



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

MARIANA REZENDE SCHUAB

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES
DIMENSIONAIS DE ARGAMASSAS
ÁLCALI-ATIVADAS E SUA
COMPATIBILIDADE COM SUBSTRATO
DE CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND
VISANDO À SUA APLICAÇÃO COMO
MATERIAL DE REPARO ESTRUTURAL**

Belo Horizonte, fevereiro de 2018

MARIANA REZENDE SCHUAB

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DE
ARGAMASSAS ÁLCALI-ATIVADAS E SUA
COMPATIBILIDADE COM SUBSTRATO DE CONCRETO
DE CIMENTO PORTLAND VISANDO À SUA APLICAÇÃO
COMO MATERIAL DE REPARO ESTRUTURAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges
Coorientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Belo Horizonte, fevereiro de 2018

S383e Schuab, Mariana Rezende
Estudo das variações dimensionais de argamassas álcali-
ativadas e sua compatibilidade com substrato de concreto de cimento
Portland visando à sua aplicação como material de reparo estrutural. /
Mariana Rezende Schuab. -- Belo Horizonte, 2018.
xii, 72 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil. 2018.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Henrique Ribeiro Borges.
Coorientador: Prof. Dr. White José dos Santos

Bibliografia

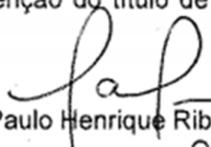
1. Materiais Compósitos. 2. Compostos Poliméricos - Argamassa.
3. Materiais de Construção. I. Borges, Paulo Henrique Ribeiro. II.
Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. III. Título

CDD 691.9

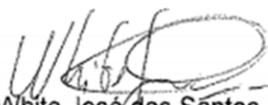
MARIANA REZENDE SCHUAB

**ESTUDO DAS VARIAÇÕES DIMENSIONAIS DE
ARGAMASSAS ÁLCALI-AATIVADAS E SUA
COMPATIBILIDADE COM SUBSTRATO DE CONCRETO
DE CIMENTO PORTLAND VISANDO À SUA APLICAÇÃO
COMO MATERIAL DE REPARO ESTRUTURAL**

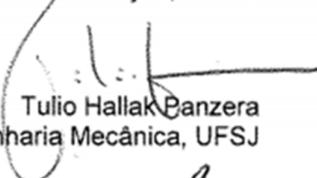
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do CEFET-MG como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

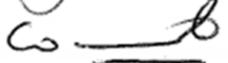

Paulo Henrique Ribeiro Borges
Orientador(a)

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG


White José dos Santos
Coorientador(a)

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, UFMG


Tulio Hallak Panzera
Departamento de Engenharia Mecânica, UFSJ


Conrado de Souza Rodrigues
Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Belo Horizonte, 08 de Fevereiro de 2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por reservar para mim oportunidades e encontros melhores do que eu mesma poderia desejar. A realização deste trabalho foi possibilitada com o auxílio direto e indireto de pessoas muito especiais. Agradeço ao Professor Paulo Borges pela orientação, suporte e compartilhamento do conhecimento, além da contribuição para o meu crescimento pessoal e profissional. Ao Professor White pela coorientação, dedicação, suporte emocional e acadêmico, empatia e por ser um exemplo de ser humano que levarei por toda a vida. Aos professores do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil Flávia, Peter, Hersília, Conrado e Rogério, que por meio das lições ensinadas em sala de aula, ou por conversas informais nos corredores, tornaram a experiência do Mestrado ainda mais rica. Ao professor Augusto Bezerra do Programa de Pós Graduação em Engenharia de Materiais por todo auxílio prestado no laboratório do DET e pelas conversas breves, porém incríveis. Às secretárias do PPGEC Ana Paula e Nathalia por toda boa vontade, eficiência, prestatividade e simpatia. Ao CEFET-MG e à FAPEMIG pela estrutura oferecida e o incentivo ao desenvolvimento da pesquisa. Aos colegas do grupo de pesquisa de reparo estrutural Luana, Rhaissa e Vitor, que tanto contribuíram para a realização dos ensaios e compartilharam comigo suas experiências. Ao técnico de laboratório Ivan por toda a paciência e auxílio, assim como aos estagiários Isabela, André e Rodrigo, sempre socílitos e empenhados. Aos meus colegas de curso que tornaram essa experiência mais leve, doce e divertida. Nem em sonho eu imaginava encontrar pessoas tão incríveis para compartilhar uma mesa redonda. Agradeço à melhor amiga-vizinha que alguém poderia ter Kastelli, à sempre alegre, autêntica e aquariana Samarina, à sincera e cuidadosa Carla, ao irritantemente prestativo e onipresente Pedro, à pessoa tão exemplar quanto doce Marcela, ao professor Aniel, à afinidade com a Vanessa, à calma do Chico, às risadas com o desespero da Dani, à admiração aos conhecimentos do Nelson, à ausência do Ricardo, ao compartilhamento de experiências e emoções com a Raquel, aos ouvidos atentos e preocupados da Scarlet e à admirável disciplina e dedicação do Felipe. Aos meus avós Jair, Nilce e Rita, que são minha fonte de afeto e inspiração mais genuína. Aos meus pais, Paulo e Ione, que nunca mediram esforços para contribuir com minha formação, que são a base de tudo e os donos de todo o meu amor. À minha irmã Luciana e ao Rapha, que foram o meu conforto nos dias mais difíceis e meu sorriso nos melhores. Ao Lopes pela paciência e dedicação comigo, por trazer leveza, segurança, desafios e doçura para minha vida. À Angélica, Ariel, Bibi, Virgínia, Clarinha e Henrique por toda torcida, ajuda e carinho diários. Às amigas que sempre estiveram presentes e foram os momentos mais descontraídos dessa jornada Pri, Carol, Quel, Urias, Paula, Bruna e Maria. À toda minha família, aos amigos e ao meu time do coração, por proporcionarem emoções que justificam tudo. Minha sincera gratidão a todos vocês, muito obrigada.

*Havia um monge
Que lustrava a careca
Para que sua cabeça
Fosse como se um espelho:
Refletisse tudo
E não guardasse nada.*

(Francisco Alvim)

RESUMO

As patologias existentes em estruturas envelhecidas de concreto armado requerem a execução de intervenções, que variam desde um reparo superficial a um reforço mais complexo. As argamassas álcali-ativadas têm sido recentemente estudadas na execução de reparos estruturais como materiais alternativos aos constituídos por cimento Portland e por resinas poliméricas. Tal utilização justifica-se pelo fato de as argamassas álcali-ativadas apresentarem desempenho mecânico satisfatório, além de apresentarem estabilidade às altas temperaturas, durabilidade química e boa aderência aos substratos de concretos, podendo ser superiores aos materiais convencionais. Há ainda uma motivação adicional ao desenvolvimento desses materiais, que alia o desempenho ao interesse no desenvolvimento de aglomerantes com baixa emissão de CO₂ e de consumo energético. Este trabalho avaliou o desempenho de 21 diferentes formulações preliminares de argamassas ativadas alcalinamente, compostas por metacaulim e escória de alto forno. A trabalhabilidade das argamassas foi fixada para todas as formulações, por ser considerada uma característica fundamental para a aplicabilidade e para a utilização proposta. Foi realizada a avaliação do comportamento mecânico das formulações preliminares, e por meio da compatibilização dos resultados de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático foram selecionadas 5 formulações. Foi realizada a avaliação da variação dimensional linear das formulações selecionadas, além da retração com restrições sobre substrato de concreto e da retração com restrição com dispositivos concentradores de tensão. De modo complementar à análise das argamassas aplicadas sobre o substrato de concreto, determinou-se experimentalmente o teor de 0,25% de adição de fibras de polipropileno, visando a redução da propagação das fissuras. Após a realização das três análises foi selecionada a formulação que obteve a menor densidade de fissuras, e para tal formulação foi avaliado o efeito da realização de cura úmida e térmica, variação da relação agregados/aglomerantes, adição de 0,75% de fibras e da área de aplicação da argamassa (para a verificação da influência do efeito de borda no surgimento das fissuras). Observou-se que a adição de 0,25% de fibras não foi eficiente no combate à retração nas primeiras idades. Além disso, constatou-se que a substituição de 20% de metacaulim por escória contribuiu para a redução do número de fissuras e também do comprimento de fissuras. Contudo, as argamassas com os maiores teores de escória avaliados não apresentaram comportamento satisfatório para as variáveis analisadas. Observou-se que as argamassas álcali-ativadas apresentam desempenho satisfatório para comportamento mecânico e variação dimensional livre, contudo há grande ocorrência de retração quando há restrição da movimentação.

Palavras-chave: argamassas álcali-ativadas; argamassas de reparo estrutural; avaliação da retração; avaliação da variação dimensional.

ABSTRACT

Existing pathologies in aged reinforced concrete structures require the execution of interventions, ranging from a superficial repair to a more complex reinforcement. Alkali-activated mortars have recently been studied in the execution of structural repairs as materials alternative to Portland cement and polymer resins. Such use is justified by the fact that alkali-activated mortars exhibit satisfactory mechanical performance, as well as stability to high temperatures, chemical durability and good adhesion to concrete substrates, which may be superior to conventional materials. There is also an additional motivation for the development of these materials, which combines performance with interest in the development of low CO₂ and energy consumption binders. This work evaluated the performance of 21 different preliminary formulations of alkaline activated mortars, composed of metakaolin (MK) and blast furnace slag (BFS). The workability of mortars for all formulations was fixed, as it was considered a fundamental characteristic for the applicability and for the proposed use. The mechanical behavior of the preliminary formulations was evaluated and, through the compatibilization of the results of resistance to simple compression and static modulus of elasticity, 5 formulations were selected. The linear dimensional variation was evaluated for the selected formulations, as well as the retraction with constraints on concrete substrate and the retraction with restriction with voltage concentrating devices. As a complement to the analysis of the applied mortars on the concrete substrate, the content of 0,25% polypropylene fiber addition was determined experimentally, aiming to reduce the propagation of cracks. After the three analyzes, the formulation that obtained the lowest crack density was selected, and the effect of the wet and thermal curing, the ratio of aggregate / binder ratio, the addition of 0,75% fibers and of the area of application of the mortar (to verify the influence of the edge effect in the appearance of the cracks). It was observed that the addition of 0,25% of fibers was not efficient in combating retraction in the early ages. In addition, it was found that the substitution of 20% of MK for BFS contributed to the reduction of cracks and also the length of cracks. However, mortars with the highest levels of slag evaluated did not present a satisfactory behavior for the analyzed variables. It was observed that the alkali-activated mortars present satisfactory performance for mechanical behavior and free dimensional variation. However, there is a high occurrence of retraction when there is movement restriction.

Keywords: alkali-activated mortars; mortars for structural repair; retraction evaluation; evaluation of dimensional variation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composições e nomenclaturas dos géis geopoliméricos.	8
Figura 2 - Modelo descritivo da álcali-ativação de aluminossilicatos sem presença de cálcio.	8
Figura 3 - Processos e produtos da reação de ativação alcalina de um precursor de aluminossilicato sólido - sistemas com alto e baixo teor de cálcio.....	10
Figura 4 - Expressão gráfica da queda de desempenho natural de uma edificação....	13
Figura 5 - Reparo não estrutural.	13
Figura 6 - Reparo estrutural.	14
Figura 7 - a) Fissura transversal no material de reparo; b) Fissura longitudinal no substrato; c) Fissura longitudinal na interface.	15
Figura 8 - a) Medidores de variação de comprimento, segundo a EN 12617-4, (2002); b) Formas prismáticas, segundo a EN 8147 (2008).	20
Figura 9 - Dispositivo de registro de imagens digitais para a avaliação da retração por secagem.	23
Figura 10 - Dispositivo de medição da retração com indicador de distância.	24
Figura 11 - a) Fôrma utilizada b) Câmara de simulação climática.	24
Figura 12 - Aparato experimental construído pelos autores para o teste do anel.	25
Figura 13 - Equipamento para o teste do anel.	25
Figura 14 - Fluxograma do programa experimental.	30
Figura 15 - Aplicação da argamassa de reparo no substrato de concreto.....	38
Figura 16 - Forma utilizada e dimensões segundo a ASTM C1579 (ASTM, 2006).....	40
Figura 17 - Indução da retração com restrição das argamassas segundo a ASTM C1579 (adaptada).	41
Figura 18 - a) Composição granulométrica dos agregados; b) Composição granulométrica dos precursores; c) DRX escória; d) DRX metacaulim.....	42
Figura 19 - Comportamento mecânico das argamassas álcali-ativadas.....	44
Figura 20 - a) e c) Variação percentual de massa das argamassas; b) e d) Variação linear dimensional das argamassas e do graute.	45
Figura 21 - Avaliação da retração segundo a EN 12617-4 (adaptado) para as formulações com razão agregados/aglomerante 1.5 a) sem adição de fibras e b) com 0,25% de fibras de PP.	47
Figura 22 - Ocorrência de eflorescência - formulação 3.6 20/80 a) Observação macroscópica aos 3 dias após a moldagem; b) Observação microscópica aos 28 dias.	48

