



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

**INFLUÊNCIA DE MATERIAL FINO INERTE NA RETRAÇÃO DE
ARGAMASSAS DE REPARO À BASE DE MATERIAL CIMENTÍCIO**

RUBYANE BRITO RODRIGUES DE ALMEIDA



**INSTITUTO LATINO-AMERICANO DE
TECNOLOGIA, INFRAESTRUTURA E
TERRITÓRIO (ILATIT)**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL (PPG ECI)**

INFLUÊNCIA DE MATERIAL FINO INERTE NA RETRAÇÃO DE ARGAMASSAS DE REPARO À BASE DE MATERIAL CIMENTÍCIO

RUBYANE BRITO RODRIGUES DE ALMEIDA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, área de concentração Construção, linha de pesquisa Materiais e Ecoeficiência, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

Orientadora: Prof^ª. Dra. Ana Carolina Parapinski dos Santos

Coorientador: Eng. Dr. Étore Funchal de Faria

RUBYANE BRITO RODRIGUES DE ALMEIDA

**INFLUÊNCIA DE MATERIAL FINO INERTE NA RETRAÇÃO DE
ARGAMASSAS DE REPARO À BASE DE MATERIAL CIMENTÍCIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Integração Latino-Americana, como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil.

BANCA EXAMINADORA

Orientadora: Prof^a. Dra Ana Carolina Parapinski dos Santos
UNILA

Prof^a. Dra Edna Possan
UNILA

Prof. Dr Paulo Francinete Silva Junior
IFG

Foz do Iguaçu, 27 de Agosto de 2021.

Catálogo elaborado pelo Setor de Tratamento da Informação
Catálogo de Publicação na Fonte. UNILA - BIBLIOTECA LATINO-AMERICANA - PTI

A447

Almeida, Rubyane Brito Rodrigues de.

Influência de material fino inerte na retração de argamassas de reparo à base de material cimentício / Rubyane Brito Rodrigues de Almeida. - Foz do Iguaçu-PR, 2022.
104 f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Foz do Iguaçu-PR, 2022.

Orientador: Ana Carolina Parapinski dos Santos.

Coorientador: Étore Funchal de Faria.

1. Retração. 2. Argamassa. 3. Reparo. 4. Materiais Finos. I. Santos, Ana Carolina Parapinski dos. II. Faria, Étore Funchal de. III. Título.

CDU 624

Dedico este trabalho à minha mãe.

AGRADECIMENTOS

A Deus que sempre esteve presente.

À minha mãe Célia, companheira de pandemia, por seu amor incondicional e suporte em todas as etapas deste trabalho e da minha vida. Ao meu irmão Diego pelo apoio e por sempre acreditar em mim. Ao meu pai Wanderley e meu irmão Fernando, presentes em espírito e meus anjos da guarda.

À minha orientadora Professora Ana Carolina que me acolheu em um momento de fragilidade e me deu todo apoio e suporte para finalizar este trabalho. Ao meu coorientador Étore por ter acreditado em minha capacidade desde nossa primeira conversa, ter me confiado um projeto de pesquisa há muito idealizado por ele e por todo apoio durante o processo.

À Itaipu Binacional, ao CEASB e ao PTI pela oportunidade, confiança e apoio a esta pesquisa. À UNILA e aos professores do PPGECl pela oportunidade e por todos os ensinamentos. Aos amigos que o mestrado me trouxe e aos colegas de turma pelas trocas e momentos compartilhados. À banca examinadora que me auxiliou muito na qualificação para o aperfeiçoamento deste estudo. Às empresas Polimix e Matchem pela doação de materiais utilizados no programa experimental.

A todos os técnicos do Laboratório de Concreto da Itaipu e do Laboratório da Unila pelo apoio, dúvidas sanadas e auxílio durante os ensaios.

Aos meus amigos que sempre me incentivaram e acreditaram no meu potencial, em especial, às minhas amigas-irmãs Camila e Thaísa que foram um refúgio em meio ao caos que os últimos anos foram.

A todos vocês, meu muito obrigada!

Desde que me seguraste pela mão, estou no caminho certo.
(Salmos 16:11)

Eu prefiro ter questões que não podem ser respondidas
a ter respostas que não podem ser questionadas.

Richard Feynman

RESUMO

A obtenção de materiais de reparo eficientes e duráveis depende de vários fatores, mas principalmente da compatibilidade dimensional entre reparo e estrutura de concreto. A retração – apesar de ser uma propriedade intrínseca dos materiais cimentícios – quando não controlada pode se tornar prejudicial por provocar tensões de tração e, conseqüentemente fissuração afetando a durabilidade de estruturas reparadas. Estudos têm demonstrado que a adição de finos inertes em argamassas pode melhorar algumas propriedades importantes em materiais de reparo, como compacidade, trabalhabilidade e resistência a agentes agressivos, no entanto, podem influenciar na retração. Dessa forma, o presente estudo objetivou verificar a influência de material fino inerte na retração de argamassas de reparo à base de material cimentício para estruturas de concreto. Foram estudadas 3 dosagens de argamassas de reparo com substituição do agregado miúdo por material fino ($<75 \mu\text{m}$) de areia natural e de areia artificial da britagem de basalto nas proporções de 5, 10 e 15%, além da referência. O programa experimental foi dividido em 3 etapas: idealização da pesquisa, caracterização de materiais e estudo das argamassas. Os materiais utilizados foram caracterizados por meio de ensaios de distribuição granulométrica, finura Blaine, fluorescência de raios-X, massa específica, absorção de água e início e fim de pega. Para caracterização das argamassas foram realizados ensaios de índice de consistência, resistência à compressão, módulo de elasticidade, e ensaios de retração autógena (ASTM C1698) e retração por secagem (ASTM C157). Os resultados obtidos demonstram que a adição de finos inertes em argamassas ocasionou o incremento da retração autógena e por secagem em todas as misturas estudadas. As dosagens com material fino artificial apresentaram maiores valores de retração por secagem em comparação às dosagens com material fino natural. De acordo com os resultados obtidos, a retração demonstra estar relacionada principalmente ao tipo, forma e finura do material fino utilizado.

Palavras-chave: Retração; argamassa; reparo; finos.

ABSTRACT

Obtaining efficient and durable concrete materials repair depends on several factors, but mainly on the dimensional compatibility between repair and concrete structure. Shrinkage – despite being an intrinsic property of cementitious materials – when not controlled can become harmful by causing tensile stresses and, consequently cracking, affecting the durability of repaired structures. Studies have shown that the addition of inert fines in mortars can improve important properties in repair materials, such as compactness, workability and resistance to aggressive agents, however, they can influence shrinkage. Thus, the present study aims to verify the influence of inert fine material on the shrinkage of cement-based repair mortars for concrete structures. Three dosages of repair mortars were studied with replacement of fine aggregate by fine material (<75 μm) of natural sand and artificial sand from basalt crushing in proportions of 5, 10 and 15%, and the reference. The experimental program was divided into 3 stages: research idealization, material characterization and mortar study. The materials used were characterized by means of granulometric distribution, Blaine fineness, X-ray fluorescence, specific mass, water absorption and setting time tests. For mortars characterization, tests of consistency, compressive strength, modulus of elasticity, and autogenous shrinkage (ASTM C1698) and drying shrinkage (ASTM C157) tests were carried out. The results obtained demonstrate that the addition of inert fines in mortars caused an increase in autogenous and drying shrinkage in all the mixtures studied. The dosages with artificial fine material showed higher drying shrinkage values compared to the dosages with natural fine material. According to the results obtained, shrinkage is mainly related to the type, shape and fineness of the fine material used.

Keywords: shrinkage; mortar; repair; fines.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Evolução do quantitativo de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave <i>shrinkage AND repair mortar</i>	16
Figura 2: Modelo holístico de materiais de reparos.....	21
Figura 3: Reações de retração química e autógena.....	24
Figura 4: Comparativo entre retração autógena (após 24 horas) e relações água/cimento de argamassas e pastas de cimento encontradas na literatura	25
Figura 5: Classificação das variações volumétricas dos sistemas cimentícios	28
Figura 6: Bancada de dilatômetro com corpos de prova (a) e a barra de Invar (b) ...	31
Figura 7: Fluxograma das etapas do estudo	34
Figura 8: Materiais utilizados para a produção das argamassas: cimento (a), sílica ativa (b) areia natural (c), material fino inerte natural (d), material fino inerte artificial (e) e aditivo superplastificante (f)	35
Figura 9: Moinho metálico (a) e bolas metálicas utilizadas (b).....	38
Figura 10: Analisador de partículas (a) e peneirador mecânico (b) para ensaio de distribuição granulométrica.....	41
Figura 11: Distribuição granulométrica dos materiais	42
Figura 12: Ensaio em andamento de pasta de consistência normal (a) e de início e fim de pega do cimento (b).....	44
Figura 13: Procedimentos do ensaio de massa específica da AN e AA pelo método do picnômetro.....	44
Figura 14: Ensaio de saturação do aditivo pelo método do miniabatimento	48
Figura 15: Ensaio de saturação do aditivo pelo método do funil de Marsh	48
Figura 16: Ponto de saturação do aditivo SP pelos métodos de Funil de Marsh e miniabatimento	49
Figura 17: Materiais (a) e mistura da argamassa (b).....	51
Figura 18: Procedimento de mistura (a) e moldagem (b) das argamassas para ensaio de retração autógena	53
Figura 19: Molde fechado preenchido (a) e posicionado no suporte ondulado para pesagem (b)	54
Figura 20: Moldes para os corpos de prova prismáticos	55
Figura 21: Mesa de ensaio de índice de consistência.....	56
Figura 22: Corpos de prova em estado fresco (a) e ensaio de resistência à compressão	

e módulo de elasticidade (b)	57
Figura 23: Corpos de prova para ensaio de retração autógena	58
Figura 24: Molde, barra de referência, dilatômetro e relógio comparador para ensaio de retração autógena	58
Figura 25: Aferição com termohigrômetro e pesagem dos corpos de prova	59
Figura 26: Acondicionamento dos corpos de prova para secagem	61
Figura 27: Procedimento de ensaio de retração por secagem	61
Figura 28: Distribuição granulométrica dos materiais finos	63
Figura 29: Índice médio de consistência das argamassas estudadas.....	65
Figura 30: Resistência à compressão média das argamassas	67
Figura 31: Módulo de elasticidade médio das argamassas estudadas	70
Figura 32: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante as primeiras 24 horas.....	71
Figura 33: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante as primeiras 24 horas, por dosagem	72
Figura 34: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino artificial durante as primeiras 24 horas.....	73
Figura 35: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino artificial durante as primeiras 24 horas, por dosagem.....	74
Figura 36: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante os primeiros 28 dias	75
Figura 37: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino artificial durante os primeiros 28 dias	76
Figura 38: Evolução cronológica da retração autógena	78
Figura 39: Variação de massa das argamassas com material fino natural durante ensaio de retração autógena.....	79
Figura 40: Variação de massa das argamassas com material fino artificial durante ensaio de retração autógena.....	79
Figura 41: Evolução da retração por secagem das argamassas com material fino natural	81
Figura 42: Evolução da retração por secagem das argamassas com material fino artificial	82
Figura 43: Leituras de retração por secagem considerando idade 0.....	84
Figura 44: Variação de massa média durante ensaio de retração por secagem com	

material fino natural.....	85
Figura 45: Variação de massa média durante ensaio de retração por secagem com material fino artificial.....	85

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/C	Água/cimento
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
ASCE	American Society of Civil Engineering
ASTM	American Society for Testing and Materials
CEASB	Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens
CRM	Cure Reference Method
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
DIC	Digital Image Correlation
EN	Norma Europeia
FRX	Fluorescência de raios-X
GPa	Gigapascal
LAMIR	Laboratório de Análises Minerai s e Rochas
LTCI	Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu
MPa	Megapascal
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
pH	Potencial Hidrogeniônico
POCQ	Procedimento Operacional de Controle de Qualidade
PPM	Partes por milhão
PTI	Parque Tecnológico de Itaipu
SRA	Shrinkage Reduction Admixtures

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	9
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	12
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVO GERAL	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 INTRODUÇÃO	19
2.2 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO E MATERIAIS DE REPARO	19
2.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO	22
2.4 ADIÇÕES MINERAIS E O EFEITO FÍLER	28
2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO	30
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	33
3.1 INTRODUÇÃO	33
3.2 MATERIAIS	35
3.2.1 Cimento Portland.....	36
3.2.2 Sílica Ativa.....	37
3.2.3 Areia Natural.....	37
3.2.4 Areia Artificial.....	38
3.2.5 Aditivo Superplastificante	39
3.2.6 Água.....	39
3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS.....	39
3.3.1 Distribuição Granulométrica	40
3.3.2 Finura por Permeabilidade ao Ar.....	42
3.3.3 Início e Fim de Pega	43
3.3.4 Massa Específica	44
3.3.5 Absorção de Água.....	45
3.3.6 Quantificação de Elementos Químicos (FRX).....	46
3.3.7 Saturação do Aditivo	47

3.4 TRAÇOS E DOSAGENS.....	49
3.4.1 Ensaio Teste de Consistência da Argamassa.....	51
3.5 MISTURA E MOLDAGEM.....	52
3.5.1 Moldagem para Ensaio de Retração Autógena.....	52
3.5.2 Moldagem para Ensaio de Retração por Secagem.....	54
3.5.3 Moldagem para Ensaio de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade.....	55
3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	55
3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	56
3.8 ENSAIOS DE RETRAÇÃO DAS ARGAMASSAS.....	57
3.8.1 Ensaio de Retração Autógena.....	57
3.8.2 Ensaio de Retração por Secagem.....	60
4 RESULTADOS.....	63
4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS FINOS.....	63
4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO.....	65
4.2.1 Índice de Consistência.....	65
4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO.....	67
4.3.1 Resistência à Compressão.....	67
4.3.2 Módulo de Elasticidade.....	69
4.4 ENSAIOS DE RETRAÇÃO.....	71
4.4.1 Retração Autógena Inicial.....	71
4.4.2 Retração Autógena Estendida.....	75
4.4.3 Variação de Massa na Retração Autógena.....	78
4.4.4 Retração por Secagem.....	80
4.4.5 Variação de Massa na Retração por Secagem.....	84
5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	89
APÊNDICES.....	99

1 INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto tem se tornado um assunto cada vez mais discutido. Manter e recuperá-las é uma necessidade recorrente, pois o concreto sob efeito de cargas e fatores ambientais acaba por deteriorar-se. As estruturas de concreto estão submetidas a constantes gradientes de temperatura e pressão que variam com as condições ambientes durante o dia e a noite e que podem afetar a durabilidade dos reparos causando falhas prematuras. Muitas vezes esses reparos têm que ser refeitos em curtos espaços de tempo (MAILVAGANAM e ZHANG, 2006).

Os materiais de reparo para estruturas de concreto podem ser de base cimentícia, de base cimentícia modificados com polímeros ou ainda materiais poliméricos (QIAN et al., 2014). São normatizados em vários países e amplamente especificados pela série de normas europeias EN 1504 (2005) sobre produtos e sistemas para reparo e proteção de estruturas de concreto. Os materiais de base cimentícia são muito utilizados principalmente pelo baixo preço, disponibilidade de materiais e compatibilidade com o substrato. No Brasil, não existe normatização específica que defina características ou propriedades para os materiais de reparo, no entanto, a consideração de fatores como a compatibilidade dimensional entre o material de reparo e a estrutura são de suma importância na obtenção de um reparo eficiente e durável.

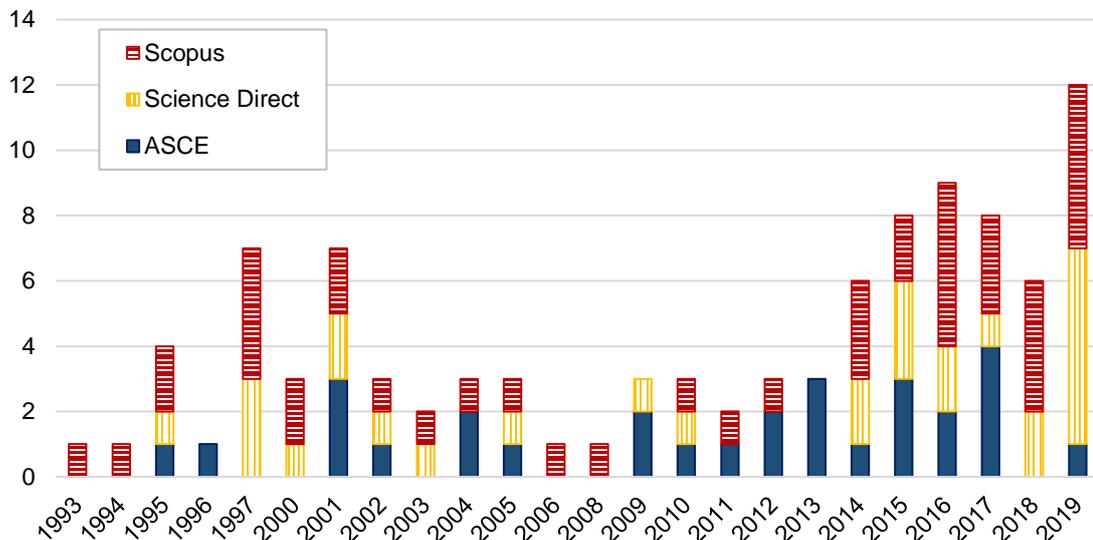
Os materiais cimentícios em geral, apresentam variações volumétricas devido às reações de hidratação, secagem, mudanças de temperatura e mecanismos de degradação que são mais significativas nas primeiras idades. A perda de água do material que acarreta na diminuição do seu volume, denominada retração, é um fenômeno intrínseco dos materiais cimentícios que ocorre desde os primeiros minutos após a mistura dos materiais e se prolonga durante toda a vida útil da estrutura. Neville (2015) ressalta que a importância da retração está em grande parte relacionada à fissuração, pois esta facilita a entrada de agentes agressivos que afetam a durabilidade do concreto.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos nos últimos anos em relação à retração de sistemas cimentícios. Os estudos contemplam as adições em concretos e argamassas (BARBOSA, 2018; BOUASKER et al., 2008; BREITENBACH et al., 2017; CHAOHUA et al., 2018; GUPTA e VYAS, 2018; ITIM et al., 2011; KABEER

e VYAS, 2018; KABEER e VYAS, 2019; SILVA JÚNIOR, 2017; VIEIRA, 2018), a utilização de agregados reciclados (CABRAL et al., 2010; MARTÍNEZ et al., 2016; LI et al., 2019), utilização de microfibras (SENISSE, 2010), métodos e técnicas de medição da retração (BOUASKER et al., 2006; GAO et al., 2014; GOLASZEWSKI et al., 2016; KUCHARCZYKOVÁ et al., 2017; VEKEY et al., 2015), sendo alguns destes computacionais (JASICZAK et al., 2015) e por correlação de imagem digital (DZAYE et al., 2019). Também são encontrados artigos que exploram a utilização de aditivos redutores de retração (QIN et al., 2019; SILVA, 2007; YOO et al., 2017) e a retração específica em argamassas de reparo (BANTHIA e GUPTA, 2009; BEUSHAUSEN e CHILWESA, 2013; BREITENBACH et al., 2017; PEÑA, 2004).

A Figura 1 apresenta uma consulta realizada sobre artigos publicados em periódicos internacionais nas bases de dados *Scopus*, *Science Direct* e *ASCE* utilizando as palavras-chave *Shrinkage AND Repair Mortar* desde 1993.

Figura 1: Evolução do quantitativo de artigos publicados em periódicos internacionais envolvendo as palavras-chave *shrinkage AND repair mortar*



Fonte: A Autora (2019)

Observa-se que os estudos sobre retração em argamassas de reparo apresentaram um maior número nos anos de 1997 a 2001, e em seguida diminuíram. A partir de 2014, com o aumento frequente dos estudos relativos à retração em concretos, também foi possível observar um aumento nos estudos em argamassas. Em 2019 observou-se o maior número de estudos, mesmo assim, foram encontrados apenas 12 estudos desse tópico em específico.

No Brasil, a retração vem sendo objeto de estudo de vários

pesquisadores como Barbosa (2018), Cabral et al. (2010), Lopes (2011), Senisse (2015), Silva (2007), Silva Júnior (2017), Vieira (2018), entre outros. Apesar do recente aumento de estudos sobre essa propriedade em argamassas, ainda são limitados os estudos específicos sobre a retração em argamassas de reparo. Existe pouca informação sobre as propriedades de materiais que afetam a compatibilidade dimensional entre reparo e substrato (YILDIRIM et al., 2018) e não foram encontrados na literatura estudos que determinem a influência do material fino nas propriedades de argamassas de reparo. Banthia e Gupta (2009) em um estudo amplo sobre a influência da proporção de misturas na retração de argamassas de reparo, não conseguiram determinar a influência exata da relação areia/cimento na fissuração deste tipo de material.

A possibilidade de utilização de material fino em argamassas permite o emprego de areias naturais com maior teor desse material e de areias artificiais (de britagem de rochas). A diminuição dos depósitos naturais de areia e as restrições ecológicas desses ambientes têm aumentado a busca por agregados alternativos que sejam estáveis, resistentes e que não sejam prejudiciais ao concreto e ao aço, satisfazendo os requisitos de qualidade dos materiais cimentícios (CABRERA et al., 2011; MEZIANE et al., 2015). A areia proveniente da britagem de rochas, ainda não é muito utilizada devido principalmente à alta taxa de material fino e à variação de propriedades de acordo com a origem e com o método de extração (KHOUADJIA, et al., 2015).

Em relação à variação volumétrica de concretos e argamassas, em alguns casos na literatura, a retração autógena era considerada insignificante frente à grande atuação da retração por secagem (HOLT, 2001). Porém dado que em materiais de reparo toda a variação de volume ocorrida desde a mistura do cimento com a água irá impactar na durabilidade do material, torna-se fundamental a consideração da retração tanto no estado plástico quanto no estado endurecido, conforme demonstram estudos mais recentes (TOPOLÁř et al., 2016; ITIM et al., 2011).

Dessa forma, o presente estudo tem por objetivo verificar a influência de material fino na retração de argamassas de reparo, pois já é sabido que a utilização desses materiais pode influenciar características como trabalhabilidade, densidade, compacidade, teor de ar incorporado e retração em outras aplicações de argamassas. Este trabalho aborda a importância de se considerar a compatibilidade dimensional entre substrato e reparo, tendo como objetivo analisar a influência da adição de

material fino na retração de materiais cimentícios de reparo para estruturas de concreto através de ensaios de retração autógena e retração por secagem.

1.1 OBJETIVO GERAL

Analisar a influência de material fino (<75 µm) inerte em substituição parcial ao agregado miúdo na retração de argamassas de reparo à base de material cimentício.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Para alcançar o objetivo principal do presente estudo, os seguintes objetivos específicos serão considerados:

- Caracterizar as argamassas de reparo com diferentes teores de material fino inerte no estado fresco a partir de ensaios de consistência, e no estado endurecido por meio de ensaios de resistência à compressão e módulo de elasticidade;
- Analisar a influência de material fino inerte na retração e na variação de massa de argamassas de reparo nas primeiras idades através de ensaios de retração autógena;
- Analisar a influência de material fino inerte na retração e na variação de massa de argamassas de reparo no estado endurecido através de ensaios de retração por secagem.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

O presente estudo insere-se na área de Construção, linha de pesquisa em 'Materiais e Ecoeficiência' e dentro do projeto de pesquisa intitulado 'Materiais cimentícios especiais para reparo de barragens' tendo como tema a influência de material fino na retração de argamassas de reparo para estruturas de concreto.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

As mudanças de volume em argamassas de reparo constituem-se em um dos maiores problemas de deterioração de estruturas, pois devido às restrições existentes e à incompatibilidade entre substrato e material de reparo, ocorrem tensões de tração que podem levar à fissuração, facilitando a entrada de agentes agressivos.

Este capítulo apresenta uma revisão dos principais aspectos da literatura considerando a importância da retração no desempenho de reparos em estruturas de concreto, a adição de material fino nesses materiais, os mecanismos de retração e as metodologias para sua medição.

2.2 DURABILIDADE DAS ESTRUTURAS DE CONCRETO E MATERIAIS DE REPARO

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente relacionada ao ataque de agentes agressivos a que estejam sujeitas durante sua vida útil. A deterioração do material pode causar o comprometimento estrutural e a perda da vida útil da estrutura, porém esse processo pode ser interrompido tratando-se as causas do processo destrutivo e devolvendo à estrutura condições de durabilidade (OLIVEIRA, 2014).

As causas do processo destrutivo das estruturas são provenientes de fatores externos e internos ao concreto e agem de diferentes formas. Os principais agentes agressivos podem ser classificados em mecânicos (abrasão, choques, fadiga, vibração), físicos (temperatura), físico-químicos, ecológicos-químicos (águas puras, carbônicas, do mar, sulfatadas, agentes reativos), intrínsecos (reação álcali-agregado) e biológicos (bactérias) (NEVILLE, 2015; OLIVEIRA, 2014). Além disso, a deterioração das estruturas também depende de fatores de projeto, construção, escolha de materiais, proteção, manutenção adequada, entre outros, que de acordo com Hamid et al. (2017) são fatores que frequentemente atuam combinados.

