10-0), o ganho foi de apenas 4,2 MPa em relação ao traço de referência, atingindo 71,2 MPa. O mesmo aconteceu para a argamassa que recebeu 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa (A4-1-10), que teve um ganho de pouco mais de 5 MPa na resistência à compressão, atingindo 72,1 MPa. Embora tenham sido observados ganhos de resistência, a ANOVA indicou que essas diferenças não são significativas.

Ao analisar os resultados obtidos para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50, a ANOVA indicou que na idade de 1 dia, não existem diferenças significativas entre os traços estudados. Já aos 7 dias, as diferenças passam a ser significativas para as argamassas A5-5-0, A5-10-0 e A5-1-10, que atingiram 45,5 MPa, 51,2 MPa e 44,8 MPa de resistência à compressão, enquanto que a A5-REF atingiu 40,6 MPa. O mesmo aconteceu aos 28 dias, com efeitos ainda mais positivos, levando a ganhos de resistência de até 20,2 MPa ao se utilizar 10% de nanosílica, em relação à argamassa sem adições.

O efeito combinado das duas adições foi avaliado por da comparação entre as argamassas que continham apenas 1% de nanosílica e aquelas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa. Como já citado, aos 28 dias não foram observadas diferenças significativas entre as resistências atingidas pelos traços A4-1-0 e A4-1-10. Entretanto, um comportamento diferente foi observado ao aumentar a relação a/agl para 0,50. A argamassa A5-1-0 atingiu 46,5 MPa de resistência aos 28 dias, enquanto que a argamassa A5-1-10 atingiu 56,6 MPa, ou seja, um ganho de 10 MPa decorrente da adição de 10% de sílica ativa.

Em relação aos demais teores estudados, nota-se que a adição de 1% de nanosílica isoladamente nas argamassas não traz melhoras significativas de resistência em nenhuma das idades estudadas, para as ambas as relações a/agl, se comparadas às argamassas de referência. Já para o teor de 5%, os efeitos são maiores e se tornam similares aos obtidos pela adição de 1% de nanosílica juntamente com 10% de sílica ativa. Nesse caso, em termos de resistência à compressão, a escolha entre qual tipo de composição utilizar, apenas nanosílica ou em conjunto com a sílica ativa, será baseada no custo-benefício de cada uma delas.

De um modo geral, os efeitos da nanosílica e da sílica ativa na resistência à compressão das argamassas foram mais relevantes nas argamassas de maior relação a/agl

e nas idades mais avançadas. A argamassa com a/agl igual a 0,40 contendo 5% de nanosílica (A4-5-0), por exemplo, apresentou um ganho de 6% na resistência à compressão aos 28 dias, se comparada a A4-REF. Ao aumentar a relação a/agl para 0,50 e mantendo o teor de nanosílica (A5-5-0), o ganho de resistência atingiu 27% em relação a A5-REF. Esse efeito é ainda mais significativo para o teor de 10% de nanosílica que resultou em ganhos de resistência da ordem de 6% e 46%, para as relações a/agl igual a 0,40 e 0,50, respectivamente.

Um comportamento semelhante foi observado nas pesquisas de Li et al. (2017), que ao adicionar 2% de nanosílica em argamassas com relação a/agl igual a 0,25, obtiveram um aumento de 7% na resistência à compressão aos 28 dias em comparação com a argamassa de referência, enquanto que para as argamassas com a/agl igual a 0,40, o mesmo teor de nanosílica resultou em um ganho de 17%.

Algumas hipóteses que expliquem esse comportamento são levantadas. Uma delas é baseada na premissa de que em relações a/agl menores, a menor quantidade de água já implica em maiores resistências, devido ao reduzido número de poros e consequente densificação da matriz cimentícia, tornando secundário o efeito das adições. Diferente das misturas com maior relação a/agl, onde a maior quantidade de água ocasiona uma maior porosidade (menor resistência mecânica), permitindo que o efeito das adições se torne mais significativo. Outra hipótese baseia-se na maior quantidade de água presente nas argamassas com maior relação a/agl, que facilitaria a dispersão do material, uma vez que devido à sua alta área superficial as partículas de nanosílica tendem a se aglomerar. Essa aglomeração reduziria a capacidade de reação do material, minimizando os efeitos físicos e químicos da adição.

Um estudo mais aprofundado acerca da influência da nanosílica nas propriedades mecânicas dos materiais cimentícios pode ser feito com base em análises de microestrutura, além de análises químicas da pasta de cimento hidratada.

5.4.2 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE

Os valores do coeficiente de absorção das argamassas aos 7 e 28 dias de relação a/agl igual a 0,40 e 0,50 estão apresentados nas Tabelas 5.14 e 5.15, respectivamente. Nelas constam os resultados obtidos em todas as leituras: 3h, 6h, 24h, 48h e 72h e a altura da ascensão capilar atingida após as 72 horas de ensaio. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados estão apresentados no Apêndice B.

Tabela 5.14 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 aos 7 e 28 dias.

Idades	Argamassas	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
		3h	6h	24h	48h	72h	
7 dias	A4-REF	0,122	0,177	0,332	0,440	0,510	4,7
	A4-1-0	0,114	0,162	0,310	0,406	0,464	4,0
	A4-5-0	0,071	0,096	0,165	0,215	0,246	9,3
	A4-10-0	0,049	0,064	0,107	0,142	0,160	9,6
	A4-1-10	0,068	0,090	0,150	0,192	0,218	7,4
28 dias	A4-REF	0,099	0,142	0,291	0,397	0,438	4,5
	A4-1-0	0,087	0,129	0,261	0,342	0,362	2,8
	A4-5-0	0,069	0,096	0,188	0,239	0,273	9,1
	A4-10-0	0,048	0,061	0,105	0,144	0,163	9,6
	A4-1-10	0,055	0,074	0,136	0,179	0,202	9,4

Tabela 5.15 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 aos 7 e 28 dias.

Idades	Argamassas	Absorção por capilaridade (g/cm ²)					h (cm)
		3h	6h	24h	48h	72h	
7 dias	A5-REF	0,225	0,350	0,757	1,042	1,220	9,3
	A5-1-0	0,207	0,314	0,667	0,927	1,092	8,6
	A5-5-0	0,120	0,179	0,369	0,488	0,568	7,6
	A5-10-0	0,056	0,074	0,133	0,165	0,206	9,4
	A5-1-10	0,106	0,150	0,292	0,346	0,413	9,1
28 dias	A5-REF	0,174	0,270	0,622	0,885	1,060	8,5
	A5-1-0	0,158	0,248	0,545	0,777	0,944	7,1
	A5-5-0	0,090	0,142	0,343	0,491	0,574	4,6
	A5-10-0	0,065	0,091	0,193	0,262	0,301	9,3
	A5-1-10	0,100	0,148	0,312	0,423	0,468	9,2

Pode-se observar que os índices de absorção capilar foram menores para as argamassas com relação a/agl igual a 0,40 do que para as argamassas com a/agl igual a 0,50, o que já era esperado, uma vez que o maior teor de água usado na mistura resulta em maior número de vazios com a evolução da hidratação e evaporação da água de amassamento.

As Figuras 5.10 e 5.11 ilustram a absorção capilar em função da raiz quadrada do tempo aos 7 e 28 dias, para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 e 0,50, respectivamente.

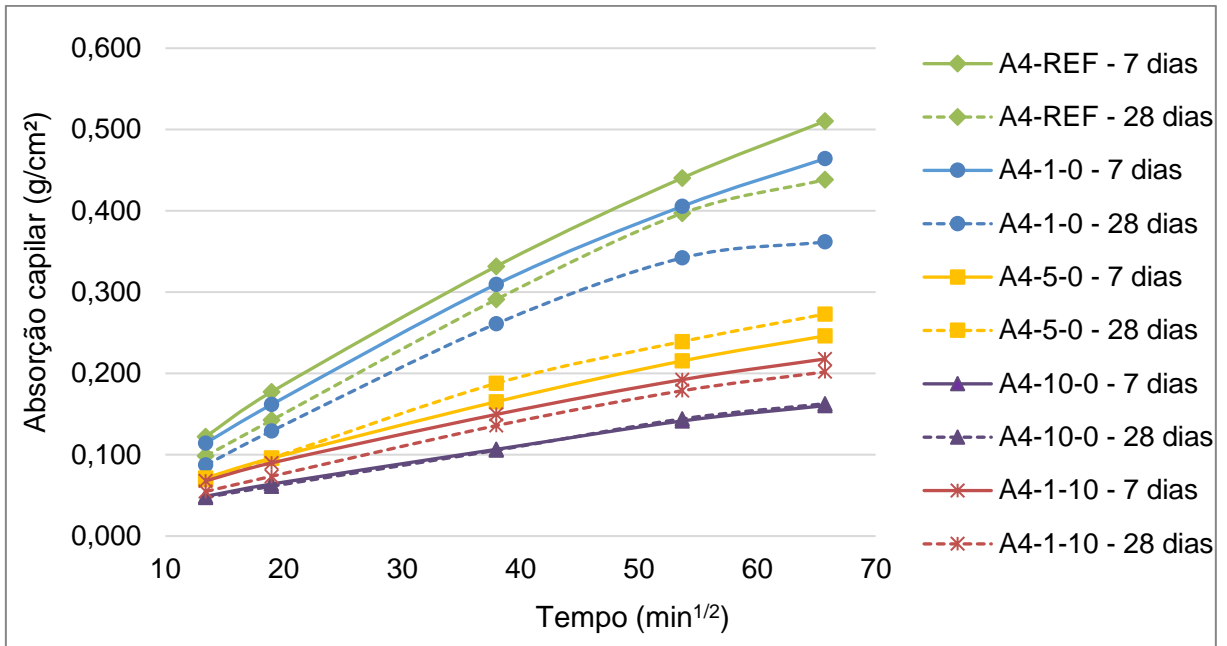


Figura 5.10 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 aos 7 e 28 dias.

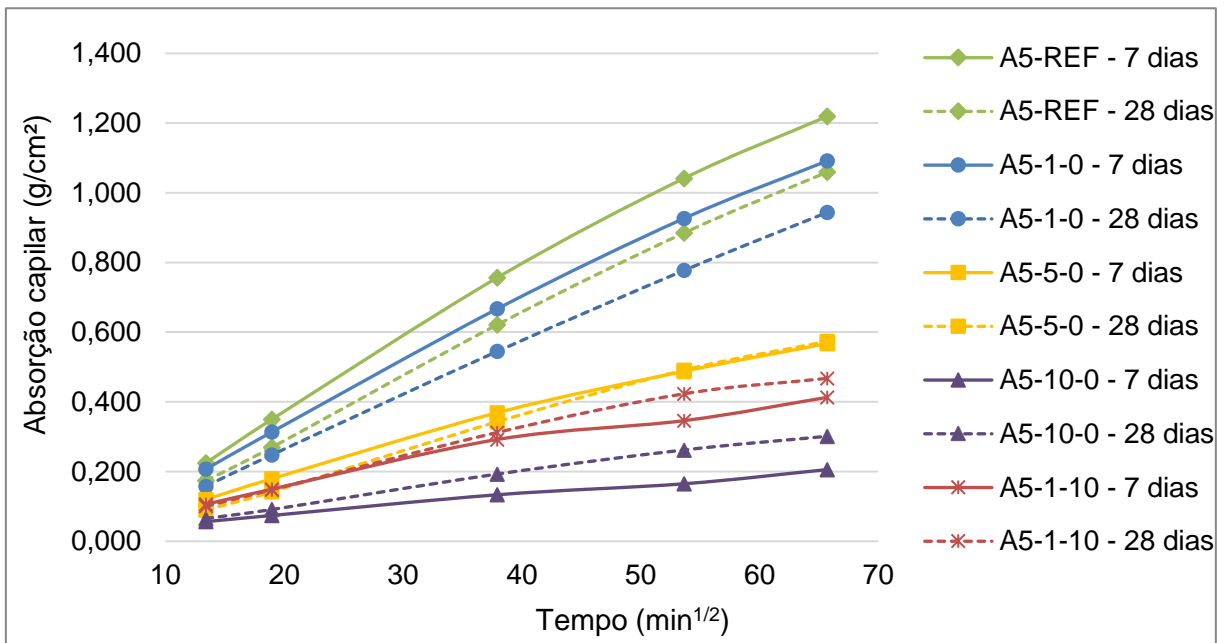


Figura 5.11 - Absorção de água por capilaridade das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 aos 7 e 28 dias.

Aos 28 dias e após 72 horas de ensaio, todas as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 que continham adições tiveram índice de absorção capilar inferior ao da argamassa de referência. Ao adicionar 1%, 5% e 10% de nanosílica, obteve-se uma redução de 17%, 38% e 63%, respectivamente, se comparados à argamassa sem adições. Já ao adicionar 1% de nanosílica em conjunto com 10% de sílica ativa, a redução foi de 54%. A ANOVA indicou que

existem diferenças significativas entre as diferentes composições estudadas, exceto entre as argamassas A4-10-0 e A4-1-10. Em casos como esse, a escolha entre qual tipo de composição utilizar deverá ser baseada no custo dos materiais.

Ao aumentar a relação a/agl para 0,50, a adição de nanosílica e sílica ativa também resultou em redução nos índices de absorção capilar aos 28 dias após 72 horas de ensaio. As argamassas A5-1-0, A5-5-0 e A5-10-0 apresentaram índice de absorção capilar cerca de 11%, 46% e 72% inferiores à argamassa de referência (A5-REF), respectivamente. Já para a argamassa A5-1-10, essa redução foi de 56%. Estatisticamente, as diferenças entre as diferentes composições estudadas são significativas, exceto entre as argamassas A4-5-0 e A4-1-10.

Joshaghani e Moeini (2017) também obtiveram redução nos índices de absorção capilar ao adicionar nanosílica coloidal em argamassas. Para os teores de 3 e 6%, a redução foi de 14 e 22%, respectivamente, se comparados ao traço de referência, que teve índice de 0,724 g/cm² após 72 horas de ensaio com idade de 28 dias. A redução nos índices de absorção das argamassas à medida que se aumenta o teor de nanosílica comprova que seus efeitos filler e pozolânico contribuem para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia.

Percebe-se que para argamassas com maior relação a/agl os efeitos da adição de nanosílica, independentemente do teor utilizado, tornam-se mais relevantes em relação ao traço de referência do que para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40. Esse comportamento se assemelha ao obtido nos ensaios de resistência mecânica e sua origem também deve ser investigada por meio de ensaios de microestrutura.

Após o término do ensaio, tanto aos 7 quanto aos 28 dias, os corpos de prova foram rompidos para que fosse possível a leitura da ascensão capilar máxima. A Figura 5.12 ilustra os valores médios obtidos e os relaciona com o índice de absorção capilar após 72 horas de ensaio e nas Figuras 5.13 e 5.14 estão destacados os perfis da umidade no interior dos corpos de prova após as 72 horas de ensaio, aos 28 dias.

Ao associar o índice de absorção capilar com a ascensão máxima de água nota-se que as argamassas que absorveram menos água apresentaram maior ascensão, como é o caso dos traços que receberam adições em teores mais elevados (A4-5-0, A4-10-0, A4-1-10, A5-10-0).

Vale ressaltar que, embora as argamassas A5-REF e A5-1-0 tenham apresentado uma ascensão capilar elevada (superior a 7 cm), o perfil da umidade foi diferente do observado nas argamassas com teores maiores de adições (A5-10-0 e A5-1-10) (Figura 5.14). Nas primeiras, a água atingiu a mesma altura ao longo de toda a seção longitudinal dos corpos de

prova, enquanto que para as demais, uma maior ascensão ocorreu apenas no centro da amostra e não nas laterais. Silva (2006) e Castro e Ferreira (2016) observaram um comportamento semelhante nas suas pesquisas e explicaram que quanto menor o diâmetro do poro, maior a pressão de sucção capilar, aumentando a altura de ascensão da água.

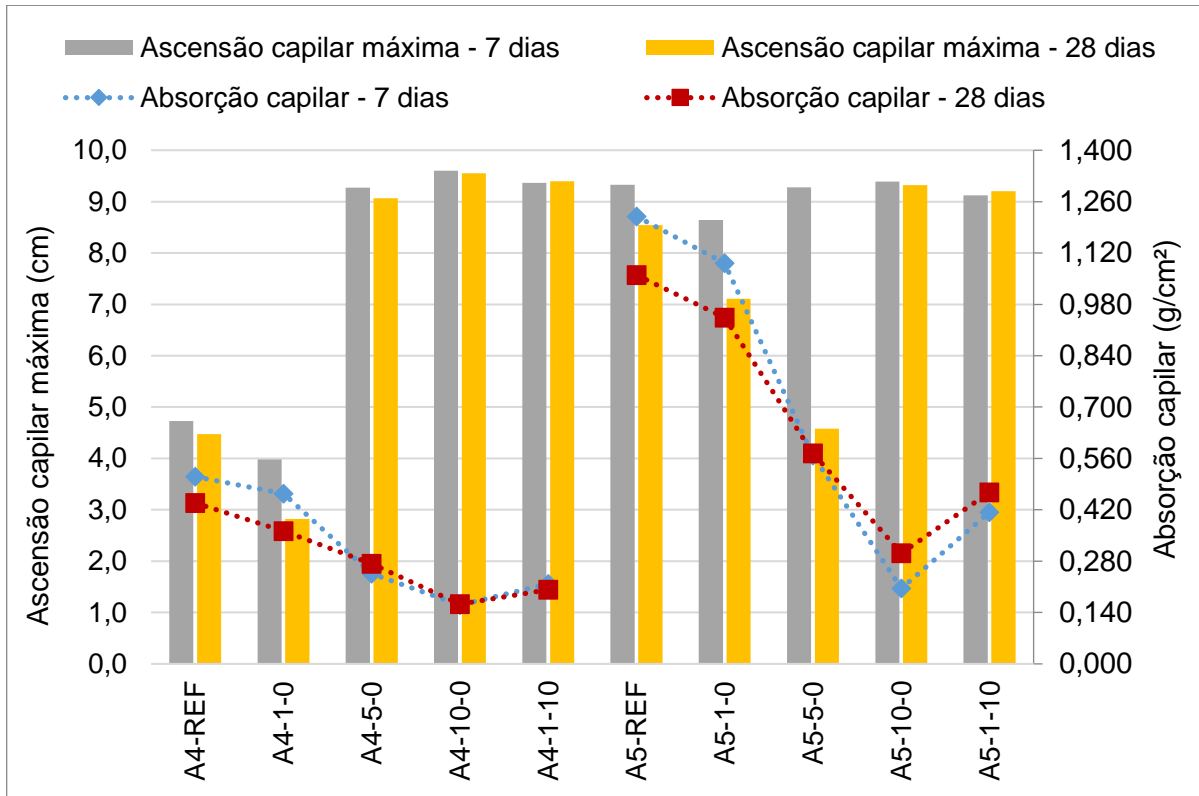


Figura 5.12 - Máxima ascensão capilar e índice de absorção capilar das argamassas após 72 horas de ensaio, aos 7 e 28 dias.