Figura 23 - Análise microscópica das argamassas: a) e b) (3.0 100/0) preenchimento de fissuras e poros por carbonatos; c) (3.0 100/0) zona de transição matriz/agregado; d) (3.6 80/20) zona de transição matriz/agregado; e) (3.0 100/0) adição de 0,25%PP; f) (3.0 60/40) adição de 0,25%PP; g) (4.2 40/60) adição de 0,25%PP e h) (3.6 20/80) adição de 0,25%PP.....	50
Figura 24 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações a) 3.0 100/0 e b) 3.0 80/20 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP.....	51
Figura 25 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações a) 3.6 60/40 e b) 4.2 40/60 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP.....	52
Figura 26 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações 3.6 80/20 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP e do graute (cura úmida e cura submersa).....	53
Figura 27 - a) Densidade de fissuras x H_2O/Na_2O ;	54
Figura 28 - Fissuração das argamassas aos 7 dias - segundo a ASTM C1579.	55
Figura 29 - Retração segundo a ASTM C1579 - a) Fissuras induzidas pelo dispositivo de tensão das formas; b) Vista lateral da realização da cura das argamassas com o fundo da forma por 7 dias.	56
Figura 30 - Densidade de fissuras x espessura – aos 7 dias, segundo a ASTM C1579.	57
Figura 31 - Densidade de fissuras [mm/mm^2] x tempo das variáveis da formulação 3.0 80/20.	59
Figura 32 - Variáveis da formulação 3.0 80/20 - evolução das fissuras aos 28 dias....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo das diferentes combinações de precursores sólidos e ativadores alcalinos que se revelaram viáveis e/ou desejáveis.	4
Tabela 2 - Considerações logísticas de compatibilidade entre o reparo e o substrato.	15
Tabela 3 - Formulações das argamassas estudadas por Mobili <i>et al.</i> (2016).	20
Tabela 4 - Utilização de fibras em compósitos alcalinamente ativados.	27
Tabela 5 - Utilização de fibras em compósitos cimentícios.	28
Tabela 6 - Influência do tipo de fibra na propriedade desejada.	28
Tabela 7 - Variáveis de resposta da pesquisa.	31
Tabela 8 - Variáveis de controle.	31
Tabela 9 - Composição química dos precursores e ativadores.	32
Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras.	32
Tabela 11 - Composição química do cimento Portland.	33
Tabela 12 - Formulações de argamassas álcali-ativadas para a compatibilização com o substrato.	34
Tabela 13 - Detalhamento da composição das formulações adotadas para a moldagem das argamassas de reparo.	35
Tabela 14 - Traço do concreto [kg/m ³].	36
Tabela 15 - Variações avaliadas da formulação 3.0 80/20.	39
Tabela 16 - Resultados do desempenho mecânico do concreto e do graute de referência.	43
Tabela 17 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático das argamassas álcali-ativadas (média e desvio padrão).	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACI – *American Concrete Institute*

Al – Alumínio

Al³⁺ – Íon alumínio

Al₂O₃ – Alumina ou óxido de alumínio

BFS – Escória de alto forno

CaO – Cal, ou óxido de cálcio

CaCO₃ – Calcita

CaMg(CO₃)₂ – Dolomita

CDTN – Centro de Desenvolvimento Técnico Nuclear

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

CO₂ – Dióxido de carbono, ou, gás carbônico

CP – Corpo (s) de prova

DEC – Departamento de Engenharia Civil

DET – Departamento de Engenharia de Transportes

DRX – Difração de raios X

EDS – Espectroscopia de energia dispersiva de raios X

FA – Cinzas volantes

Fe₂O₃ – Hematita ou óxido de ferro (III)

KOH – Hidróxido de potássio

M – Cátion alcalino

MAA – Materiais álcali-ativados

MG – Minas Gerais

MgO – Óxido de magnésio

ME – Módulo de elasticidade

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MK – Metacaulim

NF – Número de fissuras

Na₂O – Óxido de sódio

NaOH – Hidróxido de sódio

Na₂SiO₃ – Silicato de sódio

OPC – Cimento Portland Ordinário

ρ – Densidade de fissuras [mm/mm²]

PE – Polietileno

PP – Polipropileno

Psi – Libras por polegada quadrada

PVA – Acetato de polivinila

PVC – Policloreto de vinila

Si – Silício

SiO₂ – Sílica ou dióxido de silício

SO₃ – Óxido sulfúrico ou trióxido de enxofre

SP – São Paulo

TiO₂ – Dióxido de titânio

T_g – Temperatura de transição vítrea

Und – Unidade

UV – Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Materiais álcali-ativados como alternativa ao cimento Portland	3
2.1.1 Matérias primas utilizadas na produção de materiais álcali-ativados	5
2.1.2 Materiais álcali ativados sem presença de cálcio	7
2.1.3 Materiais álcali-ativados com presença de cálcio	9
2.1.4 Carbonatação em materiais álcali-ativados	10
2.2 Materiais álcali-ativados como alternativa para reparo	11
2.3 Reparo	12
2.3.1 Variáveis intervenientes na durabilidade dos reparos.....	14
2.3.2 Falhas nos sistemas compostos por argamassa de reparo e substrato.....	15
2.3.3 Principais materiais utilizados em reparos.....	16
2.4 Retração em argamassas	17
2.4.1 Estudos e métodos de avaliação da retração em argamassas	19
2.4.2 Utilização de fibras para mitigar a retração em argamassas.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	29
3.1 Materiais utilizados	31
3.1.1 Argamassas álcali-ativadas	31
3.1.2 Concreto de cimento Portland	33
3.2 Método	33
3.2.1 Formulações estudadas	33
3.2.2 Procedimento de mistura.....	35
3.2.2.1 Argamassas álcali-ativadas	35
3.2.2.2 Concreto com cimento Portland.....	35
3.2.3 Avaliação do comportamento mecânico das argamassas e do concreto.....	36
3.3 Avaliação da retração.....	37

3.3.1	Varição dimensional linear.....	37
3.3.2	Retração com restrição sob substrato de concreto.....	37
3.3.3	Retração com restrição com dispositivo indutor de tensão.....	39
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1	Caracterização das matérias primas.....	41
4.2	Avaliação do comportamento mecânico.....	43
4.3	Avaliação da retração com variação da razão sílica/alumina e da composição dos precursores.....	44
4.3.1	Varição dimensional linear.....	44
4.3.2	Retração com restrição sob substrato de concreto.....	46
4.3.3	Retração com restrição com dispositivo indutor de tensão.....	54
4.4	Retração com variação da razão agregados/aglomerantes, do percentual de fibras e do procedimento de cura.....	57
5	CONCLUSÕES.....	62
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

O cimento Portland (OPC) é o aglomerante mais utilizado no mundo para a construção de estruturas em concreto. A produção mundial desse material totalizou 4,18 Mt no ano de 2014. Esse grande consumo se deve a fatores como a sua grande versatilidade, a durabilidade dos componentes construtivos compostos por esse material e seu valor econômico acessível. Tais características motivaram a indústria da construção ao desenvolvimento de tecnologias construtivas com a utilização do cimento Portland (GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2007; JUENGER *et al.*, 2011). Sabe-se que para cada tonelada de cimento produzida, são emitidas aproximadamente 0,87 toneladas de dióxido de carbono (CO₂). O que representa cerca de 5 a 8% do total das emissões de gás carbônico provenientes da ação antrópica (FILHO *et al.*, 2015; JUENGER *et al.*, 2011; RASHAD, 2013; VAN DEVENTER *et al.*, 2012). Além disso, a produção de uma tonelada de OPC consome de 3 a 6 GJ de energia. Considerando as adversidades citadas, torna-se evidente a necessidade do desenvolvimento de materiais alternativos ao cimento Portland, que demandem um menor consumo energético e apresentem uma redução significativa das emissões de dióxido de carbono (PROVIS *et al.*, 2015).

Os polímeros inorgânicos, ou materiais álcali-ativados (MAA), são confeccionados a partir da reação entre precursores fonte de alumínio e silício, no estado sólido, e uma solução álcali-ativadora. Quando formulados de maneira apropriada, e com a realização de processos adequados de mistura e cura, os materiais álcali-ativados podem apresentar propriedades químicas e mecânicas superiores às dos concretos e das argamassas confeccionados com cimento Portland (DUXSON *et al.*, 2007; PROVIS; BERNAL, 2014). Os geopolímeros por sua vez, são definidos como materiais álcali-ativados que possuem pouca ou nenhuma presença de cálcio, e cujo precursor mais usual é o metacaulim (PROVIS; BERNAL, 2014).

Uma aplicação promissora para os MAA é a sua utilização como aglomerante em argamassas de reparo estrutural (CASTEL; FOSTER, 2015; MARANAN *et al.*, 2015). Esta alternativa pode ser vantajosa nos aspectos ambiental, econômico e, também, técnico. Justificando-se pela apresentação de características desejáveis, como por exemplo a estabilidade às altas temperaturas, a alta durabilidade química e a boa aderência em substratos de argamassas e concretos (PACHECO-TORGAL *et al.*, 2012). Contudo, as argamassas provenientes de MAA apresentam maior ocorrência de retração, quando comparadas às argamassas compostas por cimento Portland. Tal característica é considerada desvantajosa e limitadora de sua utilização (DURAN ATIŞ *et al.*, 2009; KUENZEL *et al.*, 2014; LEE *et al.*, 2014; RIDTIRUD *et al.*, 2011). Portanto, faz-se necessária a realização da avaliação dos mecanismos de retração de tais argamassas, e também da sua compatibilidade com o substrato a serem aplicadas, para que desta forma seja possível viabilizar a definição das composições mais adequadas

das matérias primas e das condições de cura que resultem na menor ocorrência de reações adversas à sua durabilidade e ao seu desempenho (COLLINS; SANJAYAN, 1999; PALACIOS; PUERTAS, 2007).

1.1 Objetivos

Este trabalho visa estudar a retração e a fissuração de argamassas álcali-ativadas à base de metacaulim e escória de alto forno para fins de reparo estrutural em substrato de concreto de cimento Portland. São objetivos específicos do trabalho:

- Verificar, dentre as formulações propostas (com diversos teores de escória de alto forno em substituição ao metacaulim), as mais adequadas para essa utilização, considerando a compatibilização mecânica (valores de resistência à compressão e módulo de elasticidade próximos aos do concreto) das formulações entre as argamassas e o substrato.
- Avaliar a retração livre e com restrição das argamassas álcali-ativadas, bem como seu desempenho com a adição de fibras de polipropileno.
- Avaliar a taxa de crescimento de fissuras oriundas da retração nas primeiras idades das argamassas, quando aplicadas sobre substratos de concreto de cimento Portland.
- Verificar o efeito da variação da relação agregado/aglomerante e da realização de curas úmida e térmica para a formulação de melhor desempenho nos ensaios anteriores.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Materiais álcali-ativados como alternativa ao cimento Portland

A combinação entre álcalis e aluminossilicatos com o intuito de formar um aglutinante cimentício foi estudada por Kühl, em meados de 1900, originando uma patente em 1908. O primeiro estudo laboratorial que envolveu uma mistura de escória de alto forno e componentes alcalinos foi publicado em 1940, e a comercialização dos materiais desenvolvidos ocorreu em 1950. Desde então Glukhovsky, em Kiev (Ucrânia), iniciou um extenso programa de pesquisa, desenvolvimento e produção em escala comercial para esses materiais. O pesquisador francês Davidovits, na década de 90, publicou os primeiros resultados de materiais com diferentes tipos de aluminossilicatos. Tais materiais, compostos por aluminossilicatos ácidos hidratados não reativos que podem ser ativados por processos químicos ou físicos, sem a presença de cálcio em sua composição, foram denominados geopolímeros (BERNAL; PROVIS, 2014; BORGES *et al.*, 2014; PROVIS, 2014, GARTNER; MACPHEE, 2011).

Os materiais álcali-ativados (MAA) possuem estrutura tridimensional predominantemente amorfa, com propriedades semelhantes às das cerâmicas. O produto da reação da mistura entre os precursores com a solução alcalina apresenta uma microestrutura de rede semelhante à de polímeros inorgânicos, motivo pelo qual esses materiais também são conhecidos por essa terminologia (PROVIS *et al.*, 2005). Ao contrário do cimento Portland, os concretos e argamassas álcali-ativados podem ser compostos exclusivamente por resíduos industriais, tais como a escória de alto forno e as cinzas volantes. Tal característica viabiliza sua produção com baixos teores de emissão de CO₂ e propicia vastas possibilidades de utilização de matérias primas, adaptando-se à disponibilidade da região em que são produzidos (GERALDO *et al.*, 2017; JUENGER *et al.*, 2011; KOMNITSAS, 2011).

Borges *et al.* (2014) efetuou a análise do ciclo de vida comparativo entre um concreto confeccionado com cimento Portland (CP II-E) e um com MAA. Em que, neste último, foi utilizado o metacaulim como precursor e uma mistura entre hidróxido e silicato de potássio na solução ativadora. Nesse estudo, constatou-se a redução de 45,8% de consumo energético na produção do concreto álcali-ativado, em detrimento ao concreto tradicional. Já as emissões de CO₂, reduziram 72,4% para os concretos ativados alcalinamente, evidenciando uma grande vantagem na adoção desses materiais.

As matérias primas utilizadas na confecção dos MAA devem ser estudadas, caracterizadas e escolhidas com cautela. O precursor deve possuir desempenho satisfatório e estar disponível no local de sua aplicação, assim como a solução ativadora deve possuir afinidade com o aglomerante adotado (BERNAL; PROVIS, 2014; DUXSON *et al.*, 2007). Tais características

são alcançadas com relativa facilidade, pois a disponibilidade mundial de materiais aluminossilicatos reativos é, em geral, elevada. Além disso, a química dessa classe de materiais é suficientemente flexível para corresponder aos precursores disponíveis (HEATH *et al.*, 2013). Embora muitas características macroscópicas dos MAA preparados com diferentes fontes de aluminossilicatos pareçam semelhantes, suas microestruturas, propriedades físicas, mecânicas e químicas variam em decorrência das matérias primas das quais são derivados (BERNAL; PROVIS, 2014; DUXSON *et al.*, 2007).

Através da combinação adequada entre precursores e ativadores podem-se obter características desejáveis, tais como: elevada resistência à compressão, boa resistência à abrasão, endurecimento rápido, alta resistência ao fogo, assim como aos ácidos e às soluções salinas, supressão às reações álcali-agregados, boa aderência adequada aos substratos de concreto, possibilidade de execução de altos padrões de acabamento para superfícies expostas e proteção inerente do reforço de aço devido ao alto pH residual e às baixas taxas de difusão de íons cloreto (DUXSON *et al.*, 2007; GARCÍA-LODEIRO *et al.*, 2007; LEE; VAN DEVENTER, 2002; MIRANDA *et al.*, 2005; WANG *et al.*, 2005). A Tabela 1 apresenta os principais precursores utilizados e como esses reagem, quando combinados com diferentes soluções ativadoras (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

Tabela 1 - Resumo das diferentes combinações de precursores sólidos e ativadores alcalinos que se revelaram viáveis e/ou desejáveis.