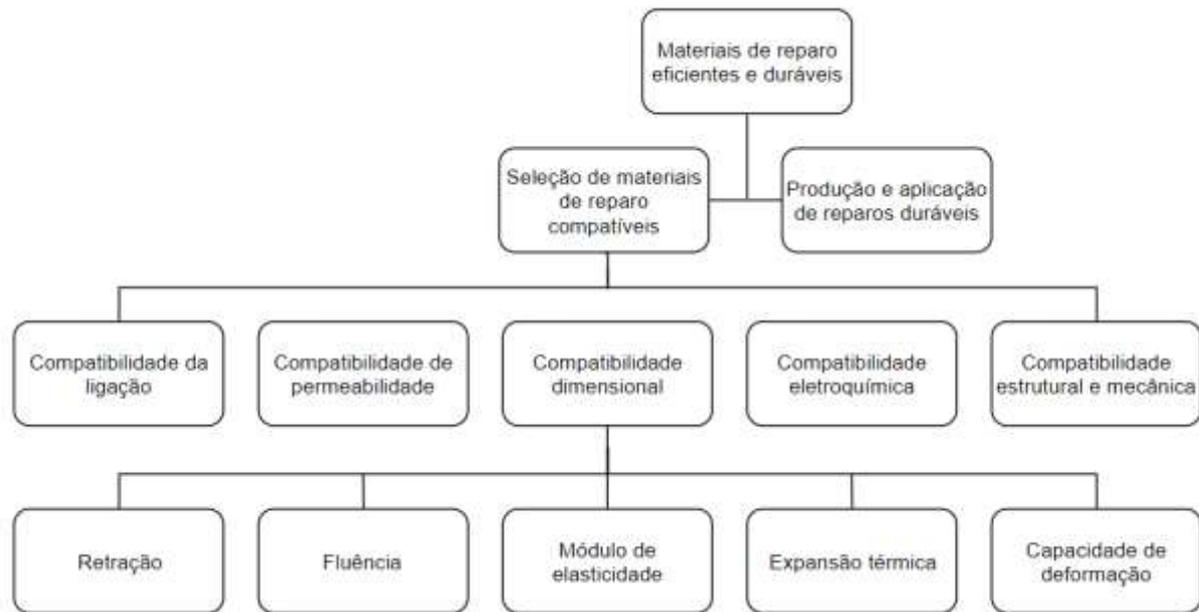
Na Europa, as estruturas de concreto devem ter uma vida útil de no

mínimo 75 anos, já no Brasil, a norma NBR 15575 determina um mínimo de pelo menos 50 anos (ABNT, 2013). A experiência, porém, têm demonstrado que sob condições extremas de carregamento e exposição às intempéries, as estruturas começam a se deteriorar aos 20 ou 30 anos (MEHTA e BURROWS, 2001). Uma das maiores causas da deterioração do concreto é a fissuração que reduz a resistência do material e facilita a entrada de agentes agressivos (SAHMARAN et al., 2015). Antigamente, a prática era de se substituir o elemento danificado, porém devido ao alto custo e às novas tecnologias recentes, atualmente são utilizados reparos para prolongar a vida útil da estrutura (YILDIRIM et al., 2018).

Em relação às tipologias, os materiais de reparo para estruturas de concreto são normalmente classificados em materiais de base cimentícia, de base cimentícia modificados com polímeros e resinas ou materiais poliméricos. Apesar de atualmente existir uma maior variedade desses materiais, os concretos e materiais de base cimentícia ainda são amplamente utilizados como reparos, devido principalmente às suas características similares ao substrato, à disponibilidade dos materiais empregados e ao baixo custo (GADRI e GUETTALA, 2017; SCHULER, 1998). Ainda que possam apresentar alta retração (QIAN et al., 2014), os materiais de base cimentícia exibem maior resistência de aderência com o substrato quando comparados com materiais poliméricos (XIONG et al., 2002).

A obtenção de materiais de reparo eficientes e duráveis depende da consideração de vários fatores de origem física, química e mecânica. A Figura 2 apresenta um modelo holístico para materiais de reparo, no qual várias propriedades devem ser consideradas.

Figura 2: Modelo holístico de materiais de reparos



Fonte: Emmons e Vaysburd (1995); Morgan (1996) apud Yildirim et. al (2018)

Dessa forma, um material de reparo ideal deveria ser volumetricamente estável (sem grandes alterações de retração ou expansão) e ter módulo de elasticidade, resistência, fluência, permeabilidade e outras propriedades compatíveis com o substrato. No entanto, obter todas essas características em um material têm se mostrado inviável. Sendo assim, a consideração da compatibilidade dimensional, ou a capacidade de suportar mudanças de volume e de o reparo suportar a parte que lhe cabe sem perturbações extremas, é a mais significativa (YILDIRIM et al., 2018).

Neste sentido, a retração, é caracterizada basicamente pela redução de volume do material, definida como plástica no concreto recém moldado, ou por secagem no concreto envelhecido (BANTHIA e GUPTA, 2009). Essa propriedade é de grande importância no estudo de materiais de reparo, pois uma das maiores dificuldades encontradas em reparos de estruturas de concreto é o fato de a retração do material de reparo ser muito maior que a da estrutura a qual é aplicado, resultando em incompatibilidade entres os materiais.

A retração do material de reparo juntamente com a restrição imposta pelo substrato geram tensões de tração que podem acarretar fissuras de sobreposição, comprometendo os requisitos de manutenção da estrutura (BANTHIA e GUPTA, 2009; BENTUR e KOVLER, 2003; LENART, 2015; CAO e YAN, 2019). Os modos de falha no material observados devido à retração podem ser fissuras verticais

por tensão direta, fissuras horizontais por tensões de tração transversais, e descascamento ou delaminação pelas tensões de cisalhamento da interface (QIN et al., 2019). Portanto, além da restrição livre, é importante conhecer a resistência e relaxamento à tração e o módulo de elasticidade do material, pois o risco de aparecimento de fissuras aumenta com o aumento da retração e do módulo de elasticidade e com a diminuição da resistência e relaxamento à tração. Fatores ambientais como temperatura e umidade também são essenciais, principalmente por sua influência direta na retração (ALY e SANJAYAN, 2008; BEUSHAUSEN e CHILWESA, 2013).

Com o intuito de minimizar a retração dos materiais de reparo, vários estudos têm utilizado misturas redutoras de retração (*Shrinkage Reduction Admixtures - SRA*) que reduzem a tensão superficial e a difusividade da água resultando em materiais mais duráveis (QIN et al., 2019; RAN et al., 2013; SALIBA et al., 2011; YOO et al., 2017). Também foram encontrados estudos referentes ao desenvolvimento de novos materiais de reparo para diferentes substratos (GADRI e GUETTALA, 2017), novos métodos de predição de fissuração (BEUSHAUSEN e ARITO, 2018; BEUSHAUSEN e CHILWESA, 2013), ao estudo de argamassas de reparo sob diferentes esforços (KUDLANVEC JR e DA COSTA, 2017), entre outros.

2.3 MECANISMOS DA RETRAÇÃO

A retração é uma propriedade física de materiais cimentícios que é a maior causa da formação de fissuras, e que quando excessiva ou descontrolada pode causar o comprometimento estrutural e redução da vida útil das estruturas pelo aumento da interferência de agentes agressivos (BANTHIA e GUPTA, 2009; CHAOHUA et al., 2018; GOLASZEWSKI, 2016; HOLT, 2001; LENART, 2015; SAHMARAN et al., 2013). Apesar de ser uma propriedade básica dos materiais cimentícios, a retração não é um fenômeno simples, pois ocorre desde os primeiros minutos após a mistura dos materiais e se prolonga durante toda a vida útil da estrutura. Neville (2015) considera que a retração ocorra em dois momentos distintos: no estado plástico (antes do início da pega) e no estado endurecido, porém não há um consenso na literatura sobre as terminologias dos diversos tipos de retração

existentes.

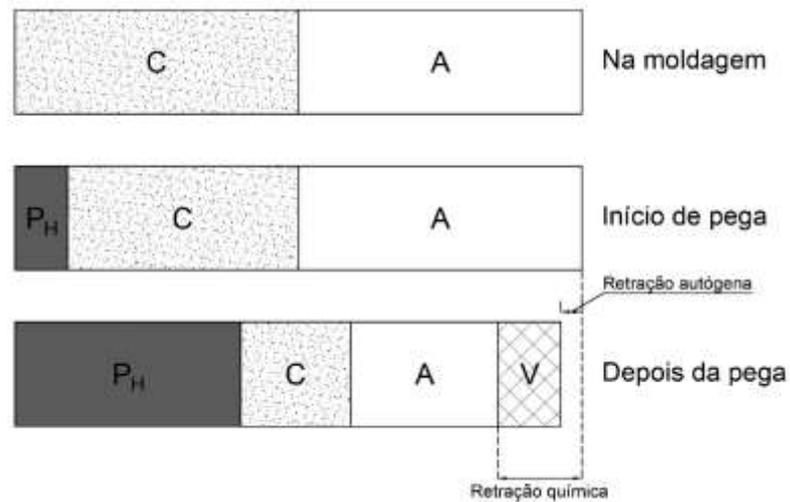
Na retração plástica, muitas vezes também denominada de retração química, os produtos de hidratação formados na pasta de cimento ocupam menos volume absoluto do que a água e o cimento (reagentes). Quando curada em condições herméticas, a pasta de cimento se autodesidrata criando poros vazios e se não houver disponibilidade externa de água para preencher esses vazios, uma retração considerável pode ocorrer (BENTZ E JENSEN, 2004; GAO et al., 2014). A retração química continua durante a hidratação dos grãos anidros, mas diminui conforme aumenta a quantidade dos C-S-H e a difusão da água se torna mais difícil. A água livre capilar é consumida e a umidade diminui provocando uma tensão interna e a consequente variação de volume (GOLASZEWSKI et al., 2016; PONS E TORRENTI, 2014). A fase da retração na qual ocorre a depressão capilar (iniciando-se após a pega) também é chamada de retração por autodessecação (BOUASKER et al., 2008; NEVILLE, 2015).

Em 1904, o químico Le Chatelier produziu um experimento preenchendo dois frascos com pasta de cimento e concluiu que a mesma varia de volume durante sua hidratação dependendo do modo de cura a que for submetida. Segundo descreve Aitcin (2016), quando hidratada sob a água, o volume absoluto da pasta diminui devido à penetração de parte dessa água, porém mais tarde seu volume aparente aumenta trincando a base do frasco. Já quando a pasta é curada ao ar seu volume aparente diminui. Independentemente do modo de cura, ocorre uma diminuição de cerca de 8% do volume absoluto da pasta, contração que ficou conhecida como *contração Le Chatelier*.

Lynam (1934) foi provavelmente o primeiro a definir essa retração como autógena, ou que não é devida à causa térmica, tensões externas ou perda de umidade para o ambiente (BENTZ E JENSEN, 2004). Para Bouasker et al., (2008) e Pons e Torrenti (2014), essa retração que ocorre na ausência de troca hídrica com o meio ambiente é uma consequência da contração Le Chatelier.

A Figura 3 apresenta os diagramas de retração química e retração por autodessecação ou autógena.

Figura 3: Reações de retração química e autógena



C = cimento não hidratado; A = água não hidratada; Ph = produtos de hidratação; V = vazios gerados pela hidratação

Fonte: Adaptado de Holt (2001)

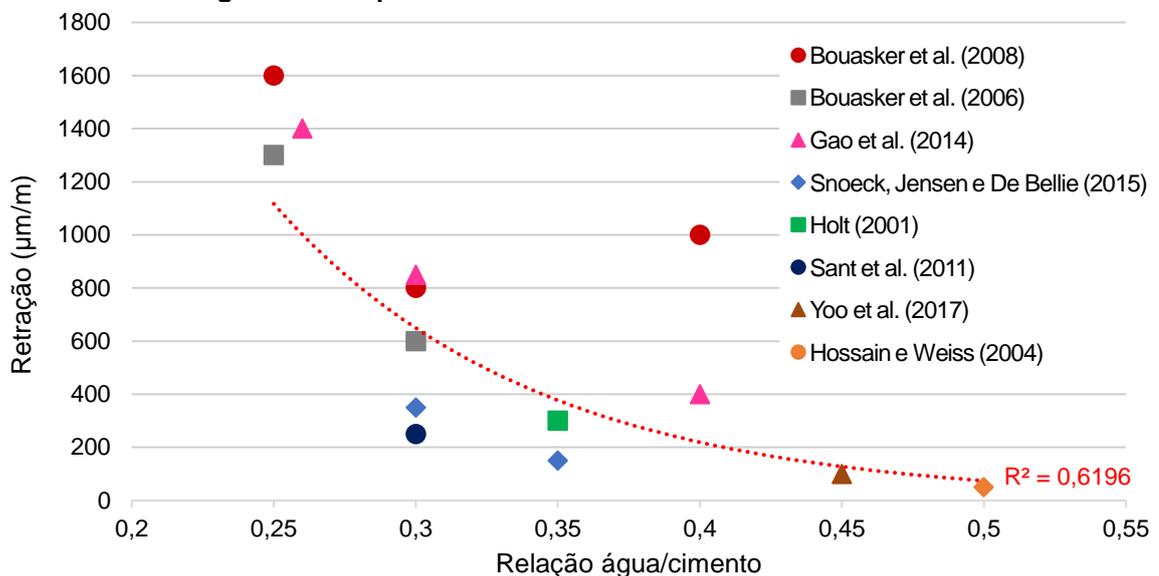
Para Gao et al. (2014), mesmo a hidratação de apenas uma partícula de cimento anidro resulta em retração química e a soma da retração química individual dessas partículas é igual à retração autógena. A retração química é uma mudança absoluta de volume interno do material, já a retração autógena é uma mudança de volume aparente ou externa e que não existe sem a formação de vazios na pasta.

Um conceito formal de retração autógena é dado pelo American Concrete Institute (ACI, 2013) que a define como a “alteração no volume devido ao processo químico de hidratação do cimento, excluindo os efeitos da carga aplicada e a mudança na condição térmica ou no teor de umidade”. Além dessas propriedades, dentre os principais mecanismos mais discutidos na literatura e que estão relacionados à retração autógena, estão as variações de:

- 1) Depressão capilar: nos poros parcialmente cheios do material, a tensão capilar gera uma superfície curva na interface entre água dos poros e ar;
- 2) Tensão de superfície ou energia de superfície de partículas coloidais: está relacionada com a adsorção (reduz a tensão superficial e provoca a expansão) e a dessorção da água (aumenta a tensão superficial e provoca a retração); e
- 3) Pressão de disjunção: relacionada à presença de água adsorvida entre duas superfícies sólidas próximas (MELO NETO, 2008; SILVA, 2007 e SILVA JUNIOR, 2017).

Entre os fatores que influenciam a retração autógena estão o consumo de cimento e a relação a/c , sendo maior a retração em menores relações água/cimento (BARBOSA, 2018; HOLT, 2001; NEVILLE, 2015; SNOECK et al., 2015). Na Figura 4 foi elaborado um gráfico a partir de diferentes estudos publicados na literatura científica (detalhados no Apêndice 1) em que se observa a influência da relação água/cimento ou água/aglomerante na retração autógena. Cabe ressaltar que existe variação da dosagem, do tipo de cimento, de adições, etc entre os diferentes estudos considerados.

Figura 4: Comparativo entre retração autógena (após 24 horas) e relações água/cimento de argamassas e pastas de cimento encontradas na literatura



Fonte: A Autora (2019)

Pode-se observar na Figura 4 que a retração autógena é mais significativa em relações a/c abaixo de 0,40 pois toda a água de mistura é consumida. Quando encontram-se muito abaixo dessa relação e a água de cura não está mais disponível, água extra será retirada dos poros internos do material reduzindo a umidade relativa (HOLT, 2001).

Lenart (2015) ressalta que as causas das variações volumétricas em matrizes cimentícias são complexas e variam entre as físico-químicas, como composição e reações de hidratação do cimento, a fatores externos como umidade relativa do ar.

De acordo com Silva (2007), a retração autógena e por secagem são

provenientes da autodessecação e secagem, respectivamente. A diferença entre as duas está na origem da diminuição da umidade interna do material. Enquanto na autodessecação é causada pelo consumo de água evaporável pelas reações químicas, na secagem é causada pela evaporação da água dos poros devido à diferença das umidades interna e externa ao material, ou seja, pela retirada da água quimicamente adsorvida (não mais disponível) por evaporação (FARIA, 2012). Apesar de ser similar à retração autógena em duração e maior expressão nas primeiras idades do material, a retração por secagem difere-se por poder ser minimizada ou evitada com procedimentos físicos, adensamento e cura adequados (HOLT, 2001).

Uma vez que a retração ocorre quando a água sai de um elemento poroso e não totalmente rígido, torna-se importante o conhecimento dos mecanismos da água na pasta de cimento. Segundo Mehta e Monteiro:

Na pasta de cimento hidratada, a água pode existir em muitas formas: estas podem ser classificadas dependendo do grau de facilidade com que a água pode ser removida. Essa classificação é útil para entender as alterações volumétricas que estão associadas à água retida em pequenos poros. (MEHTA E MONTEIRO, 2008, p. 35)

A água capilar é o volume de água que se encontra livre da influência das forças de atração da superfície sólida e está presente em vazios maiores que 50 Å, sendo classificada ainda como água livre (presente em grandes vazios $>0,05 \mu\text{m}$) e água retida por tensão capilar (presente em pequenos capilares $<0,05 \mu\text{m}$). A água adsorvida encontra-se próxima da superfície do sólido, suas moléculas são fisicamente adsorvidas na superfície dos materiais sólidos da pasta e quando é removida provoca a retração do material. Já a água interlamelar está relacionada à estrutura do C-S-H e é perdida apenas com forte secagem. A água quimicamente combinada compreende a microestrutura dos produtos de hidratação do cimento e não é perdida na secagem (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Pons e Torrenti (2014) citam ainda a água intercrystalina e intracrystalina. A primeira encontra-se confinada nos poros de pequena dimensão e transita com dificuldade, e a segunda encontra-se quimicamente ligada aos hidratos.

Estudos realizados por Baron (1982) apud Silva (2007) mencionam 3 tipos de água cuja saída do material pode gerar a retração por secagem:

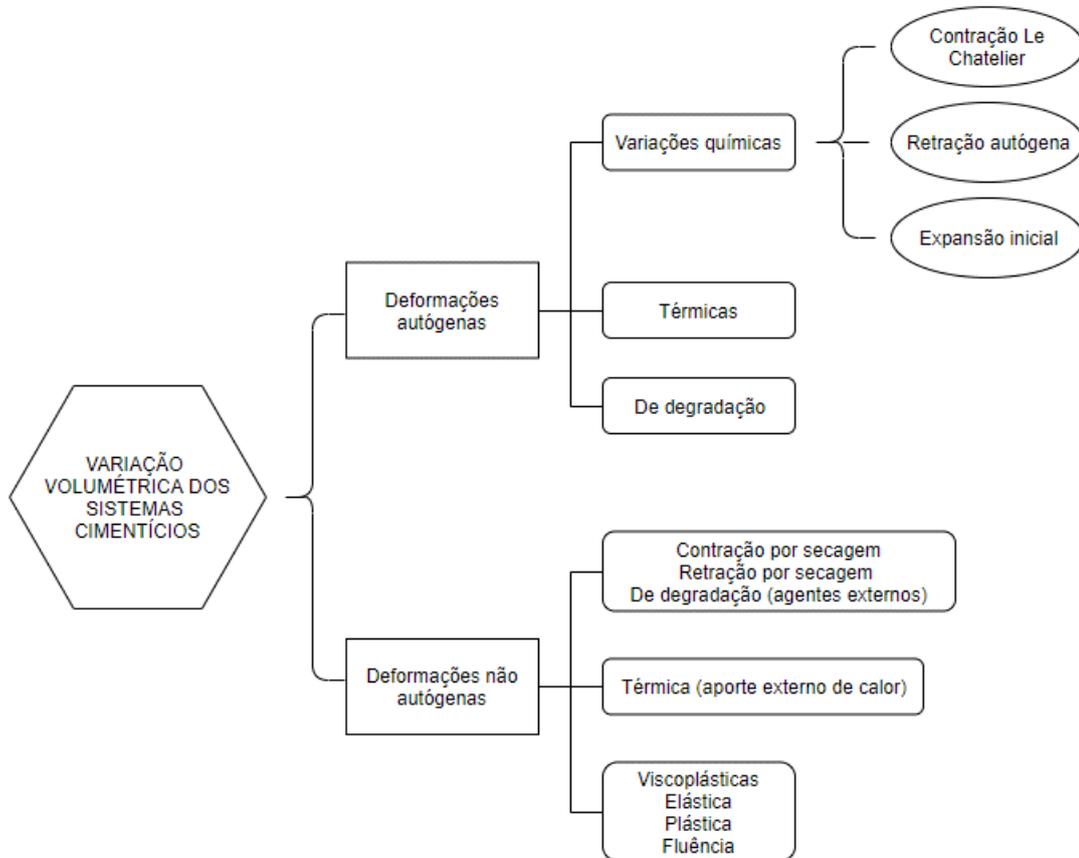
- 1) Água dos poros capilares;
- 2) Água adsorvida externa; e
- 3) Água dos microporos (interfoliar) (BOIVIN, 2001; HUA et al., 1995; SILVA, 2007).

Na retração por secagem, a variação de volume do material não é o mesmo volume perdido de água, no início essa perda causa pouca ou nenhuma retração. A água presente nos poros capilares migra para a superfície e desenvolvem-se tensões de tração que se excederem a resistência do concreto podem causar a fissuração do concreto (GOLASZEWSKI et al., 2016; LENART 2015; YILDIRIM et al., 2018; ZHANG, HOU E HAN, 2012). Apesar da dificuldade de movimentação, a retração por secagem pode estar relacionada à remoção de água intracristalina do material (NEVILLE, 2015).

Dentre os principais fatores que afetam a retração, as condições ambientais como temperatura e umidade relativa do ar são extremamente importantes, devendo ser consideradas dentro das leis de comportamento do material ao longo do tempo (HOLT, 2001; PONS E TORRENTI, 2014; LENART, 2015). Além disso, conforme cita Silva Júnior, (2017) a retração está diretamente relacionada à cinética de hidratação do cimento, portanto, os mesmos fatores que afetam a resistência do concreto também influenciam na retração autógena, como relação a/c, tipo e finura do cimento. Para Itim et al. (2011), a retração também é influenciada pela qualidade dos materiais componentes, condições de cura e adições minerais.

Silva (2007) ressalta que os mecanismos da retração autógena, principalmente, são pouco entendidos e que não existe um consenso na literatura científica sobre terminologias dos diferentes tipos de retração. Nesse sentido, em seu estudo sobre variações dimensionais de concretos de alto desempenho, a autora propôs uma classificação e terminologia para as variações volumétricas de sistemas cimentícios considerando conceitos de termodinâmica numa escala de tempo e tamanho. Essa classificação é a adotada no presente trabalho e está apresentada na Figura 5.

Figura 5: Classificação das variações volumétricas dos sistemas cimentícios



Fonte: Silva (2007)

2.4 ADIÇÕES MINERAIS E O EFEITO FÍLER

A incorporação de pós minerais como adição ao cimento pode favorecer propriedades como autocompactabilidade com intuito de melhorar propriedades mecânicas ou diminuir os custos, e o material fino pode melhorar a trabalhabilidade e a microestrutura pela densificação de empacotamento até a dosagem ótima (DUVAL e KADRI, 1998; KADRI et al., 2010).

As adições minerais consideradas inertes são aquelas quimicamente não reativas, como pó de quartzo, calcita, rutilo, alumina, entre outros. Os efeitos da utilização de materiais inertes dependem de sua finura e da forma das partículas podendo melhorar a trabalhabilidade em concretos sem finos ou diminuí-la em concretos com finos, por exemplo. Materiais inertes pulverulentos (dimensão < 0,075 mm) têm sido empregados com a finalidade de reduzir a retração do material (BAUER

et al., 2014; LAWRENCE et al., 2003). Porém, de acordo com Silva Júnior (2017), as adições minerais podem causar o aumento da retração em meios cimentícios devido ao refinamento da microestrutura da pasta.

Os materiais finamente moídos de origem natural ou provenientes do processamento de minerais inorgânicos, geralmente quimicamente inertes são chamados filers. Quando adicionados ao concreto podem influenciar em propriedades importantes como trabalhabilidade, capilaridade, permeabilidade, massa específica, exsudação e tendência à fissuração. Podem também agir como pontos de nucleação e causar um efeito benéfico por serem incorporados à fase C-S-H. A adição de filers ao concreto não deve influenciar a demanda d'água da mistura e nem a resistência do material ao intemperismo, visto que sua ação é predominantemente física (NEVILLE, 2015).

O efeito filer – ou efeito de enchimento – é caracterizado pela aceleração dos mecanismos de hidratação do cimento, e é mais significativo nas primeiras horas de hidratação quando a microestrutura está se desenvolvendo rapidamente (BERODIER & SCRIVENER, 2014). A finura desse material e os níveis de substituição ao cimento, são fatores preponderantes à cinética de hidratação (KADRI et al., 2010; LAWRENCE et al., 2003).

Dessa forma, a adição de material fino inerte em argamassas pode alterar o desempenho e durabilidade desses materiais. De forma geral, o uso de material fino pode proporcionar à argamassa maior densidade e compacidade (KABEER e VYAS, 2018; KABEER e VYAS, 2019), com menor teor de ar incorporado (BREITENBACH et al., 2017), melhora da trabalhabilidade e da ação de aditivos (ADJOUJ et al., 2014), aumento da viscosidade aparente e da tensão de cisalhamento (GIORDANI e MASUERO, 2019; GIROTTO et al., 2014), aumento da resistência ao ataque de sulfatos (JAAFRI et al., 2019), aumento da resistência e redução da retração (JAAFRI et al., 2019; JIANYONG e YAN, 2001; ITIM et al., 2011; KADRI et al., 2010). Outros estudos apontam que a utilização de finos pode aumentar a demanda de água devido à forma e à maior superfície específica das partículas (WESTERHOLM et al., 2008; CEPURITIS, et al., 2017).