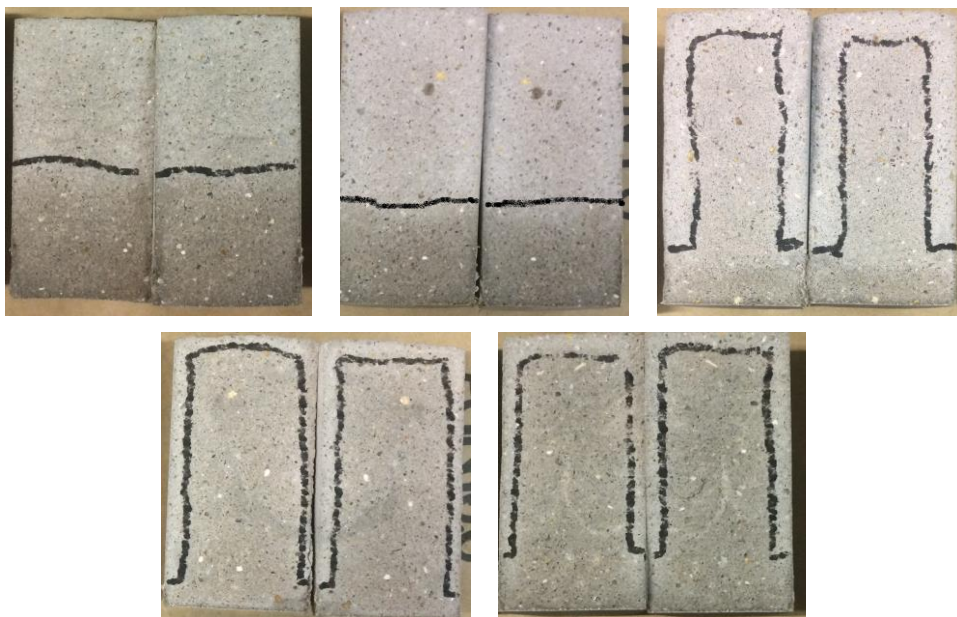


Figura 5.13 - Corpos de prova fraturados após ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) A4-REF; b) A4-1-0; c) A4-5-0; d) A4-10-0 e e) A4-1-10.



Figura 5.14 - Corpos de prova fraturados após ensaio de absorção de água por capilaridade aos 28 dias: a) A5-REF; b) A5-1-0; c) A5-5-0; d) A5-10-0 e e) A5-1-10.

Os baixos índices de absorção associados às elevadas alturas de ascensão da água indicam que a nanosílica e a sílica ativa, devido aos seus efeitos fíler e pozolânicos, foram eficazes no refinamento dos poros da matriz cimentícia. Nota-se ainda que a nanosílica, devido à sua maior área superficial, foi mais eficiente na redução da absorção de água por capilaridade do que a sílica ativa.

5.4.3 DURABILIDADE FRENTE AO ATAQUE DE SULFATOS

A avaliação da durabilidade das argamassas frente ao ataque por sulfatos de origem externa e interna foi realizada por meio de ensaios de variação dimensional de barras de argamassa, com base na NBR 13583:2014 (ABNT, 2014).

Para a realização dos ensaios foram selecionadas as argamassas que apresentaram melhor desempenho na caracterização mecânica e física (com 10% de nanosílica e com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa), além do traço de referência, para ambas as relações a/agl. Estes seis traços foram submetidos aos ataques de sulfato de sódio tanto de origem externa quanto de origem interna (presentes na água de amassamento) e ao processo de cura úmida. Devido às limitações impostas pelo procedimento adotado, assim como as condições laboratoriais, o ataque interno de sulfatos decorrentes de altas temperaturas, provocado pela cura térmica à 85°C, foi realizado apenas para as argamassas A4-REF e A4-10-0 (Tabela 5.16).

Tabela 5.16 - Argamassas submetidas ao ensaio de variação dimensional.

Argamassa	Origem do sulfato		Tipo de cura	
	Externa	Interna	Úmida	Térmica
A4-REF	X	X	X	X
A5-REF	X	X	X	
A4-10-0	X	X	X	X
A5-10-0	X	X	X	
A4-1-10	X	X	X	
A5-1-10	X	X	X	

Para cada tipo de cura e para cada traço existem três condições de ataque: sem ataque (CAL), ataque externo de sulfatos (EXT) e ataque interno de sulfatos (INT) (decorrente de contaminação). As leituras da dimensão das barras de argamassa foram realizadas aos 14, 28, 42 e 91 dias após o início do ensaio e as expansões individuais de cada barra, bem como as expansões médias para cada grupo de argamassas estão apresentadas graficamente no Apêndice C.

Seguindo a especificação da NBR 13583:2014 (ABNT, 2014), apresenta-se os resultados sob a forma de expansão resultante, dada pela diferença entre a expansão média dos corpos de prova submetidos ao ataque (externo ou interno) e a expansão média dos corpos de prova sem ataque (acondicionados em água saturada com cal) para cada idade analisada. No entanto, em alguns casos, para que seja possível comparar os resultados obtidos com os demais resultados presentes na literatura, obtidos e apresentados com base na ASTM C1012 (ASTM, 2018), serão analisados os valores de expansão média para a série de corpos de prova imersos na solução de sulfato (Apêndice C).

Com o intuito de facilitar o entendimento, a apresentação e a análise dos resultados foram realizadas separadamente, de acordo com o tipo de cura a que foram submetidas às argamassas: cura úmida ou cura térmica.

- *Cura úmida*

As expansões resultantes das argamassas que foram submetidas à cura úmida e ao ataque externo de sulfatos, ao longo dos 91 dias de ensaio, estão apresentadas graficamente na Figura 5.15.

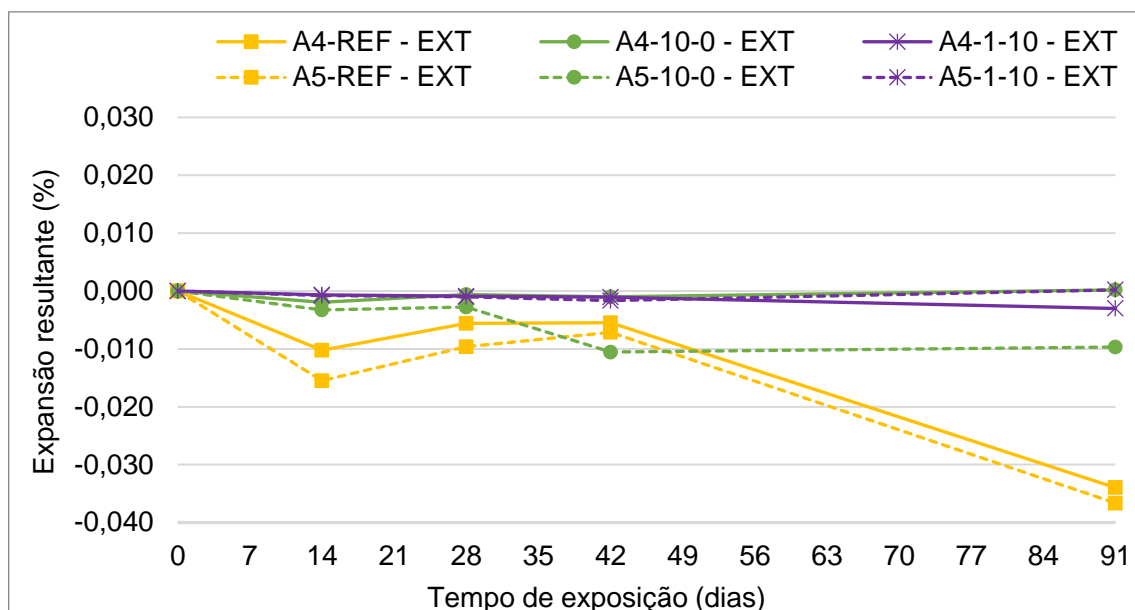


Figura 5.15 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque externo de sulfatos.

Até o término do ensaio, nenhuma das argamassas analisadas apresentaram expansão, entretanto observou-se comportamentos distintos entre as argamassas com e sem adições. As argamassas A4-REF e A5-REF apresentaram comportamentos semelhantes, com retração de 0,010% e 0,015%, respectivamente, aos 14 dias, seguida de uma tendência à redução da retração até os 42 dias, quando a retração volta a se intensificar, atingindo 0,034% e 0,037%, respectivamente. Já as argamassas que receberam adição de nanosílica e sílica ativa, mantiveram suas dimensões praticamente inalteradas durante todo o ensaio, com exceção da argamassa A5-10-0 que atingiu -0,010% aos 91 dias.

Diferente do observado neste trabalho, a retração das argamassas não é um comportamento comumente observado nas pesquisas relativas ao ataque de sulfatos (HOPPE FILHO, 2015; PEREIRA, 2015; SOUZA, 2016).

Hoppe Filho et al. (2015), por exemplo, realizaram ataque externo em barras de argamassa por 42 dias e analisaram a influência de várias adições minerais, inertes e ativas, tais como fíler calcário e quartzoso, resíduo de cerâmica vermelha, metacaulim, sílica de casca de arroz e sílica ativa. Não foi observada retração em nenhum dos traços analisados: a argamassa de referência atingiu cerca de 0,049% de expansão resultante e a adição que teve maior influência na mitigação do ataque foi a sílica ativa (10% em substituição em massa), reduzindo a expansão para, aproximadamente, 0,011%. Os autores atribuíram o resultado positivo ao efeito pozolânico da adição, que reduz a disponibilidade de CH para reagir com os íons sulfato, além de alterar a distribuição dos poros e interconectividade da rede capilar.

Em termos de expansões médias, as argamassas compostas com 10% de nanosílica (A4-10-0 e A5-10-0) e 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa (A4-1-10 e A5-1-10) submetidas ao ataque externo de sulfatos atingiram valores entre 0,012 e 0,020% aos 91 dias. Esses resultados são coerentes com os obtidos por Atahan e Arslan (2016), que desenvolveram suas pesquisas com base na ASTM C1012-15 (ASTM, 2015) e substituíram o cimento por nanosílica, nos teores de 2%, 4% e 6%. Após 90 dias de exposição à uma solução de sulfato de sódio (5%), as expansões médias obtidas variaram entre 0,015 e 0,039%, inclusive para o traço de referência.

Entretanto, os autores mantiveram as condições de ataque e realizaram novas leituras após 6, 12, 24 e 36 meses de exposição. O efeito das adições passou a ser percebido após 24 meses de ensaio, quando a argamassa de referência atingiu 0,785% de expansão e as argamassas contendo 2%, 4% e 6% de nanosílica atingiram 0,073%, 0,027% e 0,020%, respectivamente. Aos 36 meses, a influência da nanosílica ficou ainda mais evidente, uma vez que nem foi possível realizar a leitura argamassa de referência devido à fissuração excessiva, enquanto que as argamassas com adições apresentaram 0,217%, 0,050% e 0,022% de expansão média, respectivamente (ATAHAN; ARSLAN, 2016).

Quanto ao ataque interno de sulfatos, estão apresentadas na Figura 5.16 as expansões resultantes obtidas ao longo dos 91 dias de ensaio.

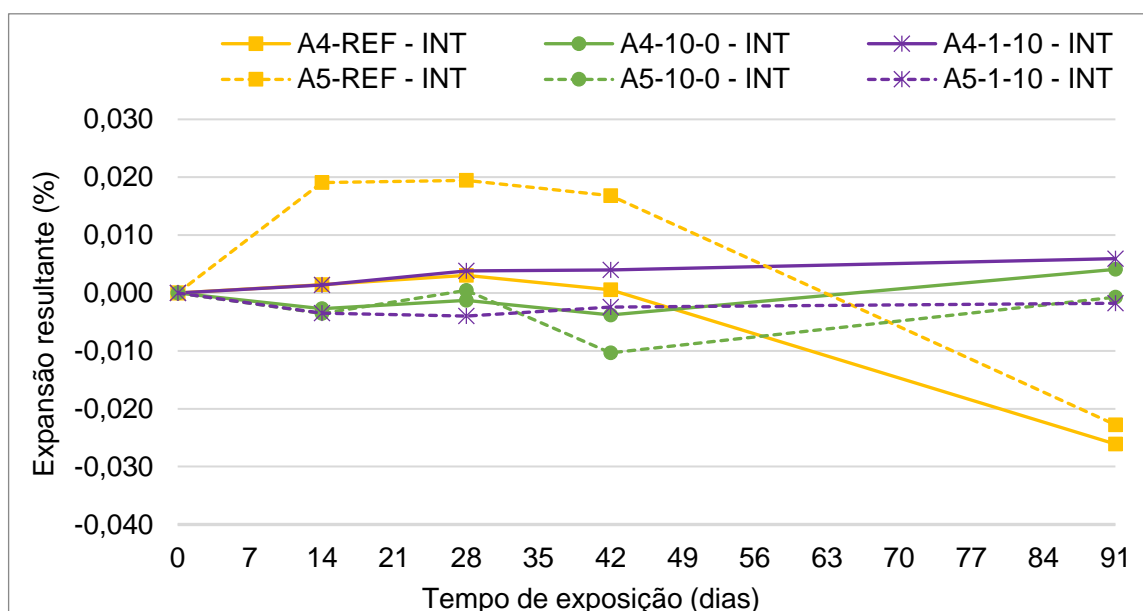


Figura 5.16 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque interno de sulfatos.

Nota-se que os traços de referência apresentaram comportamentos semelhantes, assim como no ataque externo de sulfatos. Entretanto, enquanto a A5-REF atingiu expansão

máxima de 0,019% aos 14 dias, que se manteve até os 28 dias, a A4-REF não ultrapassou os 0,003% de variação dimensional em relação ao seu comprimento inicial, para o mesmo tempo de ensaio. Após 28 dias, ambas iniciaram um processo de retração, atingindo -0,026% e -0,023% aos 91 dias. Já as argamassas contendo adições apresentaram valores variando entre -0,010% (A5-10-0) e 0,006% (A4-1-10), durante todo o período de ensaio.

Ao comparar os dois tipos de ataque, percebe-se que as argamassas submetidas ao ataque interno iniciaram um processo de expansão, diferentemente daquelas que estavam imersas em solução de sulfato de sódio. O fato de o sulfato já estar presente na mistura, não sendo necessário ingressar do meio para o interior do corpo de prova, pode ter sido fundamental para obtenção desses resultados.

O sulfato adicionado por meio da água de amassamento corresponde a um aumento de 0,8% e 1,0% no teor de sulfato presente no cimento, para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 e 0,50, respectivamente. Considerando que o cimento utilizado no preparo das argamassas continha 2,8% de sulfatos, conforme caracterização química (item 5.1.1), esse acréscimo levaria aos teores de 3,6% e 3,8%, ambos superiores ao limite da NBR 5733:1991 (ABNT, 1991), que é 3,5%.

A expansão de argamassas produzidas com cimentos contendo alto teores de sulfatos (4,7 a 5,0%), curadas em temperatura ambiente (23°C) e termicamente a 55°C foram estudadas por Zhang, Olek e Diamond (2002) e os resultados indicaram que não houve expansão em nenhuma das argamassas, mesmo após 900 dias de ensaio.

Por outro lado, Atahan e Dikme (2011) avaliaram a expansão de argamassas compostas com diferentes areias contaminadas com sulfatos: areia 1, com 1,6% de SO_3 (em massa) e areia 2, com 2,0% de SO_3 (em massa). Os autores observaram uma expansão média de 0,54% e 0,38% após 12 meses de ensaios, para as argamassas compostas pelas areias 1 e 2, respectivamente. Notou-se uma redução significativa nas expansões médias das argamassas ao adicionar 2%, 4% e 6% de nanosílica, que passaram a ser 0,18%, 0,07% e 0,05%, respectivamente, para as argamassas contendo areia 1, e 0,18%, 0,09% e 0,07%, respectivamente, para as argamassas contendo areia 2.

Quanto ao presente trabalho, a Figura 5.17 mostra as argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque de sulfatos, tanto de origem interna quanto externa, após o fim do ensaio. Não foram observados quaisquer indícios de fissuração em nenhum dos corpos de prova.