Precursor sólido	Ativador alcalino				
	MOH ¹	M ₂ O.rSiO ₂ ^{1,2}	M ₂ CO ₃ ¹	M ₂ SO ₄ ¹	Outros
Escória de alto forno	Aceitável	Desejável	Bom	Aceitável	-
Cinzas volantes	Desejável	Desejável	Ruim (aceitável com a adição de clínquer)	Ruim (aceitável com a adição de clínquer)	Aceitável para NaAlO ₂
Argilas calcinadas	Aceitável	Desejável	Ruim	Ruim (aceitável com a adição de clínquer)	-
Pozolanas naturais e cinzas vulcânicas	Aceitável/desejável	Desejável	-	-	-
Vidro sintético	Aceitável/desejável	Desejável	-	-	-
Escória de aço	-	Desejável	-	-	-
Escória de fósforo	-	Desejável	-	-	-
Escória de ferro-níquel	-	Desejável	-	-	-
Escória de cobre	-	Aceitável	-	-	-
Lama vermelha	-	Aceitável	-	-	-
Cinzas de incineração de rejeitos	-	Aceitável	-	-	-

Fonte: Provis; Van Deventer, (2014) - adaptado.

Notas:

¹ "M" representa um cátion de metal alcalino, que é ativado sob condições de pH elevado.

² A coluna intitulada "M₂O.r SiO₂" descreve a gama completa de composições de silicato de metal alcalino, independentemente do módulo (r).

As combinações entre precursores e soluções ativadoras são classificadas como:

- Desejável/ótimo: ocorre quando são alcançados altos níveis de desempenho mecânico dos aglomerantes.
- Bom: ocorre quando o desempenho mecânico alcançado é ligeiramente inferior ao ótimo, porém bons resultados ainda são conseguidos com sua adoção.
- Aceitável: é possível que sejam gerados importantes aglomerantes. Entretanto, existem desvantagens significativas quanto ao ganho de resistência, durabilidade e trabalhabilidade.
- Ruim: para a maioria das aplicações, a resistência mecânica adquirida é insuficiente, tornando sua utilização inviável.

As células em branco, na referida tabela, descrevem sistemas que ainda não foram caracterizados na literatura científica.

2.1.1 Matérias primas utilizadas na produção de materiais álcali-ativados

Os precursores utilizados na confecção dos materiais álcali-ativados podem ser oriundos de minerais naturais, como por exemplo o metacaulim (MK), ou de resíduos industriais, tais como as cinzas volantes (*fly ash* - FA) e a escória de alto forno (*blast furnace slag* - BFS) (KOMNITSAS; ZAHARAKI, 2007; PROVIS *et al.*, 2010). Apesar da ampla utilização dos precursores FA e BFS devido às suas propriedades reológicas e ao menor consumo de água na mistura, quando comparados aos MAA baseados em argilas calcinadas, o MK é a matéria-prima mais utilizada na produção dos MAA (HUSEIEN *et al.*, 2016).

O metacaulim é um material pozzolânico obtido através da calcinação da argila caulínica a um intervalo de temperatura que varia entre 500 °C e 800 °C (MOBILI *et al.*, 2016; SIDDIQUE; KLAUS, 2009). Esse material é atraente não só devido à sua excelente estabilidade térmica, mas também devido às propriedades mecânicas apresentadas pelos concretos e argamassas constituídos por ele (HUSEIEN *et al.*, 2016). Para obtenção de resistência mecânica e durabilidade satisfatórias, Davidovits recomenda que o uso de MK misturado à solução alcalina apresente razão molar de $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ em um intervalo entre 3,5 e 4,5 (PACHECO-TORGAL *et al.* 2008a).

As cinzas volantes possuem cerca de 20% a 30% de sua utilização, em escala mundial, como material suplementar nas indústrias do cimento e do concreto (NAZARI *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2012). Sabe-se também que elas são compostas principalmente por SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 . Contudo, suas propriedades químicas e físicas estão intrinsecamente ligadas ao tipo e à qualidade do carvão do qual derivam, assim como ao desempenho da usina onde são geradas. Tais fatores podem ser considerados dificultadores no seu controle de qualidade,

resultando em uma menor atratividade desse material (NAZARI *et al.*, 2011; ZHANG *et al.*, 2012).

A escória de alto forno possui uma grande quantidade de cálcio em sua composição, e a presença desse elemento nos MAA é reconhecida por contribuir positivamente com aspectos relacionados à durabilidade. Tal contribuição deve-se à sua influência na redução da permeabilidade (PROVIS; BERNAL, 2014). Contudo, estudos relatam que a utilização de BFS contribui para o aumento da retração por secagem nas argamassas álcali-ativadas, característica que deve ser evitada para a utilização em argamassas de reparo (LEE *et al.*, 2014; THOMAS *et al.*, 2017).

Para que ocorra a reação de endurecimento dos materiais álcali-ativados, os aglomerantes devem ser misturados a uma solução ativadora, composta por álcalis em meio aquoso (BORGES *et al.*, 2014; PROVIS; BERNAL, 2014). Os hidróxidos de sódio (NaOH) e de potássio (KOH), assim como os silicatos de sódio (Na_2SiO_3) e de potássio (K_2SiO_3) são os principais constituintes dessas soluções (PROVIS; BERNAL, 2014).

A utilização de silicatos na solução ativadora garante a presença de SiO_2 solúvel, responsável pelo aumento da velocidade da reação e pelo alcance de alta resistência mecânica nas primeiras horas (BORGES *et al.*, 2014). Sabe-se que os monômeros que constituem os silicatos são mais reativos que os dos hidróxidos e, portanto, vantajosos para a ativação alcalina de precursores aluminossilicatos (PROVIS; VAN DEVENTER, 2007). A sílica monomérica, $\text{Si}(\text{OH})_4$, é um ácido fraco que amortece o pH da solução para um intervalo que varia entre 11 e 13,5. Contudo, proporciona uma maior alcalinidade disponível na solução do que as soluções de hidróxidos com pH equivalente. A diminuição do pH é considerada um benefício para a confecção da mistura, fazendo com que os materiais ativados com silicato possam ser classificados como irritantes e não como corrosivos, tais como os hidróxidos (PROVIS; BERNAL, 2014; PROVIS; VAN DEVENTER, 2009). Um dos principais inconvenientes associados à utilização de silicato na ativação alcalina é a elevada viscosidade destas soluções. O silicato de potássio apresenta uma viscosidade inferior ao de sódio e promove propriedades reológicas mais favoráveis do que as suas contrapartes ativadas pelo silicato de sódio. Entretanto, devido ao seu maior valor comercial os silicatos de potássio são menos utilizados (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). As soluções aquosas de silicato de sódio mais comumente utilizadas na síntese de MAA são obtidas inicialmente através da dosagem e da mistura mecânica de carbonato de sódio (Na_2CO_3) com sílica (SiO_2). Posteriormente, é realizada a fusão em um intervalo de temperatura compreendido entre 1100 °C e 1200 °C. Esta etapa é caracterizada pela grande emissão de gases de efeito estufa, além de demandar alto consumo energético. Em seguida, o produto é submetido a alta pressão, e,

quando entra em contato com água, resulta na solução aquosa de silicato de sódio (BORGES *et al.*, 2014). Tais fatores fazem com que, entre os constituintes dos MAA, a solução de silicato de sódio seja a maior contribuinte para as emissões de CO₂ e consumo energético (BORGES *et al.*, 2014; HABERT *et al.*, 2011).

2.1.2 Materiais álcali ativados sem presença de cálcio

Os materiais álcali-ativados produzidos a partir de precursores com baixo, ou nenhum, teor de cálcio dão origem a aluminossilicatos alcalinos hidratados que formam um gel do tipo M₂O-Al₂O₃-SiO₂-(H₂O), ou M-A-S-(H). Em que “M” representa o metal alcalino presente na solução ativadora, geralmente sódio ou potássio. Sabe-se que a água não é um componente principal da estrutura do gel citado, razão pela qual está representada entre parênteses. A estrutura de tal gel, que pode ser entendido como o equivalente amorfo de determinadas zeólitas sintéticas, é tridimensional (GARTNER; MACPHEE, 2011; PROVIS *et al.*, 2005; SHI *et al.* 2011). As zeólitas, por sua vez, são sólidos cristalinos cuja estrutura é bem definida e micro porosa. Geralmente, contém em sua estrutura: silício, alumínio e oxigênio. Além disso, podem ser encontrados em seus poros: cátions, água e ou outras moléculas (GERALDO, 2016).

A elevação da relação Si/Al na estrutura dos materiais álcali-ativados contribui, consideravelmente, para a melhoria das propriedades mecânicas dos géis formados. Na escala micro estrutural o produto da reação principal dos MAA é um gel amorfo, cuja composição química varia dependendo do precursor, do ativador alcalino utilizado e das condições de síntese. Tais processos de reorganização estrutural determinam a composição final do gel M-A-S-(H) (PROVIS; BERNAL, 2014; SHI *et al.*, 2011). As diferentes classificações do gel geopolimérico estão apresentadas na Figura 1. A rede denominada sialato é formada por ligações alternadas, por meio de tetraedros de silicato e aluminato desordenados dentro das cadeias, ligados através do compartilhamento das moléculas de oxigênio. Os íons positivos alcalinos devem estar presentes nas cavidades da rede, para que o déficit de carga elétrica Al³⁺ seja neutralizado (GERALDO, 2016).

A Figura 2 ilustra o processo de álcali-ativação de aluminossilicatos sem a presença de cálcio. Inicialmente, o componente amorfo das partículas sólidas se dissolve quando entra em contato com a solução alcalina. Este mecanismo determina a fase inicial da dissolução das partículas sólidas, em que os aluminatos e os silicatos são liberados na provável forma de monômeros. A taxa de dissolução está diretamente relacionada com o pH do meio, e com a possível presença de outros componentes no sistema (FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ *et al.*, 2006).

dissolução do alumínio do que do silício, devido à intensidade das ligações Al-O. Tais ligações, por serem mais fracas, são mais facilmente desfeitas. À medida em que a reação avança, um maior número de Si-O dissolve-se no sólido inicial, favorecendo a evolução do Gel 1 para um novo gel, denominado Gel 2 (rico em Si). Este último gel, após a polimerização, endurecerá dando origem aos concretos e argamassas álcali-ativados (GARTNER; MACPHEE, 2011; SHI *et al.*, 2011).

2.1.3 Materiais álcali-ativados com presença de cálcio

Os MAA produzidos a partir de precursores com a presença de cálcio têm como matéria prima mais utilizada para a construção civil a escória de alto forno (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). Tais materiais dão origem a aluminossilicatos alcalinos hidratados que formam o C-A-S-H, um gel com fase desordenada e composição variável, baseada em cadeias curtas lineares. No referido gel, “C” representa a presença de CaO, “A” de Al₂O, “S” de SiO₂ e “H” de H₂O (GARTNER; MACPHEE, 2011). Sua estrutura é comparável à do gel formado na reação do cimento Portland, principalmente quando o silicato de sódio é utilizado na solução alcalina. O produto formado é do tipo tobermorita (C₃S₂.3H₂O), entretanto com menor teor de Ca e maior substituição de Al. Tal produto apresenta maior durabilidade quando exposto a ácidos, sulfatos ou água do mar, em comparação aos sistemas compostos por OPC (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

As cadeias de gel C-A-S-H dos MAA são mais longas (com até 13 tetraedros) do que as cadeias de gel C-S-H em sistemas de cimento Portland (3 a 5 tetraedros). E, diferentemente destas, incluem alumínio na sua estrutura em substituição parcial ao silício. Esta substituição de Al³⁺ por Si⁴⁺ gera um desequilíbrio de carga, compensado pela captação de íons Na⁺ no gel. Em geral, o gel possui a proporção Ca/(Si+Al) próxima a 1, o que conduz a um grau elevado de polimerização e, também, um grau significativo de reticulação entre as cadeias (PUERTAS *et al.*, 2011). No entanto, uma vez que o teor de Al do gel C-A-S-H atinge um determinado valor limite, o grau de absorção do mesmo é restringido pela estrutura da cadeia do gel (ABDOLHOSSEINI QOMI *et al.*, 2012).

Os géis do tipo M-A-S-(H) são muito susceptíveis a coexistir como um produto secundário aos géis de C-A-S-H dentro de grande parte da gama de composições de escórias de alto forno ativadas por álcalis (PROVIS, 2014; YIP; LUKEY; VAN DEVENTER, 2005). Os concretos e argamassas de MAA estão mais sujeitos à carbonatação e à eflorescência do que os de OPC, sendo esta uma das principais limitações tecnológicas de tais materiais. Essa ocorrência é evidenciada, principalmente, quando a solução ativadora possui silicato em sua composição (HE *et al.*, 2001; PUERTAS *et al.*, 2006). Além disso, é elevada a taxa de retração dos MAA

compostos por tal ativador (BORGES *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2001). A Figura 3 ilustra os processos e produtos descritos na ativação alcalina.