Estudos anteriores indicaram que a utilização de algumas adições minerais como cinzas volantes, pozolanas, escória granulada de alto forno, podem ser adicionados aos materiais cimentícios para diminuir a temperatura interna atrasando o pico de temperatura e reduzindo a retração (CHAOHUA et al., 2018).

Benabed et al. (2012) comentam que areias com maiores teores de finos podem ser uma fonte alternativa de fílers para materiais cimentícios, melhorando também a relação custo-benefício por reduzirem a demanda de adição de outros tipos de materiais e de acordo com Baron (1996) apud Benachour et al. (2008), as adições em substituição ao agregado são mais privilegiadas, pois mantêm a proporção de cimento e trabalhabilidade.

No presente estudo optou-se pela nomenclatura de material fino natural para o material proveniente de areia natural de rio e material fino artificial para a areia artificial da britagem de basalto, em referência à ASTM através da norma C33 (2018) que define material fino como areia natural, manufaturada, outro agregado reciclado ou ainda a combinação destes que tenham partículas menores que 75 μm .

2.5 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA RETRAÇÃO

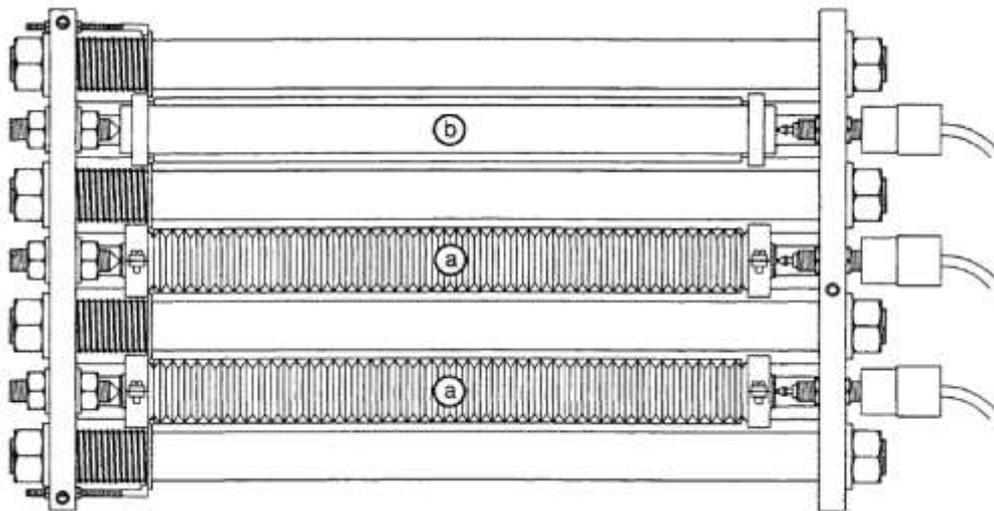
A importância em se medir a retração desde as primeiras idades visa identificar a possibilidade da formação de fissuras que possam comprometer a durabilidade do material, além disso possibilita a análise da retração total do material. Consoante, estudos recentes têm demonstrado a necessidade de se avaliar a retração em dois estágios consecutivos: plástico e endurecido (TOPOLÁř et al., 2016; ITIM et al., 2011).

Os métodos de ensaio para análise de retração autógena podem ser volumétricos ou lineares, os lineares normalmente são leituras realizadas com sensores de deformação posicionados nas extremidades de corpos de prova prismáticos no estado endurecido. Já os métodos volumétricos, conforme citam Bouasker et al. (2008) são em sua maioria realizados com o material ainda fresco, selado e imerso em água. Este último, porém, pode ser influenciado por vários fatores, principalmente pela água exsudada que pode ser reabsorvida pela pasta causando retração adicional. Estudos posteriores propuseram mudanças no ensaio, como a rotação dos corpos de prova e a imersão em parafina ao invés de água, porém os erros continuaram significativos (BOUASKER et al., 2006; BOUASKER et al., 2008; LURA E JENSEN, 2007). Por outro lado, Kucharczyková et al. (2017) comentam que considerando a isotropia das deformações por retração autógena e eliminando as

fontes de erros, ambas metodologias apresentam resultados similares.

Apesar de a retração autógena ser uma grandeza tridimensional, normalmente é expressa em deformação linear para ser analisada conjuntamente com a retração por secagem. Neste sentido, Jensen e Hansen (1995) desenvolveram um método linear para medir a deformação autógena de pastas de cimento com tubos corrugados que limitam a perda de água e impedem a restrição da pasta endurecida (Figura 6). O dilatômetro produzido pelos autores pode também ser utilizado para medir a deformação autógena de outros materiais sólidos ou líquidos.

Figura 6: Bancada de dilatômetro com corpos de prova (a) e a barra de Invar (b)



Fonte: Jensen e Hansen (1995)

Este método transforma a deformação volumétrica em uma medida linear antes do endurecimento do material. Por ter sido uma metodologia extensamente empregada e com bons resultados (BOUASKER et al., 2008; LURA e JENSEN, 2007; SNOECK et al., 2015), foi normatizada pela American Society for Testing Materials (ASTM 1698, 2014).

Kucharczyková et al. (2017) estudaram dois métodos diferentes de medição de retração, o primeiro com as leituras iniciadas após a desmoldagem e o segundo com leituras desde a pega da argamassa. Os métodos apresentaram quase o mesmo progresso de perda de massa e as diferenças na mudança de comprimento se deram em razão das especificidades de cada método, entretanto os autores consideram mais vantajoso o método de medição iniciado no estado plástico. Da mesma forma, Lenart (2015) utilizou em sua análise dois métodos de medição de

retração no estado endurecido e no estado plástico e considerou este último mais vantajoso por medir a variação volumétrica da argamassa (retração e expansão) desde os primeiros minutos da moldagem.

Para uma análise adequada da retração, verifica-se a necessidade da distinção da retração autógena e da retração por secagem utilizando-se métodos de medição diferenciados, sendo a escolha do método adequado de fundamental importância. A medição da retração por secagem é realizada basicamente pela determinação de mudanças de comprimento de corpos de prova após desmoldagem, normalmente após 24 horas de idade (KUCHARCZYKOVÁ et al., 2017). Essa medição também pode ser realizada em estruturas em escala real, com medidores de tensão diretamente embutidos no concreto ou argamassa.

A ASTM apresenta duas metodologias para medição da retração por secagem: a partir da norma C 596 (2018) realizada em barras de argamassa moldadas com cimento hidráulico e areia graduada e, pela norma C 157 (2017) que pode ser utilizada para argamassa e concreto. Esta última, diferencia-se pelo fato de os corpos de prova não serem expostos à secagem logo após a desmoldagem como na primeira, ficando imersos em água saturada com hidróxido de cálcio até a idade de 28 dias. Apenas após esse período é que os corpos de prova são armazenados em uma sala de secagem, ou ainda, em imersão a longo prazo.

Vários outros métodos também já foram utilizados em estudos de retração, como a Correlação por Imagem Digital (do inglês *Digital Image Correlation - DIC*) (DZAYE et al., 2019; MAUROUX et al., 2012), propagação de ondas por ultrassom em concretos (BHALLA, et al., 2018; CRAEYE et al., 2010), sensores de fibra ótica (GLISIC e SIMON, 2000), medidores de tensão automáticos e simulação (AZENHA et al., 2009), modelagem analítica (BEUSHAUSEN e ARITO, 2018; CABRAL et al., 2010) um método que utiliza a difração de um espécime durante o processo de cura e um interferômetro para medir variações de deformação em 2 dimensões, chamado *Cure Reference Method* (CRM) (CHEN et al., 2010), entre outros.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

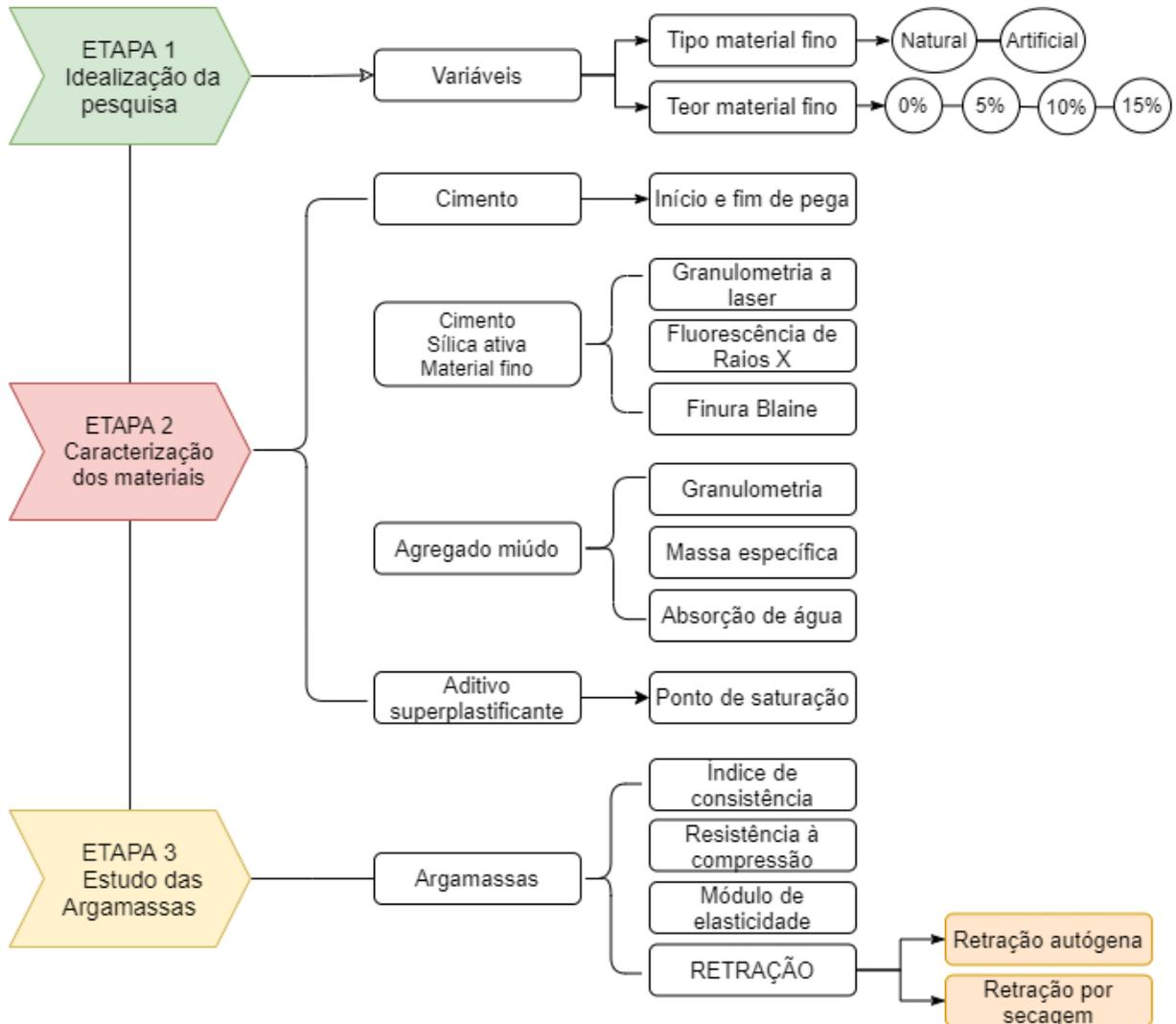
3.1 INTRODUÇÃO

No capítulo anterior foram revisados os principais aspectos relacionados aos mecanismos da retração e sua importância nos materiais de reparo de estruturas de concreto. Observou-se que não são encontrados muitos estudos sobre retração de argamassas na literatura, especialmente sobre as de reparo. Além disso, a adição de material fino na retração de argamassas ainda não é bem discutida.

Por esse motivo, decidiu-se estudar os efeitos do material fino de areia natural e de areia artificial em argamassas de reparo para estruturas de concreto. Os ensaios de caracterização dos materiais e de determinação da retração foram desenvolvidos no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu (LTCl) e no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais (LADEMA) da UNILA, em Foz do Iguaçu.

O programa experimental do presente estudo foi organizado em 3 etapas: idealização do projeto, caracterização dos materiais e estudo das argamassas. As etapas detalhadas estão apresentadas na Figura 7.

Figura 7: Fluxograma das etapas do estudo



Fonte: A Autora (2021)

A etapa 1 iniciou-se com a planejamento do projeto de pesquisa ao qual está inserido o presente estudo. A partir de indicações do Engenheiro Walton Pacelli de Andrade (2017) sobre a utilização de materiais finos em argamassas, e do Board de Consultores Civis de Itaipu (2018), idealizou-se o Projeto de Pesquisa “Materiais cimentícios especiais para reparo de barragens”. O Projeto iniciou-se a partir de uma parceria entre o Parque Tecnológico de Itaipu (PTI) através do Centro de Estudos Avançados em Segurança de Barragens (CEASB), e a Itaipu Binacional.

As variáveis do presente estudo foram definidas considerando, principalmente, a viabilidade da utilização de material fino na produção de argamassas mantendo o traço e a adequada trabalhabilidade. Foram definidas as substituições ao

agregado miúdo de 5, 10 e 15% de material fino, além da referência, utilizando-se material proveniente de areia natural e de areia artificial da britagem de basalto. Maiores considerações sobre o traço utilizado estão apresentadas em 3.4.

Na etapa 2 foram realizadas as caracterizações dos materiais que estão detalhadas em 3.2 e 3.3 e na etapa 3 foram realizados ensaios de retração das argamassas produzidas, além de ensaios de caracterização, mais bem detalhados em 3.6 e 3.7. Para caracterizar a retração foram realizados ensaios de retração autógena e retração por secagem, apresentados em 3.8. Para a realização do estudo foram produzidos no total 126 corpos de prova. Este capítulo apresenta a metodologia utilizada.

3.2 MATERIAIS

Os materiais utilizados no presente estudo foram os necessários para reproduzir uma dosagem de argamassa de reparo de base cimentícia para estruturas de concreto, os quais são: cimento Portland CP IV, sílica ativa, areia natural, areia artificial da britagem de basalto, aditivo superplastificante e água (Figura 8).

Figura 8: Materiais utilizados para a produção das argamassas: cimento (a), sílica ativa (b) areia natural (c), material fino inerte natural (d), material fino inerte artificial (e) e aditivo superplastificante (f)



Fonte: A Autora (2021)

Para facilitar a identificação dos materiais, a nomenclatura adotada no presente estudo está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1: Nomenclatura adotada para os materiais

Material	Nomenclatura
Cimento Portland IV-32 RS	CP
Sílica ativa	SA
Areia natural do Rio Paraná	AN
Areia artificial da britagem de basalto	AA
Material fino da areia natural	FAN
Material fino da areia artificial da britagem de basalto	FAA
Aditivo superplastificante	SP

Fonte: A autora (2020)

3.2.1 Cimento Portland

O cimento CP IV-32 RS é um cimento pozolânico resistente a sulfatos. Apresenta características como baixa taxa de hidratação, resistência à compressão menor nos primeiros dias, mas alta ao final da cura, alta durabilidade devido à sua maior impermeabilidade e resistência a agentes agressivos. Optou-se pela utilização desse cimento por já estar sendo utilizado em argamassas de reparos no vertedouro da Itaipu. Além disso, buscou-se também a aplicabilidade das argamassas desenvolvidas, visto que o CP IV-32 é um cimento bastante utilizado e de fácil acesso.

Após o recebimento do material, o mesmo foi pesado e separado em sacos herméticos de 2 kg que foram mantidos ao abrigo da luz e em ambiente com baixa umidade relativa, conforme recomendações de Winnefeld et al. (2016).

O cimento utilizado no presente estudo apresenta teor médio de adição de material pozolânico de 33,1%. A caracterização do material pelo fabricante está apresentada no Quadro 2.

Quadro 2: Propriedades do Cimento Portland CP IV-32 RS

Propriedades		Norma de referência	Especificações de Norma	Resultado médio
Químicas	Perda ao Fogo (%)	POCQ029	≤ 4,5	5,17
	Óxido de Magnésio - MgO (%)	POCQ023	≤ 6,5	2,69
	Trióxido de enxofre - SO ₃ (%)	POCQ023	≤ 4,0	1,23
Físicas	Resíduo na peneira #325 (%)	ABNT NBR 12826	não aplicável	1,50
	Área específica - Blaine (m ² /kg)	ABNT NBR NM 76	≥ 280	430,00
	Massa específica (g/cm ³)	ABNT NBR NM 23	não aplicável	2,97
	Início de pega (min.)	ABNT NBR NM 65	≥ 60	205,00
	Fim de pega (min.)	ABNT NBR NM 65	≤ 600	250,00
	Teor de água (%)	ABNT NBR NM 43	não aplicável	29,50
Mecânicas	Resistência à compressão 3 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	10,0	15,00
	Resistência à compressão 7 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	20,0	21,30
	Resistência à compressão 28 dias (MPa)	ABNT NBR 7215	32,0	35,90
Teor médio de adições – mat. pozolânico (%)				33,10

Fonte: O Fabricante (2020)

Nota: Relatório de Ensaio Lote 01/2020

3.2.2 Sílica Ativa

A sílica ativa é proveniente da produção de silício ou ligas de ferro-silício que é expelido na forma de fumaça durante o processo de produção e se condensa em partículas altamente reativas (NEVILLE, 2015). Optou-se por utilizá-la no presente estudo principalmente por suas características de redução da exsudação, melhora da coesão e densificação das partículas. Sua atuação não é tão significativa na melhora das propriedades mecânicas, mas destaca-se em aspectos relacionados à durabilidade em argamassas de reparo (SCHULER, 1998). Além disso, também foi utilizada no traço de referência do presente estudo (ver em 3.4).

3.2.3 Areia Natural

A areia mais utilizada na região de Foz do Iguaçu é a areia natural proveniente de jazida do Rio Paraná que usualmente apresenta granulometria de acordo com a norma C144 (ASTM, 2018). Esta areia foi utilizada como agregado miúdo em ambos os traços (tanto com FAN quanto com FAA). O material fino foi obtido a partir da cominuição da areia natural em moinho de bolas metálico por 24 horas. A

capacidade do moinho utilizado é de aproximadamente 280 litros (Figura 9a) e foram utilizadas 25 bolas metálicas de dois diâmetros diferentes (Figura 9b).

Figura 9: Moinho metálico (a) e bolas metálicas utilizadas (b)



Fonte: A autora (2019)

O tempo de moagem utilizado foi baseado em estudo anterior utilizando o mesmo equipamento, no qual foi necessário tempo superior a 24 horas para obtenção de material fino em quantidade significativa. No presente estudo, foram testados os tempo de 2 e 5 horas de moagem, porém não foram obtidas quantidades suficientes de material (< 2%). Portanto, optou-se pelo tempo de 24 horas de moagem, obtendo-se em torno de 15% de material fino.

3.2.4 Areia Artificial

A areia artificial utilizada é proveniente da britagem de basalto da região de Foz do Iguaçu – PR. Os agregados provenientes da britagem de rocha podem influenciar em características como trabalhabilidade e demanda d'água nas argamassas, devido principalmente à forma de suas partículas, além disso também pode ter efeito sobre alguns aditivos (CABRERA et al., 2011).

O material fino foi obtido a partir do peneiramento da areia artificial seca em peneira #200 (75 μ m).

3.2.5 Aditivo Superplastificante

O aditivo superplastificante utilizado é composto por policarboxilatos de última geração que possibilitam o aumento da fluidez de materiais cimentícios mesmo em baixas relações a/c. A dosagem orientativa de referência do fabricante é de 0,6%. As propriedades do aditivo estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3: Propriedades do aditivo superplastificante

Parâmetro	Unidade	Especificação	Resultados	Método
Aspecto	-	Líquido	Aprovado	Visual
Cor	-	Marrom claro	Aprovado	Visual
pH (puro) a 25°C	-	4,5 a 6,5	5,78	ABNT NBR 10908:2008
Massa específica a 25°C	g/cm ³	1,055 a 1,095	1,078	ABNT NBR 10908:2008
Teor de sólidos	%	33,0 a 37,0	34,89	ABNT NBR 10908:2008

Fonte: Fabricante (2019)

A presença de material fino em substituição ao agregado miúdo pode afetar a trabalhabilidade da argamassa, além disso foi utilizada baixa relação a/c o que tornou indispensável a utilização do aditivo.

3.2.6 Água

A água utilizada na mistura é potável e proveniente da rede de abastecimento interna da Itaipu Binacional.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Os materiais utilizados foram caracterizados através dos ensaios apresentados no Quadro 4.

Quadro 4: Ensaios de caracterização dos materiais utilizados

Ensaio	Procedimento		Materiais						
			CP	SA	AN	AA	FAN	FAA	SP
Distribuição granulométrica	Laser por via úmida em analisador de partículas Cilas 1190		X	X			X	X	
	ASTM C136 (2014)				X	X			
Finura	Método Blaine NBR 16.372 (ABNT, 2015)		X	X			X	X	
Identificação de elementos químicos	Análise química por espectrometria de fluorescência de raios X (FRX)	Semiquantitativa total por pó prensado	X	X					
		Quantitativa total em pastilha fundida					X	X	
Massa Específica	C128 (ASTM, 2015), método do picnômetro				X	X			
Absorção de Água					X	X			
Início e fim de pega	NBR 16607 (ABNT, 2018)		X						
Ponto de saturação	Aitcin (1998), métodos do miniabatimento e Funil de Marsh								X

Fonte: A autora (2021)

3.3.1 Distribuição Granulométrica

O ensaio de granulometria a laser do CP e da SA foram realizados no Laboratório de Desempenho, Estruturas e Materiais da UNILA em analisador de partículas Cilas 1190 (Figura 10a) com intervalo de medidas de 0,04 a 2500 μm , 3 lasers e 100 classes, em meio líquido. Foram analisadas 3 amostras de cada material.

Para o ensaio de granulometria da AN seguiu-se os procedimentos da norma C136 (ASTM, 2014) utilizando-se um peneirador mecânico (Figura 10b).

Figura 10: Analisador de partículas (a) e peneirador mecânico (b) para ensaio de distribuição granulométrica



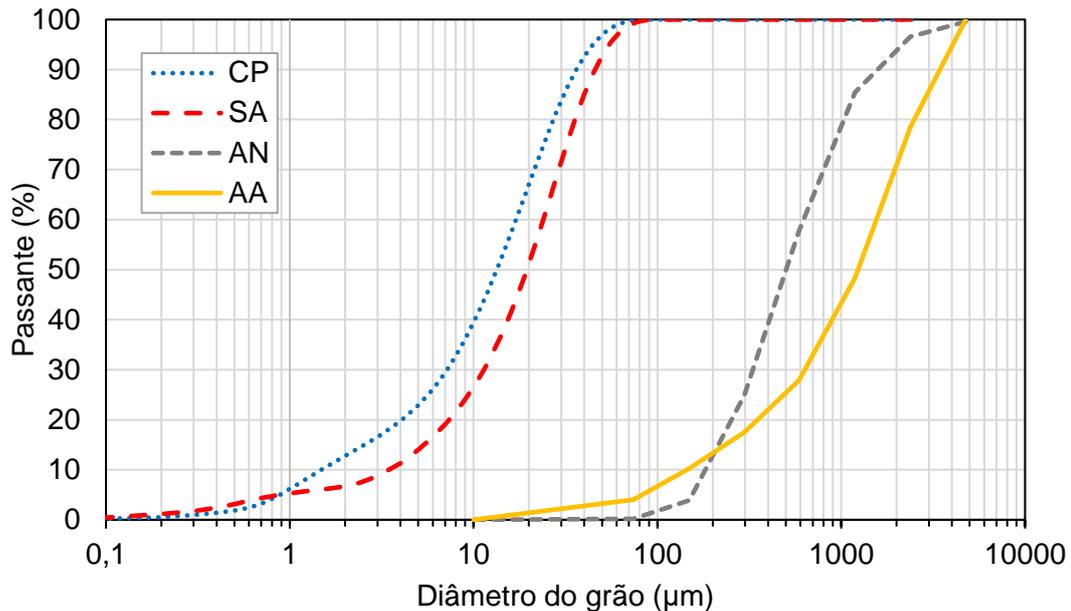
Fonte: A Autora (2020)

Foram utilizadas amostras de 500 g de material previamente reduzido de acordo com a norma C702 (ASTM, 2018) pelo método do separador mecânico. Após o peneiramento foram realizadas as verificações e as amostras foram consideradas conformes.

A areia artificial (AA), contém grande quantidade de finos, portanto, previamente à análise granulométrica foi realizado ensaio de material mais fino que 0,075 mm passante na peneira #200 por lavagem (% de pulverulento), de acordo com a norma C117 (ASTM, 2017). Foram utilizadas amostras de 500g de material previamente reduzido de acordo com a norma C702 (ASTM, 2018) pelo método para pequenos estoques de agregado. A quantidade de material fino apresentada pela AA foi de 15,2%.

A partir dos resultados médios obtidos obteve-se a curva granulométrica dos materiais, apresentada na Figura 11.

Figura 11: Distribuição granulométrica dos materiais



O CP apresentou tamanho médio de partícula de 13,36 µm e a SA de 19,51 µm. Observou-se que a curva granulométrica da sílica ativa pode ter sido influenciada pela aglomeração do material, episódio que pode ocorrer durante o ensaio devido exatamente à dificuldade de dispersar as partículas deste material.

A AN apresentou granulometria dentro dos limites estabelecidos pela norma de agregados para argamassas C144 (ASTM, 2018) com diâmetro máximo característico de 2,38 e módulo de finura de 2,32. Já a AA apresentou diâmetro máximo característico de 4,76 e módulo de finura de 3,20.