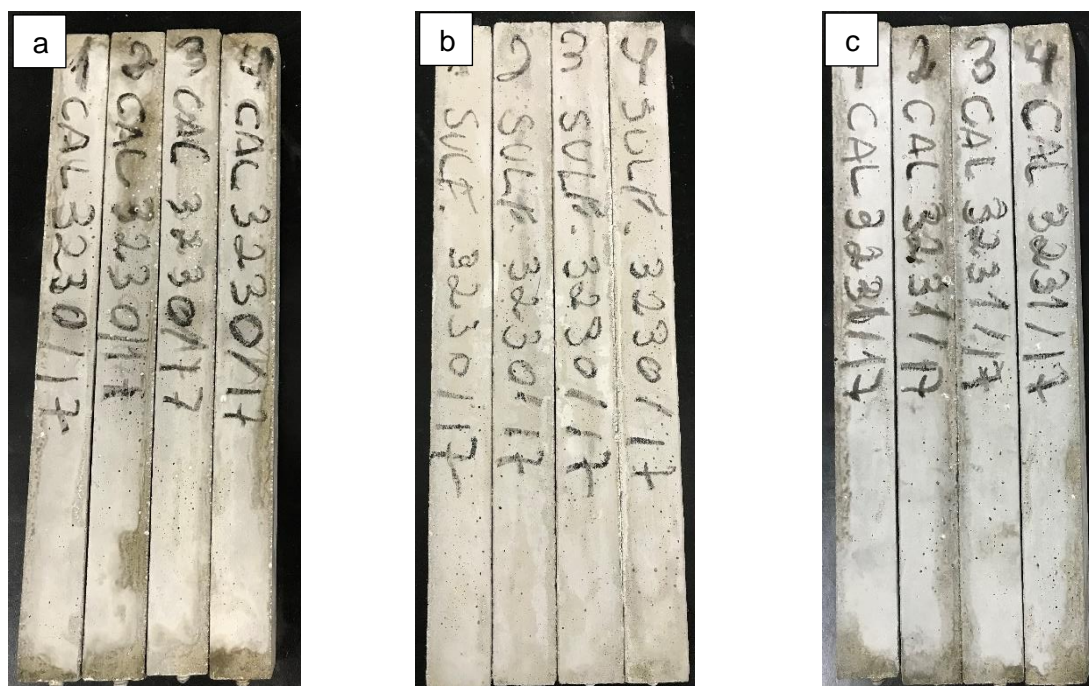


Figura 5.17 - Argamassas submetidas à cura úmida após 91 dias de ensaio: a) sem ataque, b) ataque externo e c) ataque interno.

Diante dos resultados obtidos, obteve-se a porcentagem de SO_3 em relação ao aglomerante das argamassas que foram submetidas ao ataque externo de sulfatos. Considerando que as argamassas imersas em água saturada com cal não estavam em contato com fonte externa de sulfatos, o valor de SO_3/agl obtido nessas amostras é tomado como referência para a determinação do SO_3 absorvido durante o ataque externo. As análises foram realizadas apenas para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40, por se tratarem das composições com microestrutura mais refinada e, conseqüentemente, com menor susceptibilidade à absorção. Os valores de SO_3 absorvido pelas argamassas de referência (A4-REF) e com 10% de nanosílica (A4-10-0) estão apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 - Valores de SO_3 absorvido pelas argamassas que foram submetidas à cura úmida.

Argamassa	Solução de imersão	SO_3/agl (%)	SO_3 absorvido (%)
A4-REF	Cal	2,54	-
A4-REF	Na_2SO_4	4,55	2,01
A4-10-0	Cal	2,25	-
A4-10-0	Na_2SO_4	2,81	0,56

Nota: Os resultados completos das análises químicas estão apresentados no Apêndice D.

Nota-se que as argamassas imersas em solução de sulfato de sódio absorveram os íons agressivos durante o tempo de exposição, sendo que as argamassas de referência absorveram cerca de 4 vezes mais SO_3 do que as que continham 10% de nanosílica, cujos

valores foram 2,01 e 0,56%, respectivamente. Esses resultados são coerentes com os já obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, apresentados e discutidos no item 5.4.2. Possivelmente, a quantidade de SO_3 absorvida não foi suficiente para desencadear reações expansivas significativas e/ou perceptíveis pelo método de avaliação adotado, especificado na NBR 13583:2014 (ABNT, 2014), durante os 91 dias de ensaio.

Como já citado, a norma especifica uma relação a/agl igual a 0,60 para o preparo das argamassas e no presente trabalho este valor foi reduzido para 0,40 e 0,50, valor próximo ao estipulado pela ASTM C1012/C1012M – 18a (ASTM, 2018), que é 0,49. Optou-se pela redução, uma vez que o foco da pesquisa era a obtenção de materiais cimentícios mais duráveis.

Uma medida compensatória foi o prolongamento do tempo de ensaio por 91 dias, tempo cerca de 2x superior ao tempo determinado pela norma brasileira (42 dias), porém inferior ao estipulado pela norma americana (365 dias). Acreditava-se que prolongar o tempo de exposição aos agentes agressivos possibilitaria a obtenção de resultados de variação dimensional mais coerentes e conclusivos acerca da influência da nanosílica e da sílica ativa na durabilidade de matrizes cimentícias frente ao ataque de sulfatos, fato que não ocorreu durante o período estipulado, para todas as condições de ataque.

- *Cura térmica*

As expansões resultantes das argamassas que foram submetidas à cura térmica e ao ataque de sulfatos, tanto de origem externa quanto interna, ao longo dos 91 dias de ensaio, estão apresentadas graficamente na Figura 5.18.

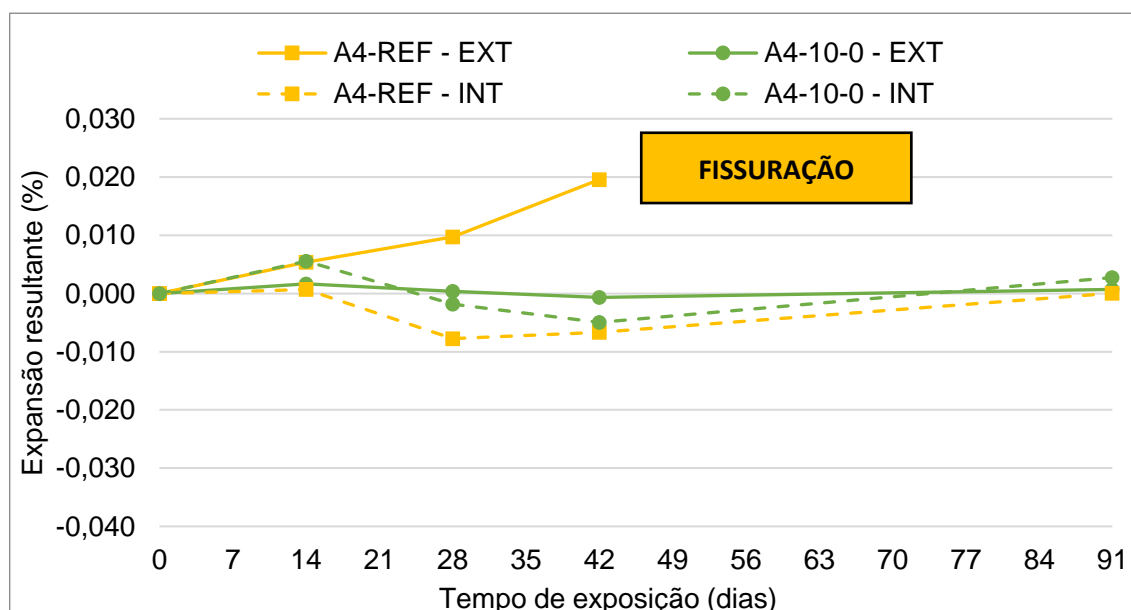


Figura 5.18 - Expansão resultante das argamassas submetidas à cura térmica.

As argamassas que receberam sulfato na mistura tiveram comportamentos semelhantes ao longo do ensaio, com expansões resultantes variando entre -0,008% e 0,006%, sendo que a argamassa com 10% de nanosílica (A4-10-0-INT) expandiu mais do que a argamassa de referência (A4-REF-INT). Já as argamassas que foram imersas em solução de sulfato de sódio tiveram comportamentos bem distintos. Enquanto que a A4-10-0 praticamente manteve suas dimensões constantes ao longo dos 91 dias, a A4-REF atingiu 0,02% de expansão resultante aos 42 dias, a qual culminou em uma completa fissuração dos corpos de prova, impossibilitando a realização da leitura aos 91 dias (Figura 5.19).

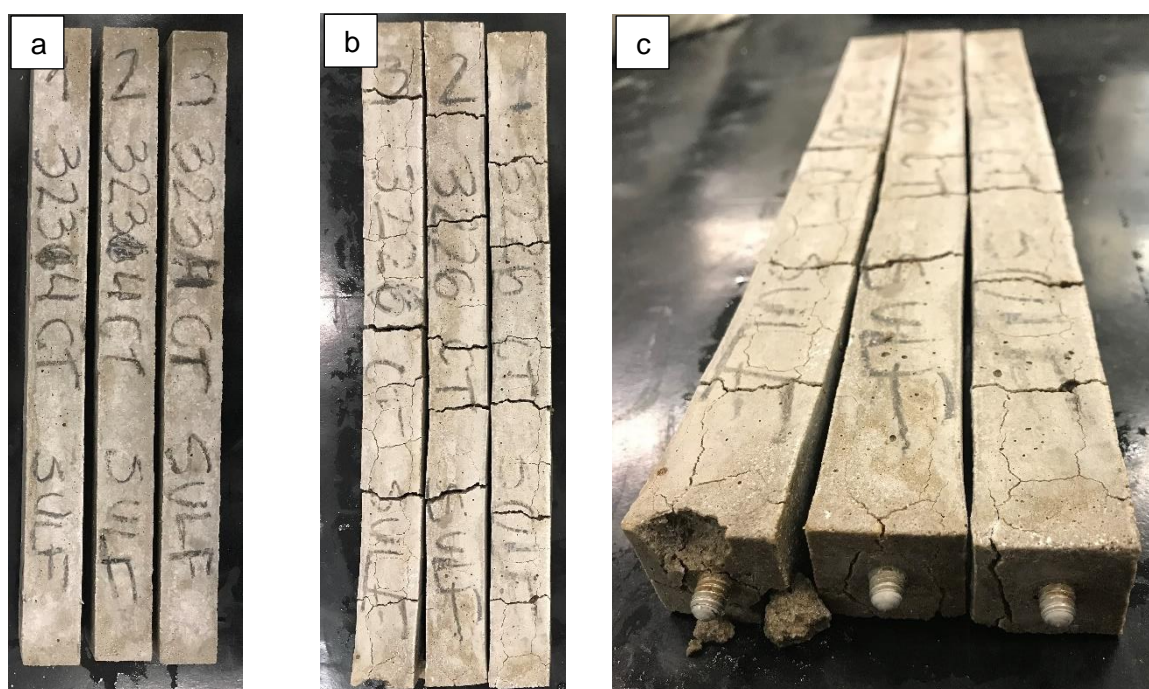


Figura 5.19 - Argamassas submetidas à cura térmica após ataque externo de sulfatos durante 91 dias: a) A4-10-0; b) e c) A4-REF.

O cálculo dos valores de SO_3 presentes nas misturas mostra que as argamassas de referência (A4-REF) absorveram cerca de 6% de SO_3 enquanto que as que tinham 10% de nanosílica (A4-10-0) absorveram pouco mais de 1% (Tabela 5.18). Vale ressaltar que as mesmas argamassas quando submetidas à cura úmida absorveram 2,01 e 0,56% de SO_3 , respectivamente (Tabela 5.17).

Tabela 5.18 - Valores de SO_3 absorvido pelas argamassas que foram submetidas à cura térmica.

Argamassa	Solução de imersão	SO_3/agl (%)	SO_3 absorvido (%)
A4-REF	Cal	2,64	-
A4-REF	Na_2SO_4	8,67	6,03
A4-10-0	Cal	2,29	-
A4-10-0	Na_2SO_4	3,35	1,06

Nota: Os resultados completos das análises químicas estão apresentados no Apêndice D.

Acredita-se que o processo de cura térmica favoreceu um ataque interno de sulfatos e induziu a formação de etringita tardia que, por sua vez, causa expansão e fissuração da matriz cimentícia. Pesquisas apontam que altas temperaturas ($> 85^{\circ}\text{C}$) são determinantes para a formação de etringita tardia (ZHANG; OLEK; DIAMOND, 2002).

No presente trabalho, a expansão decorrente desse fenômeno originou uma microfissuração inicial, que facilitou o ingresso de íons sulfato presentes no meio para o interior dos corpos de prova. Dessa forma, o ataque externo se intensificou e provocou a fissuração excessiva observada nas argamassas de referência após os 91 dias de ensaio. A baixa variação dimensional da amostra da argamassa A4-10-0 ao longo de 91 dias, submetida a condições idênticas de ensaio em comparação à argamassa de referência, evidencia a eficiência da nanosilica na mitigação das reações expansivas decorrentes das altas temperaturas.

5.4.4 ANÁLISES MICROSCÓPICAS

As análises microscópicas obtidas no MEV evidenciam que as argamassas de referência submetidas à cura úmida apresentaram uma microestrutura normal, com poros preenchidos com portlandita e etringita primária, originadas nas reações de hidratação do cimento (Figura 5.20), zona de transição entre pasta e agregado sem presença de etringita (Figura 5.21a) e grão de Hadley preenchido com C-S-H (Figura 5.21b).

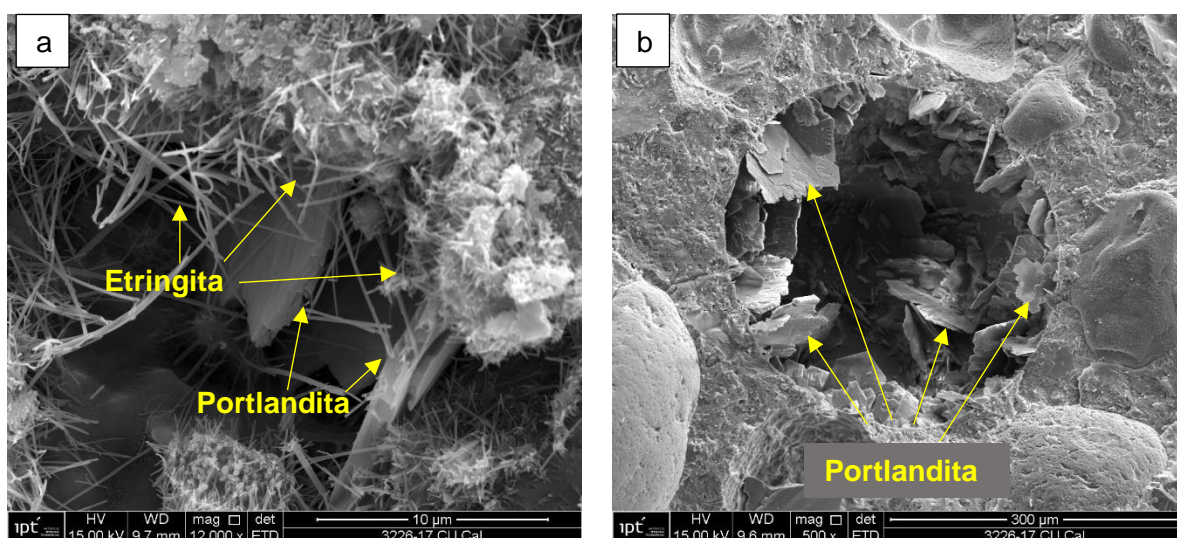


Figura 5.20 - Micrografia da argamassa de referência (A4-REF) submetida à cura úmida: poros preenchidos com portlandita e etringita primária.

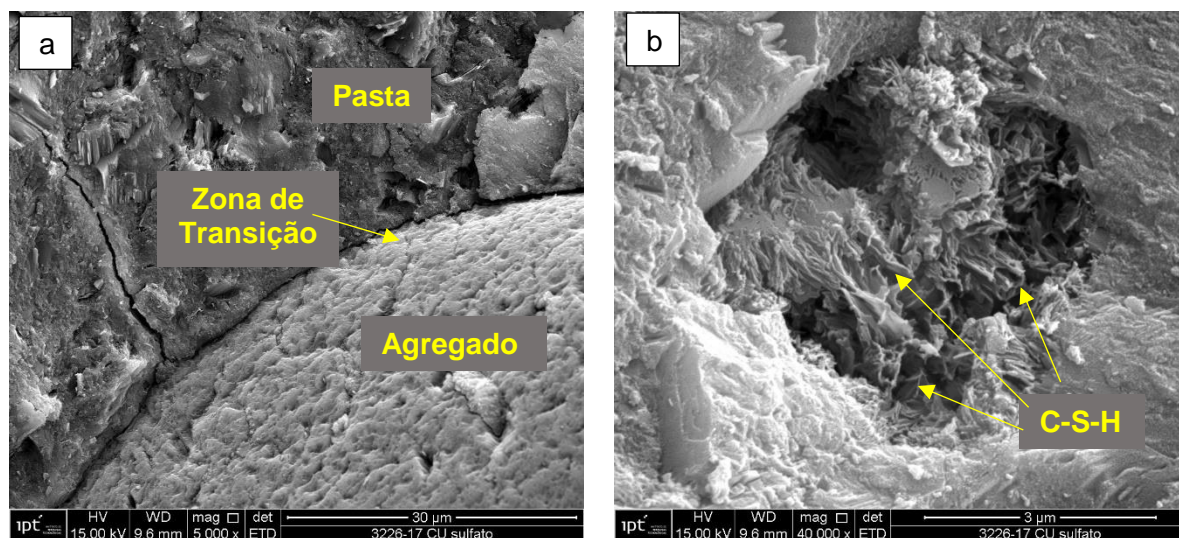


Figura 5.21 - Micrografia da argamassa de referência (A4-REF) submetida à cura úmida: a) zona de transição e b) grão de Hadley.