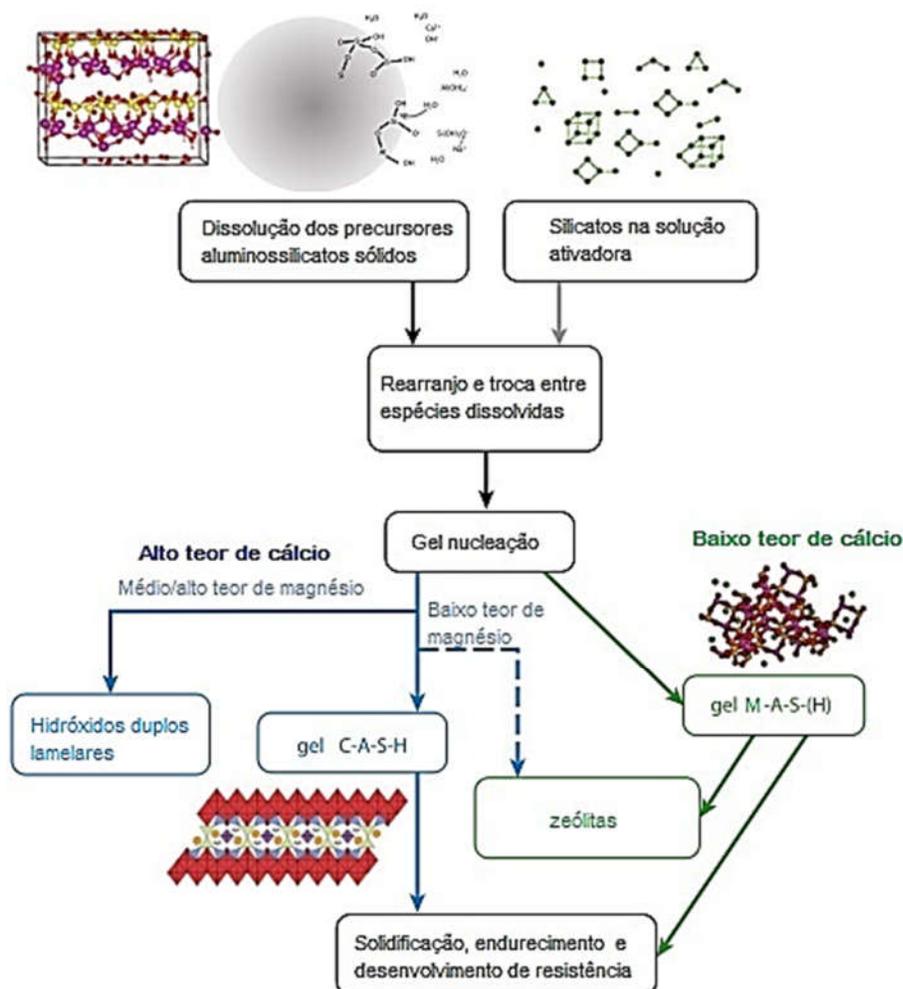


Figura 3 - Processos e produtos da reação de ativação alcalina de um precursor de aluminossilicato sólido - sistemas com alto e baixo teor de cálcio.
 Fonte: Provis; Bernal, (2014) - adaptado.

A utilização de BFS em MAA contribui para que ocorra redução da porosidade. Contribuindo, também, para a diminuição da absorção de água por capilaridade, além de viabilizar o aumento da resistência à compressão. A presença significativa de cálcio contribui para tais melhorias, provenientes da coexistência dos géis M-A-S-(H) e C-A-S-H (BORGES *et al.*, 2016; PROVIS; BERNAL, 2014).

2.1.4 Carbonatação em materiais álcali-ativados

Sabe-se que o tipo e a concentração do ativador alcalino, aliados à morfologia e à composição dos precursores utilizados, são os principais fatores determinantes das propriedades mecânicas dos concretos álcali-ativados. Estudos de pastas e argamassas de BFS ativadas por álcalis, e de misturas de BFS com MK, evidenciaram uma susceptibilidade potencialmente

maior à ocorrência de eflorescência e carbonatação nos MAA, quando comparados com os formados por cimentos Portland. O que pode ser explicado pela descalcificação do gel de ligação, especialmente devido à ausência de portlandita como produto de reação nesses aglomerantes (BERNAL *et al.*, 2010, 2011; PUERTAS *et al.*, 2006). Bernal *et al.*, (2010); Palacios; Puertas, (2006); Puertas *et al.*, (2006) identificaram que os MAA formados por BFS, com solução ativadora composta por silicato, apresentam, quando expostos a condições saturadas de CO₂, altas profundidades de carbonatação. Associadas a uma redução na densidade da matriz existe um aumento significativo na porosidade e uma redução na resistência mecânica. Além disso, os autores sugerem que outros fatores como a química da solução e as diferenças na porosidade e na estabilidade do gel, provavelmente afetarão o desempenho dos MAA.

Sabe-se também, que as condições de umidade relativa durante a cura inicial dos MAA são fatores críticos a esse fenômeno, pois influenciam na ocorrência da retração por secagem desses materiais, que pode ser favorecida quando estes são expostos a condições de baixa umidade, o que acarreta na indução da formação de microfissuras, e no aumento do progresso da carbonatação (BERNAL *et al.*, 2014; PROVIS; VAN DEVENTER, 2014). No estudo realizado por Bernal (2009), observa-se que nos MAA formados por uma mistura de precursores (BFS e MK), o progresso da carbonatação é ligeiramente maior quando as amostras são curadas com 65% de umidade relativa (UR), em relação aos concretos alcalinos curados com valores de UR de 80%. No entanto, após longos períodos de exposição, o efeito da UR torna-se menos relevante, e as profundidades carbonatadas são ligeiramente aumentadas com o aumento da UR (PROVIS; VAN DEVENTER, 2014).

2.2 Materiais álcali-ativados como alternativa para reparo

Aliado ao interesse no desenvolvimento de aglomerantes com baixas emissões de CO₂ e consumo energético, a reutilização de resíduos industriais tem sido um foco da indústria da construção civil. Apesar da grande variedade de adições minerais, oriundas de resíduos, no cimento Portland, o percentual de adição permitido para esse fim ainda é considerado baixo, em detrimento à demanda. Há, portanto, a necessidade da utilização de aglomerantes que sejam compostos majoritariamente por resíduos industriais. Sabe-se que as argamassas de reparo constituídas por MAA podem ser compostas em maior parte, ou ainda, exclusivamente, por resíduos (JUENGER *et al.*, 2011).

A logística de execução do reparo estrutural demanda que a argamassa possua características tais como o rápido aumento de resistência mecânica, maior que o fornecido por argamassas compostas por cimento Portland, e a maior durabilidade, quando sujeitas a ambientes com altas concentrações de sulfatos ou alto pH. Sabe-se que tais premissas podem

ser atendidas pelos MAA (JUENGER *et al.*, 2011). Além disso, esses materiais possuem resistência às altas temperaturas e à radiação ultravioleta (UV), e mínima emissão de fumaça tóxica, quando expostos à situação de incêndio (TOUTANJI *et al.*, 2006; ZHANG *et al.*, 2015). Portanto, os MAA constituem uma alternativa promissora à utilização como argamassas de reparo estrutural (AGUIRRE-GUERRERO *et al.*, 2016; KURTZ; BALAGURU, 2009; ZHANG *et al.*, 2015).

Essa utilização tem sido recentemente estudada, e foram encontraram resultados satisfatórios para parâmetros relevantes, tais como: altas resistências à compressão, baixa porosidade e alta aderência ao substrato (HU *et al.*, 2008; PACHECO-TORGAL; CASTRO-GOMES; JALALI, 2006, 2008b; PEÇANHA, 2012; UENG *et al.*, 2012; VASCONCELOS *et al.*, 2011; ZHANG; YAO; WANG, 2012). Contudo, a compatibilização do módulo de elasticidade, entre a argamassa de reparo e o substrato, bem como a diminuição das fissuras oriundas da retração por secagem ainda geram muitas divergências e constituem desafios a serem pesquisados (HERWEGH *et al.*, 2015; MAUROUX *et al.*, 2012; SIERRA-BELTRAN *et al.*, 2014).

2.3 Reparo

O reparo em estruturas de concreto pode ser definido como a adoção de medidas mitigatórias realizadas para conduzir a um nível aceitável a funcionalidade de uma estrutura, ou de seus componentes, os quais podem apresentar-se deficientes, deteriorados, degradados ou danificados (MENON, 2008). A recuperação de estruturas deterioradas de concreto está diretamente relacionada com a seleção dos materiais de reparo, pois estes afetam o processo de deterioração das peças recuperadas. Um dos materiais mais utilizados nos projetos de recuperação, é a argamassa de reparo, a qual pode ser composta por diferentes materiais, que devem ser escolhidos adequadamente para cada uso e cada patologia a ser recuperada (SILVA JR.; HELENE, 2001; TEMP, 2014).

A durabilidade de uma estrutura está relacionada com o período de tempo em que esta permanece em serviço (FAGURY, 2002; MEDEIROS, 2008). A vida útil de um material (ou componente) pode ser definida como o período no qual um edifício, e seus sistemas, se prestam às atividades, em que foram projetados, de forma a manter as propriedades físicas e químicas desses materiais acima dos limites mínimos admissíveis (FAGURY, 2002). Em território brasileiro e para edificações residenciais, os critérios de vida útil e durabilidade são estabelecidos conforme à NBR 15575 (ABNT, 2013). As patologias em estruturas de concreto armado requerem a execução de intervenções, que variam desde um reparo superficial a um reforço mais complexo. Promover a reabilitação do concreto é uma questão de segurança

estrutural, que demanda o desenvolvimento de materiais adequados a esse fim (SILVA; MONTEIRO, 2010; TRIGO *et al.*, 2010; WAZIEN *et al.*, 2016).

As medidas mitigatórias às patologias das estruturas estão divididas em dois grandes grupos, denominadas manutenções preventivas e manutenções corretivas. A primeira é caracterizada por intervenções realizadas com antecedência e previsão, durante o período de uso e manutenção da estrutura. A segunda corresponde ao diagnóstico, prognóstico, reparo e proteção das estruturas comprometidas por manifestações patológicas, ou seja, se refere à correção de problemas evidentes. A Figura 4 ilustra graficamente o efeito das manutenções no desempenho teórico de sistemas construtivos em função do tempo (FAGURY, 2002; SILVA, 2006).

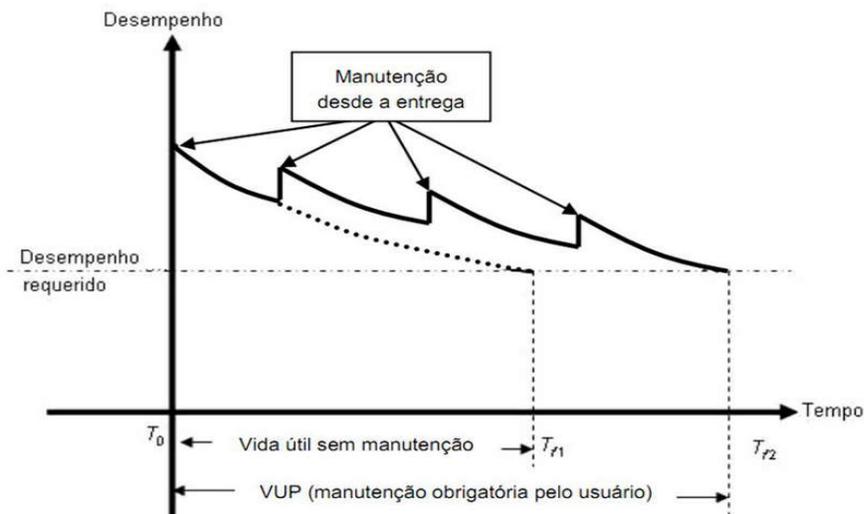


Figura 4 - Expressão gráfica da queda de desempenho natural de uma edificação.
Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013).

Há duas formas distintas de se classificar os reparos, dependendo da sua forma de aplicação, são elas: reparo não estrutural e o reparo estrutural. O primeiro tem como principais funções a redução da permeabilidade, a proteção da armadura, o aumento da resistência à abrasão e, o restabelecimento da estética de elementos (Figura 5). Já o reparo estrutural, apresentado pela Figura 6, é utilizado para reabilitar a capacidade de carga projetada das estruturas de concreto (SILVA JR.; HELENE, 2001).

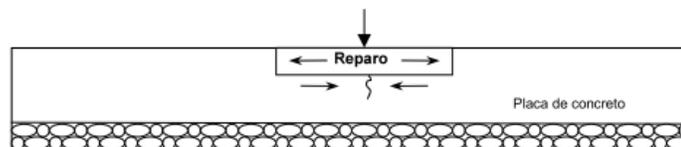


Figura 5 - Reparo não estrutural.
Fonte: Silva Jr.; Helene, (2001).

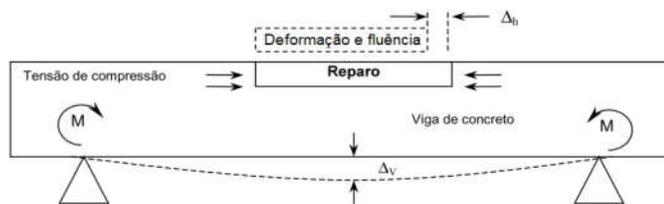


Figura 6 - Reparo estrutural.
Fonte: Silva Jr.; Helene, (2001).

2.3.1 Variáveis intervenientes na durabilidade dos reparos

A durabilidade do reparo, localizado nas regiões afetadas das estruturas através da substituição do concreto comprometido, depende diretamente da sua aderência com o substrato e da proteção conferida ao aço da armadura. Ou seja, os materiais de reparo devem ser resistentes às tensões resultantes das modificações volumétricas de carga e de temperatura (KORMANN *et al.*, 2003; SILVA JR.; HELENE, 2001). As principais propriedades que devem ser avaliadas nos materiais de reparo são: o módulo de elasticidade, a retração e a fluência. Sabe-se que um fator que contribui tanto para o aumento do módulo de elasticidade quanto para a redução da ocorrência de retração nas argamassas é o ajuste da dimensão máxima característica, da granulometria, da forma e da quantidade dos agregados (CABRAL *et al.*, 2010; MONTEIRO, 2015). Além disso, devem ser avaliadas propriedades obtidas nas primeiras idades dos concretos e argamassas, como a resistência à compressão e a aderência. Portanto, a seleção dos materiais e o levantamento dos esforços e das características do ambiente onde será executada a intervenção implicam na redução das falhas do sistema de reparo (ALVES, 2009; HELENE, 2004; SILVA JR.; HELENE, 2001).