A distribuição granulométrica dos materiais finos está apresentada no Capítulo 4 do presente trabalho (Resultados) por serem agentes principais do estudo e sua caracterização ser parte integrante dos resultados.

3.3.2 Finura por Permeabilidade ao Ar

O ensaio de finura foi realizado pela metodologia de permeabilidade ao ar, ou método de Blaine, de acordo com a NBR 16.372 (ABNT, 2015). Os resultados médios obtidos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1: Finura pelo método de Blaine

Material	Porosidade	Finura/ Área específica (cm²/g)
CP	0,50	3.580
SA	0,70	27.160
FAN	0,50	3.450
FAA	0,50	1.890

Observa-se que a finura obtida da sílica ativa foi bem maior que a do cimento Portland neste ensaio, corroborando com a afirmação anterior de que a granulometria a laser da sílica ativa foi possivelmente influenciada pela aglomeração de partículas do material.

3.3.3 Início e Fim de Pega

Para a realização do ensaio de início e fim de pega (parâmetro para o início das medições da retração autógena) foi realizado ensaio de pasta de consistência normal pela norma C187 (ASTM, 2016) obtendo-se porcentagem de massa de água de 31,5% (Figura 12a). O resultado obtido diferiu do apresentado pelo fabricante (de 29,5%) e, portanto, os resultados de início e fim de pega também apresentaram discrepâncias. Optou-se por utilizar os resultados obtidos neste ensaio para o presente estudo.

O ensaio de início e fim de pega foi realizado com aparelho de Vicat Vicamatic 2 pelo método automático (ABNT NBR 16607, 2018), conforme a Figura 12b. O ambiente de ensaio foi mantido em temperatura e umidade relativa constantes.

Figura 12: Ensaio em andamento de pasta de consistência normal (a) e de início e fim de pega do cimento (b)



Fonte: A Autora (2020) e LTCI (2021)

O tempo de início de pega do cimento foi de 260 minutos e de fim de pega foi de 330 minutos.

3.3.4 Massa Específica

Para o ensaio de massa específica das areias AN e AA seguiu-se os procedimentos apresentados pela norma C128 (ASTM, 2015) (Figura 13) sendo que para o ensaio da AA, as amostras foram previamente lavadas.

Figura 13: Procedimentos do ensaio de massa específica da AN e AA pelo método do picnômetro



Fonte: A Autora (2019)

A AN apresentou massa específica de 2,53 g/cm³ e a AA apresentou massa específica um pouco mais alta de 2,72 g/cm³.

3.3.5 Absorção de Água

O ensaio de absorção de água da AN e AA foi realizado juntamente com o ensaio de massa específica pelo método do picnômetro. A AN apresentou absorção de água de 0,37% e a AA de 1,46%.

Para a análise da absorção de água do agregado com adição de material fino foi realizado ensaio adaptado de Tam et al. (2008). O ensaio consistiu em secar uma amostra do material (areia natural do rio Paraná com as porcentagens de material fino) em estufa a 75 ± 5 °C por 24 horas. Em seguida a amostra foi colocada em um picnômetro aferido em um ambiente com temperatura controlada a 23 ± 2 °C. Adicionou-se água e o recipiente foi então levemente agitado durante 10 minutos para retirada de ar, água foi adicionada até a marca de 500 cm³ e registrou-se a massa do conjunto.

Em seguida o recipiente foi fechado e colocado em imersão em um banho de modo a manter a temperatura do conjunto (23 ± 2 °C) e permaneceu assim por 24 horas. Após esse período, registrou-se a massa do conjunto e adicionou-se a água absorvida até a marca, registrando-se a massa do conjunto novamente. Os resultados obtidos seriam utilizados como base para a compensação de água de mistura nas argamassas estudadas. Os teores de 15 e 25% de finos foram definidos de modo a observar se haveria alteração acima do teor de 15% utilizado no presente estudo.

Os resultados médios obtidos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Absorção de água do agregado miúdo com adição de finos

% de finos	Absorção de água (%)	
	Areia Natural + FAN	Areia Natural + FAA
0	0,37	0,37
15	0,28	0,32
25	0,34	0,32

Devido ao fato de ser necessário o término das atividades em laboratório no início de 2020, não foi possível finalizar as análises com todas as percentagens de material fino. Portanto, em retorno às atividades em 2021, utilizou-se como parâmetro para a compensação de água de mistura nas argamassas, os valores de absorção de água das areias natural e artificial obtidos anteriormente.

3.3.6 Quantificação de Elementos Químicos (FRX)

A composição química dos materiais foi determinada por ensaio de espectrometria por fluorescência de raios X em equipamento Malvern PANalytical Axios-mAX, com tubo de ródio. Foram realizados por análise química semiquantitativa total pela metodologia de pó prensado para o CP e a SA e por análise química quantitativa total pela metodologia de pastilha fundida com tetraborato de lítio/metaborato de lítio para o FAN e FAA. De acordo com o Laboratório de Análises de Minerais e Rochas – LAMIR da Universidade Federal do Paraná em Curitiba (2020), onde foram realizados os ensaios, a análise semiquantitativa pode apresentar precisão variável, em alguns casos aproximando-se da análise quantitativa ou, em outros, apresentando falsas indicações de elementos presentes em baixas concentrações, pois nessa técnica não é possível identificar o estado de oxidação dos elementos.

Os resultados médios das análises estão apresentados na Tabela 3 a seguir.

Tabela 3: Composição química dos materiais pelo ensaio de FRX

Material	Composição (%)													
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	MnO	P ₂ O ₅	ZnO	SrO	SO ₃	P.F
CP	25,8	6,6	3,5	52,1	2,1	1,0	0,2	0,4	0,7	0,2	<0,1	0,3	1,7	5,4
SA	93,9	0,4	0,1	0,9	0,5	1,0	0,3	-	<0,1	0,2	-	<0,1	0,2	2,42
FAN	91,86	2,73	2,35	0,26	0,12	1,18	0,2	0,55	0,03	0,04	-	-	-	0,95
FAA	50,92	13,44	13,72	8,44	4,38	1,55	2,98	2,58	0,2	0,59	-	-	-	1,34

*P.F: Perda ao fogo

O cimento Portland apresentou 52,1% de óxido de cálcio (CaO) e 25,1% de dióxido de silício (SiO₂), enquanto a sílica apresentou 93,9% deste último como componente predominante.

Observa-se que nos materiais finos o elemento químico que se apresenta em maior quantidade, como já esperado, é o dióxido de silício (SiO_2) ou quartzo com 91,86% no FAN e 50,92% no FAA. O FAA apresentou maior variedade de elementos químicos em maior quantidade, como os óxidos de alumínio (Al_2O_3), ferro (Fe_2O_3) e cálcio (CaO).

3.3.7 Saturação do Aditivo

A presença de material fino em substituição ao agregado miúdo e a baixa relação a/c pode dificultar a mistura e trabalhabilidade da argamassa, portanto a utilização de aditivo superplastificante foi considerada indispensável. A dosagem adequada possibilita a utilização ótima do material e evita desperdícios. Dessa forma, antes da mistura dos materiais foi realizado o ensaio de ponto de saturação do aditivo, que visa determinar a máxima quantidade de aditivo acima da qual não é observada melhora da fluidez da pasta de cimento, a partir dos métodos do Funil de Marsh e do miniabatimento.

O ensaio seguiu os procedimentos descritos por Aitcin (1998). As dosagens levaram em consideração o teor de sólidos do aditivo (34,89%) disponibilizado pelo fabricante. De acordo com o autor, as dosagens de superplastificante para medição do ponto de saturação do aditivo são expressas em porcentagem de sólidos contidos no superplastificante para a massa de cimento. Assim, os teores de aditivo aqui utilizados são da porcentagem de sólidos e a quantidade de água presente no aditivo foi descontada da água de mistura. A temperatura do ambiente de ensaio foi mantida a 23 ± 1 °C.

Para o ensaio do miniabatimento utilizou-se um molde tronco-cônico e uma folha de papel milimetrado sob uma placa de vidro. O recipiente foi preenchido com pasta e levantou-se o molde cerca de 3 cm da superfície esperando o material escoar. Após estabilização, mediu-se 8 diâmetros de espalhamento com a ajuda de um papel milimetrado com demarcações (Figura 14).

Figura 14: Ensaio de saturação do aditivo pelo método do miniabatimento



Fonte: A Autora (2019)

Para o ensaio de funil de Marsh foi utilizado o cone do *Corps of Engineers*, conforme mostra a Figura 15.

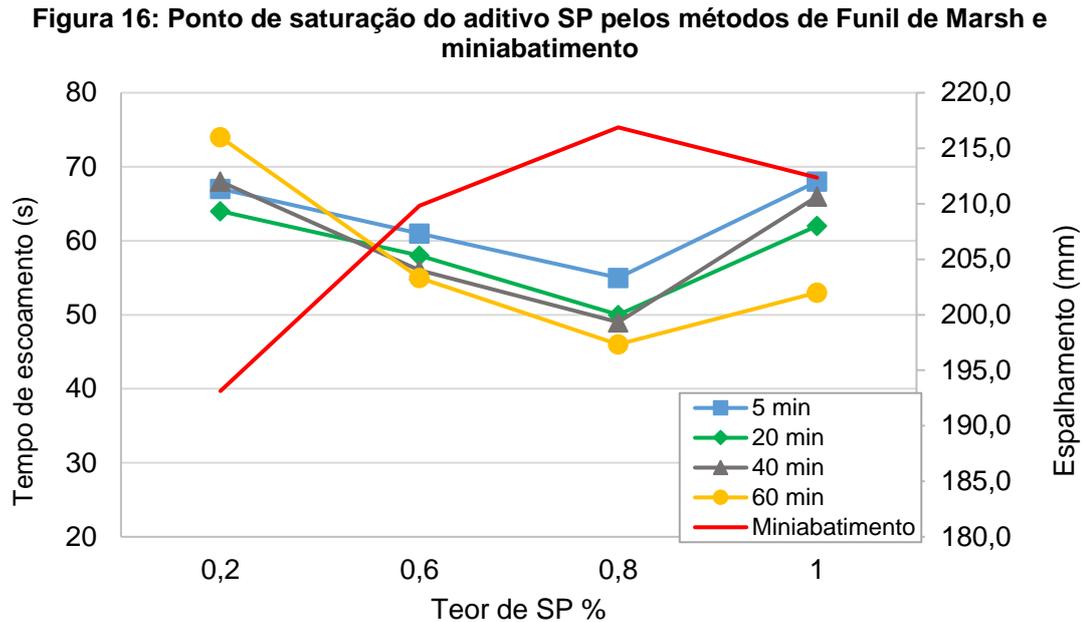
Figura 15: Ensaio de saturação do aditivo pelo método do funil de Marsh



Fonte: A Autora (2019)

Em seguida ao ensaio do miniabatimento, a pasta foi misturada novamente antes de iniciar-se o ensaio do funil de Marsh. A pasta foi colocada no funil enquanto o orifício de saída foi tapado, assim que toda a pasta estava contida no funil, o orifício foi destampado e o cronômetro foi iniciado. Foram medidos os tempos de escoamento para 200, 400, 500, 600, 800, 900 e 1000 ml e as leituras foram realizadas aos 5, 20, 40 e 60 minutos após a mistura do cimento e água. A pasta permanecia em repouso no recipiente de mistura até a próxima leitura, quando era novamente colocada no misturador em velocidade baixa por 30 s.

Os resultados médios obtidos pelo escoamento de 200 ml da pasta (400 a 600 ml) estão apresentados na Figura 16.



Fonte: A Autora (2019)

Após a realização do ensaio e análise dos resultados, observou-se que o aditivo necessitou de algum tempo para iniciar a ação, observação corroborada pelo ensaio-teste de consistência apresentado em 3.4.1, no qual o aditivo apresentou tempo de ação de 5 minutos. Porém, como as condições de ensaio foram as mesmas para todos os teores de aditivo, o resultado de 0,8% foi considerado adequado.

3.4 TRAÇOS E DOSAGENS

O traço utilizado no presente estudo foi desenvolvido por recomendações do Engenheiro Walton Pacelli de Andrade e pelo fato de ser a adaptação de um traço de argamassa que já vem sendo utilizado com bons resultados em reparos de estruturas de usinas hidrelétricas no Brasil (informação verbal)¹, incluindo a Itaipu Binacional que vem utilizando traço similar em reparos do vertedouro. O traço de referência foi apresentado no relatório oficial de atividades de segurança de barragens no “Board de Consultores Civis de Itaipu” em 2018 (ITAIPU BINACIONAL, 2018).

O traço foi definido em 1:0,1:2,321:0,33, dosados em massa e em relação ao total de aglomerante, o consumo de cimento do traço de referência foi de

¹ Fala do engenheiro Walton Pacelli de Andrade, em 2017.

613,82 kg/m³. A relação a/c utilizada foi definida a partir de estudos que afirmam que a retração autógena é maior em relações a/c abaixo de 0,40 (ver gráfico da Figura 4). Foram realizadas 3 dosagens com substituição do agregado miúdo por material fino de areia natural e de areia artificial nas proporções de 5, 10 e 15%, além da referência. A Tabela 4 apresenta as dosagens de argamassas produzidas.

Tabela 4: Dosagens das argamassas produzidas

Argamassas	Cimento	Sílica ativa	Agregado miúdo	Finos		Aditivo (%)*	a/ag**	Consumo de cimento (kg/m ³)
			Areia Natural	FAN	FAA			
A0	1	0,1	2,321	-	-	0,8	0,33	613,82
AN5	1	0,1	2,205	0,116	-	0,8	0,33	613,82
AN10	1	0,1	2,089	0,232	-	0,8	0,33	613,82
AN15	1	0,1	1,973	0,348	-	0,8	0,33	613,82
AA5	1	0,1	2,205		0,119	0,8	0,33	614,63
AA10	1	0,1	2,089		0,238	0,8	0,33	615,38
AA15	1	0,1	1,973		0,357	0,8	0,33	616,14

*Porcentagem sobre o consumo de aglomerante

**a/ag = cimento + sílica ativa

O teor de aditivo utilizado refere-se à porcentagem de sólidos sobre a massa de cimento e a quantidade de água presente no aditivo foi descontada da água de mistura. Utilizou-se traço em massa para as dosagens com FAN e em volume para as dosagens com FAA, devido à diferença de massa específica dos materiais.

O total de corpos de prova produzidos estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5: Quantidade de corpos de prova produzidos

Ensaio		Nº de CPs	Formato CPs	Dosagens	Idades	Total
Retração	Autógena	2	Cilíndrico (29±5 mm x 420±5 mm)	A0, AN5, AN10, AN15, AA5, AA10 e AA15	-	14
	Secagem	6	Prismático (25x25x285 mm)	A0, AN5, AN10, AN15, AA5, AA10 e AA15	-	42
Resistência à compressão e Módulo de elasticidade		5	Cilíndrico (50x100 mm)	A0, AN5, AN10, AN15, AA5, AA10 e AA15	7 e 28	70
Total						126

3.4.1 Ensaio Teste de Consistência da Argamassa

Foi realizado um ensaio teste com argamassa em mesa de consistência, com 25% de material fino em substituição ao agregado miúdo para verificar a trabalhabilidade e consistência, bem como a atuação do aditivo superplastificante. Antes da moldagem, os materiais foram trazidos ao laboratório a temperatura de $\pm 23^{\circ}\text{C}$, foram separados e pesados (Figura 17a). O cimento foi misturado com a sílica e a areia integral misturada com o material fino antes do início da mistura. O procedimento de mistura seguiu os seguintes passos:

- 1) Colocou-se na cuba toda a água e o aditivo superplastificante, tomando-se o cuidado de lavar o recipiente do aditivo com a água de mistura;
- 2) O cimento foi adicionado e o misturador foi ligado em velocidade baixa por 30s;
- 3) Após esse tempo e sem desligar o misturador, a areia foi sendo colocada aos poucos, no intervalo de 1 min;
- 4) O misturador foi mantido ligado por mais 1 min em velocidade baixa devido à perda de material caso a velocidade fosse aumentada;
- 5) Nesse ponto verificou-se que a mistura não havia se homogeneizado e o misturador permaneceu ligado por 5 min em velocidade baixa (Figura 17b).

Figura 17: Materiais (a) e mistura da argamassa (b)



Fonte: A Autora (2019)

Após 5 minutos de mistura, pôde-se perceber a homogeneização da argamassa, foi então realizado o primeiro ensaio de consistência. Após o ensaio de consistência, voltou-se o material ao misturador e foi realizada a mistura por 2 min em

velocidade baixa e realizado novamente o ensaio de consistência de acordo com a norma C1437 (ASTM, 2015), esse procedimento foi repetido por mais uma vez.

Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6: Ensaio teste de consistência (AN25)

Tempo de mistura	Consistência (mm)	Média (mm)
5 minutos	316,68	325,16
	324,71	
	334,10	
+ 2 minutos	311,38	322,59
	321,70	
	334,70	
+ 2 minutos	316,60	318,14
	308,82	
	329,00	

3.5 MISTURA E MOLDAGEM

Para o procedimento de mistura das argamassas foram seguidas as especificações da norma C305 (ASTM, 2014) em relação à ordem de inserção dos materiais, adaptadas ao tempo de atuação do aditivo observado no ensaio teste de consistência utilizando-se um misturador elétrico. Primeiramente foi adicionada a água e o aditivo, em seguida todo o cimento previamente misturado com a sílica, e o misturador foi ligado em velocidade baixa durante 60 segundos. Foi adicionada a areia e o material fino previamente misturados em 3 partes intercaladas com o misturador ligado por 30 segundos em velocidade baixa. Com o equipamento desligado, foi retirada com uma espátula a argamassa aderida às laterais e à pá do misturador e a mistura permaneceu em repouso por 1 min e 30 s. Em seguida misturou-se por mais 5 minutos em velocidade baixa.

3.5.1 Moldagem para Ensaio de Retração Autógena

Os corpos de prova para ensaio de retração autógena foram

moldados em tubos corrugados de 29 mm de diâmetro por 420 mm de comprimento, pois as corrugações oferecem pouca resistência à mudança de comprimento. O molde e o suporte foram colocados em uma mesa elétrica de adensamento, conforme mostra a Figura 18:.

A moldagem foi realizada com a ajuda de um funil e haste de adensamento. O procedimento de moldagem foi o seguinte:

1. A argamassa foi colocada no molde em 4 camadas com a ajuda da haste de adensamento e com a mesa de adensamento ligada (em torno de 10 golpes);
2. Após cada camada foram aplicados 5 golpes com a haste de adensamento e em seguida mais 5 golpes com a mesa;
3. O molde havia sido selado em uma das extremidades com o plug e foi fechado com outro plug, limpo e colocado no suporte horizontal para pesagem (Figura 19) (a massa epóxi colocada nas extremidades foi depois considerada no cálculo, bem como a massa do suporte).

Figura 18: Procedimento de mistura (a) e moldagem (b) das argamassas para ensaio de retração autógena



Fonte: A Autora (2021)

Figura 19: Molde fechado preenchido (a) e posicionado no suporte ondulado para pesagem (b)



Fonte: A Autora (2021)

Devido ao fato de as leituras de retração autógena somente poder ser realizadas uma de cada vez, as moldagens foram produzidas 1 por dia de forma contínua iniciando-se pela referência A0 e seguindo-se com a AN5, AN10, AN15, AA5, AA10 e AA15. O processo foi repetido mais uma vez para a moldagem do segundo corpo de prova de cada dosagem.

3.5.2 Moldagem para Ensaio de Retração por Secagem

Para os ensaios de retração por secagem foram utilizados moldes metálicos prismáticos de 25 x 25 x 285 mm (Figura 20). O procedimento de mistura seguido foi o mesmo do ensaio para retração autógena. Os moldes foram previamente untados com óleo mineral e a moldagem foi realizada em 2 camadas compactadas com auxílio de soquete e a superfície rasada com uma espátula.

Figura 20: Moldes para os corpos de prova prismáticos



Fonte: A Autora (2020)

Em seguida os parafusos foram afrouxados para prevenir qualquer restrição de retração nas primeiras idades. Os corpos de prova de retração por secagem foram desmoldados após $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$. O procedimento de cura dos corpos de prova está descrito no tópico 3.8 do presente trabalho.

3.5.3 Moldagem para Ensaios de Resistência à Compressão e Módulo de Elasticidade

Os corpos de prova cilíndricos de argamassa de $50 \times 100 \text{ mm}$ para os ensaios de propriedades mecânicas e elásticas foram moldados e curados de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019). Foram desmoldados após $24 \text{ h} \pm 30 \text{ min}$ da mistura do cimento com a água para a realização dos ensaios.

3.6 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

Para a caracterização das argamassas no estado fresco foram realizados ensaios de índice de consistência de acordo com a norma C1437 (ASTM, 2015), conforme apresenta a Figura 21. O ensaio foi realizado para todas as dosagens, com duas repetições.

Figura 21: Mesa de ensaio de índice de consistência



Fonte: A Autora (2021)

3.7 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

As argamassas foram ensaiadas de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018) para resistência à compressão e de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2017) para módulo estático de elasticidade à compressão, ambos aos 7 e 28 dias de idade. Foram ensaiados 5 corpos de prova para cada dosagem e idade, e antes da execução do ensaio, foi realizada a retificação da base e o topo dos corpos de prova para eliminar qualquer irregularidade superficial e obter bases paralelas para execução do ensaio.

A Figura 22 apresenta os corpos de prova cilíndricos moldados e o equipamento medidor de resistência à compressão juntamente com os medidores de deformação mecânicos para ensaio de módulo de elasticidade já acoplados ao corpo de prova. Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia do Concreto de Itaipu – LTCl em equipamento classe 1.

Figura 22: Corpos de prova em estado fresco (a) e ensaio de resistência à compressão e módulo de elasticidade (b)



Fonte: A Autora (2021 e 2020)

3.8 ENSAIOS DE RETRAÇÃO DAS ARGAMASSAS

Os ensaios para caracterizar a retração das argamassas, serão descritos separadamente por ser objeto principal de estudo do presente trabalho, a seguir detalha-se os procedimentos metodológicos para a medida da retração autógena e retração por secagem pelas normas C1698 e C157, respectivamente.

3.8.1 Ensaio de Retração Autógena

A retração autógena das argamassas foi medida a partir da deformação volumétrica de corpos de prova em temperatura constante e sem ação de forças externas conforme a norma C1698 (ASTM, 2019). Foram moldados 2 corpos de prova para cada dosagem, a Figura 23 apresenta os corpos de prova sobre suporte ondulado.

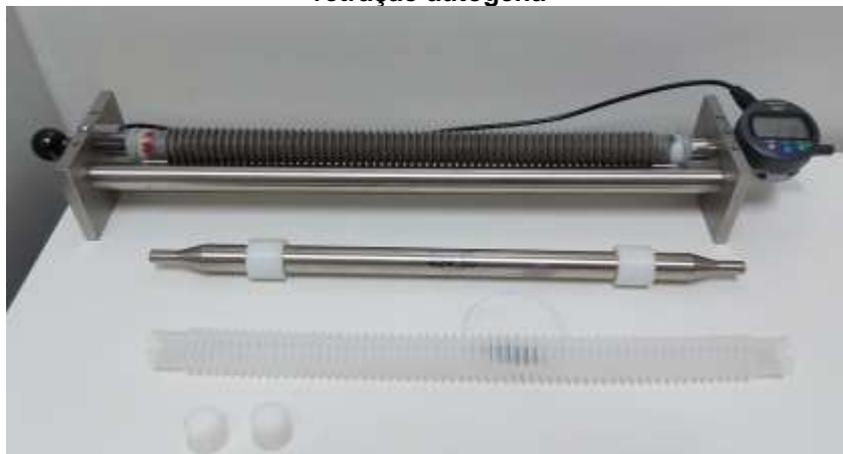
Figura 23: Corpos de prova para ensaio de retração autóloga



Fonte: A Autora (2021)

A medição da deformação foi realizada em dilatômetro com relógio comparador e sistema de aquisição de dados com o auxílio de uma barra de Invar para referência (Figura 24). O equipamento denominado Auto-Shrink foi adquirido pelo projeto de pesquisa diretamente com o fabricante.

Figura 24: Molde, barra de referência, dilatômetro e relógio comparador para ensaio de retração autóloga



Fonte: A Autora (2021)

A primeira medição ocorreu a partir do tempo final de pega do cimento. As leituras foram realizadas a cada 10 minutos nas primeiras 24 horas e seguiram por intervalos regulares até pelo menos os 28 dias de idade. Juntamente com as leituras de deformação foram monitoradas a temperatura ambiente, umidade relativa do ar e as variações de massa (Figura 25).

Figura 25: Aferição com termohigrômetro e pesagem dos corpos de prova



Fonte: A Autora (2021)

A mudança de comprimento dos corpos de prova é dada pela Equação 1.

$$L(t) = L_{ref} + R(t) - 2 \times L_{plug} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

$L(t)$ = comprimento no tempo t ;

L_{ref} = comprimento da barra de referência (mm);

$R(t)$ = leitura (mm);

L_{plug} = média de comprimento dos plugs de extremidade (mm).

A deformação por retração autógena é calculada pela Equação 2.

$$\varepsilon_{autógena} = \frac{L(t) - L(t_{fs})}{L(t_{fs})} \times 10^6 = \frac{R(t) - R(t_{fs})}{L(t_{fs})} \times 10^6 \mu m/m \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

t_{fs} = final da pega, quando é realizada a primeira leitura (min).

A mudança de massa é obtida pela Equação 3.

$$\Delta M = M_s(t_e) - M_s(t_{fs}) \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

ΔM = perda de massa;

M_s = massa medida ao final do ensaio (g);

(t_e) = idade da última medição (min);

$M_s(t_{fs})$ = massa no início da pega quando a primeira leitura é realizada (g).