Do mesmo modo, as argamassas contendo 10% de nanosílica e submetidas à cura úmida apresentaram uma microestrutura normal. Nas bolhas de ar também foram encontradas placas hexagonais de Portlandita (Figura 5.22a), porém em menor quantidade se comparadas à A4-REF. Isso se dá devido as reações pozolânicas da nanosílica, que consome o CH para formação de C-S-H adicional. Na Figura 5.22b pode-se notar uma fissura formada na matriz cimentícia e não na zona de transição, indicando a eficiência da nanosílica na melhoria da interface pasta-agregado.

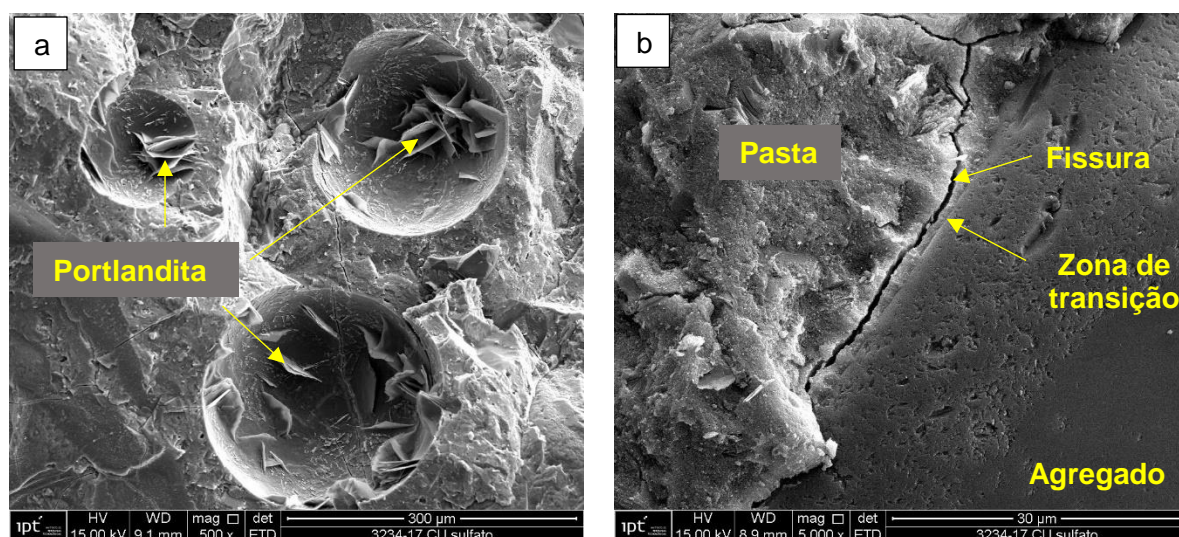


Figura 5.22 - Micrografia da argamassa com 10% de nanosílica (A4-10-0) submetida à cura úmida.

Ressalta-se que, apesar de terem sido observadas algumas fissuras nas amostras, estas não são, necessariamente, relacionadas às reações expansivas, principalmente devido à ausência de etringita nas regiões fissuradas.

Ao analisar as argamassas que foram submetidas à cura térmica, as imagens foram coerentes com os resultados obtidos no ensaio de variação dimensional. As argamassas de referência, que apresentaram expansão e completa fissuração antes mesmo dos 91 dias de ensaio, apresentaram grande quantidade de etringita na matriz cimentícia (Figura 5.23a). Além disso, observou-se que houve a formação de etringita na zona de transição, caracterizando um caso típico de DEF (Figuras 5.23b, 5.23c e 5.23d). Uma análise por espectroscopia de dispersão de energia (EDS) identificou picos de cálcio, enxofre e alumínio, confirmando a presença de etringita ($C_3A \cdot 3CS \cdot H_{32}$) (Figura 5.24).

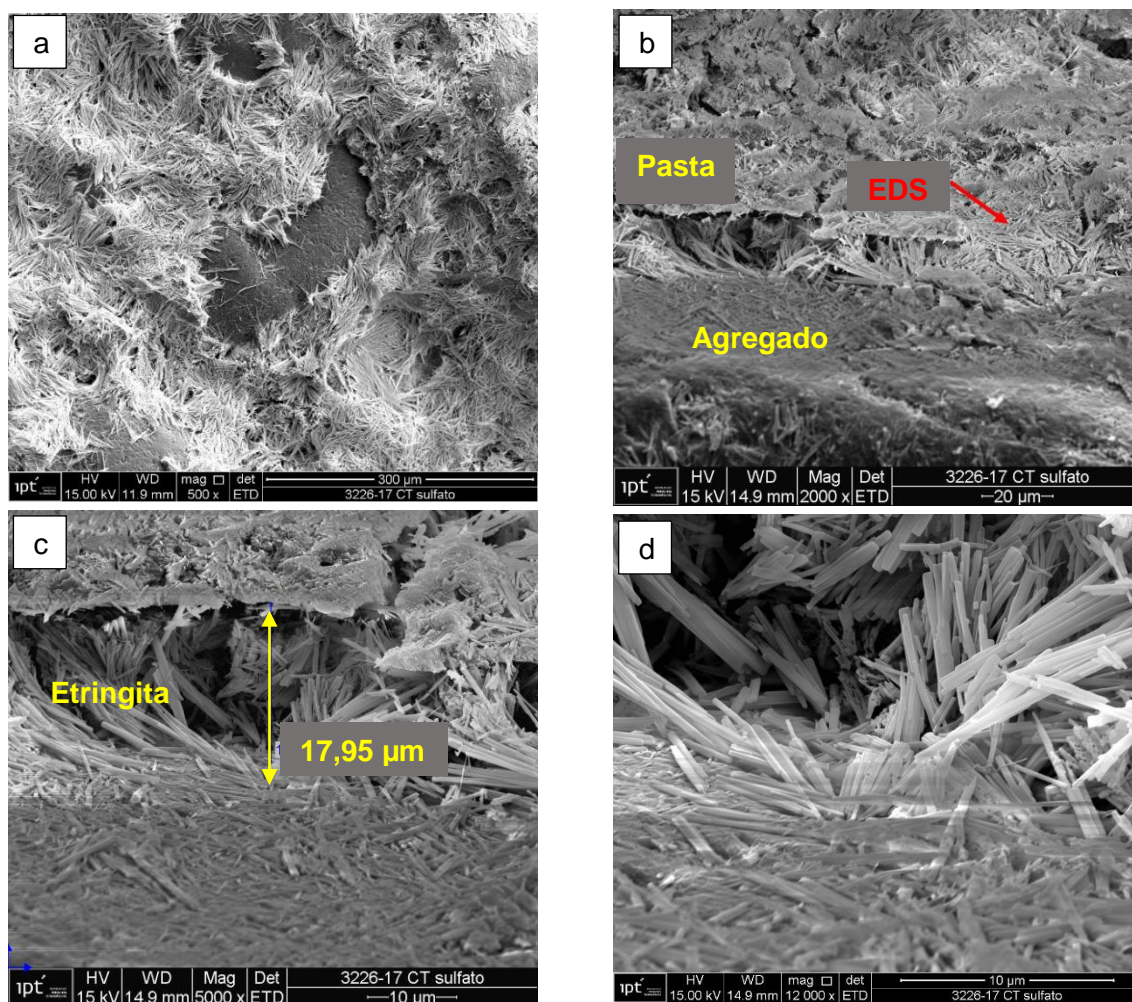


Figura 5.23 - Micrografia da argamassa A4-REF submetida à cura térmica e ao ataque externo de sulfatos: a) agregado envolto por etringita; b) Interface pasta agregado com agulhas de etringita e ponto de análise de EDS; c) e d) etringita presente na interface pasta agregado.

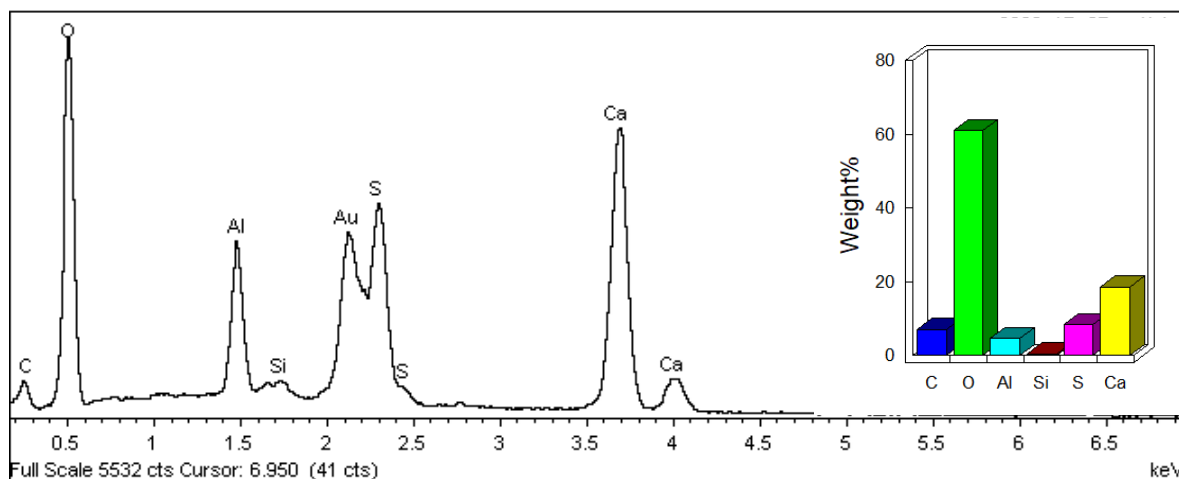


Figura 5.24 - Espectros de EDS da micrografia da argamassa A4-REF submetida à cura térmica e ao ataque externo de sulfatos, referente à Figura 5.23b.

A Figura 5.25 ilustra a micrografia da argamassa contendo 10% de nanosílica e submetidas à cura térmica.

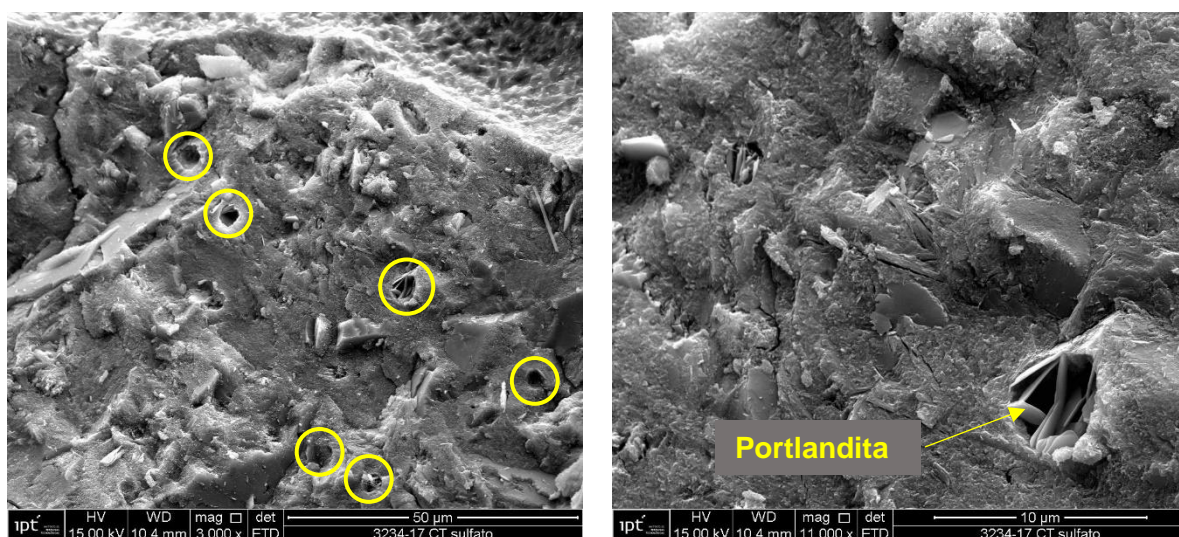


Figura 5.25 - Micrografia da argamassa com 10 % de nanosílica (A4-10-0) submetida à cura térmica.

Corroborando os resultados de variação dimensional, não foram identificadas anormalidades na microestrutura das argamassas A4-10-0, submetidas a cura térmica e posterior ataque externo de sulfatos. Entretanto, observou-se a presença de poros com diâmetro aproximado de 5 μm , em alguns casos, preenchidos com Portlandita.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos durante o desenvolvimento do programa experimental, pode-se concluir que:

- Os efeitos mais expressivos da nanosílica nas características mecânicas e físicas foram obtidos nas argamassas de relação a/agl igual a 0,50, aumentando 46% a resistência à compressão e reduzindo 72% a absorção de água por capilaridade, para 10% de adição. Esses resultados são atribuídos aos efeitos fíler e pozolânico da nanosílica, que contribuem para o refinamento da microestrutura da matriz cimentícia;
- Quanto ao uso combinado da nanosílica com a sílica ativa, não foram observadas melhorias significativas nas propriedades mecânicas e físicas das argamassas se comparadas com o uso isolado da nanosílica nos teores de 1 e 5%. Em casos como esse, a escolha entre qual tipo de composição utilizar deverá ser baseada no custo dos materiais;
- Em relação à durabilidade das argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque de sulfatos de origem externa e interna, não foi possível verificar os efeitos positivos da nanosílica, uma vez que ao longo dos 91 dias de ensaio não foram observados indícios de expansão decorrentes das reações entre os agentes agressivos e os produtos de hidratação do cimento;
- As altas temperaturas ($> 85^{\circ}\text{C}$) ocasionaram um ataque interno de sulfatos e induziram a formação de etringita tardia nas argamassas sem adições. Esta, por sua vez, potencializou os efeitos do ataque por sulfatos de origem externa, levando as argamassas à completa fissuração;
- A adição de 10% de nanosílica mitigou a formação de etringita tardia nas argamassas submetidas à cura térmica, uma vez que não houve expansão ao longo dos 91 dias.

- As análises microscópicas não identificaram evidências de etringita tardia nas argamassas submetidas à cura úmida e ao ataque externo e interno de sulfatos, apenas naquelas que foram submetidas à cura térmica à 85°C;
- Entre os teores analisados, o teor ideal de nanosílica coloidal a ser utilizado como adição em materiais cimentícios a fim de melhorar seu desempenho é de 10% em substituição ao cimento.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das conclusões obtidas, lista-se algumas sugestões para dar continuidade aos estudos:

- Prolongar o tempo de exposição das argamassas aos íons sulfato, de origem externa e interna, bem como estudar o ataque por diferentes tipos de sulfato (cálcio e magnésio);
- Aumentar a relação a/agl, ficando em conformidade com a NBR 13583:2014 (ABNT, 2014), com a finalidade de facilitar o ingresso dos íons de origem externa e verificar a influência da nanosílica como mitigadora desse tipo de ataque;
- Realizar outros ensaios que complementem o estudo do ataque por sulfatos, tais como perda de resistência e perda de massa após os ataques;
- Aprofundar o estudo microscópico em materiais cimentícios com uso de nanosílica submetidos à elevadas temperaturas, a fim de verificar qual seu papel no controle da formação de etringita tardia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-AMOUDI, A. S. B. Attack on plain and blended cements exposed to aggressive sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*. v. 24, p. 305-316, 2002.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ACI 318*. Building code requirements for structural concrete, 2014.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *C1012/C1012M -15*. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2015.

_____. *C1012/C1012M -18a*. Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution, 2018.

AREL, H. Ş.; THOMAS, B. S. The effects of nano- and micro-particle additives on the durability and mechanical properties of mortars exposed to internal and external sulfate attacks. *Results in Physics*, v. 7, p. 843-851, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 5733*: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.

_____. *NBR 5739*: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. *NBR 6118*: Projeto de estruturas de concreto armado. Rio de Janeiro, 2014.

_____. *NBR 7211*: Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

_____. *NBR 7215*: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. *NBR 7681*: Calda de cimento para injeção. Rio de Janeiro, 2013.

_____. *NBR 9779*: Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. *NBR 12655*: Concreto de cimento Portland – Preparo, Controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2015.

_____. *NBR 13276*: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. *NBR 13583*: Cimento Portland - Determinação da variação dimensional de barras de argamassa de Cimento Portland expostas à solução de sulfato de sódio. Rio de Janeiro, 2014.

_____. *NBR 14931*: Execução de estruturas de concreto - Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

_____. *NBR 15575*: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.

- _____. *NBR 15577: Agregados – Reatividade álcali-agregado*. Rio de Janeiro, 2008.
- _____. *NBR 15900: Água para amassamento do concreto*. Rio de Janeiro, 2009.
- _____. *NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. *NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. *NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios*. Rio de Janeiro, 2006.
- _____. *NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem*. Rio de Janeiro, 2003.
- _____. *NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas*. Rio de Janeiro, 2001.
- _____. *NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente*. Rio de Janeiro, 2009.
- ATAHAN, H. N.; ARSLAN, K. M. Improved durability of cement mortars exposed to external sulfate attack: The role of nano & micro additives. *Sustainable Cities and Society*, v. 22, p. 40-48, 2016.
- ATAHAN, H. N.; DIKME, D. Use of mineral admixtures for enhanced resistance against sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 25, p. 3450-3457, 2011.
- BAROGHEL-BOUNY, V.; CUSSIGH, F.; ROUGEAU, P. *Durabilidade dos concretos a partir da abordagem do desempenho*. Durabilidade do Concreto. Cap. 8, p. 237-254. São Paulo: IBRACON, 2014.
- BERRA, M.; CARASSITI, F.; MANGIALARDI, T.; PAOLINI, A. E.; SEBASTIANI, M. Effects of nanosilica addition on workability and compressive strength of Portland cement pastes. *Construction and Building Materials*, v. 35, p. 666-675, 2012.
- BONEM, D.; COHEN, M. D. Magnesium sulfate attack on Portland cement-paste – I. Microstructural analysis. *Cement and Concrete Research*, v. 22, p. 169-180. 1992.
- BONEM, D.; COHEN, M. D. Magnesium sulfate attack on Portland cement-paste – II. Chemical and mineralogical analyses. *Cement and Concrete Research*, v. 22, p. 707-718. 1992.
- BRAGANÇA, M. D. G. P. *Avaliação e monitoramento dos mecanismos de deterioração do concreto exposto aos íons cloreto e sulfato e o efeito da adição de nano-Fe₃O₄ por espectroscopia de impedância eletroquímica*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BROWN, P. W. An evaluation of the sulfate resistance of cements in a controlled environment. *Cement and Concrete Research*, v. 11, p. 719-727, 1981.
- BULATOVIĆ, V.; MELEŠEV, M.; RADEKA, M.; RADONJANIN, V.; LUKIĆ, I. Evaluation of sulfate resistance of concrete with recycled and natural aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 614-631, 2017.
- CAMPOS, A.; LÓPEZ, C. M.; AGUADO, A. Diffusion-reaction model for the internal sulfate attack in concrete. *Construction and Building Materials*, v. 102, p. 531-540, 2016.
- CASTRO, A. L. *Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- CASTRO, A.; FERREIRA, F. Effect of particle packing in the durability of high performance concretes. *Revista Ingeniería de Construcción*, v. 31, p. 91-104, 2016.