Os materiais de reparo devem apresentar, além das características supracitadas, baixa permeabilidade e devem-se manter condições adequadas de trabalhabilidade (ZANOTTI *et al.*, 2014). Uma argamassa é considerada trabalhável quando, no estado fresco, apresenta consistência e dimensões máximas dos agregados apropriadas ao tipo de aplicação a que se destina (KONOFAL *et al.*, 2013). Uma vez que a aplicação das argamassas de reparo é geralmente uma atividade cautelosa submetida a restrições físicas, a logística da aplicação e a velocidade no ganho de resistência mecânica se sobrepõe a outros parâmetros na escolha dos materiais de recuperação estrutural. Por vezes, a inacessibilidade do local a ser recuperado impõe ao material uma condição peculiar dos parâmetros de trabalhabilidade (SILVA JR.; HELENE, 2001; TORRI, 2014). Além disso, as argamassas de reparo devem ser dimensionadas em conformidade com as solicitações de carga, as condições operacionais da estrutura, bem como às características do desgaste a que estarão submetidas (FREITAS, 2007). A Tabela 2 apresenta algumas propriedades que devem ser consideradas no dimensionamento dos materiais de reparo a serem utilizados.

Tabela 2 - Considerações logísticas de compatibilidade entre o reparo e o substrato.

Propriedade	Relação do material de reparo (R) com o substrato de concreto (C)
Tensão de retração	$R < C$
Coefficiente de expansão térmica	$R = C$
Módulo de elasticidade	$R \leq C$
Coefficiente de Poisson	$R = C$
Resistência à tração	$R > C$
Desempenho à fadiga	$R > C$
Aderência	$R > C$
Porosidade e resistividade	$R \leq C$
Reatividade química	$R < C$

Fonte: Silva Jr.; Helene, (2001) - adaptado.

2.3.2 Falhas nos sistemas compostos por argamassa de reparo e substrato

Os principais fatores que implicam na diminuição da durabilidade dos sistemas de reparo se dão das seguintes formas:

- Fissuração à tração ao longo da espessura do reparo (Figura 7 a)), devido à redução da tensão de tração do material de reparo em relação à resistência da aderência entre a interface e o substrato (CARASEK; CASCUDO, 2007; SILVA JR.; HELENE, 2001; STOLZ, 2011).
- Cisalhamento do substrato de concreto (Figura 7 b)), por meio da delaminação do reparo com uma camada da base de concreto que permanece aderida à argamassa (CARASEK; CASCUDO, 2007; SILVA JR.; HELENE, 2001; STOLZ, 2011).
- Falta de aderência entre o material de reparo e a base de concreto (Figura 7 c)), decorrente de quando há baixa resistência de aderência entre o reparo e o substrato (CARASEK; CASCUDO, 2007; PRETTO, 2010; SILVA JR.; HELENE, 2001; STOLZ, 2011).

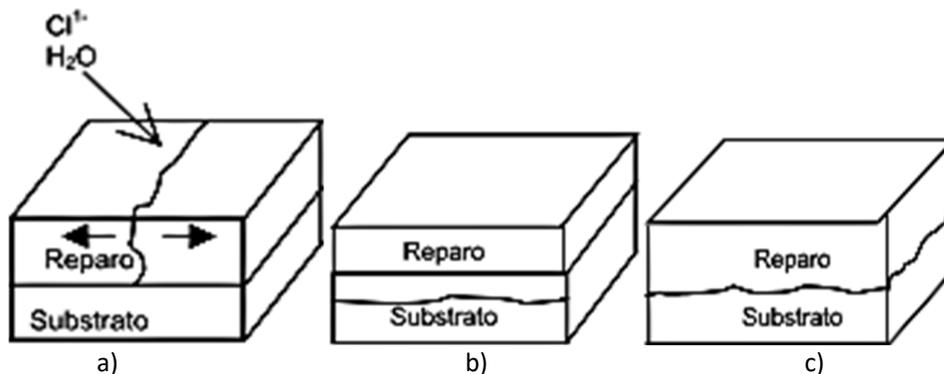


Figura 7 - a) Fissura transversal no material de reparo; b) Fissura longitudinal no substrato; c) Fissura longitudinal na interface.

Fonte: Silva Jr.; Helene, (2001).

2.3.3 Principais materiais utilizados em reparos

Para determinar o tipo de material utilizado nos sistemas de reparo é necessário considerar que o procedimento adotado requer mão de obra qualificada e do estabelecimento de condições adequadas para a aplicação do reparo (FAGURY, 2002). As variações mais utilizadas, para esse fim, são:

- Materiais com base cimentícia, ou inorgânica: possuem como principais constituintes o cimento Portland, o cimento aluminoso, as misturas compostas por cimento Portland e aluminoso, além dos grates com aditivos expansivos. A utilização desses materiais tem sido estudada e desenvolvida como uma alternativa à utilização de resinas poliméricas orgânicas, as quais podem apresentar desvantagens, como baixa resistência à radiação ultravioleta e às altas temperaturas (GOMES, 2013; MARANAN *et al.*, 2015; NATALI *et al.*, 2011). Tais materiais viabilizam a restauração da alcalinidade, característica essencial à passivação da armadura e, conseqüentemente, à durabilidade. Podem, ainda, ser subdivididos em tradicionais (cimento com introdução de aditivos e adições como por exemplo a sílica ativa, as cinzas volantes, as cinzas de casca de arroz, a escória de alto forno, os superplastificantes, os polímeros e os impermeabilizantes) e em não tradicionais (argamassas modificadas com látex, geopolímeros e materiais álcali-ativados) (FAGURY, 2002; GONDIM, 2005).
- Materiais de base orgânica: estes materiais têm como características principais a baixa permeabilidade e a boa aderência, o que implica na formação de uma barreira contra a penetração de agentes agressivos, de oxigênio e de umidade. Contudo, devido à divergência da natureza química entre o reparo e o substrato, são apontadas desvantagens quanto ao coeficiente de expansão térmica, ao módulo de deformação e à compatibilidade. São subdivididos entre termoplásticos e termorrígidos. As argamassas de base epóxi, termorrígidas, são obtidas mediante à mistura entre agregados miúdos e um ligante polimérico. Tais materiais apresentam excelentes propriedades físicas, além de boa aderência a diversos tipos de superfície, e podem não apresentar retração durante a polimerização. Contudo, após o endurecimento, apresentam um coeficiente de dilatação térmica bastante superior ao do concreto (GONDIM, 2005; MAZZA, 2010). Uma relevante desvantagem em relação à utilização desses materiais é a alta combustibilidade e a liberação de fumaça tóxica, quando expostos ao fogo. Além disso, sua aplicação fica limitada a ambientes cujas temperaturas são inferiores à temperatura de transição vítrea das resinas (T_g), cerca de 82°C para a resina epóxi mais amplamente utilizada. Essa restrição é devida à deterioração das propriedades mecânicas desses materiais em altas temperaturas (ZHANG *et al.*, 2015).

- Materiais mistos: os materiais mistos são constituídos pela mistura entre materiais de base inorgânica e materiais poliméricos, ou resinas orgânicas. As diversas possibilidades entre combinações de aglomerantes e de adições poliméricas, ou inorgânicas, determinam uma razoável gama de propriedades e de possibilidades de formulação dos materiais de reparo (GONDIM, 2005; MAZZA, 2010).

2.4 Retração em argamassas

Sabe-se que a ocorrência de fissuras provenientes da retração é um dos fatores que promovem a maior contribuição para a redução da vida útil dos sistemas de reparo estrutural (ARITO *et al.*, 2016). A retração, nas primeiras idades, pode ocorrer no estado plástico e no estado endurecido das argamassas. Sabe-se que há diferentes mecanismos responsáveis pela ocorrência desse fenômeno, o que implica em diferentes tipos de retração, podendo ser classificadas como retração plástica, por secagem, autógena e por variação térmica (CARTWRIGHT *et al.*, 2014; FERRAZ, 2009; GUPTA, 2008; MELO NETO *et al.*, 2008; PALACIOS; PUERTAS, 2007; RATU, 2016; THOMAS *et al.*, 2017; YE *et al.*, 2017).

As argamassas em estado plástico, cujo ganho de resistência ainda não é significativo, estão sujeitas a reduções volumétricas externas macroscópicas, principalmente devido à evaporação de parte da água da mistura. Essa redução causa o aparecimento de fissuras e é denominada retração plástica (RATU, 2016). Quando a movimentação dessas argamassas está submetida à restrição (retração por encolhimento plástico restrito), pode haver ainda a ocorrência de tensões muito superiores às necessárias para o aparecimento de fissuras se a condição de movimentação fosse livre (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2001; GUPTA, 2008).

Semelhante à retração plástica, a retração por secagem também ocorre por meio da perda de umidade. Entretanto, a ocorrência de fissuras continua durante um estendido período de tempo, até que o material tenha atingido sua resistência final (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2001; RATU, 2016).

Os materiais cimentícios podem apresentar expansão, durante as primeiras horas que procedem a mistura (de 6 a 12 horas). Essa ocorrência deve-se ao calor de hidratação liberado na reação. Tal expansão também pode ser explicada pela reabsorção da água exsudada na superfície das argamassas (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2001). Posteriormente, os materiais podem estar sujeitos à contração por retração autógena, ou por exposição a baixas temperaturas. Tais fatores podem induzir o surgimento de fissuras, por variação térmica (BJONTEGAARD; SELLEVOLD, 2001; RATU, 2016).

A retração química, que geralmente é o mecanismo responsável pela retração autógena, ocorre durante a fase de hidratação dos aglomerantes, na qual há redução do volume total,

sem que haja perda de umidade para o ambiente. Esse fenômeno é decorrente da redução macroscópica interna do volume, uma vez que o volume dos compostos hidratados é inferior ao dos materiais constituintes da mistura antes da hidratação (BANTHIA; NANDAKUMAR, 2001; FERRAZ, 2009; MOREIRA, 2009).

Há uma série de fatores que interferem na retração dos MAA, dentre os quais se destacam: o tipo e o conteúdo dos ativadores alcalinos, as propriedades do agregado e do precursor e as condições de cura (ABDEL-GAWWAD, 2014). Destaca-se que a velocidade da reação dos materiais MAA é muito mais rápida do que a dos materiais constituídos por OPC, o que também pode ser uma justificativa do surgimento precoce de fissuras (GAO *et al.*, 2016). Em geral, a presença de escória como precursor e de silicato na solução ativadora contribuem para que haja maior incidência da retração nas primeiras idades (CARTWRIGHT *et al.*, 2014; PALACIOS; PUERTAS, 2007; YE *et al.*, 2017).

Algumas pesquisas sugerem que as características do gel formado por silicatos e a distribuição do tamanho dos poros, têm um efeito direto na ocorrência de retração por secagem (ABDEL-GAWWAD, 2014; KRIZAN; ZIVANOVIC, 2002; MELO NETO *et al.*, 2008). Sabe-se ainda, que a maior concentração dos ativadores na solução e a maior finura dos grãos dos precursores também são fatores contributivos para o desenvolvimento de fissuras por retração autógena e por secagem (BAKHAREV *et al.*, 1999; COLLINS; SANJAYAN, 1999; GAO *et al.*, 2016; MELO NETO *et al.*, 2008; PUERTAS; TORRES-CARRASCO, 2014). Essa ocorrência constitui uma das maiores desvantagens da utilização de MAA como alternativa aos aglomerantes tradicionais. No entanto, a origem desse comportamento ainda não foi completamente explicada (ABDEL-GAWWAD, 2014).

Uma intervenção simples que pode influenciar na retração das argamassas é a escolha da matéria-prima utilizada como agregado, e também a razão agregado/aglomerante utilizada. Sabe-se que a utilização de uma razão ótima para esse fator contribui para a redução da ocorrência de fissuras e para a compatibilização do módulo de elasticidade entre os MAA e o concreto de cimento Portland (AGUILAR *et al.*, 2014; ARTICLES *et al.*, 2013). Contudo, deve-se atentar para a composição de tais agregados, pois a ocorrência de reações álcalis-silicato é um fenômeno complexo e pouco explorado. Tal fenômeno pode ser explicado pelo fato de rochas reativas possuírem em sua formação grandes cristais de dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) espalhados e envoltos por uma matriz de granulação fina de calcita (CaCO_3) e argila. Essas rochas apresentam características litológicas, tais como: o teor de argila contido na faixa de 5% a 25% e relação calcita/dolomita de aproximadamente 1. A reação ocorre pelo processo de desdolomitização, que consiste na decomposição do carbonato duplo de cálcio e magnésio (dolomita) por ação da solução intersticial alcalina, originando um enfraquecimento da ligação

matriz-agregado. Neste caso, diferentemente da reação álcali-agregado, não há a formação de gel expansivo. A expansão é atribuída à absorção de íons hidróxilos pelos minerais de argila. Alguns fatores condicionantes de tal reação podem ser destacados, tais como a temperatura (quanto maior, maior a expansão), a alta umidade, a alcalinidade suficientemente elevada, a existência de inertes reativos com concentrações dentro da faixa crítica e a granulometria (quanto menor a superfície específica do material maior a expansão) (RIBEIRO *et al.*, 2012; ZAMBOTTO, 2014).

2.4.1 Estudos e métodos de avaliação da retração em argamassas

Zanotti *et al.* (2017) estudaram argamassas de reparo compostas por uma matriz geopolimérica à base de metacaulim e cuja solução ativadora foi composta por hidróxido de sódio e silicato de sódio. A matriz foi reforçada com três diferentes frações de fibras de Poli Álcool Vinílico (PVA) (adição em volume: 0%, 0,5% e 1%) com 8 mm de comprimento. Foram avaliados dois regimes de cura: a cura ambiente e a cura a 45°C por 24 horas - visando acelerar a reação dos MAA e diminuir a incidência de retração nas argamassas. Os pesquisadores constataram que houve o surgimento de uma grande quantidade de fissuras nas primeiras idades da argamassa curada em temperatura ambiente. Evidenciando que essa ocorrência é, possivelmente, devida à geração de altas pressões capilares entre as áreas úmidas e secas da rede de microporos, fenômeno que favorece a propagação das fissuras na microestrutura. Sabe-se que a água não é incorporada diretamente nos produtos de reação do gel dos MAA, apenas uma pequena porcentagem da água de mistura permanece como água intersticial nesse processo. Portanto, a água em excesso encontra-se livre e disponível para evaporação a partir do início da pega da argamassa, e quando submetida à baixa umidade relativa e à cura ambiente, retarda o processo de geopolimerização. Essa sequência de fatores pode resultar em fissuras extensas, apesar da adição de fibras. Ao contrário da cura ambiente, a cura térmica acelera a dissolução das partículas de metacaulim e a reação de polimerização da solução alcalina, não havendo a observação de fissuras nos materiais submetidos a esse processo.