3.8.2 Ensaio de Retração por Secagem

Para a análise das variações de comprimento que não são provocadas por causas externas como aplicação de tensão ou mudança de temperatura, foi seguido o procedimento proposto pela norma C157 (ASTM, 2017) utilizando-se um aparato de medição de deformação.

Foram moldados 6 corpos de prova para cada dosagem, após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados em câmara úmida por 24 h \pm 30 min, desmoldados e colocados em solução saturada de hidróxido de cálcio por pelo menos 15 minutos para então ser realizada a primeira leitura. Em seguida, os corpos de prova foram recolocados em imersão até a idade de 28 dias quando foi realizada a segunda leitura.

Após a segunda leitura, os corpos de prova foram acondicionados em estante espaçados entre si para que houvesse adequada circulação de ar em todas as suas faces. Permaneceram em ambiente controlado com temperatura de 20 \pm 3 °C e umidade relativa de 60 \pm 20 °C para secagem por aproximadamente 75 dias após a segunda leitura para a dosagem com FAN e 40 dias para a dosagem com FAA (devido aos ensaios não terem sido realizados simultaneamente) sendo realizadas leituras em intervalos regulares. A Figura 26 apresenta o acondicionamento dos corpos de prova.

Figura 26: Acondicionamento dos corpos de prova para secagem



Fonte: A autora (2020)

Antes de cada leitura de retração foram medidas a temperatura e a umidade relativa do ambiente de ensaio. Também foram medidas as massas de cada corpo de prova. A Figura 27 apresenta o procedimento de ensaio.

Figura 27: Procedimento de ensaio de retração por secagem



Fonte: A autora (2020)

A retração por secagem foi calculada subtraindo-se a leitura inicial tomada logo após a retirada da cura úmida, da leitura realizada em cada idade de secagem expressa em milionésimos e em porcentagem da distância efetiva entre parafusos.

O cálculo da mudança de comprimento dos corpos de prova foi dado

pela Equação 4 a seguir:

$$\Delta L_x = \frac{CRD - CRD_{inicial}}{G} \times 100 (\%) \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

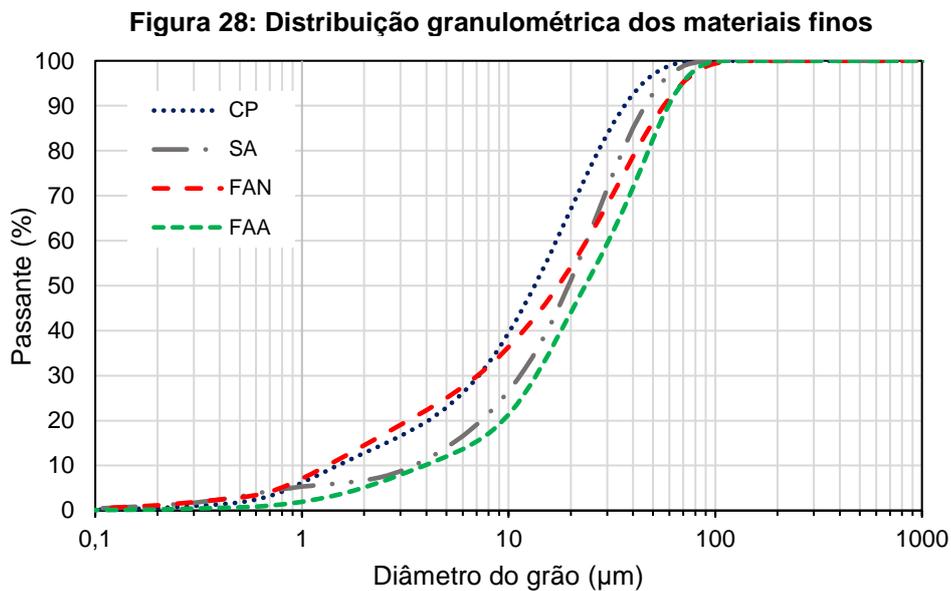
CRD = diferença entre a leitura do corpo de prova e a barra de referência em determinada idade;

G = distância entre parafusos (mm).

4 RESULTADOS

4.1 DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DOS MATERIAIS FINOS

Os resultados médios da distribuição granulométrica dos materiais finos de areia natural e artificial estão apresentados na Figura 28 juntamente com as curvas do cimento e da sílica ativa.



O FAN apresentou tamanho médio de partícula de 17,39 μm e D90 de 56 μm , ou seja, apresenta 90% das partículas menores que 56 μm . O FAA, apresentou diâmetro médio de 23,49 μm e D90 de 59 μm . A Tabela 7 apresenta as propriedades granulométricas dos materiais utilizados.

Tabela 7: Propriedades granulométricas dos materiais

Propriedade	AN	AA	CP	SA	FAN	FAA
Diâmetro máximo característico	2,38	4,76	-	-	-	-
Módulo de finura	2,32	3,20	-	-	-	-
Finura Blaine (cm^2/g)	-	-	3.850	27.160	3.450	1.890
D10 (μm)	190	149	1,48	3,46	1,33	3,92
D50 (μm)	500	1200	13,36	19,51	17,39	23,49
D90 (μm)	1600	3500	36,29	45,80	56,35	59,35

Observa-se que o FAN apresenta maior quantidade de material fino em comparação ao FAA, porém com distribuição de tamanhos de partículas próximos entre si. A relevância de se conhecer a distribuição granulométrica das adições para substituição ao agregado natural está principalmente na possibilidade de se determinar faixas de tamanhos de partículas satisfatórias para atender requisitos específicos de propriedades em materiais cimentícios, conforme citam Li et al. (2019).

Além da distribuição e tamanho de partículas, é importante observar propriedades como área e superfície específicas dos agregados e adições. No presente estudo a finura observada foi maior para o FAN apresentando-se cerca de 45% mais fino que o FAA. Os materiais finos possuem maior superfície específica e sua adição às dosagens de materiais cimentícios pode influenciar significativamente várias propriedades como a reologia, demanda d'água, trabalhabilidade, resistência e retração de argamassas (CEPURITIS et al., 2017; LI et al., 2019; MEHTA e MONTEIRO, 2008; SHI-CONG e CHI-SUN, 2009; e WESTERHOLM et al., 2008). Maiores superfícies específicas dos materiais finos possibilitam maior interação com aditivos superplastificantes pela maior superfície disponível, conforme citam Cepuritis et al. (2017). Os autores observaram que a reologia das pastas cimentícias se mostrou proporcional à superfície específica podendo ser controlada alterando-se a distribuição de tamanho de partícula e a fração volumétrica dos materiais finos.

Mehta e Monteiro (2008) citam que agregados britados, devido à forma e à superfície específica das partículas, podem aumentar a resistência à compressão de materiais cimentícios devido a uma ligação física mais forte entre agregado e pasta de cimento hidratada, mas que esse ganho de resistência pode ser perdido com a maior demanda d'água necessária.

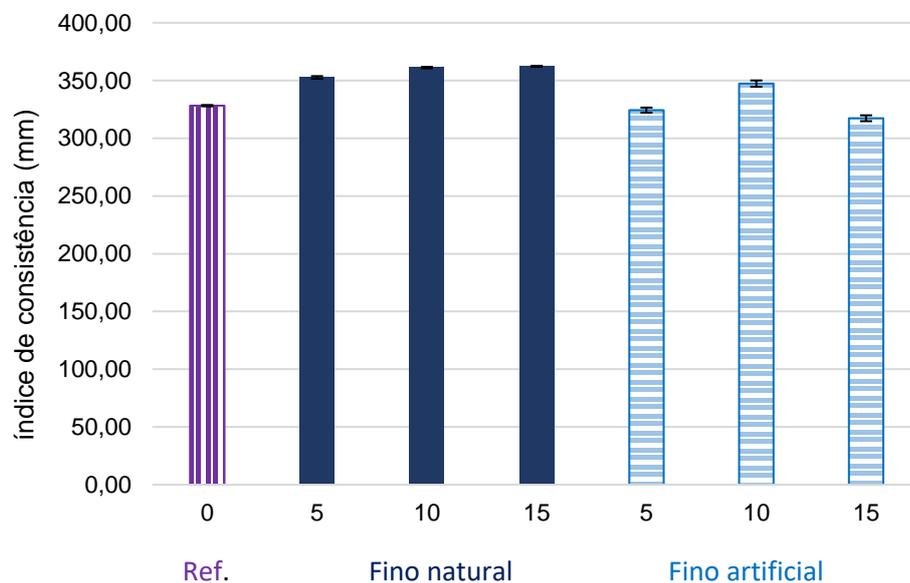
Para Shi-Cong e Chi-Sun (2009), o tamanho da partícula de agregado influencia diretamente a retração por secagem, sendo esta mais pronunciada utilizando-se menores tamanhos de partícula devido à superfície específica do material.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO FRESCO

4.2.1 Índice de Consistência

Os resultados médios do índice de consistência das argamassas estão apresentados no gráfico da Figura 29. Os resultados dos ensaios estão apresentados no APÊNDICE 2.

Figura 29: Índice médio de consistência das argamassas estudadas



A consistência das argamassas com FAN apresentou aumento gradual com a adição do material fino inerte. Já a argamassa com adição de FAA não apresentou esse comportamento, pois o maior índice de consistência foi observado na dosagem com teor de 10% de adição. Esse mesmo comportamento foi verificado em ensaios pilotos deste projeto, nos quais o maior índice de consistência observado foi da dosagem AA10 e o menor da AA15. Este fato pode estar relacionado a uma maior dificuldade na mistura da argamassa com porcentagem de FAA acima de 10%, pois durante os ensaios observou-se que a trabalhabilidade da argamassa produzida com o material acima desse teor era menor quando comparada à areia natural, conforme também observado por Jurowski e Grzeszczyk (2015). Ressalta-se que foram mantidos o modo e tempos de mistura para todas as argamassas. Nos estudos

de Martínez et al. (2016), os autores também observaram uma redução na trabalhabilidade de argamassas produzidas com agregados reciclados devido à maior absorção de água deste material, como pode ter ocorrido com a areia artificial que apresentou absorção de 1,46% enquanto a absorção da areia natural foi de 0,37%.

Outro fator que pode explicar esse comportamento está relacionado às características dos materiais finos, em relação à finura por exemplo, o FAN apresentou maiores valores em relação ao FAA. Além disso, o material fino proveniente da britagem de rocha difere do agregado de areia natural principalmente na classificação granulométrica e na forma das partículas. Enquanto o agregado natural apresenta partículas arredondadas e suaves, o agregado proveniente de britagem de rocha apresenta formas angulares e superfície mais áspera, sendo essas características causas de maior demanda d'água e menor trabalhabilidade na produção de materiais cimentícios, conforme observaram Li et. al (2019), Shi-Cong e Chi-Sun (2009) e Westerholm et al. (2008). Apesar de o material fino natural ter sido obtido da cominuição de areia natural em moinho de bolas, sabe-se que neste tipo de moagem os movimentos de fragmentação se dão – diferentemente do processo de britagem – ao mesmo tempo por impacto, compressão e atrito, produzindo formas diferentes de partículas. Esse comportamento foi observado por He et al. (2021) utilizando escória de alto-forno, no qual a cominuição por moinho de bolas apresentou partículas com maior grau de esfericidade quando comparado à cominuição por rolos verticais. Contudo, cabe ressaltar que a análise da forma de partículas não fez parte do escopo do presente estudo.

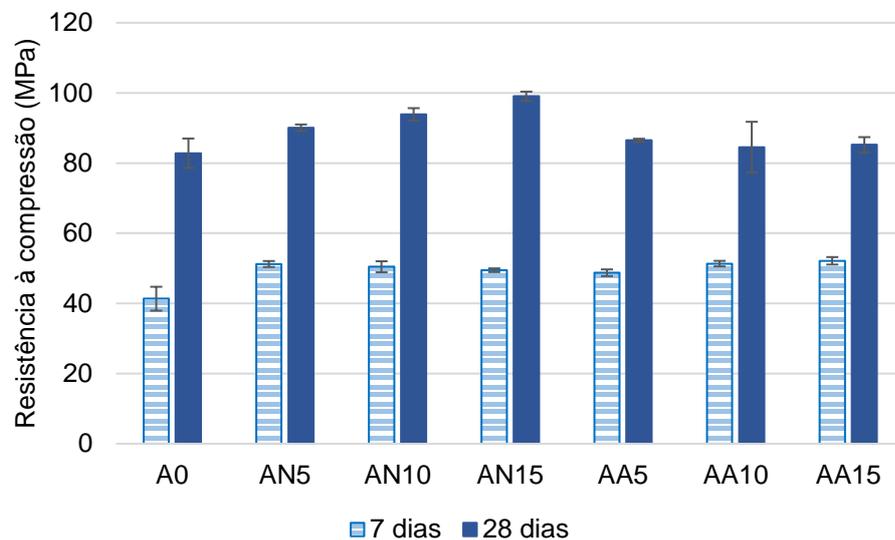
De forma similar ao observado com o FAN no presente estudo, Braga et al. (2012) observaram um incremento da trabalhabilidade conforme aumentou-se a adição em até 15% de material fino de concreto reciclado, indicando que o tamanho, forma e textura da partícula interferem na consistência das argamassas. Cepuritis, et al. (2017) apontam também que podem ser observadas alterações na reologia do concreto quando simplesmente substitui-se a areia natural pela areia britada, sem nenhum ajuste de distribuição de partículas ou no modo de mistura. Essas alterações nas propriedades reológicas de pastas de cimento estão relacionadas principalmente à superfície específica do material fino e sua interação com os aditivos superplastificantes. Os autores salientam ainda que alguns tipos de finos podem ter maior afinidade com os aditivos superplastificantes, resultando na deficiência de aditivo para a dispersão do cimento em condições não saturadas.

4.3 CARACTERIZAÇÃO DAS ARGAMASSAS NO ESTADO ENDURECIDO

4.3.1 Resistência à Compressão

A Figura 30 apresenta os resultados médios de resistência à compressão das argamassas aos 7 e 28 dias de idade. Os resultados dos ensaios estão apresentados no APÊNDICE 3.

Figura 30: Resistência à compressão média das argamassas



Observa-se que em relação à resistência à compressão, houve um discreto aumento dessa propriedade nas argamassas com adição de material fino inerte em relação à referência nas duas idades, chegando a 99,06 MPa para a dosagem AN15 na idade de 28 dias em comparação a 82,80 MPa da dosagem de referência, representando um aumento de 16%.

Porém, não é possível afirmar que esse comportamento se manteria em teores de adição acima de 15%. Conforme Yuli et al. (2019) observaram em seus estudos com material fino calcário, a resistência à compressão de argamassas aumentou conforme a porcentagem de adição desse material era maior, chegando a um ponto ótimo em torno de 15% e decaindo a partir de 20% de adição. Benabed et al. (2012) observaram o mesmo comportamento das argamassas com adição de fino calcário e com relação a/c constante. Os autores citaram a insuficiência da pasta de

cimento para revestir todas as partículas de agregado na mistura, levando a uma redução na resistência à compressão a partir de teores acima de 15% de adição.

As adições minerais, quando utilizadas em substituição ao cimento Portland normalmente têm um poder retardador sobre a resistência nas primeiras idades do concreto, mas também podem reduzir a porosidade da matriz cimentícia levando ao aumento da resistência final do material, conforme relatam Itim et al (2011) e Mehta & Monteiro (2008). Este efeito não foi observado nas dosagens estudadas, visto que não houve retardo no ganho de resistência nas primeiras idades em relação à referência, o que pode estar relacionado ao fato de a adição de material fino ter sido em substituição ao agregado miúdo e não ao cimento.

Silva et. al (2009) utilizaram material fino reciclado de cerâmica vermelha na produção de argamassas e observaram um significativo aumento na resistência à compressão e à flexão em adições de até 10% de material fino em substituição ao agregado. Os autores relacionaram esse aumento na resistência à menor relação a/c , à maior compactação (efeito filler) e ao possível efeito pozolânico da cerâmica na pasta de cimento hidratada. Desses, os fatores que podem estar relacionados ao presente estudo são a baixa relação a/c e a maior compactação de partículas.

Observa-se na Figura 30 que para as dosagens com FAN aos 28 dias, os valores de resistência à compressão aumentaram conforme maior o teor de adição, o que não foi observado nas dosagens com FAA na mesma idade. Esses resultados concordam com os apresentados nos estudos de Benabed et al. (2012), no qual os autores constataram que argamassas produzidas com areia natural de rio em diferentes proporções apresentaram maiores valores de resistência à compressão em comparação a argamassas produzidas com areia de britagem de rocha.

Braga et al. (2012) também estudaram as propriedades de argamassas com adição de material fino em substituição ao agregado. Foram utilizados finos de concreto reciclado com tamanho de partícula abaixo de 0,15 mm e os resultados de resistência à compressão e à flexão obtidos foram maiores conforme aumentou-se a adição, com comportamento praticamente linear. Em relação apenas à resistência à compressão aos 28 dias, os autores compararam os resultados obtidos com outros estudos e observaram que para adições acima de 5% o aumento gradual dessa propriedade só se manteve nas adições de material cerâmico e concreto reciclado, enquanto argamassas com outras adições como granulito e micaxisto

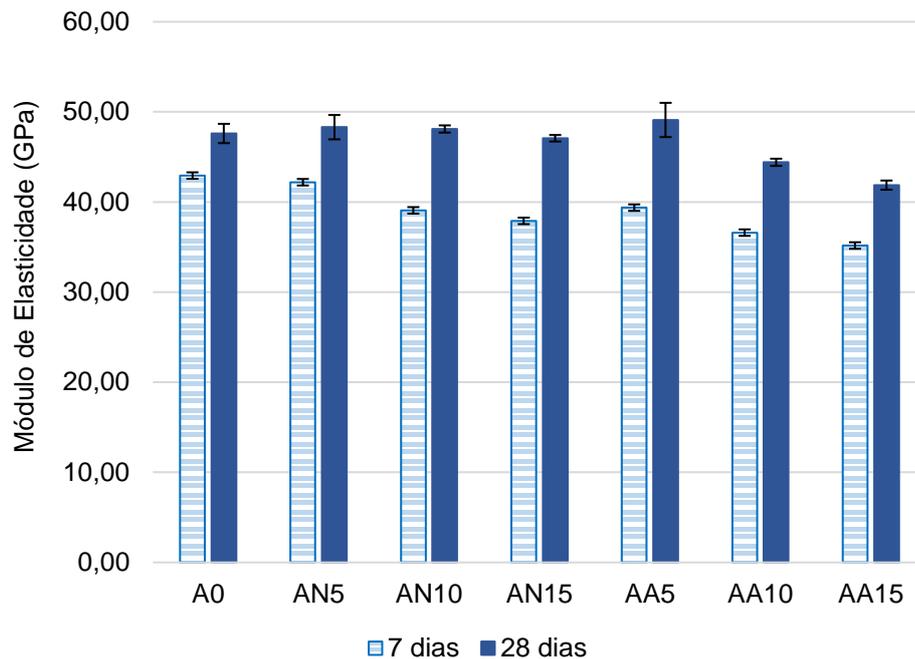
apresentaram resistência à compressão menores que a referência. Isso demonstra que o tipo de material fino e sua origem também influenciaram nos valores de resistência à compressão das argamassas no presente estudo, conforme também observaram Kadri et al. (2010), Li et al. (2019) e Mehta e Monteiro (2008).

Nos estudos de Feng et. al (2021) com superplastificantes à base de policarboxilatos, as argamassas com a utilização do aditivo apresentaram redução da resistência à compressão nas primeiras idades. Já Noaman et. al (2020) utilizando areia revestida de superplastificante em várias proporções, observaram um aumento da resistência à compressão com a adição do aditivo em diferentes dosagens de argamassa, demonstrando que o aditivo também pode ter influenciado na resistência à compressão das argamassas, assim como nos estudos descritos por Mehta e Monteiro (2008).

Valores elevados de resistência observados estão relacionados à baixa relação a/c da mistura devido à sua relação direta com a resistência – conhecida como Lei de Abrams – na qual quanto menor a relação a/c maior a resistência do concreto, como também ocorre em argamassas. Também é sabido que a adição de sílica ativa em associação ao aditivo superplastificante resulta em materiais cimentícios de alta resistência.

4.3.2 Módulo de Elasticidade

A Figura 31 apresenta os resultados médios de módulo de elasticidade das argamassas aos 7 e 28 dias de idade. Os resultados dos ensaios estão apresentados no APÊNDICE 3.

Figura 31: Módulo de elasticidade médio das argamassas estudadas

Observa-se que o módulo de elasticidade das argamassas diminuiu com o aumento da adição de material fino aos 7 dias de idade para ambos os traços. Aos 28 dias, o traço com FAN apresentou certa estabilidade variando de 47,07 a 48,30 GPa e o traço com FAA apresentou uma diminuição com o aumento da adição a partir de 5%, de 44,40 a 41,87 GPa.

Conforme observaram Thomaz et al. (2021) em seu estudo com concretos produzidos com agregado basáltico, a origem e as propriedades microestruturais das rochas apresentam influência mais significativa no módulo de elasticidade do que outros fatores como relação a/c e teor de agregado. Nos estudos de Jurowski e Grzeszczyk (2015), concretos produzidos com agregado basáltico apresentaram maiores valores de módulo de elasticidade em relação aos produzidos com agregado natural.

Benachour et al. (2008), afirmam que o módulo de elasticidade é diretamente influenciado pela porosidade da argamassa, quanto maior a porosidade, menor é o módulo observado. Porém, não é possível afirmar que esses fatores tenham influenciado os valores de módulo de elasticidade no presente estudo. Nos estudos de Benachour et al. (2008), Braga et al. (2012), Kabeer & Vyas (2018) e Silva et al. (2009), os módulos de elasticidade de argamassas produzidas com adições variaram

de 9 a 45 GPa com teores de 10 a 20% de adição. No estudo de Peña (2004) em argamassas de reparo com relação a/c 0,30 e sem adição de finos, o módulo de elasticidade observado foi em torno de 33 GPa aos 28 dias.

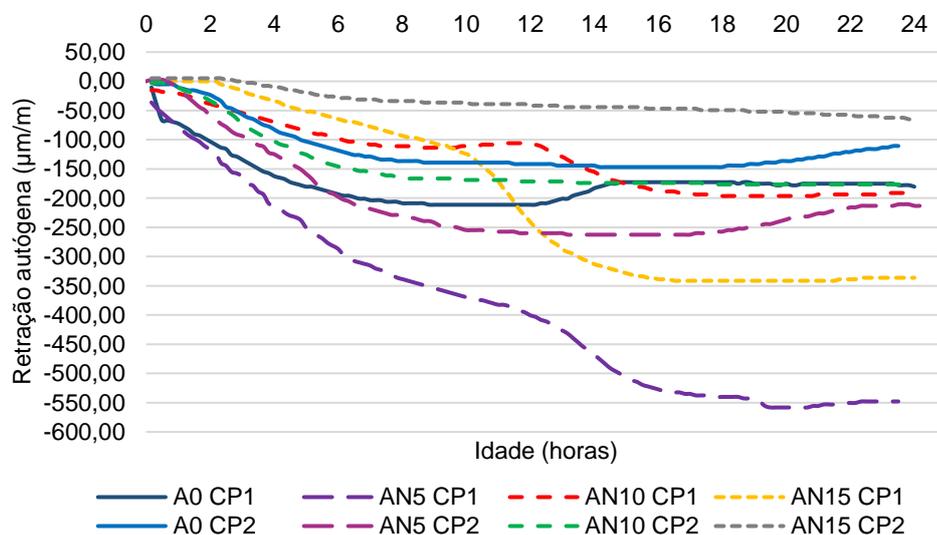
Altos valores de módulo de elasticidade podem ter um efeito negativo em argamassas de reparo, pois a alta rigidez pode causar maiores tensões internas, menor deformação e maior risco de fissuração, conforme observaram Braga et al. (2012). Já Peña (2004) menciona que para a maioria dos pesquisadores, a melhor opção para reparos em concreto é utilizar materiais com módulo de elasticidade próximo ao da estrutura, porém também tem sido recomendada a utilização de materiais de reparo com módulo de elasticidade maior ao do concreto, pois assim estes conseguiriam transferir as solicitações ao substrato.

4.4 ENSAIOS DE RETRAÇÃO

4.4.1 Retração Autógena Inicial

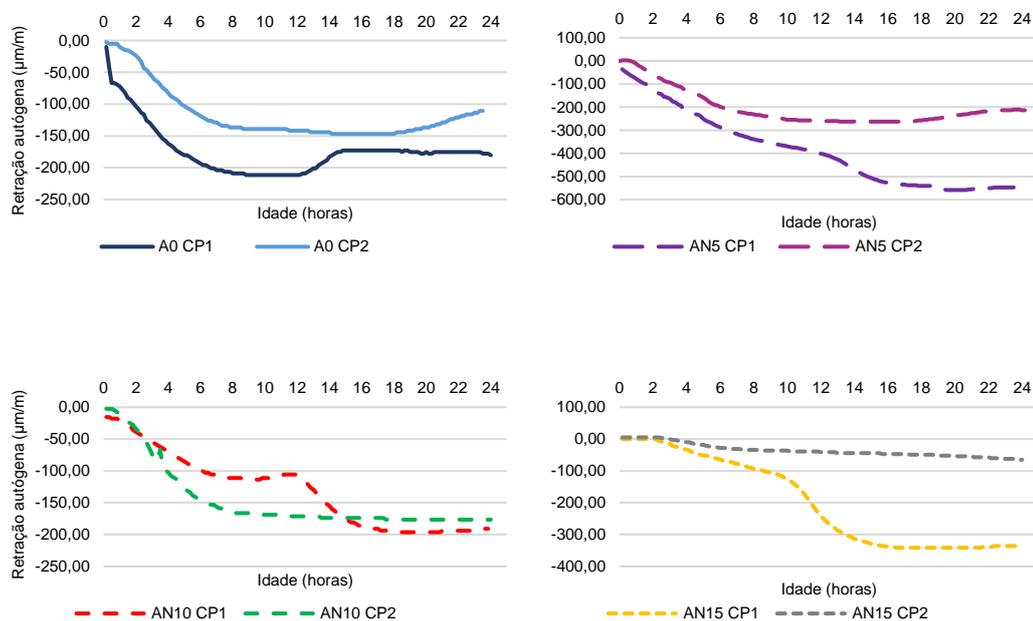
A Figura 32 apresenta a evolução da retração autógena das argamassas produzidas com FAN durante as primeiras 24 horas após o fim de pega. As leituras foram realizadas a cada 10 minutos em duas amostras (1 e 2).