CEFIS, N.; COMI, C. Chemo-mechanical modelling of the external sulfate attack in concrete. *Cement and Concrete Research*, v. 93, p. 57-70, 2017.

CENTURIONE, S. L.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F. Durabilidade de concreto submetido a ataques de íons sulfato. In: XLVII Congresso Brasileiro de Cerâmica, João Pessoa. *Anais*. João Pessoa, 2003.

CESÁRIO, A. P.; SILVA, B. V. *Análise do desempenho do concreto utilizado em fundações submetido a ataque por sulfato*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade do Extremo Sul Catarinense, 2014.

CHEN, J.; QIAN, C.; SONG, H. A new chemo-mechanical model of damage in concrete under sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 115, p. 536-543, 2016.

CHITHRA, S.; SENTHIL KUMAR, S. R. R.; CHINNARAJU, K. The effect of Colloidal Nano-silica on workability, mechanical and durability properties of High Performance Concrete with Copper slag as partial fine aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 113, p. 794-804, 2016.

COELHO, E.; COSTA JUNIOR, M. P.; FRANCO, A.; CAMARINI, G. Influência da adição de nano-SiO₂ nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. In: 50° Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). *Anais*. Salvador, 2008.

COHEN, M. D.; BENTUR, A. Durability of portland cement-silica fume pastes in magnesium and sodium sulfate solutions. *Materials Journal*, v. 85, p. 148-157, 1988.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites*. v. 25, p. 401-407, 2003.

COSTA, R. M. *Análise de propriedades mecânicas do concreto deteriorado pela ação de sulfato mediante utilização do UPV*. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

DAL MOLIN, D. C. C. *Adições Minerais*. Concreto: Ciência e Tecnologia. v. 1, cap. 08, p. 261-309. São Paulo: IBRACON, 2011.

DE LARRARD, F.; BOSCH, F.; CATHERINE, C.; DEFLORENNE, F. The AFREM method for the mix-design of high performance concrete. *Materials and Structures*, v. 30, p. 439-446, 1997.

DELGADO, A.; TALERO, R.; TÉLLEZ, E.; BAYARRI, R.; FORTUÑO, J. M.; POMPIANO, R. B. Nanosílíce estabilizada y microsílíce para materiales cementantes expuestos al ambiente marino. Aplicación al caso del Mar Caribe. p. 1-16, 2012.

ESCADEILLAS, G.; HORNAIN, H. *A durabilidade do concreto frente a ambientes quimicamente agressivos*. Durabilidade do Concreto. Cap. 11, p. 433-507. São Paulo: IBRACON, 2014

ESPECIFICAÇÃO LNEC E464. Betões - Metodologia prescritiva para a vida útil de projecto de 50 anos face às acções ambientais. LNEC, Lisboa, 2005.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. EN, NP 206-1. Betão - Parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade. Lisboa, 2007.

FERRARIS, C. F.; CLIFTON, J. R.; STUTZMAN, P. E.; GARBOCZI, E. J. Mechanisms of degradation of Portland cement-based systems by sulfate attack. *Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems*, p. 185-192, 1997.

GANESH, P.; MURTHY, A. R.; KUMAR, S. S.; REHEMAN, M. M.; IYER, N. R. Effect of nanosilica on durability and mechanical properties of high-strength concrete. *Magazine of Concrete Research*, v. 68, p. 229-236, 2016.

- GHAFOORI, N.; BATILOV, I. B.; NAJIMI, M. Sulfate resistance of nanosilica and microsilica contained mortars. *ACI Materials Journal*, v. 113, p. 459-469, 2016.
- GLEIZE, P. J. P. *Nanotecnologia e materiais de construção*. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais. v. 2, p. 1659-1685. São Paulo: IBRACON, 2007.
- GOMIDES, M. J. *Ataque por sulfatos ao concreto compactado com rolo*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2001.
- HELENE, P. R. L. *Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado*. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HELENE, P. TERZIAN, P. Manual de dosagem e controle do concreto, São Paulo: PINI; Brasília: SENAI, 1992.
- HOPPE FILHO, J.; SOUZA, D. J.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; PORTELLA, K.F. Ataque de matrizes cimentícias por sulfatos de sódio: adições minerais como agentes mitigadores. *Cerâmica*. v. 61, p. 168-177, 2015.
- IKUMI, T.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I.; AGUADO, A. Alternative methodology to consider damage and expansions in external sulfate attack modeling. *Cement and Concrete Research*, v. 63, p. 105-116, 2014.
- IKUMI, T.; CAVALARO, S. H. P.; SEGURA, I.; DE LA FUENTE, A.; AGUADO, A. Simplified methodology to evaluate the external sulfate attack in concrete structures. *Materials and Design*, v. 89, p. 1147-1160, 2016.
- IRASSAR, E. F. Sulfate attack in cementitious materials containing limestone filler – A review. *Cement and Concrete Research*, v. 39, p. 241-254, 2009.
- Jl, T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 1943-1947, 2005.
- JIANG, L.; NIU, D. Study of deterioration of concrete exposed to different types of sulfate solutions under drying-wetting cycles. *Construction and Building Materials*, v. 117, p. 88-98, 2016.
- JOSHAGHANI, A.; MOEINI, M. A. Evaluating the effects of sugar cane bagasse ash (SCBA) and nanosilica on the mechanical and durability properties of mortar. *Construction and Building Materials*, v. 152, p. 818-831, 2017.
- LEE, H.; CODY, R. D.; CODY, A. M.; SPRY, P. G. The formation and role of ettringite in Iowa highway concrete deterioration. *Cement and Concrete Research*, v. 35, p. 332-343, 2005.
- LI, L. G.; HUANG, Z. H.; ZHU, J.; KWAN, A. K. H.; CHEN, H. Y. Synergistic effect of microsilica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. *Construction and Building Materials*, v. 140, p. 229-238, 2017.
- LIM, S.; MONDAL, P. Effects of incorporating nanosilica on carbonation of cement paste. *Journal of Materials Science*, v. 50, p. 3531-3540, 2015.
- LINHARES, B. T. *Avaliação do desempenho de cimentos CII E e CIII F com diferentes teores de pozolana frente ao ataque de íons sulfato*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.
- MA, X.; ÇOPUROĞLU, O.; SCHLANGEN, E.; HAN, N.; XING, F. Expansion and degradation of cement paste in sodium sulfate solutions. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 410-422, 2018.

- MASSAAD, G.; ROZIÈRE, E.; LOUKILI, A.; IZORET, L. Do the geometry and aggregates size influence external sulfate attack mechanism?. *Construction and Building Materials*, v. 157, p. 778-789, 2017.
- MATHER, B. Concrete durability. *Cement and Concrete Composites*, v. 26, p. 3-4, 2004.
- MEHTA, P. K. Mechanism of sulfate attack on portland cement concrete - Another look. *Cement and Concrete Research*. v. 13, p. 401-406, 1983.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. São Paulo: IBRACON, 2014.
- MELO, A. B. *Influência da cura térmica (vapor) sob pressão atmosférica no desenvolvimento da microestrutura dos concretos de cimento Portland*. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2000.
- MOSTOFINEJAD, D.; NOSOUHIAN, F.; NAZARI-MONFARED, H. Influence of magnesium sulphate concentration on durability of concrete containing micro-silica, slag and limestone powder using durability index. *Construction and Building Materials*, v. 117, p. 107-120, 2016.
- MOURA, E. C.; COSTA JR., M. P.; FRANCO, A.; CAMARINI, G. Influência da adição da nano-SiO₂ nas propriedades mecânicas e físicas do concreto. In: 50° Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON). *Anais*. Salvador, 2008.
- MOURA, W. A. *Utilização de Escória de Cobre como adição e como agregado miúdo para concreto*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. Bookman Editora, 2015.
- PAMPLONA, A. D. G.; TORRES, J. R. A utilização do concreto de alto desempenho na construção do Porto do Pecém. *Soluções Silmix*, v. 4, p. 4-5, 2003.
- PATTALI, A.; MATHEW, B. An experimental investigation on strength properties of concrete containing micro-silica and nano-silica. *International Research Journal of Engineering and Technology*, v. 4, p. 1692-1694, 2017.
- PAULON, V.; KIRCHHEIM, A. P. *Nanoestrutura e Microestrutura do Concreto Endurecido*. *Concreto: Ciência e Tecnologia*. v. 1, cap. 16, p. 585-614. São Paulo: IBRACON, 2011.
- PEREIRA, E. *Investigação e monitoramento do ataque por sulfatos de origem interna em concretos nas primeiras idades*. Tese (Doutorado). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2015.
- PIASTA, W. Analysis of carbonate and sulphate attack on concrete structures. *Engineering Failure Analysis*, v. 79, p. 606-614, 2017.
- PREFEITURA DE SÃO PAULO. SECRETARIA DE SERVIÇOS. *Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo*. São Paulo, 2014.
- QING, Y.; ZENAN, Z.; DEYU, K. RONGSHEN, C. Influence of nano-SiO₂ addition on properties of hardened cement paste as compared with silica fume. *Construction and Building Materials*, v. 21, p. 539-545, 2007.
- QUARCIONI, V. A. Reconstituição de traço de argamassas: atualização do Método IPT. Dissertação (Mestrado) Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998.
- REINHEIMER, B.; KHOE, S. S. *Ataque por sulfatos em estações de tratamento de efluentes*. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- ROUGEAU, P.; GUIRAUD, P. *A durabilidade no contexto normativo europeu*. In: Durabilidade do Concreto. Cap. 7, p. 209-236. São Paulo: IBRACON, 2014.

- SAHU, S.; THAULOW, N. Delayed ettringite formation on Swedish concrete railroad ties. *Cement and Concrete Research*, v. 34, p. 1675-1681, 2004.
- SALVADOR FILHO, J. A. A. *Cura térmica dos concretos de alto desempenho: análise das propriedades mecânicas utilizando o método da maturidade*. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2001.
- SANCHEZ, F.; SOBOLEV, K. Nanotechnology in concrete – A review. *Construction and Building Materials*, v. 24, p. 2060-2071, 2010
- SANTHANAM, M.; COHEN, M. D.; OLEK, J. Sulfate attack research – whither now?. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 845-851, 2001.
- SCHMALZ, R.; FERREIRA, F. G. S.; QUARCIONI, V. A. Argamassas com incorporação de sílica e nanosilica: avaliação de propriedades mecânica e física. In: II Simpósio Paranaense de Patologia de Construção. *Anais*. Curitiba, 2017.
- SCRIVENER, K.; SKALNY, J. P. Conclusions of the International RILEM TC 186-ISA Workshop on Internal Sulfate Attack and Delayed Ettringite Formation (4-6 September 2002, Villars, Switzerland). *Materials and Structures*. v. 38, p. 659-663, 2005.
- SEFFF, L.; LABRINCHA, J. A.; FERREIRA, V. M.; HOTZA, D.; REPETTE, W. L. Effect of nano-silica on rheology and fresh properties of cement pastes and mortars. *Construction and Building Materials*, v. 23, p. 2487–2491, 2009.
- SHARKAWI, A. M.; ABD-ELATY, M. A.; KHALIFA, O. H. Synergistic influence of micro-nano silica mixture on durability performance of cementitious materials. *Construction and Building Materials*, v. 164, p. 579-588, 2018.
- SILVA FILHO, L. C. P. *Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito da permeação de água e da adição de microssilica*. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- SILVA, F. G. *Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos*. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.
- SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. Consumo anual de cimento. Disponível em: <<http://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>>.
- SINGH, L. P.; KARADE, S. R.; BHATTACHARYYA, S. K.; YOUSUF, M. M.; AHALAWAT, S. Beneficial role of nanosilica in cement based materials – A review. *Construction and Building Materials*, v. 47, p. 1069-1077, 2013.
- SITTER, W. R. Costs for service life optimization: the law of fives. In: Durability of Concrete Structures. *Workshop Report*. p. 131-134, 1984.
- SONG, H.; CHEN, J.; JIANG, J. An internal expansive stress model of concrete under sulfate attack. *Acta Mechanica Solida Sinica*, v. 29, p. 610-619, 2016.
- SOUZA, R. B. *Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – método de ensaio acelerado*. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 683-693, 2001.
- TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 135, p. 335-342, 2017.
- THOMAZ, E. *Execução, controle e desempenho das estruturas de concreto*. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. v. 1, cap. 18, p. 527-581. São Paulo: IBRACON, 2005.

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Performance-based Standard Specifications for Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. *Structural Engineering International*, v. 4, p. 359-366, 2007.

USTABAŞ, İ.; ERDOĞDU, Ş. Performance of mortars incorporating fly ash, silica fume, blast furnace slag at different temperature in magnesium sulfate solution. *Turkish Journal of Materials*, v. 1, p. 1-14, 2016.

VERA-AGULLO, J.; CHOZAS-LIGERO, V.; PORTILLO-RICO, D.; GARCÍA-CASAS M. J.; GUTIÉRREZ-MARTÍNEZ, A.; MIERES-ROYO, J. M.; GRÁVALOS-MORENO, J. Mortar and Concrete Reinforced with Nanomaterials. In: *Nanotechnology in Construction 3*. p, 383-388. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009.

VIEIRA, F. P; KULAKOWSKI, M. P; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, A. C. F. *Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de microssilica*. 2007.

WANG, D.; ZHOU, X.; MENG, Y.; CHEN, Z. Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 147, p. 398-406, 2017.

YU, Y.; ZHANG, Y. X. Numerical modelling of mechanical deterioration of cement mortar under external sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 158, p. 490-502, 2018.

ZHANG, Z.; OLEK, J.; DIAMOND, S. Studies on delayed ettringite formation in early-age, heat-cured mortars I. Expansion measurements, changes in dynamic modulus of elasticity, and weight gains. *Cement and Concrete Research*, v. 32, p. 1729-1736, 2002.

ZHUTOVSKY, S.; HOOTON, R. D. Accelerated testing of cementitious materials for resistance to physical sulfate attack. *Construction and Building Materials*, v. 145, p. 98-106, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A

RESISTÊNCIA MECÂNICA - ANÁLISES ESTATÍSTICAS

- Condições: $a/agl = 0,40$; Idade: 1 dia.

Tabela A.1 – Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 1 dia.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	29,63	28,14	25,01	23,10	25,66
2	31,28	26,83	26,14	24,36	25,09
3	29,72	29,47	25,68	22,82	24,61

Tabela A.2 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 1 dia.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A4-REF	3	90,63	30,21	0,860
A4-1-0	3	84,44	28,15	1,742
A4-5-0	3	76,83	25,61	0,323
A4-10-0	3	70,28	23,43	0,673
A4-1-10	3	75,36	25,12	0,276

Tabela A.3 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 1 dia.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	85,852	4	21,463	27,692	2,17E-05	3,478
Dentro dos grupos	7,751	10	0,775			
Total	93,603	14		Conclusão: Rejeitar H_0		

Tabela A.4 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 1 dia.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	não	sim	sim	sim
A4-1-0	-	sim	sim	sim
A4-5-0	-	-	não	não
A4-10-0	-	-	-	não

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: $a/agl = 0,40$; Idade: 7 dias.

Tabela A.5 - Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	60,46	58,08	61,19	55,35	57,98
2	61,57	58,50	57,37	55,68	61,11
3	62,08	58,09	58,50	57,16	59,12

Tabela A.6 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A4-REF	3	184,11	61,37	0,686
A4-1-0	3	174,67	58,22	0,057
A4-5-0	3	177,06	59,02	3,851
A4-10-0	3	168,19	56,06	0,929
A4-1-10	3	178,21	59,40	2,509

Tabela A.7 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	44,514	4	11,128	6,927	2,17E-05	3,478
Dentro dos grupos	16,066	10	1,607			
Total	60,580	14				

Conclusão: Rejeitar H_0

Tabela A.8 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	não	não	sim	não
A4-1-0	-	não	não	não
A4-5-0	-	-	não	não
A4-10-0	-	-	-	não

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: $a/agl = 0,40$; Idade: 28 dias.

Tabela A.9 - Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	65,79	68,62	72,88	69,11	71,25
2	69,67	70,64	68,30	73,32	72,91
3	65,44	72,54	72,76	*	*

* Valores não obtidos devido à falha no equipamento de ensaio.

Tabela A.10 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A4-REF	3	200,90	66,97	5,512
A4-1-0	3	211,80	70,60	3,843
A4-5-0	3	213,94	71,31	6,814
A4-10-0	2	142,43	71,22	8,862
A4-1-10	2	144,16	72,08	1,378

Tabela A.11 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	44,661	4	11,165	2,098	0,173	3,838
Dentro dos grupos	42,576	8	5,322			
Total	87,237	12				

Conclusão: Aceitar H_0

- Condições: $a/agl = 0,50$; Idade: 1 dia.