Mobili *et al.* (2016) compararam o desempenho, nos estados fresco e endurecido, de argamassas de reparo compostas por MAA e argamassas compostas por cimento Portland, em três classes de resistência (10 MPa, 15 MPa e 25 MPa). Nesse estudo foi preconizada a compatibilidade com o substrato em que foram aplicadas foi preconizada, e a cura foi realizada em temperatura ambiente. Foram avaliadas 12 formulações, apresentadas na Tabela 3. Cabe ressaltar que a concentração de silicato de sódio foi mantida para as formulações 1 e 2, e dobrada nas formulações compostas exclusivamente por metacaulim. Os autores avaliaram a trabalhabilidade, o módulo de elasticidade dinâmico, a porosimetria, a permeabilidade ao

vapor de água, a absorção de água por capilaridade, as retrações por secagem livre e com restrição, a resistência ao ataque de sulfatos e a corrosão de reforços embutidos e galvanizados. A retração por secagem livre foi avaliada seguindo-se os requisitos da EN 12617-1 (BRITISH STANDARD, 2002). Já para a avaliação da retração com restrição, seguiram-se as premissas da EN 8147 (ITALIAN STANDARDS, 2008). A Figura 8 ilustra os aparatos necessários à realização dos ensaios, conforme às respectivas normas utilizadas.

Tabela 3 - Formulações das argamassas estudadas por Mobili *et al.* (2016).

Argamassas de cimento Portland				
Formulação 1:	25% cimento Portland			75% cal hidratada
Formulação 2:	50% cimento Portland			50% cal hidratada
Formulação 3:	100% cimento Portland			0% cal hidratada
Argamassas álcali-ativadas				
Precursores 1:	100% cinzas volantes	-	Solução ativadora 1:	Silicato de sódio e 3 concentrações de hidróxido de sódio
Precursores 2:	92% cinzas volantes	8% cimento aluminato de cálcio	Solução ativadora 2:	Silicato de sódio e 3 concentrações de hidróxido de potássio
Precursores 3:	100% metacaulim	-	Solução ativadora 3:	Silicato de sódio e 3 concentrações de hidróxido de potássio

A retração por secagem livre foi avaliada em três corpos de prova prismáticos com dimensões de 40x40x160 mm a partir do primeiro dia posterior à moldagem, e durante o período de dois meses. A retração com restrição foi avaliada em três corpos de prova prismáticos com dimensões de 50x50x250 mm, também a partir do primeiro dia após a moldagem. Os corpos de prova foram curados, nas primeiras 24 horas, em ambiente cuja temperatura manteve-se no intervalo de 20 ± 1 °C e umidade relativa de $90 \pm 5\%$. Nos dias posteriores a temperatura foi mantida e a umidade relativa alterada para $50 \pm 5\%$ (MOBILI *et al.*, 2016).

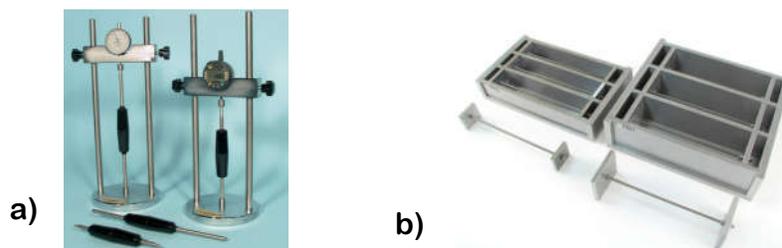


Figura 8 - a) Medidores de variação de comprimento, segundo a EN 12617-4, (2002); b) Formas prismáticas, segundo a EN 8147 (2008).

Fonte: a) Controls Group, (2017); b) JET Materials, (2017).

Os resultados encontrados indicaram que as argamassas álcali-ativadas apresentaram maior incidência de retração por secagem livre, comparadas às compostas por cimento Portland. As formulações compostas exclusivamente por metacaulim apresentaram variação dimensional linear entre -1 e -4 mm/m, já as compostas exclusivamente por cimento Portland apresentaram retração média de -1 mm/m para as três classes de resistência avaliadas. A perda de massa

tanto para as argamassas compostas por MAA quanto para as compostas por OPC permaneceu constante na avaliação entre as três classes de resistência, sendo próxima a 15% e 10%, respectivamente. Entretanto, neste estudo, a retração com restrição das argamassas álcali-ativadas foi menor, segundo os autores, devido ao menor módulo de elasticidade das argamassas de MAA. A retração com restrição das argamassas compostas por metacaulim foi de aproximadamente -0,1 mm/m, já a de OPC variou de -0,1 a -0,5 mm/m (MOBILI *et al.*, 2016).

Puertas *et al.* (2003) avaliaram a retração de argamassas álcali-ativadas compostas por BFS, FA e de OPC como referência. Além disso, foi avaliada a adição de 1% de fibras de polipropileno de 12mm. Os autores afirmam que quando as argamassas compostas por BFS são armazenadas em um ambiente com alta umidade (> 95%), ocorre elevada retração em idades precoces. A adição de fibras aumenta esse efeito, sendo necessárias mais investigações para explicar esse fato. Houve a constatação que com cerca de 10 a 15 dias após o armazenamento, os valores encontrados para a retração permanecem praticamente constantes até o final do ensaio (-0,08 a -0,12%). Conclui-se que em condições de alta umidade, a retração deve estar relacionada às características da matriz, à natureza e à estrutura dos principais produtos de reação formados, identificando-se que, neste caso, a retração é prevalentemente do tipo química. Sob condições de alta umidade, o processo de ativação é favorecido e uma grande quantidade de produtos de reação é formada. Já para a situação em que os CPs de argamassa são armazenados em condições ambientes (21 °C e 50% UR), a retração é contínua. Ao final do ensaio, 45 dias, valores constantes não foram alcançados. Nessas condições, o encolhimento deve-se principalmente à perda da água contida nos poros. A presença da fibra reduz ligeiramente esse encolhimento. Segundo os autores, quando a retração ocorre de forma mais contínua, as fibras de PP podem contribuir positivamente para moderar as alterações dimensionais das argamassas, pois atuam como uma ligação entre a matriz e as partículas de agregados. Já para a retração das argamassas compostas por cimento, os CPs que foram armazenados em condições de alta umidade apresentaram encolhimento relativamente baixo (valores estáveis em torno de -0,04%). E quando armazenados em ambiente de laboratório, as argamassas apresentaram alta incidência de retração, devido basicamente à secagem e eliminação da água livre dentro da argamassa, atingindo valores finais em torno de 0,10%. Neste caso, as fibras contribuem positivamente para a redução, em uma pequena porcentagem, da retração final (PUERTAS *et al.*, 2003). As argamassas de cinzas volantes, em condições de alta umidade, apresentaram uma leve expansão inicial, que é acentuada no CPs que contêm fibras (valor final de expansão de 0,015%). Na ausência de fibras, as argamassas também experimentam pequena expansão inicial. O encolhimento é observado após 20 dias, atingindo no final do ensaio um valor de

0,0075%. Em ambiente de laboratório, ocorre um ligeiro encolhimento em idades precoce, atingindo no final do ensaio um encolhimento de cerca de 0,02% nas argamassas com e sem fibras (PUERTAS *et al.*, 2003).

De modo similar, Peçanha (2012) avaliou a retração hidráulica e autógena de concretos compostos por metacaulim e cimento Portland (como precursores), e silicato e hidróxido de cálcio (na solução ativadora). O autor também conclui que as argamassas álcali-ativadas apresentam pequena expansão química nas primeiras idades, da ordem de 0,005 mm/m. Reitera-se ainda, que a utilização de MAA é uma opção vantajosa para o reparo de estruturas em concreto, visto que a retração do reparo é baixa e possui boa aderência ao substrato. Além disso, a pequena expansão verificada experimentalmente coopera para a melhoria da aderência entre a argamassa e o substrato.

Mauroux *et al.* (2012) avaliaram a retração por secagem com restrição nas primeiras idades de argamassas compostas por cimento Portland por meio de um dispositivo que correlaciona a imagem digital com a realização de medidas dos campos de deslocamento em duas dimensões (ver Figura 9). Foram avaliados corpos de prova de dimensões 200x200x200 mm para o substrato, e uma camada de 10 mm de argamassa. Apenas a área superficial da argamassa permaneceu exposta durante a avaliação, sendo as laterais dos corpos de prova protegidas por folhas adesivas para evitar a perda de umidade. O registro das imagens foi realizado a cada 10 minutos, por um período de 10 dias. A superfície dos CPs foi pintada para a obtenção de um padrão de homogeneidade, para que fosse possível melhorar a eficiência do pós-processamento e correlação dos dados. Essa técnica destaca-se positivamente, comparada aos métodos intrusivos, pois o dispositivo proposto não induz o desenvolvimento das fissuras, e a amostra pode ser monitorada de forma contínua e automática. Os autores sugerem que a utilização de sensores rígidos, como por exemplo o proposto no primeiro método de avaliação da EN 12617-4 (BRITISH STANDARD, 2002) possuem eficiência limitada, o que pode ser explicado pela realização de medidas locais e orientadas, não sendo possível determinar a localização das fissuras de maneira precisa. Além disso, a utilização do dispositivo de correlação é vantajosa também por possibilitar a avaliação de dimensões dos corpos de prova mais representativas, assim como as condições de restrição. Nesse estudo foi proposta uma ferramenta de pós-processamento dos dados para determinar a evolução dos padrões de fissuras, a espessura e a profundidade das fissuras no interior da argamassa e na interface entre esta e o substrato (MAUROUX *et al.*, 2012).

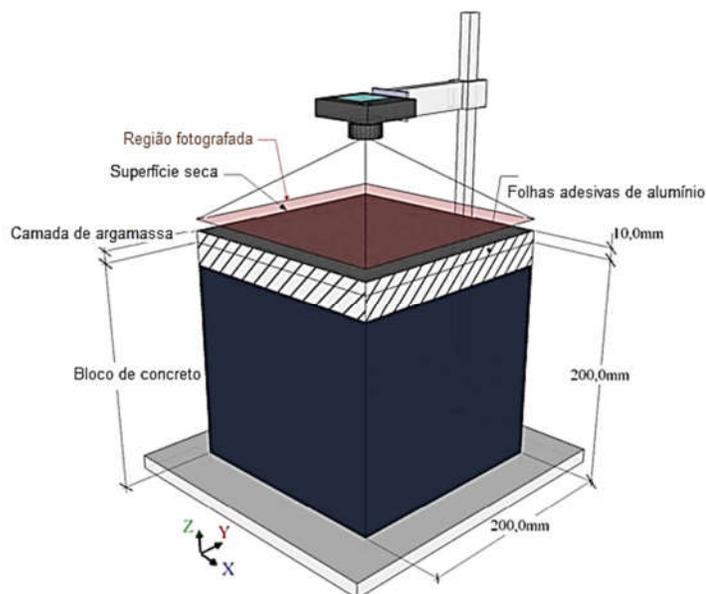


Figura 9 - Dispositivo de registro de imagens digitais para a avaliação da retração por secagem.
 Fonte: Mauroux *et al.*, (2012) - adaptado.

Sierra-Beltran *et al.* (2014) avaliaram um sistema de reparo de argamassas em substrato de concreto. Foram utilizadas duas formulações de compostos à base de cimento biológico com adição de fibras de PVA, presentes em 2% e 1,7% em volume. Foram avaliadas as propriedades mecânicas da argamassa por meio da avaliação da flexão, da aderência, da resistência à compressão e da retração por secagem livre. A compatibilidade entre a interface e o substrato de concreto foi baseada nos resultados dos ensaios de aderência e de retração com restrição. A retração foi avaliada por meio da confecção de corpos de prova, com dimensões de 500x100x100 mm, em que foram aplicadas camadas de argamassa com espessura de 12 mm. A superfície de aplicação das argamassas foi previamente preparada por meio do jateamento para exposição uniforme dos agregados e, posteriormente, submetida a um jato de ar para eliminar os materiais particulados soltos. Para cada corpo de prova, foram utilizados dois indicadores de movimentação para registrar a delaminação da interface, em termos de distância de separação vertical em função do tempo de secagem, conforme a Figura 10. Após a desmoldagem, com 24h, os corpos de prova foram armazenados em sacos plásticos e após 7 dias foram submetidos a condições controladas de temperatura e umidade de 20 ± 2 °C e $50 \pm 5\%$ respectivamente, por um período de 2 anos.

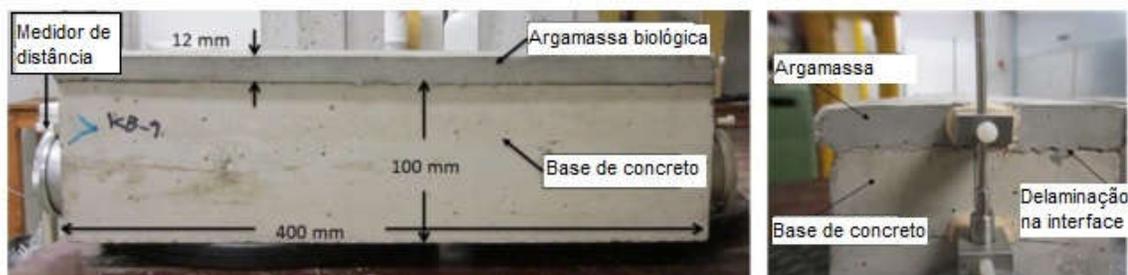


Figura 10 - Dispositivo de medição da retração com indicador de distância.
Fonte: Sierra-Beltran *et al.*, (2014) - adaptado.