Figura 32: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante as primeiras 24 horas



Na Figura 33 pode-se observar que na dosagem AN5 houve uma diferença em torno de 330 $\mu\text{m/m}$ entre corpos de prova. Já para a dosagem AN15, observa-se que o corpo de prova 2 quase não apresentou variação de retração, o que pode ser devido a um erro na leitura do equipamento, já que esse comportamento não foi observado no corpo de prova 1 de mesma dosagem.

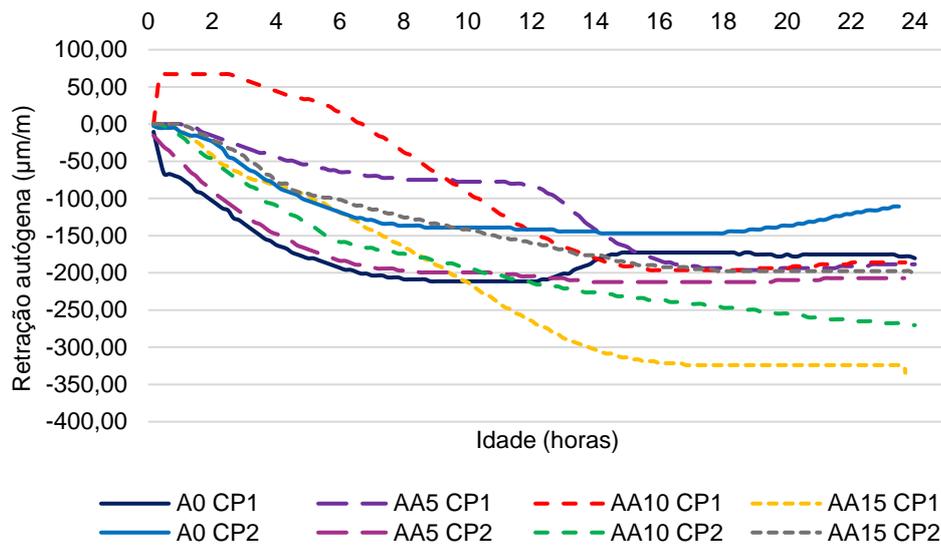
Figura 33: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante as primeiras 24 horas, por dosagem



Salienta-se a necessidade de um maior número de corpos de prova e repetições para minimizar a variabilidade dos resultados o que poderia ser realizado com a leitura simultânea de 2 ou mais corpos de prova de mesma dosagem. Para tanto, seria necessário sistema de aquisição de dados simultâneos.

A Figura 34 apresenta a evolução da retração autógena das argamassas produzidas com FAA durante as primeiras 24 horas após o fim de pega.

Figura 34: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino artificial durante as primeiras 24 horas



Observa-se que a única dosagem que apresentou expansão inicial foi a AA10, porém em apenas um dos corpos de prova, o que pode ser relativo a alguma interferência de temperatura ou umidade relativa do ambiente nas primeiras leituras. Porém, essa expansão inicial não é incomum de ser observada em estudos com materiais cimentícios (LENART, 2015), pois após a mistura dos materiais ocorre uma expansão inicial devido às reações de hidratação e dependendo do tempo de início das medições, alguma expansão ainda pode ser observada.

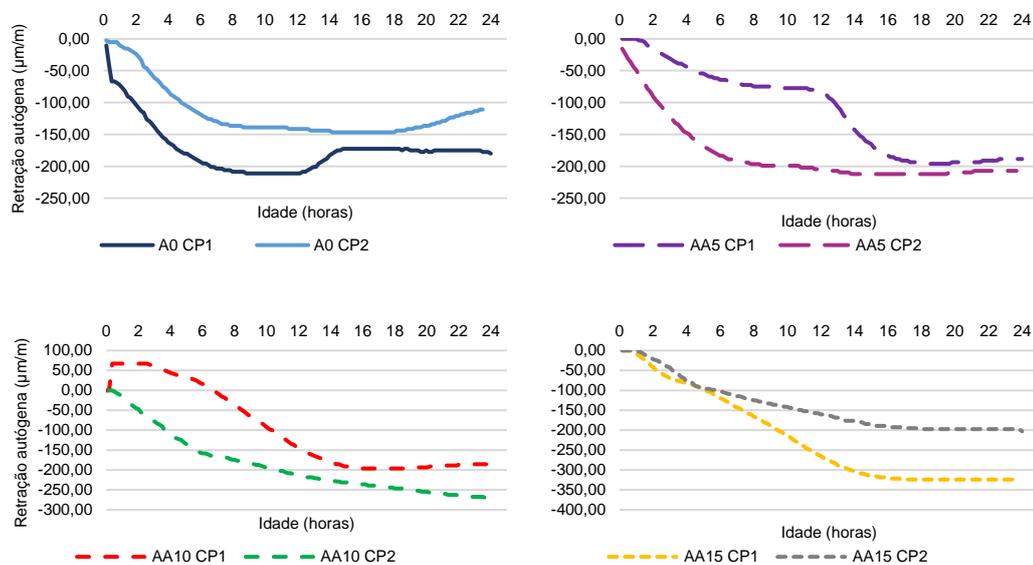
Alguns pesquisadores questionam a utilização do tempo final de pega para iniciar a medição da retração autógena, por não ocorrerem exatamente ao mesmo tempo. Dessa forma, pesquisadores têm utilizado o “tempo-zero” para o início da medição da retração autógena, que é o momento que o material forma estrutura suficiente para permitir transferência de tensões após a mistura de cimento e água (CHANG-WEN et al., 2007; LU et al., 2020).

Conforme observado no estudo de Lu et al. (2020), ao iniciar as medições no “tempo-zero” ao final da expansão inicial macroscópica observada em pastas de cimento, os valores de retração autógena ao longo do tempo foram menores em relação às medições iniciadas ao final da pega. Portanto, de forma a não interferir na evolução da retração autógena e seguindo os procedimentos normatizados pela ASTM, no presente estudo foram utilizados os tempos de final de pega do cimento como início das medições.

Entre outros fatores, alguns autores citam que o tipo de fíler e sua

finura podem ter influência na expansão inicial observada na retração autógena, Craeye, et al. (2010) relataram que esse fato pode estar relacionado à absorção de água na superfície do filer causando pressão de disjunção, pela cristalização do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ e pela interação dos materiais finos com o superplastificante. Porém, estes fatores não estão relacionados à expansão observada no presente estudo, visto que esta ocorreu apenas em um dos corpos de prova analisados.

Figura 35: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino artificial durante as primeiras 24 horas, por dosagem



Observa-se da Figura 33 que a dosagem de referência apresentou valor máximo médio de retração autógena em torno de 179 $\mu\text{m}/\text{m}$, enquanto a dosagem AN5 chegou a uma média máxima de 410 $\mu\text{m}/\text{m}$, representando um aumento de 56%. A dosagem AN10 apresentou valor máximo médio de retração de 186 $\mu\text{m}/\text{m}$, bem próximo à referência e a dosagem AN15 chegou a 341 $\mu\text{m}/\text{m}$. Para as argamassas produzidas com FAA, observa-se da Figura 35 que quanto maior o percentual de adição, maiores os valores de retração autógena obtidos. A dosagem AA5 apresentou retração máxima média de 205 $\mu\text{m}/\text{m}$, a AA10 233 $\mu\text{m}/\text{m}$ e a dosagem AA15 chegou a 265 $\mu\text{m}/\text{m}$. A maior variação em relação à referência foi da dosagem AA15, representando 32% de aumento nessa propriedade.

Os resultados obtidos concordam com os estudos de Martínez et al. (2016) utilizando finos de agregados reciclados, os quais demonstraram que o tipo de material fino, o teor de substituição e os fatores de dosagem apresentaram efeito

estatisticamente significativo na retração autógena, sendo que esta foi maior para as argamassas com adição de finos em relação à referência.

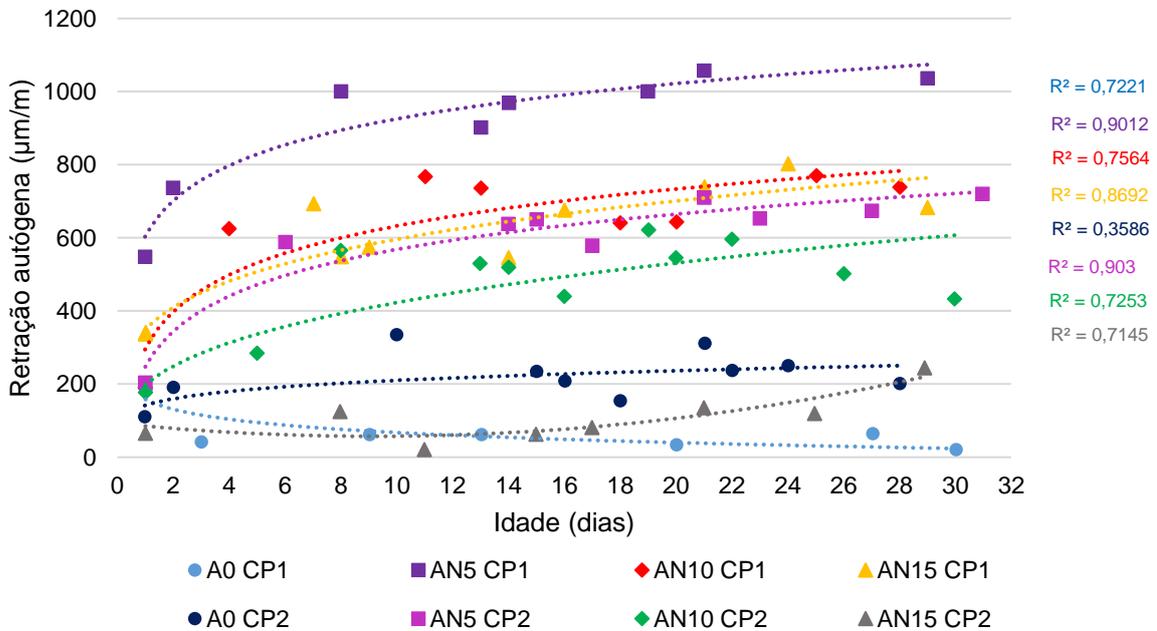
De forma similar, Barbosa (2018) em estudo com adições de cinzas de bagaço de cana, de casca de arroz, e material inerte (quartzo) em substituição ao cimento em microconcretos, observou que a adição de cinzas aumentaram a retração autógena do material.

De modo geral, as argamassas com adição de finos apresentaram maiores valores de retração autógena nas primeiras 24 horas após o final de pega.

4.4.2 Retração Autógena Estendida

A Figura 36 apresenta a evolução da retração autógena das argamassas produzidas com FAN após as 24 horas iniciais e durante pelo menos os primeiros 28 dias de idade. As leituras estão positivas para visualização das curvas de tendência.

Figura 36: Evolução da retração autógena das argamassas com material fino natural durante os primeiros 28 dias

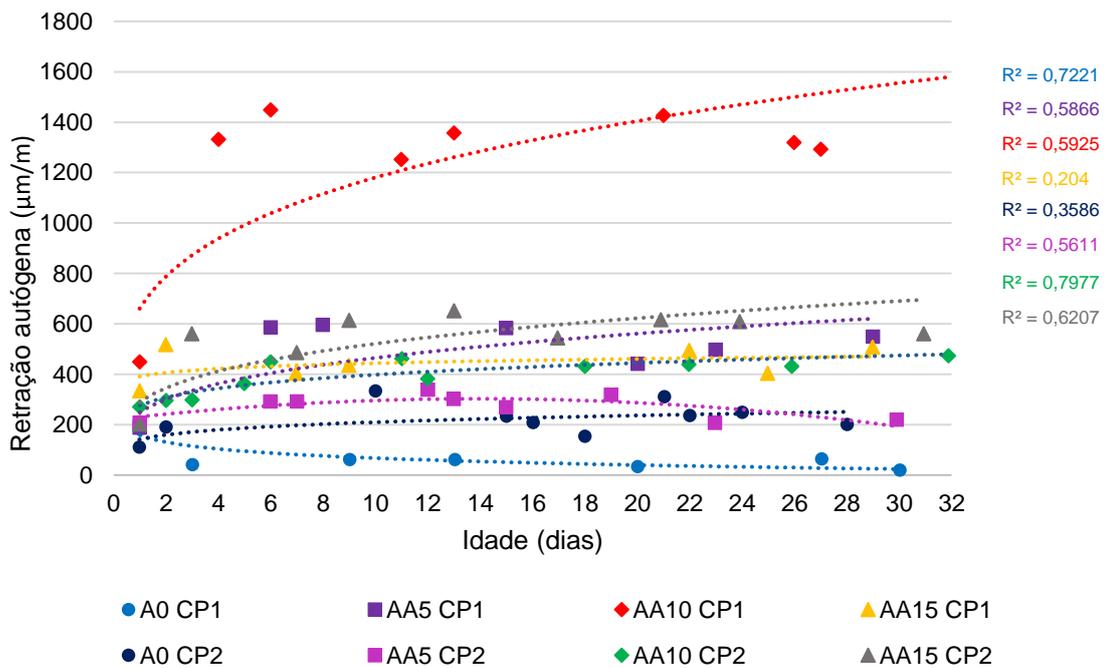


Pode-se observar do gráfico da Figura 36 que as dosagens de referência apresentaram variação de retração de 0 a 300 µm/m, enquanto as

dosagens de 5, 10 e 15% de adição apresentaram retração máxima entre 600 a 800 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os valores de retração para as dosagens AN5 CP1 e AN15 CP2 não apresentaram o mesmo comportamento, e verificou-se que para a dosagem AN15 CP2 ocorreu um erro de leitura, visto que durante o ensaio de retração autóloga nas primeiras 24 horas este corpo de prova praticamente não apresentou alterações conforme observado anteriormente e, portanto, foi excluído desta análise. Para a dosagem AN5 CP1 pode ter ocorrido uma vedação menos eficiente do corpo de prova, pois nas primeiras moldagens a metodologia de vedação adotada foi diferente. Essa possibilidade pode ser verificada pelo fato de o corpo de prova ter apresentado a mesma tendência que os demais, porém com valores mais altos de retração, devido ao fato de estar mais exposto às variações de temperatura e umidade relativa do ambiente. Conforme observado nos ensaios de perda de massa, a dosagem AN5 CP1 apresentou maiores variações nas leituras de massa.

A Figura 37 apresenta a evolução da retração autóloga das argamassas produzidas com FAA após as 24 horas iniciais e durante pelo menos os primeiros 28 dias de idade.

Figura 37: Evolução da retração autóloga das argamassas com material fino artificial durante os primeiros 28 dias



Observa-se que para as argamassas com adição de FAA, os valores

de retração autógena observados foram maiores do que a referência, variando entre 300 e 700 $\mu\text{m}/\text{m}$. Um dos corpos de prova da dosagem AA10 (CP 1) apresentou altos valores de retração diferindo dos demais devido a uma possível vedação menos eficiente e à interferências externas relacionadas à temperatura e umidade relativa do ar que não puderam ser controladas. Como pode-se observar, o comportamento do corpo de prova manteve-se próximo aos demais, porém apresentando altos valores de retração.

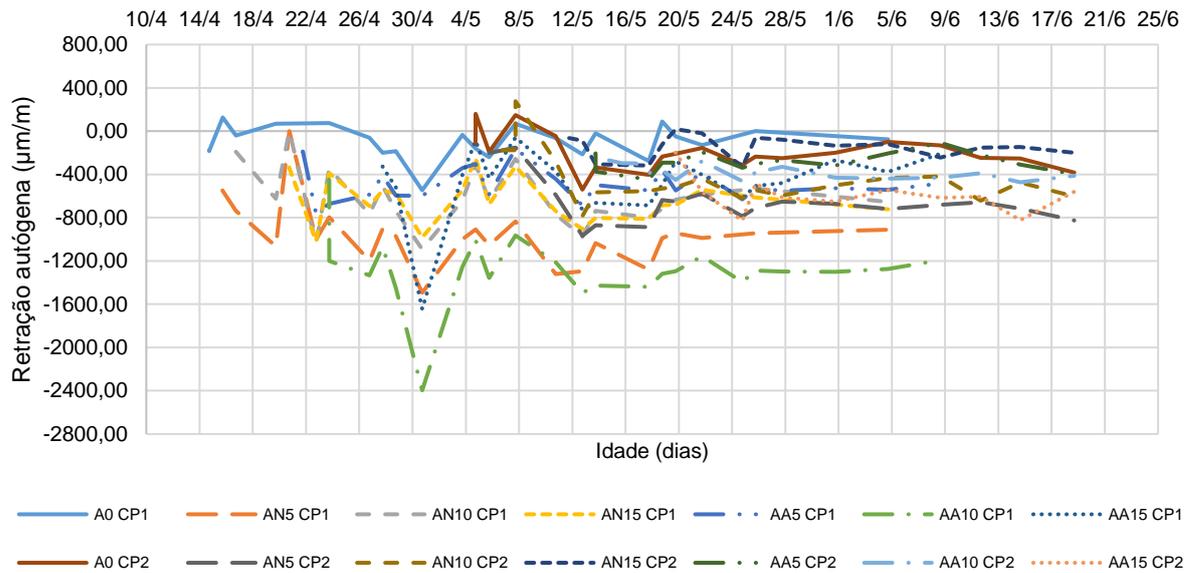
De modo geral, pode-se verificar que a retração autógena nos primeiros 28 dias de idade das argamassas foi maior com a adição material fino em ambos os traços, apresentando valores de retração em torno de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$, aproximadamente 63% maior em comparação com a retração máxima média da referência de 260 $\mu\text{m}/\text{m}$. Os resultados obtidos corroboram com os estudos de Iitim et al. (2011) que observaram maior retração autógena em argamassas produzidas com material fino de agregado reciclado.

Entre outros fatores citados por pesquisadores e que não parecem estar relacionados ao aumento da retração autógena no presente estudo, estão a baixa relação a/c que contribui para maiores valores de retração autógena, conforme confirmaram os estudos de Craeye et al. (2010). Os autores também perceberam que o superplastificante influenciou na retração autógena, mesmo trocando-o por um do mesmo tipo (à base de policarboxilatos). Além disso, o tempo zero para o início das medições de retração autógena pode ser influenciado pelo tipo de material fino utilizado, possivelmente pela influência desse material nas reações de hidratação do cimento. Os autores utilizaram filers calcário, de quartzito e cinza volante.

Observa-se que a retração autógena foi mais pronunciada durante os 28 dias de ensaio em relação à retração observada nas primeiras 24 horas para todas as dosagens com adição de material fino. Este fato valida a continuidade da evolução de retração autógena após as primeiras idades, conforme também observaram Iitim et al. (2011), Lenart (2015), Silva Júnior (2017) e Vieira (2018).

A Figura 38 apresenta a evolução da retração autógena das argamassas produzidas em ordem cronológica durante pelo menos os primeiros 28 dias de idade. Durante os ensaios observou-se que a retração autógena é bastante sensível às alterações de temperatura e umidade relativa do ambiente e, portanto, os ensaios devem ser realizados com controle total dessas propriedades para que não haja interferência nos resultados obtidos.

Figura 38: Evolução cronológica da retração autógena

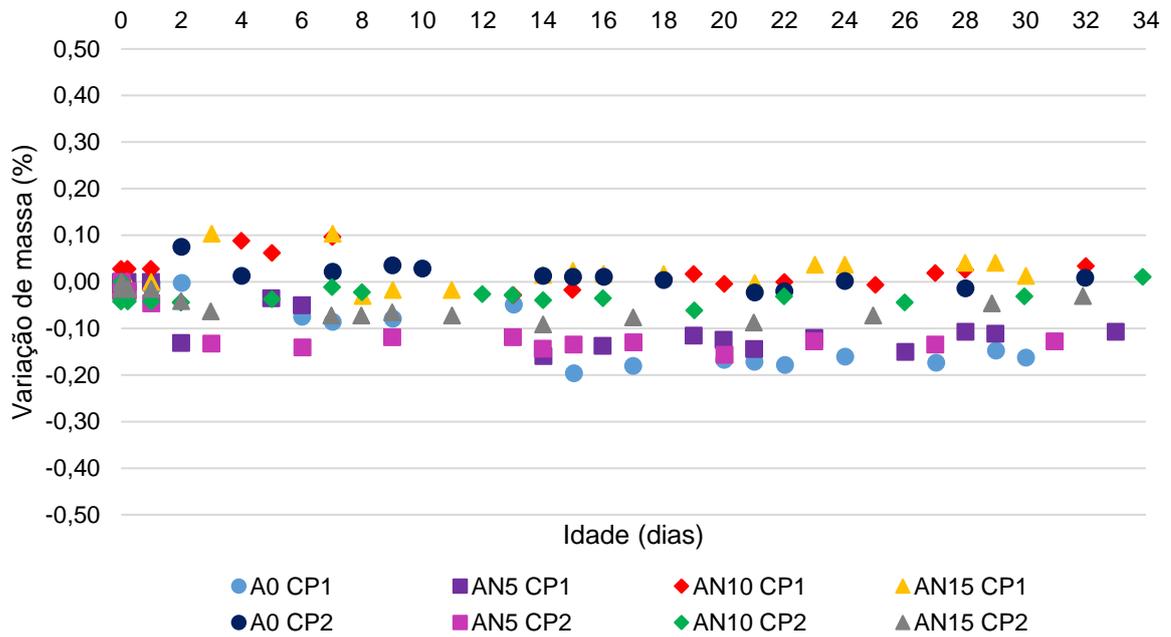


Pode-se confirmar no gráfico da Figura 38, algumas influências observadas nas leituras de retração autógena por ordem cronológica, onde variações de temperatura e umidade relativa do ambiente que não puderam ser totalmente controladas alteraram as leituras de retração para todos os corpos de prova. A partir dessa e de outras observações, os dados foram ajustados identificando-se os erros de leitura, interferências externas e leituras com alta variabilidade que poderiam alterar o comportamento dos materiais e prejudicar a análise.

4.4.3 Variação de Massa na Retração Autógena

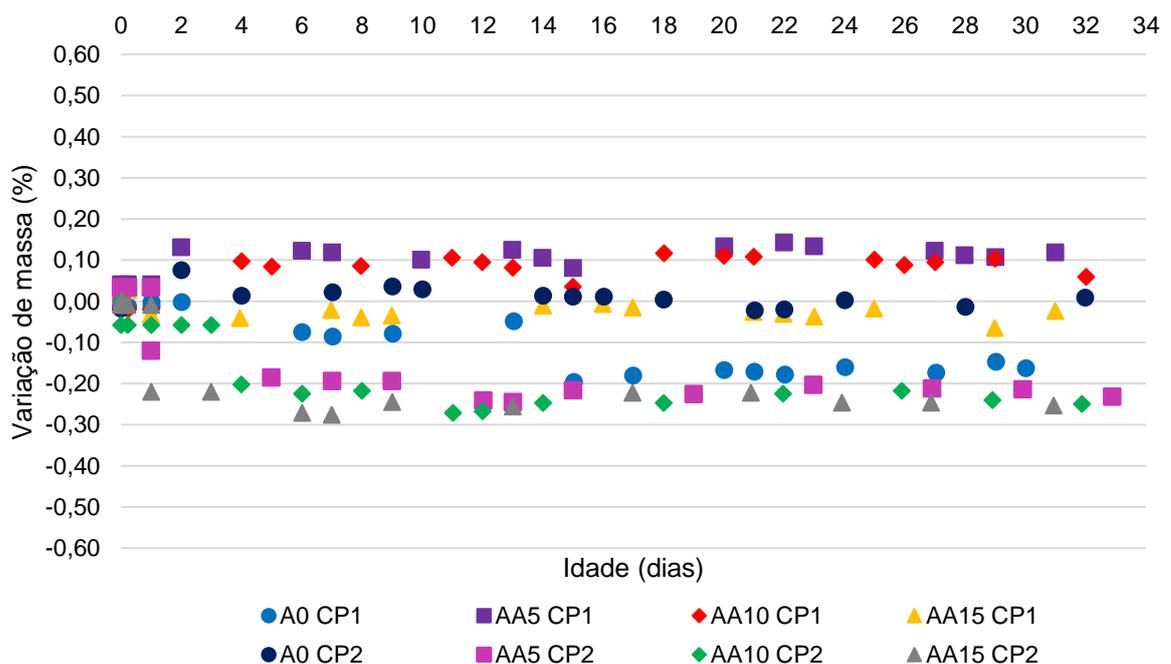
Na Figura 39 apresenta-se a variação de massa das argamassas produzidas com FAN durante pelo menos os primeiros 28 dias de idade no ensaio de retração autógena.

Figura 39: Variação de massa das argamassas com material fino natural durante ensaio de retração autógena



A Figura 40 apresenta a variação de massa das argamassas produzidas com FAA durante pelo menos os primeiros 28 dias de idade no ensaio de retração autógena.