Tabela A.12 – Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 1 dia.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A5-REF	A5-1-0	A5-5-0	A5-10-0	A5-1-10
1	20,90	20,90	22,87	21,82	20,34
2	19,55	22,60	21,72	21,97	19,24
3	21,03	20,94	22,42	20,44	20,91

Tabela A.13 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 1 dia.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A5-REF	3	61,48	20,49	0,672
A5-1-0	3	64,44	21,48	0,941
A5-5-0	3	67,01	22,34	0,336
A5-10-0	3	64,23	21,41	0,711
A5-1-10	3	60,49	20,16	0,721

Tabela A.14 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 1 dia.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	8,958	4	2,239	3,312	0,057	3,478
Dentro dos grupos	6,761	10	0,676			
Total	15,719	14				

Conclusão: Aceitar H₀

- Condições: a/agl = 0,50; Idade: 7 dias.

Tabela A.15 - Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A5-REF	A5-1-0	A5-5-0	A5-10-0	A5-1-10
1	42,41	40,46	45,65	*	43,50
2	39,84	41,16	47,22	51,71	46,52
3	39,53	41,49	43,64	50,75	44,29

* Valores não obtidos devido à falha no equipamento de ensaio.

Tabela A.16 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A5-REF	3	121,78	40,59	2,499
A5-1-0	3	123,11	41,04	0,277
A5-5-0	3	136,51	45,50	3,220
A5-10-0	2	102,46	51,23	0,461
A5-1-10	3	134,31	44,77	2,453

Tabela A.17 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	173,928	4	43,482	22,544	1,04E-04	3,633
Dentro dos grupos	17,359	9	1,929			
Total	191,287	13		Conclusão: Rejeitar H ₀		

Tabela A.18 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias.

Argamassas	A5-1-0	A5-5-0	A5-10-0	A5-1-10
A5-REF	não	sim	sim	sim
A5-1-0	-	sim	sim	não
A5-5-0	-	-	sim	não
A5-10-0	-	-	-	sim

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: a/agl = 0,50; Idade: 28 dias.

Tabela A.19 - Resistência à compressão das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias.

Nº CP	Resistência à compressão (MPa)				
	A5-REF	A5-1-0	A5-5-0	A5-10-0	A5-1-10
1	47,63	47,16	*	*	57,89
2	40,69	46,93	59,32	66,59	55,14
3	43,42	45,47	51,89	61,69	56,79

* Valores não obtidos devido à falha no equipamento de ensaio.

Tabela A.20 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias.

Grupo	Contagem	Soma (MPa)	Média (MPa)	Variância (MPa ²)
A5-REF	3	131,74	43,91	12,223
A5-1-0	3	139,56	46,52	0,840
A5-5-0	2	111,21	55,61	27,602
A5-10-0	2	128,28	64,14	12,005
A5-1-10	3	169,82	56,61	1,916

Tabela A.21 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	669,054	4	167,264	19,235	3,63E-04	3,838
Dentro dos grupos	69,566	8	8,696			
Total	738,621	12		Conclusão: Rejeitar H_0		

Tabela A.22 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias.

Argamassas	A5-1-0	A5-5-0	A5-10-0	A5-1-10
A5-REF	não	sim	sim	sim
A5-1-0	-	não	sim	sim
A5-5-0	-	-	não	não
A5-10-0	-	-	-	não

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

APÊNDICE B

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE – ANÁLISES ESTATÍSTICAS

- Condições: a/agl = 0,40; Idade: 7 dias; Leitura: 72 horas.

Tabela B.1 – Absorção capilar das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias após 72 horas.

Nº CP	Absorção capilar (g/cm ²)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	0,514	0,439	0,223	0,184	0,200
2	0,498	0,501	0,296	0,145	0,217
3	0,518	0,453	0,220	0,153	0,236

Tabela B.2 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias após 72 horas.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
A4-REF	3	1,53	0,51	0,000
A4-1-0	3	1,39	0,46	0,001
A4-5-0	3	0,74	0,25	0,002
A4-10-0	3	0,48	0,16	0,000
A4-1-10	3	0,65	0,22	0,000

Tabela B.3 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias após 72 horas.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	0,295	4	0,074	97,273	5,80E-08	3,478
Dentro dos grupos	0,008	10	0,001			
Total	0,303	14		Conclusão: Rejeitar H ₀		

Tabela B.4 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 7 dias após 72 horas.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	não	sim	sim	sim
A4-1-0	-	sim	sim	sim
A4-5-0	-	-	sim	não
A4-10-0	-	-	-	não

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: a/agl = 0,40; Idade: 28 dias; Leitura: 72 horas.

Tabela B.5 – Absorção capilar das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias após 72 horas.

Nº CP	Absorção capilar (g/cm ²)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	0,436	0,368	0,268	0,152	0,218
2	0,456	0,361	0,280	0,187	0,203
3	0,423	0,357	0,271	0,149	0,184

Tabela B.6 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias após 72 horas.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
A4-REF	3	1,32	0,44	0,000
A4-1-0	3	1,09	0,36	0,000
A4-5-0	3	0,82	0,27	0,000
A4-10-0	3	0,49	0,16	0,000
A4-1-10	3	0,61	0,20	0,000

Tabela B.7 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias após 72 horas.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	0,154	4	0,039	176,326	3,167E-09	3,478
Dentro dos grupos	0,002	10	0,000			
Total	0,156	14		Conclusão: Rejeitar H ₀		

Tabela B.8 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,40 na idade de 28 dias após 72 horas.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	sim	sim	sim	sim
A4-1-0	-	sim	sim	sim
A4-5-0	-	-	sim	sim
A4-10-0	-	-	-	não

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: a/agl = 0,50; Idade: 7 dias; Leitura: 72 horas.

Tabela B.9 – Absorção capilar das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias após 72 horas.

Nº CP	Absorção capilar (g/cm ²)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	1,157	1,108	0,549	0,233	0,417
2	1,225	1,092	0,589	0,193	0,403
3	1,277	1,076	0,565	0,191	0,419

Tabela B.10 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias após 72 horas.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
A4-REF	3	3,66	1,22	0,004
A4-1-0	3	3,28	1,09	0,000
A4-5-0	3	1,70	0,57	0,000
A4-10-0	3	0,62	0,21	0,001
A4-1-10	3	1,24	0,41	0,000

Tabela B.11 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias após 72 horas.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	2,303	4	0,576	586,632	8,227E-12	3,478
Dentro dos grupos	0,010	10	0,001			
Total	2,313	14		Conclusão: Rejeitar H ₀		

Tabela B.12 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 7 dias após 72 horas.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	sim	sim	sim	sim
A4-1-0	-	sim	sim	sim
A4-5-0	-	-	sim	sim
A4-10-0	-	-	-	sim

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

- Condições: a/agl = 0,50; Idade: 28 dias; Leitura: 72 horas.

Tabela B.13 – Absorção capilar das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias após 72 horas.

Nº CP	Absorção capilar (g/cm ²)				
	A4-REF	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
1	1,076	0,845	0,617	0,307	0,445
2	1,084	0,955	0,519	0,317	0,458
3	1,019	1,031	0,585	0,280	0,500

Tabela B.14 – Valores estatísticos descritivos das argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias após 72 horas.

Grupo	Contagem	Soma (g/cm ²)	Média (g/cm ²)	Variância ((g/cm ²) ²)
A4-REF	3	3,18	1,06	0,001
A4-1-0	3	2,83	0,94	0,009
A4-5-0	3	1,72	0,57	0,003
A4-10-0	3	0,90	0,30	0,000
A4-1-10	3	1,40	0,47	0,001

Tabela B.15 – ANOVA para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias após 72 horas.

Fonte da variação	Soma dos quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Fcalc.	p-valor	Fcrítico
Entre grupos	1,239	4	0,310	113,523	2,737E-08	3,478
Dentro dos grupos	0,027	10	0,003			
Total	1,266	14		Conclusão: Rejeitar H ₀		

Tabela B.16 – Teste de Tukey para as argamassas de relação a/agl igual a 0,50 na idade de 28 dias após 72 horas.

Argamassas	A4-1-0	A4-5-0	A4-10-0	A4-1-10
A4-REF	sim	sim	sim	sim
A4-1-0	-	sim	sim	sim
A4-5-0	-	-	sim	não
A4-10-0	-	-	-	sim

Obs.: não = não há diferença significativa; sim = há diferença significativa.

APÊNDICE C

VARIAÇÃO DIMENSIONAL – EXPANSÃO INDIVIDUAL E EXPANSÃO MÉDIA

Tabela C.1 - Expansão individual das argamassas de referência submetidas à cura úmida.

Argamassas	CP	Expansão individual (%)				
		0	14	28	42	91
A4-REF CAL	1	0,000	-0,062	-0,067	-0,062	-0,050
	2	0,000	-0,058	-0,063	-0,058	-0,019
	3	0,000	-0,049	-0,057	-0,052	-0,035
	4	0,000	-0,013	-0,020	-0,011	0,016
A4-REF EXT	1	0,000	-0,068	-0,067	-0,061	-0,066
	2	0,000	-0,068	-0,068	-0,066	-0,071
	3	0,000	-0,066	-0,069	-0,063	-0,070
	4	0,000	-0,065	-0,068	-0,061	-0,067
A4-REF INT	1	0,000	-0,057	-0,059	-0,058	-0,067
	2	0,000	-0,057	-0,061	-0,057	-0,060
	3	0,000	-0,053	-0,060	-0,057	-0,062
	4	0,000	-0,053	-0,057	-0,055	-0,053
A5-REF CAL	1	0,000	-0,077	-0,083	-0,078	-0,030
	2	0,000	-0,018	-0,022	-0,018	0,003
	3	0,000	-0,029	-0,034	-0,029	-0,005
	4	0,000	-0,083	-0,083	-0,080	-0,057
A5-REF EXT	1	0,000	-0,004	-0,004	0,000	-0,001
	2	0,000	-0,063	-0,065	-0,058	-0,058
	3	0,000	-0,063	-0,064	-0,058	-0,058
	4	0,000	-0,075	-0,067	-0,059	-0,061
A5-REF INT	1	0,000	-0,009	-0,016	-0,004	-0,023
	2	0,000	-0,054	-0,060	-0,057	-0,067
	3	0,000	-0,011	-0,012	-0,017	-0,024
	4	0,000	-0,055	-0,058	-0,061	-0,067

Tabela C.2 - Expansão individual das argamassas com 10% de nanosílica submetidas à cura úmida.

Argamassas	CP	Expansão individual (%)				
		0	14	28	42	91
A4-10-0 CAL	1	0,000	0,013	0,017	0,019	0,007
	2	0,000	0,019	0,024	0,019	0,013
	3	0,000	0,016	0,021	0,017	0,013
	4	0,000	0,012	0,011	0,016	0,014
A4-10-0 EXT	1	0,000	0,012	0,018	0,018	0,009
	2	0,000	0,016	0,020	0,021	0,018
	3	0,000	0,012	0,016	0,016	0,016
	4	0,000	0,012	0,017	0,013	0,005
A4-10-0 INT	1	0,000	0,011	0,012	0,011	0,011
	2	0,000	0,012	0,017	0,014	0,014
	3	0,000	0,014	0,020	0,017	0,018
	4	0,000	0,012	0,019	0,014	0,020
A5-10-0 CAL	1	0,000	0,018	0,020	0,020	0,009
	2	0,000	0,014	0,020	0,025	0,016
	3	0,000	0,023	0,019	0,034	0,031
	4	0,000	0,016	0,018	0,055	0,012
A5-10-0 EXT	1	0,000	0,018	0,018	0,019	0,018
	2	0,000	0,012	0,012	0,011	-0,011
	3	0,000	0,014	0,019	0,018	0,016
	4	0,000	0,014	0,018	0,018	0,012
A5-10-0 INT	1	0,000	0,014	0,021	0,018	0,016
	2	0,000	0,013	0,018	0,016	0,018
	3	0,000	0,015	0,020	0,014	0,018
	4	0,000	0,016	0,020	0,017	0,019

Tabela C.3 - Expansão individual das argamassas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa submetidas à cura úmida.

Argamassas	CP	Expansão individual (%)				
		0	14	28	42	91
A4-1-10 CAL	1	0,000	0,014	0,020	0,018	0,017
	2	0,000	0,016	0,020	0,021	0,020
	3	0,000	0,009	0,015	0,016	0,016
	4	0,000	0,012	0,021	0,019	0,019
A4-1-10 EXT	1	0,000	0,014	0,020	0,020	0,018
	2	0,000	0,009	0,015	0,011	0,009
	3	0,000	0,011	0,019	0,019	0,017
	4	0,000	0,014	0,019	0,019	0,016
A4-1-10 INT	1	0,000	0,014	0,020	0,023	0,023
	2	0,000	0,015	0,028	0,023	0,025
	3	0,000	0,015	0,023	0,023	0,024
	4	0,000	0,013	0,021	0,022	0,024
A5-1-10 CAL	1	0,000	0,014	0,022	0,016	0,016
	2	0,000	0,014	0,021	0,021	0,021
	3	0,000	0,016	0,022	0,022	0,021
	4	0,000	0,014	0,021	0,021	0,021
A5-1-10 EXT	1	0,000	0,013	0,019	0,021	0,024
	2	0,000	0,014	0,021	0,013	0,016
	3	0,000	0,013	0,019	0,018	0,017
	4	0,000	0,015	0,021	0,021	0,022
A5-1-10 INT	1	0,000	0,012	0,020	0,020	0,020
	2	0,000	0,014	0,017	0,017	0,017
	3	0,000	0,014	0,020	0,022	0,023
	4	0,000	0,005	0,012	0,011	0,012

Tabela C.4 - Expansão individual das argamassas de referência submetidas à cura térmica.

Argamassas	CP	Expansão individual (%)				
		0	14	28	42	91
A4-REF CAL	1	0,000	0,021	0,023	0,017	0,005
	2	0,000	0,018	0,018	0,013	0,004
	3	0,000	0,021	0,021	0,017	0,009
	4	0,000	0,020	0,022	0,016	0,008
A4-REF EXT	1	0,000	0,020	0,026	0,030	Fissuração
	2	0,000	0,027	0,032	0,041	
	3	0,000	0,028	0,031	0,034	
	4	0,000	0,027	0,034	0,037	
A4-REF INT	1	0,000	0,020	0,012	0,008	0,007
	2	0,000	0,022	0,015	0,009	0,007
	3	0,000	0,005	-0,004	-0,013	-0,022
	4	0,000	0,021	0,013	0,011	0,005

Tabela C.5 - Expansão individual das argamassas com 10% de nanosilica submetidas à cura térmica.

Argamassas	CP	Expansão individual (%)				
		0	14	28	42	91
A4-10-0 CAL	1	0,000	0,012	0,016	0,016	0,006
	2	0,000	0,022	0,025	0,021	0,011
	3	0,000	0,023	0,027	0,023	0,016
	4	0,000	0,022	0,025	0,022	0,012
A4-10-0 EXT	1	0,000	0,022	0,026	0,023	0,013
	2	0,000	0,022	0,023	0,017	0,008
	3	0,000	0,021	0,023	0,019	0,012
	4	0,000	0,021	0,023	0,021	0,014
A4-10-0 INT	1	0,000	0,022	0,016	0,008	0,007
	2	0,000	0,028	0,023	0,018	0,019
	3	0,000	0,026	0,024	0,017	0,012
	4	0,000	0,026	0,022	0,020	0,016

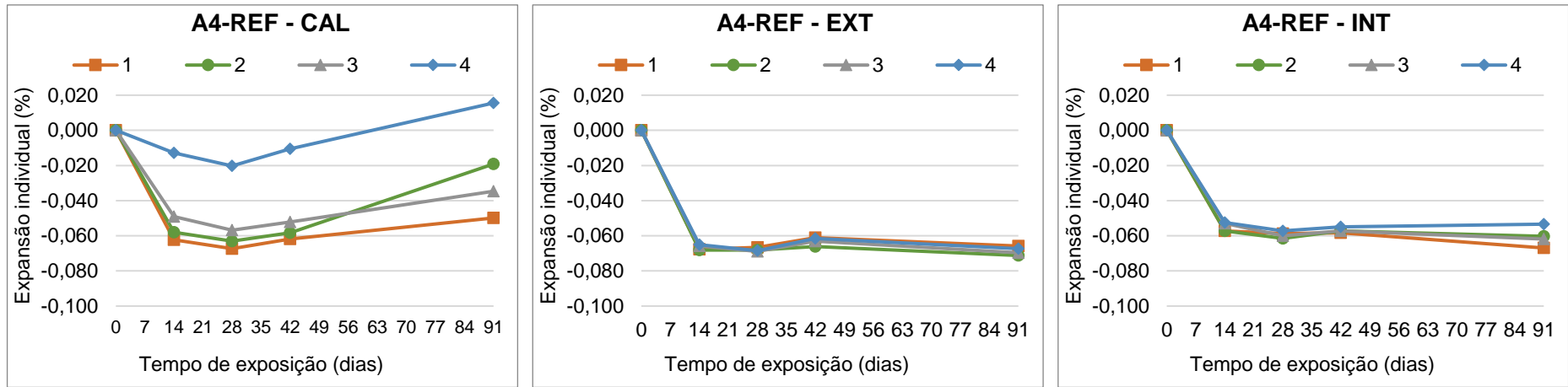


Figura C.1 – Expansão individual das argamassas de referência de relação a/agl igual a 0,40 submetidas à cura úmida.