Rahmani *et al.* (2012) avaliaram a eficiência da adição de diferentes fibras para combater a fissuração de concretos confeccionados com cimento Portland, devido a encolhimento plástico com restrição. O método de avaliação da retração plástica adotado neste estudo foi semelhante ao previsto na norma americana ASTM C1579 (ASTM, 2006a), sendo utilizado um molde de madeira, com profundidade de 85 mm e dimensões retangulares de 360x560 mm. No fundo dos moldes foi acrescentado um dispositivo para induzir a tensão, com 63,5 mm de altura no centro, além de mais duas restrições, cuja base possui 32 mm de altura espaçadas por uma distância de 90 mm de ambas as extremidades, como mostrado na Figura 11 a).



Figura 11 - a) Fôrma utilizada b) Câmara de simulação climática.

Após a moldagem, os CPs foram mantidos por 24 horas em condições ambientes de temperatura e umidade. Posteriormente, a temperatura e a umidade prescritas na norma foram alcançadas por meio de aquecedores elétricos e por um controlador de temperatura como ilustra a Figura 11 b). Os CPs de concreto fresco foram expostos a uma temperatura média de 36 °C e umidade relativa de 25%, além de estarem sujeitos a uma velocidade de vento de 6 m/s. A taxa média de evaporação foi medida pela perda de água de um recipiente prismático, colocado ao lados dos corpos de prova (em kg/m²/h). Os CPs foram monitorados visualmente para quaisquer sinais de aparecimento de fissuras, em intervalos de aproximadamente 30 minutos.

Outro modo de avaliação da retração com restrição é por meio do teste padrão de determinação da idade das fissuras e da tensão de tração induzida determinado pela C1581M (ASTM, 2016). Os equipamentos necessários à realização deste ensaio estão ilustrados pela Figura 13. Corinaldesi; Nardinocchi, (2014) avaliaram a influência de diferentes tipos de fibras (de aço, macrofibras de polipropileno, macrofibras de vidro, fibras sintéticas híbridas ou bicomponentes) no concreto armado. A adição das fibras foi constante para todos os tipos utilizados e igual a 0,55% em volume. O ensaio do anel possui como principal vantagem a consideração dos fatores relevantes que influenciam na fissuração nas primeiras idades

sendo eles: o desenvolvimento das tensões, as mudanças dimensionais e o comportamento viscoso concreto. Além do ensaio do anel, o ensaio de retração livre também foi realizado, estando ambos sujeitos a condições equivalentes de exposição iguais a 21 °C e 50% de umidade relativa. Foram avaliados também os parâmetros de resistência à compressão e à tração, bem como o módulo de elasticidade, ambos com 28 dias de cura.

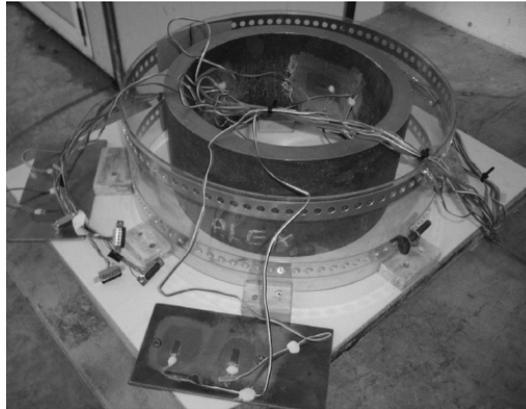


Figura 12 - Aparato experimental construído pelos autores para o teste do anel.
Fonte: Corinaldesi; Donnini; Nardinocchi, (2015).

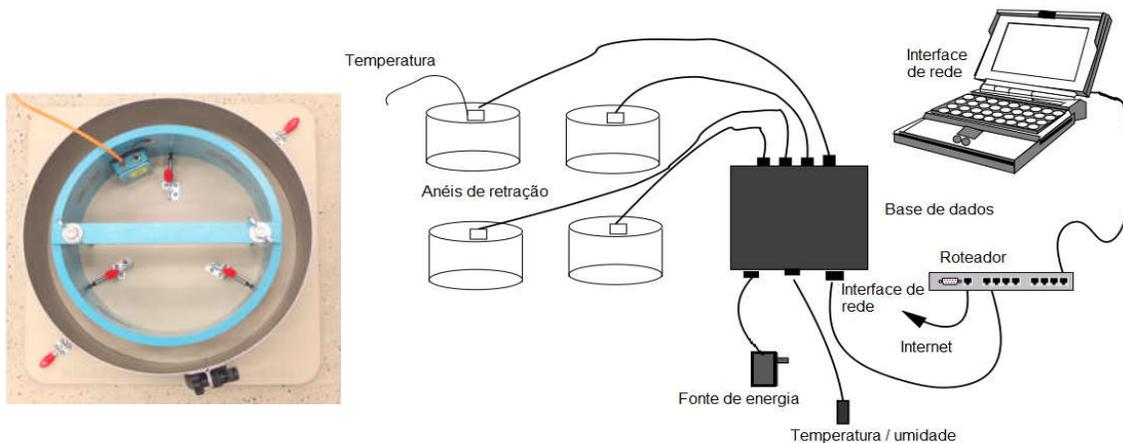


Figura 13 - Equipamento para o teste do anel.
Fonte: Schleibinger Geräte, (2017).

Para a avaliação da retração com restrição, os CPs foram moldados em torno de um anel de aço no qual foi utilizada uma folha plástica como um molde externo, como ilustra a Figura 12. Após a desmoldagem com 24 horas, uma das superfícies dos CPs foi revestida com epóxi. Este procedimento cria uma condição que permite a secagem por evaporação apenas a partir da superfície externa da circunferência, de forma que a aplicação da resina automaticamente sela a parte inferior do anel de concreto. Dois corpos de prova foram moldados para cada formulação. Contudo, apenas um deles foi instrumentado por quatro medidores de tensão, ilustrados pela Figura 13. De modo a determinar a primeira fissura, caracterizada por uma diminuição abrupta de tensão compressiva no tubo de aço, os medidores foram conectados a

um sistema de aquisição de dados. As medidas de tensão do anel de aço foram monitoradas a partir da finalização da moldagem. As leituras subsequentes foram realizadas a cada meia hora, até a ruptura do anel de concreto (CORINALDESI; NARDINOCCHI, 2014).

2.4.2 Utilização de fibras para mitigar a retração em argamassas

O desenvolvimento de fissuras gerado pela retração é uma ocorrência relevante no dimensionamento das argamassas, principalmente em estruturas cuja relação superfície/volume é alta (RAHMANI *et al.*, 2012; SIVAKUMAR; SANTHANAM, 2007; TOLEDO FILHO *et al.*, 2005). A utilização de fibras é um artifício bem estabelecido para a redução da fragilidade da matriz de compósitos cimentícios e também de materiais álcali-ativados (BHUTTA *et al.*, 2017; RAHMANI *et al.*, 2012). Diferentes tipos de reforços de fibras já foram estudados e caracterizados para uma vasta gama de formulações de argamassas e concretos. Na Tabela 4 e na Tabela 5 são destacados estudos realizados com a utilização de fibras com a finalidade de mitigar a retração em argamassas.

A utilização dos compósitos obtidos a partir de matriz inorgânica e reforçados com fibras desempenha um papel importante na reabilitação e no reparo de estruturas de alvenaria e concreto. Uma vez que estes geralmente apresentam maior ductilidade, resistências à compressão, à flexão e à fissuração, quando comparados aos materiais cimentícios não reforçados (GOMES, 2013; MARANAN *et al.*, 2015; NATALI; MANZI; BIGNOZZI, 2011).

Contudo, a variada gama de combinações entre precursores e soluções ativadoras aliada à grande disponibilidade de fibras que podem ser utilizadas como reforço em argamassas, gera divergências em relação aos materiais mais adequados às finalidades desejadas (HEARD *et al.*, 2011; SU; XU; REN, 2014). Deve-se, portanto, avaliar criteriosamente a disponibilidade dos materiais a serem adotados, assim como seu desempenho na matriz a ser utilizada (HEARD *et al.*, 2011).

Baricevic; Pezer; Stirmer, (2016) estudaram compósitos à base de cimento para a utilização em reparos. Sabendo-se que em estruturas susceptíveis ao encolhimento e/ou expostas a condições de carga específicas, a utilização de fibras é recomendada. Principalmente, para a finalidade de promoção da diminuição da ocorrência de microfissuras provenientes do encolhimento autógeno, plástico e reprimido. Os autores ressaltam as vantagens da utilização das fibras de polipropileno, devido ao preço acessível do produto, e à relativa facilidade de dispersão na matriz. Nesse estudo, é apresentada uma tabela comparativa entre os principais tipos de fibra utilizados em compósitos cimentícios e a influência dessa adição nas propriedades do concreto, como pode ser observado na Tabela 6.

Tabela 4 - Utilização de fibras em compósitos alcalinamente ativados.

Autores	Fibras utilizadas	Características das fibras		Matriz	Finalidade	Conclusões
		Diâmetro	Comprimento			
Natali <i>et al.</i> , (2011)	de alto teor de tenacidade de carbono	10 μ	7 \pm 1 mm	Precursores: metacaulim e escória secundária refinada <u>Solução ativadora</u> : silicato e hidróxido de sódio Fibras: 0,1% em massa.	Aumento da resistência à flexão e à fratura.	- Todas as fibras melhoraram a adesão, e o controle da propagação de microfissuras; - As poliméricas obtiveram melhor desempenho, em detrimento às de vidro; - A adição de fibras leva a um incremento de resistência à flexão de 30 a 70%.
	fibras de vidro					
	fibras de acetato de polivinila (PVA)	18 μ				
	fibras de policloreto de vinila (PVC)	400 μ				
Zhang <i>et al.</i> , (2012)	Fibras de polipropileno (PP) e agente de expansão MgO	10 μ	3 mm	Precursores: MK e BFS <u>Solução ativadora</u> : silicato e hidróxido de sódio Fibras: 0,4% em massa.	Reparo em estruturas de concreto expostas aos ambientes marinhos avaliando o tempo de pega, permeabilidade anticorrosão, aderência e retração.	A retração diminuiu nos primeiros dias, e, foi cessada 2 semanas pós moldagem. Após esse período, a formulação contendo 0,5%, em massa, de MgO apresentou a melhor estabilidade em detrimento às amostras contendo 1,0%, 1,5% e 2,0%.
Ganesan <i>et al.</i> , (2015)	Fibras de aço – adição de (0,25; 0,50; 0,75 e 1,00)% em volume	0,5mm	30 mm	Precursores: cinzas volantes e sílica <u>Solução ativadora</u> : silicato e hidróxido de sódio	Avaliar as características de durabilidade dos materiais álcali-ativados reforçados com fibras.	Melhoria na absorção de água e na porosidade efetiva; melhor performance de desgaste à abrasão; diminuição da microfissuração.
Choi <i>et al.</i> , (2016)	Fibras de polietileno (PE) – adição de 1,75% em volume	12 μ	18 mm	Precursor: BFS <u>Solução ativadora</u> : hidróxido de cálcio e sulfato de sódio	Avaliação das propriedades de densidade, resistência à compressão e tensão uniaxial, e, a ocorrência de fissuras do compósito.	Melhoria em todas as propriedades avaliadas, exceto na retração. Havendo a ocorrência de fissuras com espaçamento médio de 2,25mm e comprimento médio de 101mm
Zanotti <i>et al.</i> , (2017)	Fibras de PVA – adição de (0,5 e 1)% em volume	40 μ	8 mm	Precursor: MK <u>Solução ativadora</u> : hidróxido de sódio e silicato de sódio	Avaliação da aderência de argamassas de reparo geopoliméricas com o substrato de concreto	Melhoria na coesão das argamassas para a adição de 0,5% de fibras e a diminuição da retração, para essas condições de mistura, só foi possível através da cura térmica.

Tabela 5 - Utilização de fibras em compósitos cimentícios.

Autores	Fibras utilizadas	Características das fibras		Matriz	Finalidade	Conclusões
		Diâmetro	Comprimento			
Sivakumar; Santhanam, (2007)	Fibras de aço	0,5 mm	30 mm	Concreto de 60 MPa, constituído por cimento Portland, sílica ativa, água, agregados e superplastificante à base de sulfato de naftaleno (para obter a trabalhabilidade desejada). - Fibras: adição de 0,5% em volume.	Controlar a ocorrência da retração plástica em concretos com alto teor de sílica ativa por meio da adição do reforço de fibras de aço, bem como combinações híbridas de aço e fibras não metálicas (poliéster, polipropileno e vidro).	A adição de fibras reduziu as fissuras de 50 a 99% em relação ao concreto sem fibras; as híbridas foram mais efetivas na redução das fissuras. Entre as 3 combinações híbridas, a combinação aço-poliéster causou a maior redução (99%). O aumento de fibras não metálicas reduz a trabalhabilidade, portanto restringiu-se o teor máximo de utilização para 0,25%.
	Fibras de vidro	0,01 mm	6,0 mm			
	Fibras de polipropileno (PP)	0,10 mm	20 mm			
	Poliéster	0,05 mm	12 mm			
Rahmani <i>et al.</i> , (2012)	Fibras de aço	0,55 mm	35 mm	Concreto de cimento Portland, água e agregados - Fibras: adição de 0,1% em volume	Avaliação da eficiência das diferentes fibras, para combater a fissuração de compósitos cimentícios, devido ao encolhimento plástico com restrição.	A adição de fibras reduziu a retração plástica com restrição. Entre as fibras investigadas a de aço foi a mais efetiva na redução, pois melhora a capacidade de deformação do concreto e restringe o crescimento das fissuras. As fibras de vidro apresentaram desempenho melhor que as de PP.
	Fibras de vidro	0,012 mm	15 mm			
	Fibras de polipropileno (PP)	0,022 mm	12 mm			

Tabela 6 - Influência do tipo de fibra na propriedade desejada.