Figura 40: Variação de massa das argamassas com material fino artificial durante ensaio de retração autógena



Observa-se dos gráficos das Figura 39 e 40 que a massa das argamassas não se alterou de forma significativa durante o ensaio de retração autógena, principalmente após o fim de pega, apresentando variação média de 0,18%. Isso valida a boa selagem dos corpos de prova, considerando as argamassas com fino natural e artificial e também os corpos de prova que tiveram selagem menos eficiente. Essa variação foi compatível com a apresentada por Silva Junior (2017) que utilizando a mesma metodologia de selagem dos corpos de prova, observou uma variação de massa média de 0,04%.

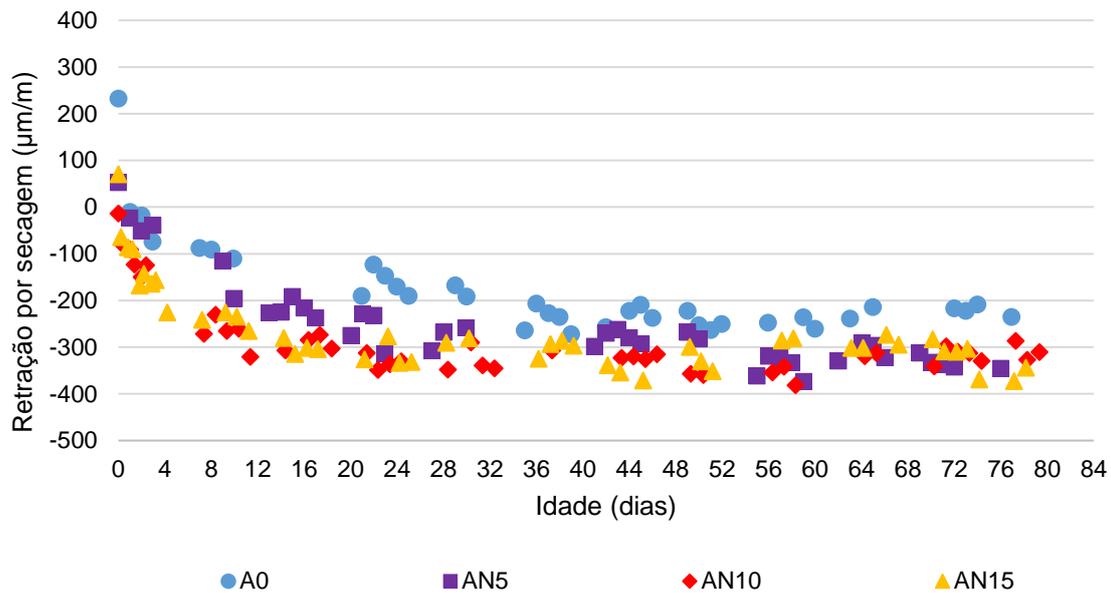
Algumas argamassas apresentaram pequeno ganho de massa, porém em apenas um dos corpos de prova de cada dosagem. Este fato pode estar relacionado à selagem dos corpos de prova que foi realizada de maneira diferente nas primeiras moldagens, selando-se um lado do corpo de prova antes da moldagem. Nas moldagens posteriores observou-se que selar os dois lados do corpo de prova ao mesmo tempo (após a moldagem) apresentou-se como uma melhor opção para a diminuição de ar aprisionado no molde.

A dosagem AN5 apresentada anteriormente como tendo possivelmente selagem menos eficiente do corpo de prova 1 apresentou variação máxima de massa de 0,16% nos dois corpos de prova estudados (o maior valor entre todas as dosagens depois da referência). Para o corpo de prova AA10 CP1 esse comportamento não se manteve e a variação de massa foi menor (0,12%) do que o corpo de prova 2 de mesma dosagem (0,27%). Portanto, pode-se observar que a temperatura e umidade relativa do ambiente evidenciaram ser mais importantes no desenvolvimento da retração autógena do que a exposição à secagem e consequente variação de massa.

4.4.4 Retração por Secagem

A Figura 41 apresenta a evolução da retração por secagem média das argamassas produzidas com FAN durante aproximadamente 75 dias de idade após o período de cura.

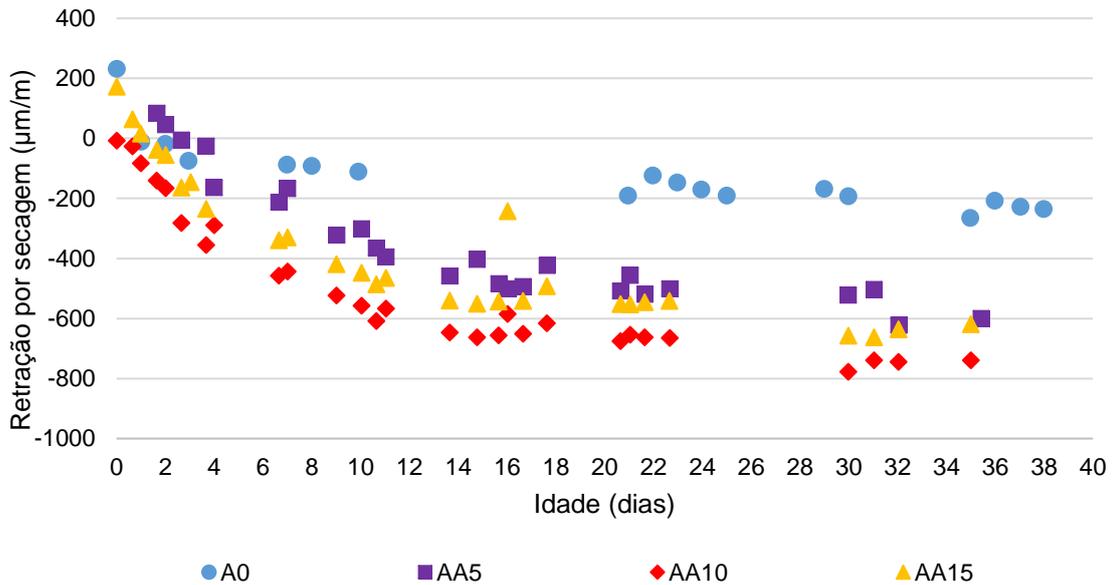
Figura 41: Evolução da retração por secagem das argamassas com material fino natural



Observa-se que todas as dosagens apresentaram comportamento similar, apresentando valores máximos de retração próximo a 400 $\mu\text{m/m}$, sendo 373, 396 e 372 $\mu\text{m/m}$, para as dosagens AN5, AN10 e AN15 respectivamente, ou cerca de 33% superior em relação à referência. Portanto, as argamassas com adição apresentaram maiores valores de retração por secagem, demonstrando que o material fino influenciou nesta propriedade. Porém, a diferença da retração máxima observada em relação à referência foi de apenas 125 $\mu\text{m/m}$.

A Figura 42 apresenta a evolução da retração por secagem média das argamassas produzidas com FAA durante aproximadamente 40 dias de idade após o período de cura.

Figura 42: Evolução da retração por secagem das argamassas com material fino artificial



Observa-se que a retração por secagem para as dosagens com FAA foi mais pronunciada em relação à dosagem com FAN, apresentando valores de retração máximo de 777 µm/m para a dosagem AA10, representando um aumento de 65% em relação à referência. A dosagem AA5 apresentou retração máxima de 622 µm/m e a dosagem AA15, de 662 µm/m. O teor de 10% de adição de finos apresentou os maiores valores de retração por secagem, evidenciando que em relação a esta propriedade possa existir um percentual ótimo de adição de material fino.

Os resultados obtidos concordam com os estudos de Braga et al. (2012), nos quais a retração por secagem de argamassas produzidas com adição de material fino de concreto reciclado foi 44% maior em comparação à referência, assim como em concretos nos estudos de Shi-Cong e Chi-Sun (2009). Li et al. (2019) também observaram um aumento na retração por secagem de argamassas produzidas com diferentes tamanhos de partículas de agregado de concreto reciclado e de pó de pedra, principalmente com adições de material mais fino. Os estudos também indicaram que as substituições ao agregado de areia natural foram mais significativas na retração por secagem do que na resistência à compressão.

O mesmo não foi observado nos estudos de Shi-Cong e Chi-Sun (2009) em argamassas utilizando agregado miúdo proveniente de granito, pois a retração por secagem foi menor em comparação à referência. Os autores atribuíram esse comportamento à menor área de superfície específica do material, e mencionam

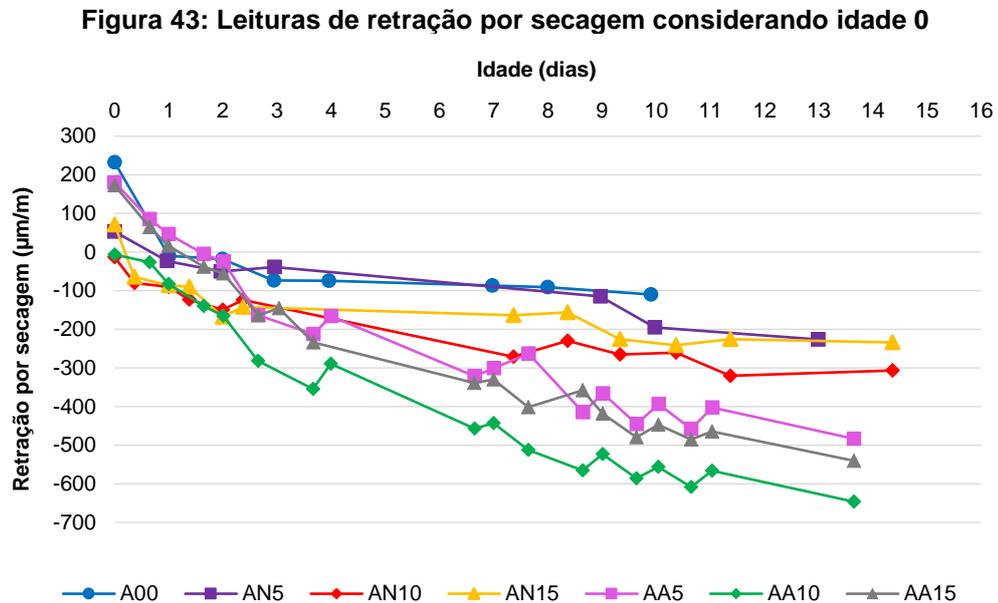
que quanto maior o tamanho da partícula, menor a retração do concreto, o que não foi observado no presente estudo em relação à finura, pois a adição com maior finura (FAN) apresentou menores valores de retração por secagem. Zhao et al. (2021) também observaram uma redução na retração por secagem utilizando finos de resíduos cerâmicos em argamassas, devido a uma rede de poros mais refinada produzida pela atividade pozolânica do material. Ressalta-se que os autores observaram valores de retração por secagem da argamassa de referência na ordem de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ aos 28 dias e para as argamassas com material fino em torno de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$, valores mais elevados que os obtidos no presente estudo.

De forma similar, nos estudos de Itim et al (2011) os autores observaram uma diminuição da retração total a longo prazo em argamassas produzidas com adições minerais. Os valores de retração total neste estudo atingiram a ordem de 1200 μm a longo prazo, para a referência e para as adições calcárias e 1400 μm para adições de pozolana natural. Nos estudos de Peña (2004) em argamassas de reparo sem adições, os valores de retração por secagem observados foram em torno de 1100 μm aos 70 dias de idade.

Cabe ressaltar que são poucos os estudos que utilizaram adições em substituição ao agregado miúdo, na maioria dos casos a substituição é feita em relação ao cimento e, portanto, comparativos de resultados devem considerar esta particularidade. Porém, é consenso entre os pesquisadores que o tipo, forma e tamanho das partículas de material fino influenciam na retração por secagem tanto em concretos quanto em argamassas.

De acordo com os resultados apresentados no estudo de Itim et al. (2011), tanto a retração autógena quanto a retração por secagem continuam evoluindo com o tempo, para adições de material calcário e pozolânico. Porém, a retração autógena apresenta resultados mais elevados ao longo do tempo em comparação à retração por secagem. A retração autógena para adições calcárias a 15% chegou a quase 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ aos 365 dias enquanto a retração por secagem aproximou-se de 400 $\mu\text{m}/\text{m}$ para o mesmo caso. Já para adições de material pozolânico a 10% a retração autógena aos 365 dias foi próxima de 1000 $\mu\text{m}/\text{m}$ e a retração por secagem ficou em torno de 400 $\mu\text{m}/\text{m}$. De forma similar, conforme pode-se observar no presente estudo, a retração por secagem teve uma tendência a se estabilizar com o tempo, ao contrário do que parece ocorrer na retração autógena que se aproxima da estabilização, mas continua evoluindo.

O gráfico da Figura 43 apresenta as leituras médias de retração por secagem durante os primeiros dias, considerando a primeira leitura na idade 0.

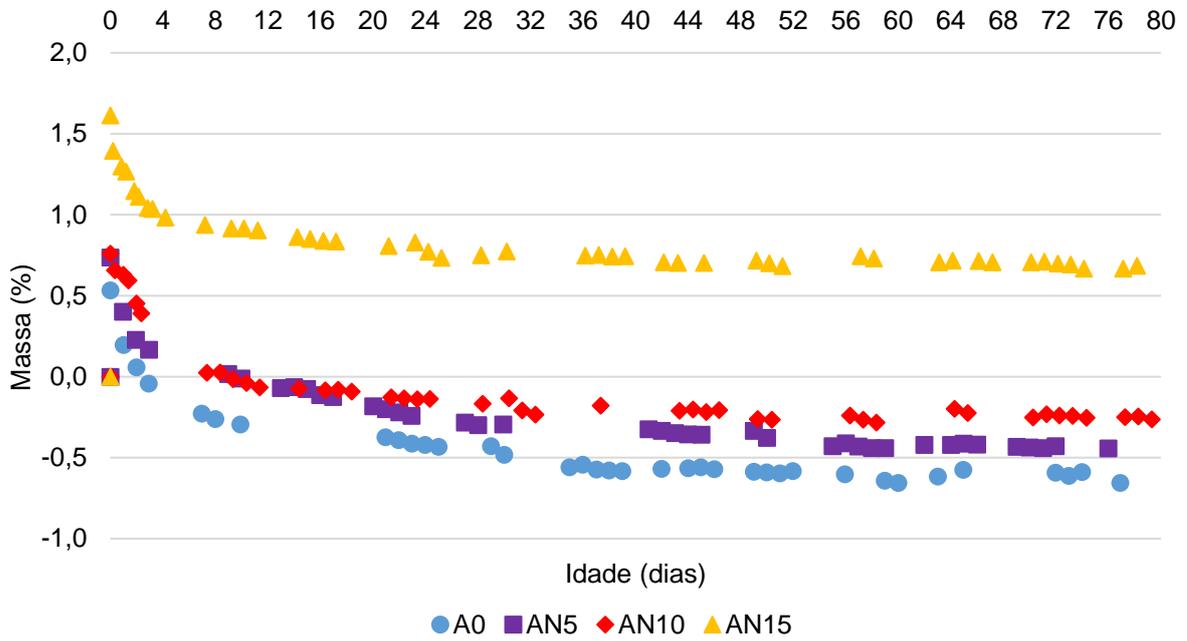


No gráfico da Figura 43, é possível observar uma expansão inicial das argamassas, sendo que a argamassa de referência apresentou o maior valor observado, chegando a 233 $\mu\text{m/m}$. A dosagem AN5 apresentou expansão de 53 $\mu\text{m/m}$, a AN15 de 70 $\mu\text{m/m}$, a AA5 de 181 $\mu\text{m/m}$ e a AA15 de 172 $\mu\text{m/m}$. Para os dois tipos de material fino, o teor de 10% de adição não apresentou expansão inicial.

4.4.5 Variação de Massa na Retração por Secagem

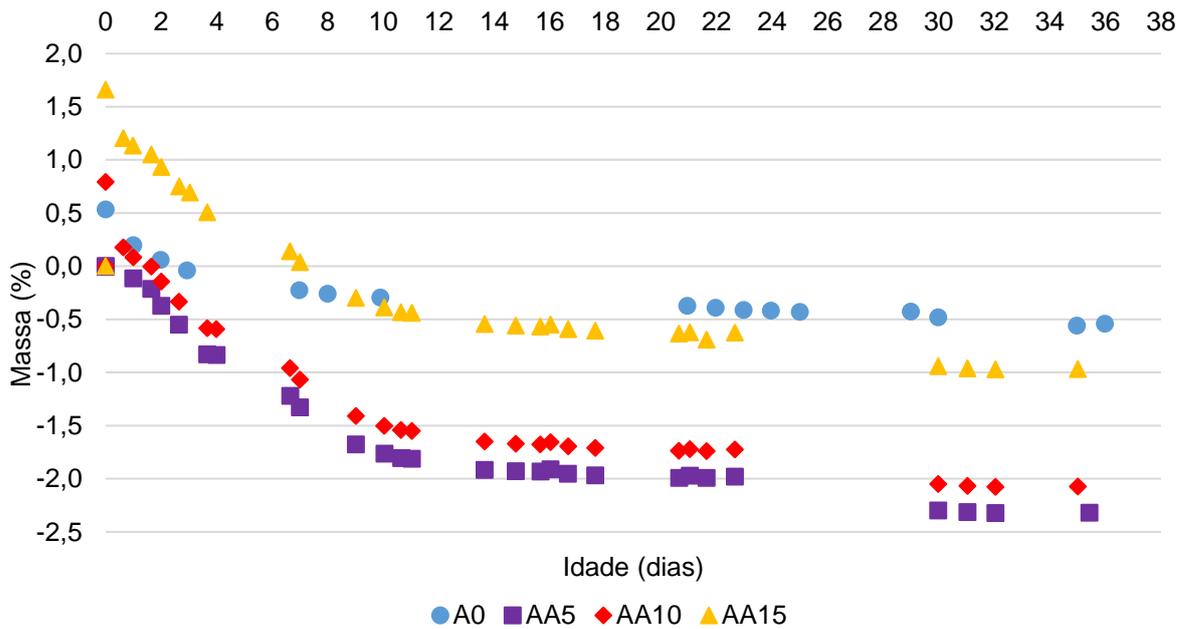
A Figura 44 apresenta a variação de massa das argamassas produzidas com FAN durante o ensaio de retração por secagem.

Figura 44: Variação de massa média durante ensaio de retração por secagem com material fino natural



A Figura 45 apresenta a variação de massa das argamassas produzidas com FAA durante o ensaio de retração por secagem.

Figura 45: Variação de massa média durante ensaio de retração por secagem com material fino artificial



As argamassas expostas à secagem apresentaram maior perda de massa nos primeiros 10 dias de exposição e após iniciaram a estabilização.

No geral, as argamassas produzidas com FAA apresentaram maiores variações de massa em relação às dosagens com FAN. A dosagem de referência apresentou variação máxima de massa de 1,18%, a menor variação nas dosagens produzidas com FAN foi observada na AN10 com 0,24% e a maior foi na AN5 com 1,17%. Nas argamassas produzidas com FAA, a maior variação de massa observada foi na dosagem AA5 chegando a 3,10% e a dosagem AA15 apresentou a menor variação, de 2,58%. Do mesmo modo, Braga et al. (2012) em um ensaio de secagem em argamassas também observaram que a presença de material fino de concreto reciclado em até 15% não influenciou significativamente a perda de massa.

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente estudo foi analisada a influência na retração autógena e por secagem de argamassas produzidas com teores de material fino natural e artificial em substituição ao agregado miúdo. Foram realizados ensaios de índice de consistência, resistência à compressão, módulo de elasticidade, retração autógena e retração por secagem. A partir dos resultados obtidos, apresentam-se as conclusões a seguir.

A consistência de argamassas foi influenciada pela adição de finos. Para as argamassas produzidas com material fino natural, o aumento desta propriedade foi gradual conforme o teor de adição, representando um aumento de 9,5% em relação à referência. Para as argamassas produzidas com material fino artificial, o maior índice de consistência observado foi da dosagem com 10% de adição e o menor índice foi da dosagem com 15% de adição. O fator principal que pode explicar esse comportamento é a forma das partículas, pois partículas de formas angulares e superfície áspera como as de britagem de rocha, são causas de maior demanda d'água e menor trabalhabilidade na produção de materiais cimentícios.

A resistência à compressão aos 28 dias das argamassas produzidas com material fino natural foi maior conforme maior o teor de adição. Esse comportamento não foi observado para as argamassas produzidas com material fino artificial. Alguns fatores que podem explicar esse comportamento são a composição, origem e forma das partículas dos materiais finos. Em relação ao módulo de elasticidade, observou-se que essa propriedade diminuiu conforme aumentou-se a adição de material fino, confirmando que as adições influenciaram nas propriedades mecânicas das argamassas.

Durante as primeiras 24 horas, a retração autógena foi maior conforme maior o teor de adição de material fino artificial, chegando a um aumento de 32% nessa propriedade para a dosagem AA15 em relação à referência. Já para as dosagens com adição de material fino natural esse comportamento proporcional não foi observado e os maiores valores de retração autógena foram observados na dosagem AN5. Porém, de modo geral, a retração autógena durante as primeiras 24 horas de idade das argamassas estudadas foi maior nas dosagens com adição de material fino inerte. Pode-se verificar também que a retração autógena nos primeiros 28 dias de idade das argamassas foi maior com a adição material fino inerte em ambos

os traços, apresentando valores de retração em torno de 700 $\mu\text{m}/\text{m}$, aproximadamente 63% maior em comparação com a retração máxima média da referência de 260 $\mu\text{m}/\text{m}$.

Na retração por secagem, esta propriedade foi mais evidenciada na dosagem com material fino artificial, chegando a um máximo de 777 $\mu\text{m}/\text{m}$ em comparação à 271 $\mu\text{m}/\text{m}$ na dosagem com material fino natural. A retração por secagem é influenciada pelo tipo, forma e tamanho do material fino adicionado em argamassas.

A adição de material fino influenciou nas propriedades no estado fresco e endurecido das argamassas, porém não foram observadas alterações extremas, possibilitando a adequação da dosagem para obtenção de propriedades desejadas para aplicação. Dessa forma, a utilização de material fino inerte mostrou ser uma alternativa viável para a produção de argamassas de reparo de alta resistência, possibilitando a utilização de agregados com maiores teores de finos, como os provenientes da britagem de rochas. Normalmente para alcançar propriedades específicas e alta resistência, em argamassas de reparo costuma-se utilizar maiores teores de cimento. A adição de material fino em substituição ao agregado miúdo diminui a necessidade de maiores teores de cimento, apresentando também uma vantagem econômica.

Percepções e sugestões para futuros estudos:

- A retração autógena é muito sensível às variações de temperatura e umidade relativas do ambiente e deve ser estudada sob condições rigorosamente controladas;
- O equipamento leitor de retração autógena é muito influenciado por qualquer movimento do corpo de prova durante a leitura, portanto é imprescindível que todas as leituras sejam realizadas na mesma posição. A melhor maneira de se realizar as leituras é automaticamente, sem a retirada do corpo de prova do equipamento medidor;
- As leituras de retração autógena foram realizadas de forma “cega”, ou seja, sem o conhecimento das leituras anteriores, para diminuir a possibilidade de interferências do leitor. Esse fato, apesar de atestar a fidelidade dos dados, apresentou maiores variações nas leituras;
- Estudar as propriedades de argamassas com variação da relação a/c ou com índice de consistência fixo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adjoudj, M., Ezziane, K., Kadri, E. H., Ngo, T.-T., & Kaci, A. (2014). Evaluation of rheological parameters of mortar containing various amounts of mineral addition with polycarboxylate superplasticizer. *Construction and Building Materials*, *70*, 549-559. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.07.111>
- Aitcin, P. C. (1998). *High-Performance Concrete*. London: E&FN Spon.
- Aly, T., & Sanjayan, J. G. (2008). Factors contributing to early age shrinkage cracking of slag concretes subjected to 7-days moist curing. *Materials and Structures*, *41*, 633-642. doi:10.1617/s11527-007-9269-2
- American Concrete Institute. (2013). *ACI Concrete Terminology: An ACI Standard (ACI CT-13)*. Farmington Hills.
- American Society of Testing Materials. (2014). *C136: Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2014). *C1698: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2014). *C305: Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2015). *C128: Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2015). *C1437: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2016). *C187: Standard Test Method for Amount of Water Required for Normal Consistency of Hydraulic Cement Paste*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2016). *C403: Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2017). *C117: Standard Test Method for Materials Finer than 75- μ m (No. 200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2017). *C157: Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2018). *C144: Standard Specification for Aggregate for Masonry Mortar*. West Conshohocken: ASTM.

- American Society of Testing Materials. (2018). *C191: Standard Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2018). *C33: Standard Specification for Concrete Aggregates*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2018). *C596: Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Hydraulic Cement*. West Conshohocken: ASTM.
- American Society of Testing Materials. (2018). *C702: Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. West Conshohocken: ASTM.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2013). *NBR 15575: Desempenho de edificações habitacionais*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2015). *NBR 16372: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)*. Rio de Janeiro: ANBT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2017). *NBR 8522: Concreto - determinação do módulo estático de elasticidade à compressão*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 16607: Cimento Portland — Determinação dos tempos de pega*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5738: Concreto - Procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2018). *NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos*. Rio de Janeiro: ABNT.
- Azenha, M., Faria, R., & Ferreira, D. (2009). Identification of early-age concrete temperatures and strains: Monitoring and numerical simulation. *Cement & Concrete Composites*, 31, 369-378. doi:doi:10.1016/j.cemconcomp.2009.03.004
- Banthia, N., & Gupta, R. (2009). Plastic shrinkage cracking in cementitious repairs and overlays. *Materials and Structures*, 42. doi:https://doi.org/10.1617/s11527-008-9403-9
- Barbosa, F. L. (2018). *Hidratação e retração autógena de sistemas cimentícios com diferentes cinzas do bagaço de cana-de-açúcar*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Campos dos Goytacazes - RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF.
- Bauer, L. A., Noronha, M. A., & Bauer, R. J. (2014). Uso de aditivos no concreto. Em L. A. Bauer, *Materiais de Construção* (5 ed., Vol. 1, p. 488). LTC.
- Benabed, B., Kadri, E.-H., Azzouz, L., & Kenai, S. (2012). Properties of self-compacting mortar made with various types of sand. *Cement & Concrete Composites*, 1167-1173.
- Benachour, Y., Davy, C. A., Skoczylas, F., & Houari, H. (2008). Effect of a high calcite filler addition upon microstructural, mechanical, shrinkage and transport properties of

a mortar. *Cement and Concrete Research*, 727-736.