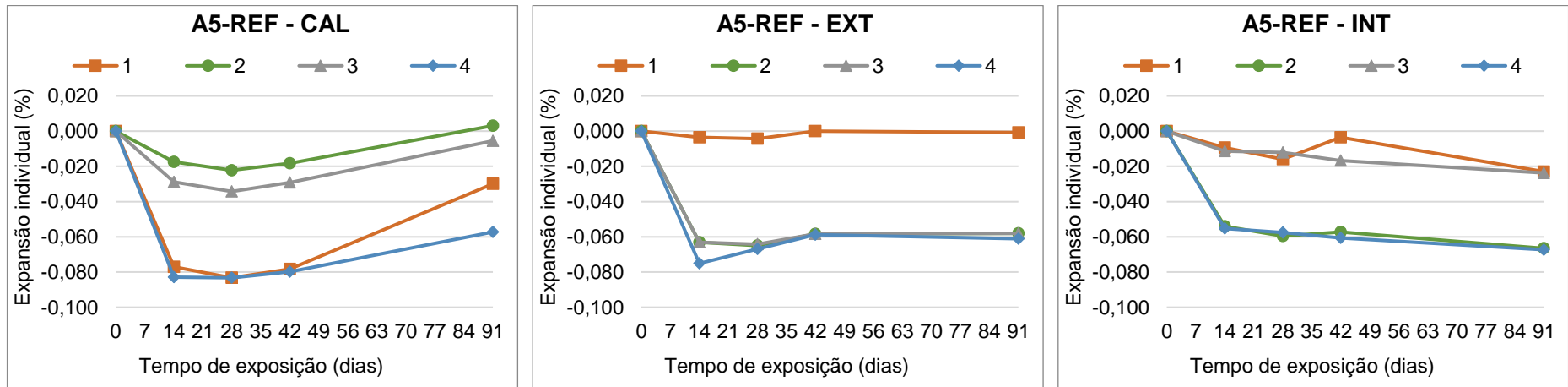


Figura C.2 - Expansão individual das argamassas de referência de relação a/agl igual a 0,50 submetidas à cura úmida.

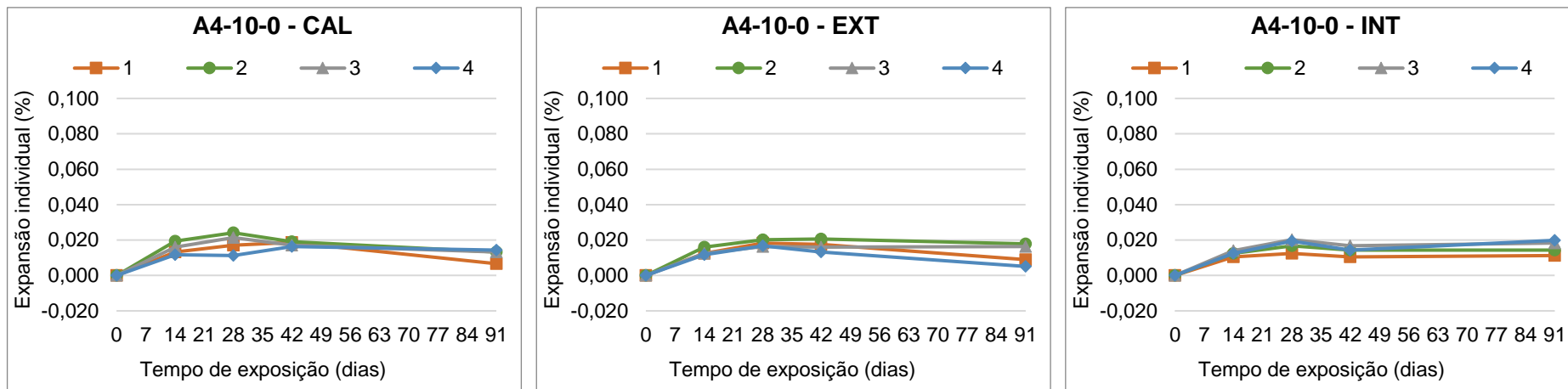


Figura C.3 - Expansão individual das argamassas com 10% de nanosílica de relação a/agl igual a 0,40 submetidas à cura úmida.

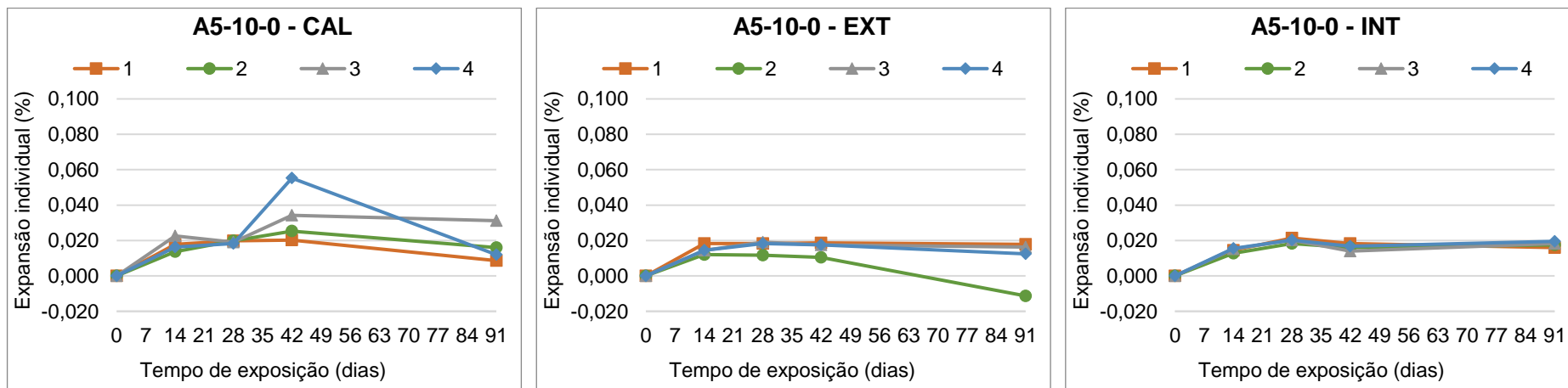


Figura C.4 - Expansão individual das argamassas com 10% de nanosílica de relação a/agl igual a 0,50 submetidas à cura úmida.

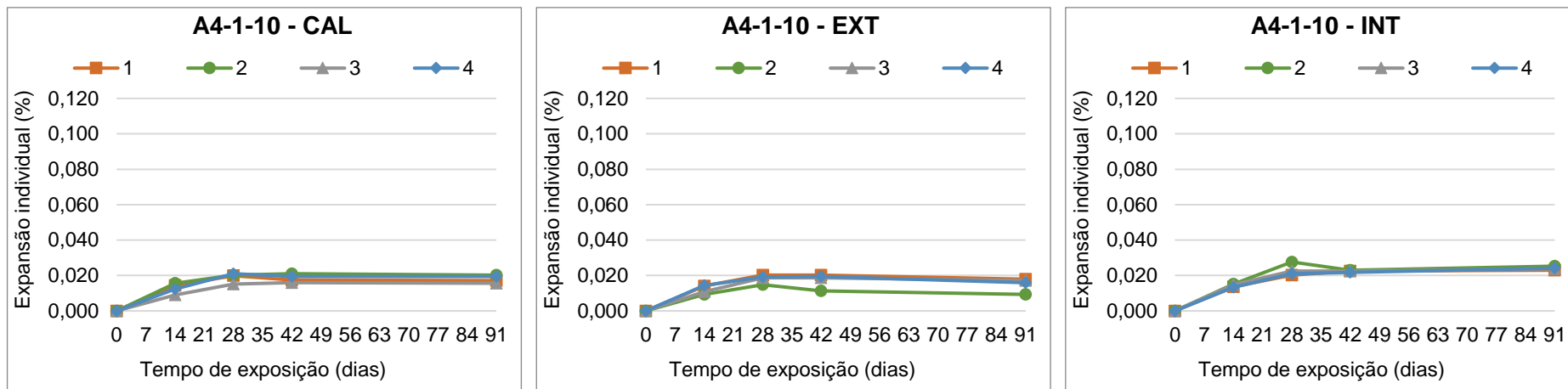


Figura C.5 - Expansão individual das argamassas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa de relação a/agl igual a 0,40 submetidas à cura úmida.

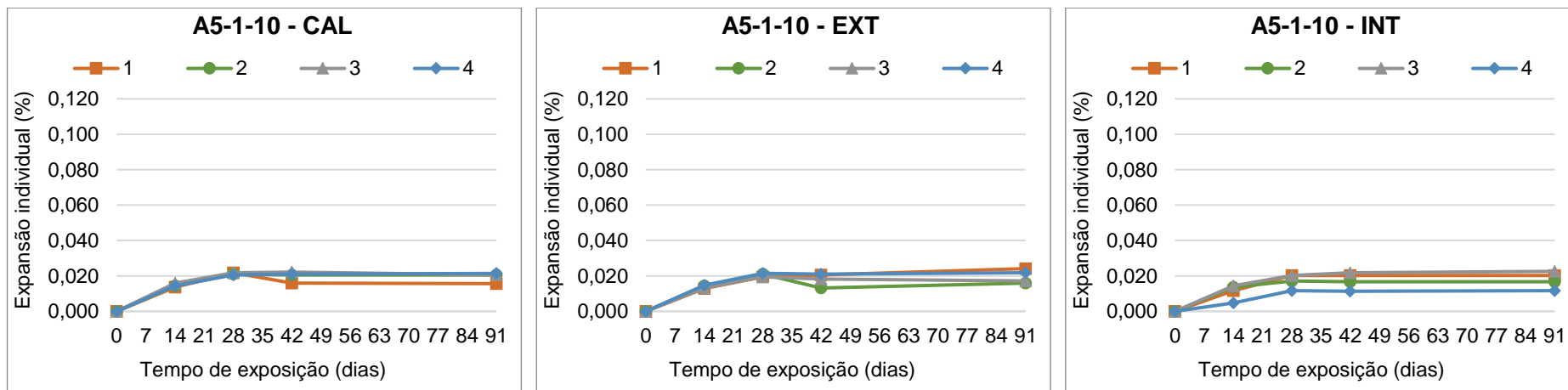


Figura C.6 - Expansão individual das argamassas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa de relação a/agl igual a 0,50 submetidas à cura úmida.

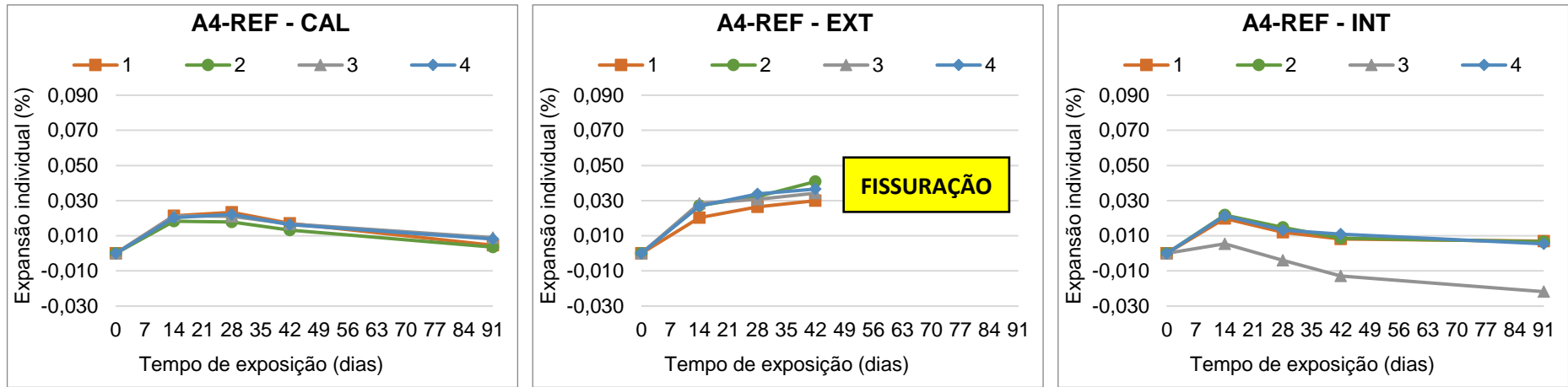


Figura C.7 - Expansão individual das argamassas de referência de relação a/agl igual a 0,40 submetidas à cura térmica.

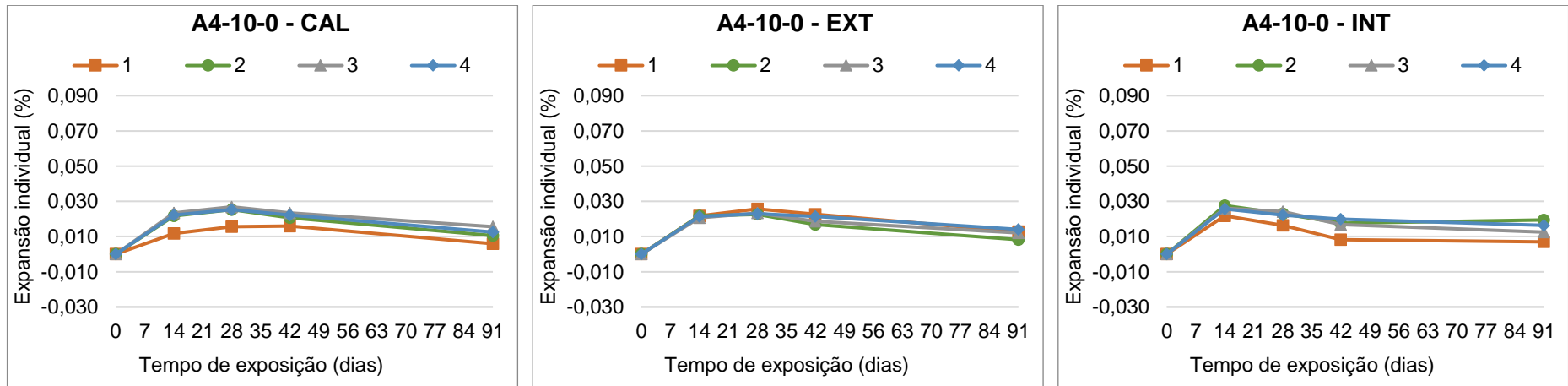


Figura C.8 - Expansão individual das argamassas com 10% de nanosílica de relação a/agl igual a 0,40 submetidas à cura térmica.

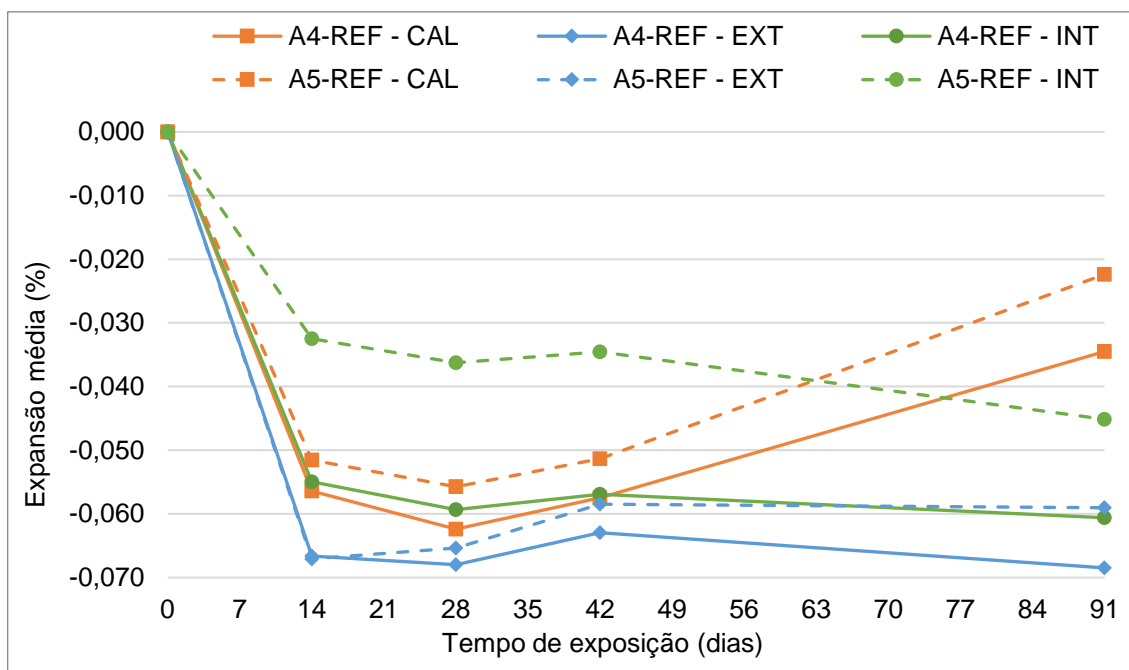


Figura C.9 - Expansão média das argamassas de referência submetidas à cura úmida.

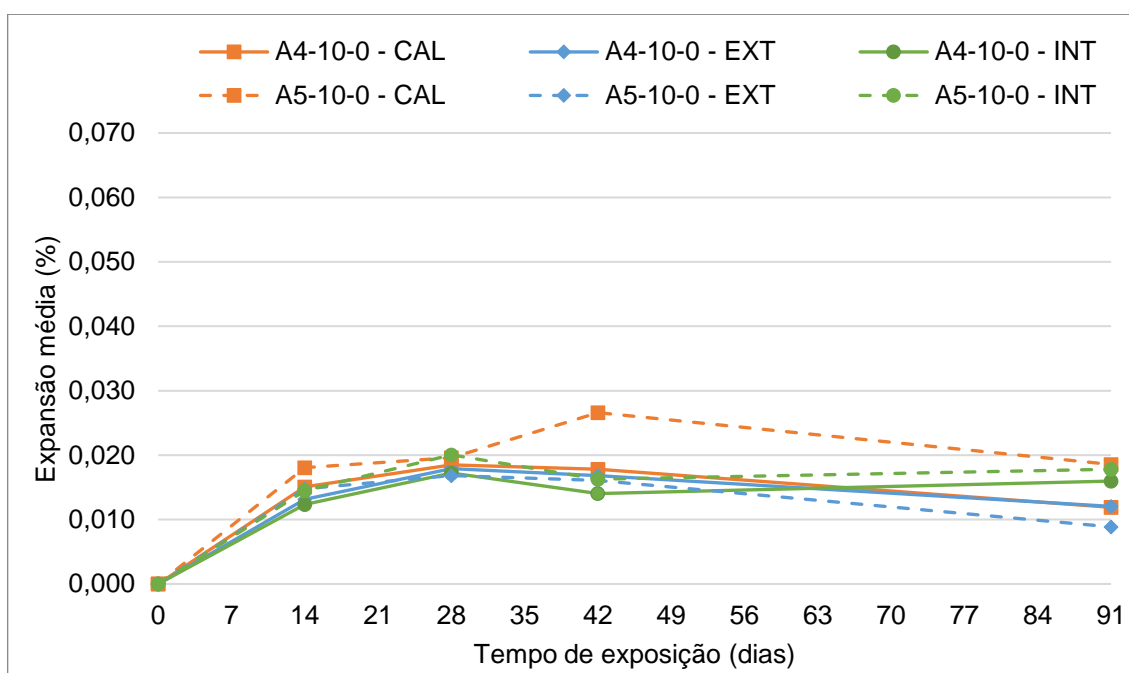


Figura C.10 - Expansão média das argamassas com 10% de nanosilica submetidas à cura úmida.

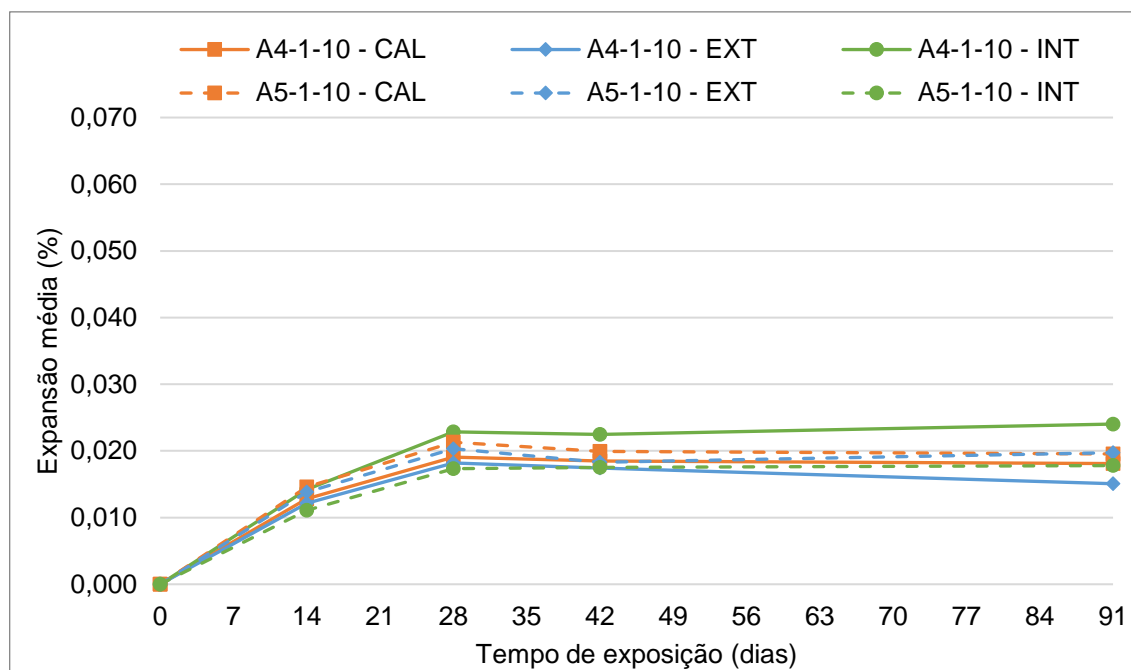


Figura C.11- Expansão média das argamassas com 1% de nanosílica e 10% de sílica ativa submetidas à cura úmida.

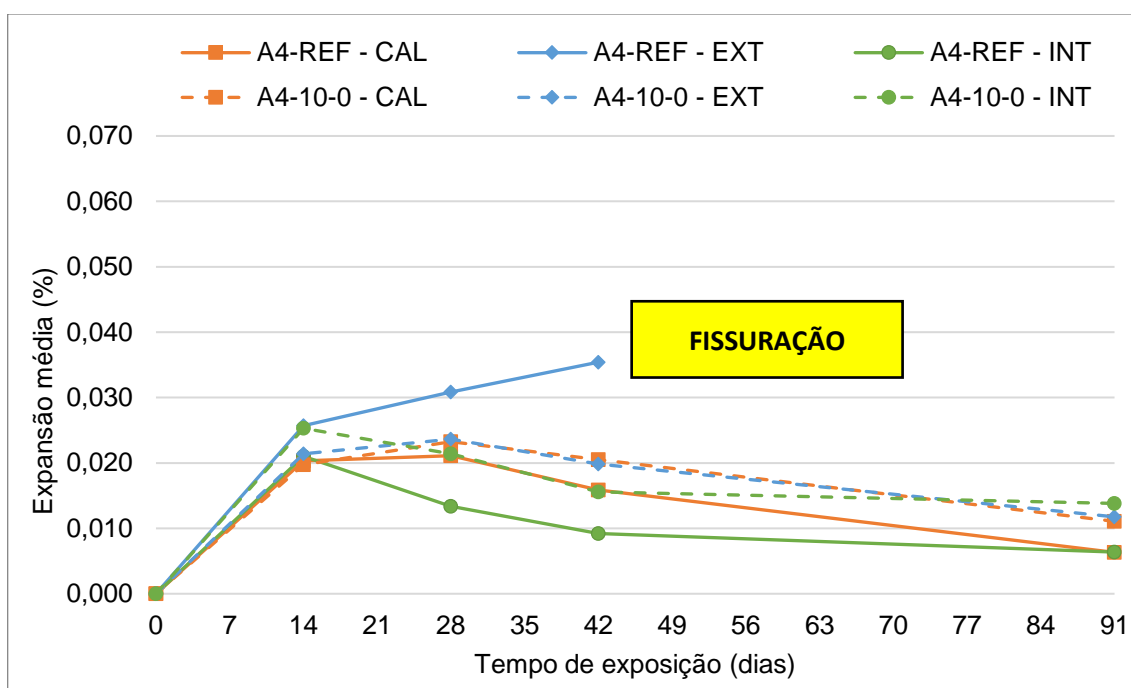


Figura C.12 - Expansão média das argamassas de referência e com 10% de nanosílica submetidas à cura térmica

APÊNDICE D

RESULTADOS DAS ANÁLISES QUÍMICAS

Tabela D.1 – Resultados das análises químicas obtidas após reconstituição dos traços das argamassas submetidas à cura úmida e cura térmica e ao ataque externo de sulfatos.

Argamassas	Tipo de cura	Solução de imersão	Resultados (%)			Ligante	Agregado	Traço (1:x)	SO ₃ em relação ao ligante (%)
			Perda ao fogo	Resíduo Insolúvel	SO ₃				
A4-REF	Úmida	Cal	9,15	69,0	0,61	24,1	75,9	3,2	2,54
		Na ₂ SO ₄	10,3	69,4	1,03	22,6	77,4	3,4	4,55
	Térmica	Cal	8,55	71,0	0,59	22,4	77,6	3,5	2,64
		Na ₂ SO ₄	10,3	68,9	2,01	23,2	76,8	3,3	8,67
A4-10-0	Úmida	Cal	10,4	69,3	0,51	22,7	77,3	3,4	2,25
		Na ₂ SO ₄	10,3	69,3	0,64	22,7	77,3	3,4	2,81
	Térmica	Cal	9,95	69,2	0,53	23,2	76,8	3,3	2,29
		Na ₂ SO ₄	10,3	68,8	0,78	23,3	76,7	3,3	3,35

ANEXOS

ANEXO A

FICHA TÉCNICA NANOSÍLICA (LEVASIL CB8)

Product Data Sheet

Levasil CB8

Levasil CB8 is an alkaline, aqueous dispersion of colloidal silica that is approximately 50% solids by weight. The silica dispersion is sodium stabilized and the amorphous silica particles carry a negative surface charge. The SiO₂ particles are discrete, have a smooth, spherical shape, and are present in a wide particle size distribution. The physical appearance of the dispersion is a white liquid, slightly more viscous than water. Levasil CB8 is produced for world-wide distribution.

Typical Properties

Silica, wt%:	50
pH:	9.5
Viscosity, cP:	8
Density, g/cm ³ :	1.4
Na ₂ O, wt%:	0.2

Range of Applications

Levasil CB8 is a specialty product used primarily in concrete to control stability, segregation and water loss.

Storage, Handling, & Transport

Levasil CB8 should be transported and stored at a temperature of 5-35°C (40-95°F). If the silica dispersion is allowed to freeze, the silica will irreversibly precipitate. For bulk storage, the tank should be sealed and constructed of plastic, fiberglass reinforced plastic, or stainless steel. For packaged goods, any translucent packages should be stored out of direct sunlight or bright light. Under recommended conditions, Levasil CB8 has a shelf life of at least twelve months after production.

Levasil CB8 is available in bulk and packaged quantities. Bulk shipping and packaging sizes can vary by region.

Before handling this material, review the corresponding Material Safety Data Sheet.

Contact Information

For more product information or enquiries, please visit our website:

www.akzonobel.com/colloidalsilica

Or write an email to:

colloidal.silica@akzonobel.com


Information herein is given in good faith and is accurate to the best of our knowledge. Information and suggestions are made without warranty or guarantee of results. Before using, user should determine the suitability of the product for its intended use and user assumes the risk and liability in connection therewith. The application, use and processing of our products and the products manufactured by you on the basis of our technical advice are beyond our control and, therefore, entirely your own responsibility. We do not suggest violation of any existing patents or give permission to practice any patented invention without a license.

Levasil[®] is a registered trademark of AkzoNobel Pulp and Performance Chemicals in several countries world-wide.

Serving global markets from offices in: Brazil, China, Germany, Sweden, Taiwan, & USA

ANEXO B

CERTIFICADO DE ANÁLISE SÍLICA ATIVA

 Dow Corning Silício do Brasil Indústria e Comércio Ltda. Rod. BR 499, S/N - KM 7/9 MANTIQUEIRA - CX POSTAL 04 Santos Dumont - MG 36240-000 Telefone: (32) 3251-9225 Telefax: (32) 3251-9236	Certificado de Análise		Página 1 de 1	
	Fax - Destinatário: 1175884		Data de emissão 12/08/2016	
Destinatário: 1175884 Departamento de Qualidade Assegurada TECNOSIL MAT DE CONST LTDA 119,RUA AMERICO SIMOES ITUPEVA - SP 13295-000	Número da entrega 8611552319	Item da entrega 000010	Data de entrega 03/10/2016	
	Número da ordem 7462151	Item da entrega 000010	Data do pedido 12/08/2016	
	Número do pedido de compra 1333		Data	
	Nosso código de material 4108644			
	DOW CORNING(R) SM SÍLICA ATIVA ,15 KG Saco			
Material Do Cliente				
Lote 0008792765		Data de validade 26/06/2018		
Quantidade da entrega 1,05 to		Data de produção 06/07/2016		
Características	Valor	Unidade de medida	Limite inferior	Limite superior
EQUIVALENTE ALCALINO EM NA2O	0,7	%		
% SIO2	93	%	85	
UMIDADE	0,1	%		3,0
PERDA AO FOGO	3,7	%		6,0
% RETIDO 45 um (325 MESH)	3,7	%		10,0
DENSIDADE	0,35	g/cm3	0,20	1,00
pH	7,9			
Na2O	0,2	%		
Fe2O3	0,5	%		
CaO	0,5	%		
Al2O3	0,2	%		
MgO	0,4	%		
K2O	0,9	%		
<p>Este documento certifica que o material acima foi testado e atende as especificações discriminadas (exceções estão destacadas) quando fornecido na embalagem original. O produto está sujeito as condições listadas no verso da Nota Fiscal. Este certificado copia de informações em arquivo eletrônico e válido sem assinatura. Os dados de aprovação do lote estão disponíveis para verificação.</p>				
<p>Internal reference: 410864479753</p>				
<p>Referência externa: 6090170</p>				

ANEXO C

FICHA TÉCNICA ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE



We create chemistry

MasterGlenium® SKY 150

Aditivo hiperplastificante

Descrição do Produto

Aditivo líquido para concreto, livre de cloretos e pronto para uso. Composto por policarboxilato, que atuam como dispersantes do material aglomerante propiciando elevada redução de água, muito eficaz na produção de concreto com diferentes necessidades como aquelas que utilizam concretos auto adensáveis (CAA) (SCC) e concretos de alto desempenho (CAD), geralmente utilizados na indústria de pré-moldados e concretos protendidos, onde se requerem baixo fator A/C, com baixo consumo de cimento e alta manutenção de *flow*, maior durabilidade e desempenho sem alteração do tempo de pega do concreto. Atende os requisitos da norma Brasileira ABNT NBR 11768 (Tipo P e SP) e ASTM C494(Tipo A e F).

Campos de Aplicação

Recomendado para todos os tipos de concreto quando se pretende alta redução da maior plasticidade ou redução da água de amassamento e aumento do tempo de trabalhabilidade sem alteração no tempo de pega, tais como:

- Concretos Auto Adensáveis (CAA) (SCC);
- Concretos reforçados, bombeados, fluidos e de pouco peso ou peso normal;
- Concreto protendido;
- Concreto de alto desempenho;
- Concreto "fast-track";
- Concretos para reparações de superfícies de pontes.

Propriedades e Benefícios

- Compatível com todos os tipos de cimento Portland;
- Alta taxa de redução de água (40% aproximadamente);
- Aumento da trabalhabilidade do concreto;
- Aumento da coesão e redução da segregação;
- Não altera o tempo de pega do cimento Portland;
- Concreto mais uniforme e com melhor qualidade;
- Reduz os tempos de cura ambiente ou a vapor;
- Elevada manutenção de *flow*;

- Facilita o adensamento e lançamento;
- Facilita o bombeamento;
- Permite a redução do fator água/cimento;
- Permite o incremento da resistência à compressão e flexão;
- Permite o aumento do módulo de elasticidade;
- Permite o aumento da durabilidade do concreto;
- Melhor acabamento do concreto endurecido;
- Permite a redução da permeabilidade;
- Permite a redução da retração diminuindo a tendência à fissuração do concreto.

Embalagem

Caminhão tanque e bombona de 220 kg.

Dados Técnicos

Base Química	Éter Policarboxílico
Aspecto TM 761B*	Líquido Branco turvo
Densidade (g/cm ³) TM 103B*	1,055 - 1,085
pH TM 112B*	7,5 - 9,5
Teor de Sólidos (%) TM 613B*	28,00 – 31,00

*Método Interno

Modo de Aplicação

O que diferencia o MasterGlenium® SKY 150 dos aditivos superplastificantes tradicionais (à base de naftaleno sulfonato ou melamina sulfonada) é o tipo de mecanismo de ação que melhora sensivelmente a dispersão das partículas de cimento. Os polímeros tradicionais normalmente são adsorvidos pelas partículas de cimento que recobrem a superfície das partículas no processo de mistura do concreto. Os grupos sulfônicos das cadeias de polímeros aumentam a carga negativa da superfície das partículas de cimento e dispersam estas por repulsão elétrica. Este mecanismo eletrostático causa a dispersão da pasta de cimento e a consequência positiva é que se requer menos



We create chemistry

água na mistura para se obter uma determinada consistência do concreto.

O **MasterGlenium® SKY 150** deve ser adicionado após a homogeneização dos materiais (cimento, água, agregados, etc) junto com a segunda parte da água de amassamento a ser utilizada na mistura. Nunca deve ser adicionado aos componentes secos do concreto.

Consumo

Deve ser definido baseado em ensaios de laboratório e industriais.

Dosagem

0,2% a 1,2% em relação ao peso do cimento.

Observações / Limitações

- As dosagens acima são orientativas sendo imprescindível a realização ensaios laboratoriais ou de campo. A dosagem ótima do **MasterGlenium® SKY 150** (reduções de água >10%) pode variar de acordo com a temperatura ambiente, tipo de cimento, quantidade de finos na mistura, relação água/cimento, condições de mistura, tipo de agregado utilizado, etc;
- O tempo de pega do concreto pode ser influenciado pela temperatura e umidade ambiente bem como pelo aumento da dosagem do **MasterGlenium® SKY 150**;
- O **MasterGlenium® SKY 150** é compatível com outros aditivos utilizados na produção de concreto;
- Para dosagens fora da faixa recomendada e para mais informações, entrar em contato com o nosso departamento técnico.

Manuseio

Quando utilizado em conjunto com outros aditivos para concreto, o **MasterGlenium® SKY 150** deve ser adicionado separadamente.

Limpeza de Ferramentas

A limpeza das ferramentas ou equipamentos contaminados com **MasterGlenium® SKY 150** deve ser realizada com água em abundância.

Armazenagem

MasterGlenium® SKY 150 deve ser armazenado em local coberto, seco e fresco, longe de temperaturas extremas ou fontes de calor nas embalagens originais lacradas. Se for armazenado em recipientes originais bem fechados, a validade é de 9 meses.

Precauções de Segurança

MasterGlenium® SKY 150 não é classificado como produto perigoso para transporte, não é inflamável nem explosivo.

Produto não considerado tóxico porém, impróprio para consumo humano.

Observe as precauções normais para manuseio de produtos químicos. Evite contato com a pele e olhos; use luvas de borracha e óculos de segurança. O contato prolongado com a pele pode causar dermatites.

Se ocorrer contato, enxágue com abundante água. Em caso de contato nos olhos procure um médico.

Não beber, comer ou fumar durante o manuseio; lavar as mãos antes de uma pausa ou depois do trabalho.

Para obter informação adicional, consulte à Folha de Dados de Segurança;