Bentur, A., & Kovler, K. (April de 2003). Evaluation of early age cracking characteristics in cementitious systems. *Materials and Structures*, 36, 183-190.

Bentz, D. P., & Jensen, O. M. (2004). Mitigation strategies for autogenous shrinkage cracking. *Cement & Concrete Composites*, 26, 677-685. doi:doi:10.1016/S0958-9465(03)00045-3

Berodier, E., & Scrivener, K. (2014). Understanding the Filler Effect on the Nucleation and Growth of C-S-H. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(12), 3764-3773. doi:10.1111/jace.13177

Beushausen, H., & Arito, P. (2018). The influence of mix composition, w/b ratio and curing on restrained shrinkage cracking of cementitious mortars. *Construction and Building Materials*, 174, 38-46. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.099

Beushausen, H., & Chilwesa, M. (2013). Assessment and prediction of drying shrinkage cracking in bonded mortar overlays. *Cement and Concrete Research*(53), 256-266. doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2013.07.008

Bhalla, N., Sharma, S., Sharma, S., & Siddique, R. (2018). Monitoring early-age setting of silica fume concrete using wave propagation techniques. *Construction and Building Materials*, 162, 802-815. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.12.032

Boivin, S. G. (2001). *Retrait au jeune âge du béton. Développement d'une méthode expérimentale et contribution à l'analyse physique du retrait endogène*. Paris: Tese de Doutorado (LCPC).

Bouasker, M., Grondin, F., Mounanga, P., Pertué, A., & Khelidj, A. (2006). *Improved measurement methods for autogenous shrinkage of cement mortars at very early age*. Québec. In: International conference Advances in Concrete through Science and Engineering.

Bouasker, M., Mounanga, P., Turcry, P., Loukili, A., & Khelidj, A. (2008). Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. *Cement and Concrete Composites*, 30, 13-22. doi:<10.1016/j.cemconcomp.2007.06.004>.

Braga, M., Brito, J. d., & Veiga, R. (2012). Incorporation of fine concrete aggregates in mortars. *Construction and Building Materials*, 960-968.

Breitenbach, S. B., Santos, O. C., Andrade, J. C., Nascimento, R. M., & Martinelli, A. E. (2017). Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. *Cerâmica*, 63, 395-401. doi:10.1590/0366-69132017633672182

British Standard. (2005). *BS EN 1504-1: Products and systems for the protection and repair of concrete structures. Definitions, requirements, quality control and evaluation of conformity. Definitions*. BSI.

Cabral, A. E., Schalch, V., Dal Molin, D. C., Ribeiro, J. L., & Ravindrarajah, R. S. (Mar de 2010). Modelagem da retração por secagem de concretos produzidos com

agregados reciclados. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 3(1), 1-23.

Cabrera, O. A., Traversa, L. P., & Ortega, N. F. (2011). Estado fresco de morteros y hormigones con arenas de machaqueo. *Materiales de Construcción*, 61(303), 401-416. doi:10.3989/mc.2011.55609

Cao, F., & Yan, P. (2019). The influence of the hydration procedure of MgO expansive agent on the expansive behavior of shrinkage-compensating mortar. *Construction and Building Materials*, 202, 162-168. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.016

Cepuritis, R., Jacobsen, S., Smeplass, S., Mørtzell, E., Wigum, B. J., & Ng, S. (2017). Influence of crushed aggregate fines with micro-proportioned particle size distributions on rheology of cement paste. *Cement and Concrete Composites*, 64-79.

Chang-wen, M., Qian, T., Wei, S., & Jia-ping, L. (2007). Water consumption of the early-age paste and the determination of "time-zero" of self-desiccation shrinkage. *Cement and Concrete Research*, 1496-1501.

Chaohua, J., Chen, J., Yizhi, W., Sheng, Y., & Da, C. (07 de 2018). Effect of heat curing treatment on the drying shrinkage behavior and microstructure characteristics of mortar incorporating different content ground granulated blast-furnace slag. *Construction and Building Materials*, 186, 379-387. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.079

Chen, T. C., Ferraro, C. C., Yin, W. Q., Ishee, C. A., & Ifju, P. G. (2010). A novel two-dimensional method to measure surface shrinkage in cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 40, 687-698. doi:doi:10.1016/j.cemconres.2009.11.013

Craeye, B., De Schutter, G., Desmet, B., Vantomme, J., Heirman, G., Vandewalle, L., . . . Kadri, E. H. (2010). Effect of mineral filler type on autogenous shrinkage of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, 908-913.

Duval, R., & Kadri, E. (1998). Influence of Silica Fume on the Workability and the Compressive Strength of High-Performance Concretes. *Cement and Concrete Research*, 28(4), pp. 533-547. doi:10.1016/s0008-8846(98)00010-6

Dzaye, E. D., Tsangouri, E., Spiessens, K., De Schutter, G., & Aggelis, D. G. (2019). Digital image correlation (DIC) on fresh cement mortar to quantify settlement and shrinkage. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 19, 205-214. doi:https://doi.org/10.1016/j.acme.2018.10.003

Faria, E. F. (2012). *Concretos Autoadensáveis de Alto Desempenho com Catalisador Residual do Craqueamento Catalítico Fluido (ECAT) de Refinarias de Petróleo*. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil). Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE.

Feng, H., Feng, Z., Wang, W., Deng, Z., & Zheng, B. (2021). Impact of polycarboxylate superplasticizers (PCEs) with novel molecular structures on fluidity, rheological behavior and adsorption properties of cement mortar. *Construction and Building Materials* 292, 1-13.

Gadri, K., & Guettala, A. (2017). Evaluation of bond strength between sand concrete

as new repair material and ordinary concrete substrate (The surface roughness effect). *Construction and Building Materials*, 157, 1133-1144. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.183>

Gao, P., Zhang, T., Luo, R., Wei, J., & Yu, Q. (Fev. de 2014). Improvement of autogenous shrinkage measurement for cement paste at very early age: Corrugated tube method using non-contact sensors. *Construction and Building Materials*, 55, 57-62. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.086>

Giordani, C., & Masuero, A. B. (2019). Blended mortars: Influence of the constituents and proportioning in the fresh state. *Construction and Building Materials*, 210, 574-587. doi:<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.02.077>

Giroto, L. S., Barbosa, M. P., & Maciel, G. F. (Fev de 2014). Avaliação do comportamento reológico na retração plástica e na fissuração de argamassas de concreto auto-adensável. *Revista Ibracon de Estruturas e Materiais*, 7(1), 24-52.

Glisic, B., & Simon, N. (2000). Monitoring of concrete at very early age using stiff SOFO sensor. *Cement & Concrete Composites*, 22, 115-119.

Golaszewski, J., Ponikiewski, T., Cygan, T., & Golaszewska, M. (2016). Laser system for testing early shrinkage of concrete elements in conjunction with the deterioration of the setting time. *Civil Engineering Series*, 16(2), 25-34. doi:10.1515/tvsb-2016-0011

Gupta, L. K., & Vyas, A. K. (2018). Impact on mechanical properties of cement sand mortar containing waste granite powder. *Construction and Building Materials*, 155-164.

Hamid, S. A., Nouh, A., & Zabel, N. Y. (2017). A model for prioritizing concrete structures repair works. *Housing and Building National Research Center Journal*, 14, 334-339. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.hbrcj.2017.04.001>

He, T., Li, Z., Zhao, S., Zhao, X., & Qu, X. (2021). Study on the particle morphology, powder characteristics and hydration activity of blast furnace slag prepared by different grinding methods. *Construction and Building Materials*, 124445.

Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. *Technical Research Centre of Finland*, 446, 184.

Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), 531-540. doi:[https://doi.org/10.1016/S0958-9465\(03\)00069-6](https://doi.org/10.1016/S0958-9465(03)00069-6)

Hua, C., Acker, P., & Ehrlacher, A. (1995). Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Cement and Concrete Research*, 25(7), pp. 1457-1468. doi:[https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00140-8](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00140-8)

Itaipu Binacional. (2018). *Board de Consultores Civis de Itaipu*. Foz do Iguaçu: Itaipu Binacional.

Itim, A., Ezziene, K., & Kadri, E.-H. (2011). Compressive strength and shrinkage of mortar containing various amounts of mineral additions. *Construction and Building Materials*, 25, 3603-3609. doi:[doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055](https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.03.055)

- Jaafri, R., Aboulayt, A., Alam, S. Y., Roziere, E., & Loukili, A. (2019). Natural hydraulic lime for blended cement mortars: Behavior from fresh to hardened states. *Cement and Concrete Research*, 120, 52-65. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.03.003>
- Jasiczak, J., Szymański, P., & Nowotarski, P. (2015). Computerised evaluation of the early age of shrinkage in concrete. *Automation in Construction*, 40-50.
- Jianyong, L., & Yan, Y. (2001). A study on creep and drying shrinkage of high performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31, 1203-1206. doi:10.1016/s0008-8846(01)00539-7
- Jurowski, K., & Grzeszczyk, S. (2015). The influence of concrete composition on Young's modulus. *Procedia Engineering* 108, 584-591.
- Kabeer, K. I., & Vyas, A. K. (2019). Experimental investigation on utilization of dried marble slurry as fine aggregate in lean masonry mortars. *Journal of Building Engineering*, 23, 185-192. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jobe.2019.01.034>
- Kabeer, K. S., & Vyas, A. K. (2018). Utilization of marble powder as fine aggregate in mortar mixes. *Construction and Building Materials*, 321-332.
- Kadri, E. H., Aggoun, S., De Schutter, G., & Ezziane, K. (2010). Combined effect of chemical nature and fineness of mineral powders on Portland cement hydration. *Materials and Structures*, 43, 665-673. doi:10.1617/s11527-009-9519-6
- Khouadjia, M. L., Mezghiche, B., & Drissi, M. (2015). Experimental evaluation of workability and compressive strength of concrete with several local sand and mineral additions. *Construction and Building Materials*, 98, 194-203. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.081>
- Kucharczykováa, B., Karel, O., Daněk, P., Kocáb, D., & Pössl, P. (2017). Comparison of Measurements Methods Intended to Determination of the Shrinkage Development in Polymer Cement Mortars. *Procedia Engineering*, 17-23.
- Kudlanvec Jr, V. L., & da Costa, M. d. (2017). Argamassas de reparo estrutural: resistência de aderência sob diferentes formas de solicitação. *Revista Técnico-Científica do CREA-PR(Especial)*, 1-14.
- Laboratório de Análise de Minerais e Rochas - LAMIR. (2020). *Recibo e GRU Lamir nº36/20 - Por Franciele de Oliveira Czervinski*. Mensagem recebida por <lamir_tec@ufpr.br> em 14 de fevereiro de 2020.
- Lawrence, P., Cyr, M., & Ringot, E. (2003). Mineral admixtures in mortars effect of inert materials on short-term hydration. *Cement and Concrete Research*, 33, 1939-1947. doi:10.1016/S0008-8846(03)00183-2
- Lenart, M. (2015). Assessment of mortar shrinkage in aspect of organic and inorganic modifiers use. *Procedia Engineering*, 108, 309-315. doi:10.1016/j.proeng.2015.06.152
- Li, L., Long, B. J., Lu, J., & Poon, C. S. (2019). Systematic evaluation of the effect of replacing river sand by different particle size ranges of fine recycled concrete aggregates (FRCA) in cement mortars. *Construction and Building Materials*, 147-155.

- Lopes, A. N. (2011). *Mitigação da retração autógena em concretos de alta resistência contendo aditivo redutor de retração e seus efeitos na macro e microestrutura*. Porto Alegre: Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia.
- Lu, T., Li, Z., & van Breugel, K. (2020). Modelling of autogenous shrinkage of hardening cement paste. *Construction and Building Materials*, 120708.
- Lura, P., & Jensen, O. M. (2007). Measuring techniques for autogenous strain of cement paste. *Materials and Structures*, 40, 431-440.
- Mailvaganam, N. P., & Zhang, J. (2006). Structural and patch repair in concrete structures. *Cement & Concrete Composites*, 28, 669-670. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.05.007
- Martínez, P. S., Cortina, M. G., Martínez, F. F., & Sánchez, A. R. (2016). Comparative study of three types of fine recycled aggregates from construction and demolition waste (CDW), and their use in masonry mortar fabrication. *Journal of Cleaner Production*, 162-169.
- Mauroux, T., Benboudjema, F., Turcry, P., Ait-Mokhtar, A., & Deves, O. (2012). Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. *Cement and Concrete Research*, 42, 1014-1023. doi:https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.04.002
- Mehta, P. K., & Burrows, R. W. (Março de 2001). Building Durable Structures in the 21st Century. *Concrete International*(23), pp. 57-63.
- Mehta, P. K., & Monteiro, P. J. (2008). *Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais* (3 ed.). São Paulo: IBRACON.
- Melo Neto, A. A. (2008). *Influência de aditivos redutores e compensadores de retração em argamassas e pastas com cimento de escória ativada*. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo: São Paulo.
- Meziane, E.-H., Ezziane, K., Kenai, S., & Kadri, A. (2015). Mechanical, hydration, and durability modifications provided to mortar made with crushed sand and blended cements. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 29, pp. 1987-2005. doi:http://dx.doi.org/10.1080/01694243.2015.1048931
- Neville, A. M. (2015). *Propriedades do Concreto* (5 ed.). Bookman.
- Noaman, A. T., Abed, M. S., & Abdul Hamead, A. A. (2020). Production of polycarboxylate-ether superplasticizer (PCE) coated sand with modified hardened properties in cement mortar. *Construction and Building Materials*, 245, 1-9.
- Oliveira, H. M. (2014). Propriedades do Concreto Endurecido. Em L. A. Bauer, & J. F. Dias (Ed.), *Materiais de Construção* (5 ed., p. 488). LTC.
- Peña, M. R. (2004). *Estudo da fissuração associada à retração em argamassas para reparo em estruturas de concreto*. Dissertação (Mestrado) - São Paulo: Universidade de São Paulo.

Pons, G., & Torrenti, J. M. (2014). Retração e Fluência. Em J.-P. Ollivier, & A. Vichot, *Durabilidade do Concreto: Bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente* (1 ed., pp. 139-180). São Paulo: IBRACON.

Qian, J., You, C., Wang, Q., Wang, H., & Jia, X. (2014). A method for assessing bond performance of cement-based repair materials. *Construction and Building Materials*, 68, 307-313. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.06.048>

Qin, R., Hao, H., Rousakis, T., & Lau, D. (2019). Effect of shrinkage reducing admixture on new-to-old concrete interface. *Composites Part B*, 167, 346-355. doi:<https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.11.087>

Ran, Q., Gao, N., Liu, J., Tian, Q., & Zhang, J. (2013). Shrinkage action mechanism of shrinkage-reducing admixtures based on the pore solution. *Magazine of Concrete Research*, 65(18), 1092-1100. doi:<https://doi.org/10.1680/mac.12.00224>

Sahmaran, M., Al-Emam, M., Yıldırım, G., Simsek, Y. E., Erdem, T. K., & Lachemi, M. (2015). High-early-strength ductile cementitious composites with characteristics of low early-age shrinkage for repair of infrastructures. *Materials and Structures*, 48, 1389-1403. doi:[10.1617/s11527-013-0241-z](https://doi.org/10.1617/s11527-013-0241-z)

Saliba, J., Rozière, E., Grondin, F., & Loukili, A. (2011). Influence of shrinkage-reducing admixtures on plastic and long-term shrinkage. *Cement and Concrete Composites*, 33(2), 209-217. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2010.10.006>

Sant, G., Lothenbach, B., Juilland, P., Le Saout, G., Weiss, J., & Scrivener, K. (2011). The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. *Cement and Concrete Research*, 41(3), 218-229. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.004>

Schuler, A. (1998). *Caracterização de argamassas com adições de sílica ativa como material para reparos e reforços de estruturas de concreto armado*. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Senisse, J. A. (2010). *Influência do consumo de água, do teor de adição de microfibras de polipropileno e do tipo de cimento no fenômeno da retração por secagem em concretos empregados em pisos*. Porto Alegre: Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Senisse, J. A. (2015). *Estudo do efeito do agregado cerâmico com diferentes porosidades no comportamento mecânico e de retração livre e restringida de concretos, visando o uso de resíduos de construção e demolição como agente de cura interna*. Porto Alegre: Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Shi-Cong, K., & Chi-Sun, P. (2009). Properties of concrete prepared with crushed fine stone, furnace bottom ash and fine recycled aggregate as fine aggregates. *Construction and Building Materials*, 2877-2886.

Silva Júnior, P. F. (2017). *Estudo da estabilidade dimensional de concretos de alta resistência com adição de polímero superabsorvente e nanopartículas de sílica*. Tese

de Doutorado (Estruturas e Construção Civil). Universidade de Brasília: Brasília.

Silva, E. F. (2007). *Variações dimensionais em concretos de alto desempenho contendo aditivo redutor de retração*. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Rio de Janeiro COPPE/UFRJ: Rio de Janeiro.

Silva, J., Brito, J. d., & Veiga, R. (2009). Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*, 556-564.

Snoeck, D., Jensen, O. M., & De Belie, N. (2015). The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 74, 59-67. doi:<https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.03.020>

Tam, V. W., Gao, X. F., Tam, C. M., & Chan, C. H. (2008). New approach in measuring water absorption of recycled aggregates. *Construction and Building Materials*(22), pp. 364-369.

Thomaz, W. d., Miyaji, D. Y., & Possan, E. (2021). Comparative study of dynamic and static Young's modulus of concrete containing basaltic aggregates . *Case Studies in Construction Materials* , e00645.

Topolář, L., Misák, P., Kocáb, D., & Matysík, M. (2016). Applying Method of Acoustic Emission for Monitoring of Different Concrete Mixture during Setting and Hardening. *Solid State Phenomena*, 249, 91-95.

Vekey, B. d., Sutherland, A., & Ferguson, A. (2001). A new total shrinkage test for mortar. *9th Canadian Masonry Symposium*.

Vieira, A. P. (2018). *Avaliação da retração autógena de concretos de alto desempenho produzidos com cinza da casca de arroz*. Rio de Janeiro: Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil COPPE - Universidade Federal do Rio de Janeiro.

Westerholm, M., Lagerblad, B., Silfwerbrand, J., & Forssberg, E. (2008). Influence of fine aggregate characteristics on the rheological properties of mortars. *Cement & Concrete Composites*, 274-282.

Winnefeld, F., Schöler, A., & Lothenbach, B. (2016). Sample preparation. Em K. Scrivener, R. Snellings, & B. Lothenbach (Eds.), *A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials*. CRC.

Xiong, G., Liu, J., Li, G., & Xie, H. (2002). A way for improving interfacial transition zone between concrete substrate and repair materials. *Cement and Concrete Research*, 32, 1877-1881.

Yıldırım, G., Sahmaran, M., & Anil, Ö. (2018). Engineered cementitious composites-based concrete. Em F. Pacheco-Torgal, R. E. Melchers, X. Shi, N. De Belie, K. Van Tittelboom, & A. Sáez (Eds.), *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures* (pp. 387-425). Woodhead Publishing. doi:<https://doi.org/10.1016/C2016-0-04100-1>

Yoo, D.-Y., Ryu, G.-S., Yuan, T., & Koh, K.-T. (2017). Mitigating shrinkage cracking in

posttensioning grout using shrinkage-reducing admixture. *Cement and Concrete Composites*, 81, 97-108. doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.05.005>

Yuli, W., Hang, H., & Xiaoxing, L. (2019). Influences of aggregate micro fines on the packing of fresh mortar and the performances of mortar. *Composites Part B*, 493-498.

Zhang, J., Hou, D., & Han, Y. (2012). Micromechanical modeling on autogenous and drying shrinkages of concrete. *Construction and Building Materials*, 29, 230-240. doi:[doi:10.1016/j.conbuildmat.2011.09.022](http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.09.022)

Zhao, Z., Grellier, A., Bouarroudj, M. E., Michel, F., Bulteel, D., & Courard, L. (2021). Substitution of limestone filler by waste brick powder in self-compacting mortars: properties and durability. *Journal of Building Engineering*.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Relação a/c e retração em estudos publicados na literatura científica

Referência	Relação a/c	Material estudado
Holt, E. E. (2001). Early age autogenous shrinkage of concrete. <i>Technical Research Centre of Finland</i> , 446, 184.	0,35	Argamassa
Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 26(5), 531-540.	0,50	Argamassa
Bouasker, M., Grondin, F., Mounanga, P., Pertué, A., & Khelidj, A. (2006). <i>Improved measurement methods for autogenous shrinkage of cement mortars at very early age</i> . Québec. In: International conference Advances in Concrete through Science and Engineering.	0,25	Pasta de cimento
	0,30	
Bouasker, M., Mounanga, P., Turcry, P., Loukili, A., & Khelidj, A. (2008). Chemical shrinkage of cement pastes and mortars at very early age: Effect of limestone filler and granular inclusions. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 30, 13-22.	0,25	Pasta de cimento
	0,30	
	0,40	
Sant, G., Lothenbach, B., Juilland, P., Le Saout, G., Weiss, J., & Scrivener, K. (2011). The origin of early age expansions induced in cementitious materials containing shrinkage reducing admixtures. <i>Cement and Concrete Research</i> , 41(3), 218-229	0,30	Pasta de cimento
Gao, P., Zhang, T., Luo, R., Wei, J., & Yu, Q. (Fev. de 2014). Improvement of autogenous shrinkage measurement for cement paste at very early age: Corrugated tube method using non-contact sensors. <i>Construction and Building Materials</i> , 55, 57-62.	0,26	Pasta de cimento
	0,30	
	0,40	
Snoeck, D., Jensen, O. M., & De Belie, N. (2015). The influence of superabsorbent polymers on the autogenous shrinkage properties of cement pastes with supplementary cementitious materials. <i>Cement and Concrete Research</i> , 74, 59-67.	0,30	Pasta de cimento
	0,35	
Yoo, D.-Y., Ryu, G.-S., Yuan, T., & Koh, K.-T. (2017). Mitigating shrinkage cracking in posttensioning grout using shrinkage-reducing admixture. <i>Cement and Concrete Composites</i> , 81, 97-108.	0,45	Pasta de cimento

Fonte: A Autora (2019)

APÊNDICE 2: Índice de consistência das argamassas estudadas

Dosagem	Consistência (mm)		
	1	2	3
A0	32,50	32,00	32,23
AN5	34,00	34,10	34,30
AN10	34,90	35,50	36,10
AN15	36,20	35,80	36,30
AA5	34,00	34,90	35,00
AA10	36,80	37,50	38,00
AA15	34,00	34,60	34,20
A0	34,00	33,00	33,20
AN5	37,00	36,00	36,20
AN10	36,50	36,20	37,50
AN15	36,10	36,20	36,80
AA5	30,20	30,00	30,50
AA10	32,00	32,10	32,00
AA15	29,00	29,20	29,40

APÊNDICE 3: Resistência à compressão e módulo de elasticidade das argamassas estudadas

Dosagem	Idade (dias)	CP	Resistência à Compressão (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)
A0	7	1	38,9	-
		2	38,8	-
		3	44,4	42,9
		4	37,8	41,3
		5	46,8	44,6
	28	1	85,4	-
		2	74,5	-
		3	80,6	47,9
		4	87,2	46,0
		5	86,3	48,9
AN5	7	1	52,41	-
		2	52,17	-
		3	50,12	42,19
		4	50,92	42,19
		5	50,51	-
	28	1	89,52	-
		2	89,67	-
		3	88,58	48,85
		4	90,61	49,77
		5	91,85	46,28
AN10	7	1	50,0	-
		2	47,9	-
		3	49,5	37,3
		4	51,8	39,4
		5	53,0	40,5
	28	1	92,6	-
		2	92,5	-
		3	96,0	47,8
		4	96,2	48,7
		5	92,2	47,8
AN15	7	1	49,3	-
		2	48,3	-
		3	50,3	39,3
		4	49,6	37,2
		5	49,8	37,2
	28	1	99,3	-
		2	100,6	-
		3	99,9	46,8
		4	95,8	46,8
		5	99,7	47,6
AA5	7	1	48,6	-

		2	46,5	-
		3	50,4	40,5
		4	49,1	39,3
		5	49,1	38,3
		1	86,5	-
	28	2	86,9	-
		3	87,2	47,2
		4	86,1	-
		5	85,7	51,0
		1	51,9	-
AA10	7	2	50,6	-
		3	50,1	36,3
		4	51,7	36,3
		5	52,4	37,2
		1	86,9	-
	28	2	66,4	-
		3	89,5	44,1
		4	91,5	44,1
		5	88,3	45,0
		1	51,6	-
AA15	7	2	54,0	-
		3	50,0	34,9
		4	52,2	35,7
		5	52,9	34,9
		1	89,0	-
	28	2	84,4	-
		3	86,7	42,5
		4	80,6	41,1
		5	85,4	42,0