Propriedades	Fibras de aço	Microfibras poliméricas	Macrofibras poliméricas
Retração plástica	+	+++	+
Retração por secagem	+++	0	-
Resistência ao impacto	+++	+	++
Largura da fissura	+++	0	0
Comportamento pós fissuração	++	-	-

Fonte: Lambrechts, (2009) - adaptado.

Legenda: (+) influência positiva; (-) influência negativa; (0) sem influência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O programa experimental (Figura 14) deste trabalho consistiu no desenvolvimento de 21 argamassas álcali-ativadas. Objetivou-se avaliar a retração de argamassas álcali-ativadas para fins de reparo estrutural. Primeiramente, foram realizadas as caracterizações química e física das matérias-primas. Em seguida, foi realizado um ajuste das 21 formulações de argamassas para atingir uma trabalhabilidade de 250 ± 15 mm, propriedade relevante para a utilização proposta e descrita no item 2.3.1.

A relação sílica/alumina e a composição dos precursores aluminossilicatos, compostos por escória de alto forno e metacaulim foram variadas nas diferentes formulações. Para o ajuste da trabalhabilidade, foi fixada a razão de 1.5 de agregados/aglomerantes, razão máxima alcançada experimentalmente para as condições propostas. Buscou-se, com essa maximização, a redução da ocorrência de fissuração e o aumento do módulo de elasticidade, como sugerido pela literatura e evidenciado no item 2.3.1 deste trabalho.

Foram avaliados os valores médios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade estático, sendo estes valores correlacionados aos apresentados pelo concreto do substrato para fins de compatibilização. Das 21 formulações preliminares, selecionaram-se as que apresentaram valores médios de resistência à compressão, e de módulo de elasticidade estático. Foram escolhidas 5 formulações, com relações sílica/alumina nos valores de 3.0, 3.6 e 4.2, para os quais foi alterada a proporção entre metacaulim e escória. A avaliação dos 5 traços de argamassa foi correlacionada com um graute comercial (Argamassa estrutural D-240 da Vedacit), utilizado como referência para os três métodos de análise da retração.

Para determinar a retração livre (ou variação dimensional linear) das argamassas e do graute, utilizou-se o procedimento descrito pela NBR 15261 (ABNT, 2005). Tal metodologia assemelha-se à proposta pela EN 12617-1 (BRITISH STANDARD, 2002) muito utilizada na literatura para a caracterização da retração em MAA.

A retração com restrição das argamassas, foi primeiramente avaliada segundo os requisitos da norma EN 12617-4 (BRITISH STANDARD, 2002), no qual as argamassas são aplicadas sobre o substrato de concreto. Avaliou-se também a influência da adição de 0,25% de fibras de polipropileno (PP) com 6 mm de comprimento, tal percentual foi determinado experimentalmente (a maior quantidade possível de fibras que não influenciasse no intervalo pré-determinado de trabalhabilidade). O intuito da adição foi verificar se havia diminuição da ocorrência de fissuras nas primeiras idades das argamassas, como descrito na bibliografia e explicitado no item 2.4.2 deste trabalho.

Para determinar a retração com restrição foi realizado também um procedimento semelhante ao descrito na norma americana ASTM C1579 (ASTM, 2006). O objetivo dessa etapa foi de verificar se a incidência de fissuras nas argamassas aplicadas sobre o substrato de concreto estava diretamente relacionada com a interação entre o concreto e a argamassa, ou com a restrição da movimentação das mesmas.

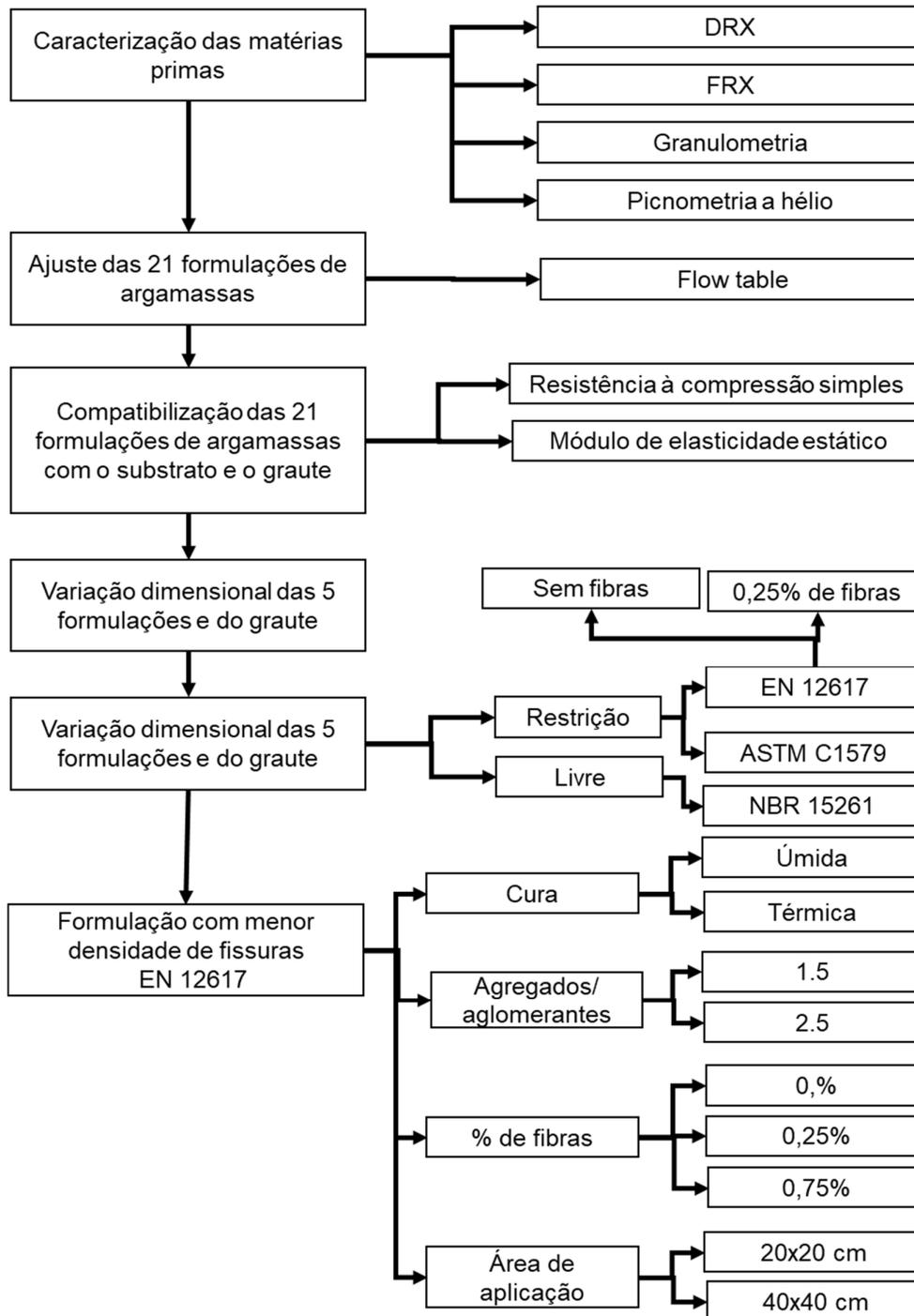


Figura 14 - Fluxograma do programa experimental.

Após a avaliação da retração com restrição das argamassas aplicadas sobre o substrato de concreto, foi escolhida a formulação que apresentou a menor incidência de fissuras. A partir disso, variou-se para essa formulação o processo de cura (úmida e térmica), a relação agregados/aglomerantes (1.5 e 2.5), o percentual de fibras (0, 0,25% e 0,75% - excluindo-se a premissa do intervalo de trabalhabilidade inicialmente adotado) e a área de aplicação das argamassas sobre o substrato (de modo a verificar a influência do efeito de borda no desenvolvimento das fissuras). A Tabela 7 e a Tabela 8 apresentam, respectivamente, as variáveis de resposta da pesquisa e as variáveis de controle.

Tabela 7 - Variáveis de resposta da pesquisa.

Variáveis de resposta	Análises
Composição granulométrica dos agregados e dos precursores – NBR NM 248 (ABNT, 2003a)	Caracterização física das matérias-primas, para determinação do traço do concreto e da formulação das argamassas.
Determinação da densidade dos precursores - Pícnometria por hélio	Avaliar a densidade real dos aglomerantes, para ser utilizada no cálculo das formulações.
Avaliação da estrutura cristalina dos precursores - Difração de Raios-X	Avaliação qualitativa dos componentes mineralógicos dos precursores, e, análise do caráter amorfo/cristalino desses materiais.
Resistência à compressão simples – NBR 5739 (ABNT, 2007)	Avaliar a resistência mecânica do concreto e da argamassa, e, a compatibilidade entre eles.
Determinação do módulo de elasticidade estático – NBR 8522 (ABNT, 2008)	Avaliar as formulações de argamassas alcali-ativadas cuja compatibilidade com o substrato de concreto é viável.
Avaliação da retração por secagem, com restrição – EN 12617 (BRITISH STANDARD, 2002)	Avaliar a ocorrência de fissuras, na argamassa de reparo, e o seu comportamento nas primeiras idades de aplicação sobre o substrato.
Avaliação da retração por secagem, com restrição – ASTM C1579 (ASTM, 2006a)	Obter parâmetros de comparação, normatizados, da retração por secagem com restrição.
Avaliação da variação dimensional linear – NBR 15261 (ABNT, 2005)	Avaliar a ocorrência de fissuras na argamassa de reparo, e o seu comportamento, nas primeiras idades.

Tabela 8 - Variáveis de controle.

Variáveis de controle	Objetivos
Traço do concreto utilizado no substrato	Padronização de fatores externos à reação e influenciadores na variável analisada
Origem e composição das matérias primas	Padronização da composição química dos componentes das argamassas
Procedimentos de moldagem	Padronização de fatores influenciadores no comportamento das argamassas
Razão molar Na ₂ O/SiO ₂ nas argamassas	Padronização dos fatores internos à reação e influenciadores na variável analisada
Trabalhabilidade – <i>flow table</i>	Padronização de fator determinante para a aplicação proposta ao material

3.1 Materiais utilizados

3.1.1 Argamassas alcali-ativadas

Os aluminossilicatos utilizados para a confecção das argamassas de MAA foram o metacaulim HP MAX - fornecido pela empresa Metacaulim do Brasil Indústria e Comércio (localizada em

Jundiaí, SP) e a escória granulada de alto forno - fornecida pela empresa Central IBEC (localizada no município de Matozinhos, MG). As soluções ativadoras utilizadas foram compostas por hidróxido de sódio, em solução com concentração de 50%, fornecido pela Imperial Química (localizada em Contagem, MG), e o silicato de sódio, fornecido pela Getex Indústria e Comércio Ltda (localizada em Belo Horizonte, MG). A composição do metacaulim, da escória e do silicato de sódio foi fornecida por meio de relatório técnico dos fornecedores e está exposta na Tabela 9. Os agregados dolomíticos utilizados na composição da argamassa foram fornecidos pela empresa Dacapo Minasit, localizada em Belo Horizonte, MG.

Tabela 9 - Composição química dos precursores e ativadores.

Materiais (%)	SiO₂	Al₂O₃	Na₂O	CaO + MgO	H₂O
Metacaulim	57,0	34,0	-	< 0,1	-
Escória de alto forno	38,6	9,9	-	41,7	-
Silicato de sódio	31,8	-	15,0	-	53,21

A composição mineralógica da escória e do metacaulim foi realizada por difração de raios X (DRX), utilizando-se o equipamento da marca Shimadzu, modelo XRD-7000. Com radiação de cobre igual a 1,5418 Å, operando a 40 kV e 30 mA. Para determinação das fases foram realizadas varreduras, cuja velocidade angular foi igual a 0,02º/segundo, com intervalo de medidas entre os ângulos de Bragg (2θ) igual a 5º e 80º.

As distribuições granulométricas da escória e do metacaulim foram determinadas por difração a LASER, no Departamento de Engenharia Civil (DEC), utilizando-se o equipamento CILAS1090. A massa específica unitária (ou real) dos aglomerantes foi determinada com a utilização de um picnômetro manual por gás hélio, fabricado pela Quantachrome *Instruments*.

As fibras de polipropileno (PP) utilizadas possuem o nome comercial FibroMac e são produzidas pela empresa Maccaferri do Brasil. Segundo o fabricante, são indicadas para o reforço de concretos e argamassas, com a finalidade de gerar um composto homogêneo e controlar a fissuração por retração (MACCAFERRI, 2008). Suas propriedades físicas e mecânicas encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10 - Propriedades físicas e mecânicas das fibras.

Propriedade	Unidade	Valor
Diâmetro	µm	18
Comprimento	mm	6
Alongamento	%	80
Peso específico	g/cm ³	0,91
Temperatura de fusão	°C	160
Temperatura de ignição	°C	365
Resistência à tração	MPa	300
Módulo de Young	MPa	3000

Fonte: Maccaferri, (2008).

Os agregados dolomíticos, utilizados na composição das argamassas, foram fornecidos em frações separadas por faixa granulométrica. A mistura entre as três faixas de agregados garantiu que a granulometria final estivesse contida na faixa ótima recomendada pela NBR 7211 (ABNT, 2009). De modo a favorecer o empacotamento das partículas e auxiliar na trabalhabilidade da argamassa formada (MONTEIRO, 2015). A trabalhabilidade das argamassas álcali-ativadas foi determinada por meio do ensaio de determinação do índice de consistência, segundo a NBR 13276 (ABNT, 2002).

3.1.2 Concreto de cimento Portland

O cimento utilizado para a confecção do concreto do substrato foi fornecido pela empresa Holcim, localizada em Belo Horizonte, MG. Adotou-se para este trabalho o cimento CP V ARI, por possuir pureza maior que 95% segundo a NBR 5733 (ABNT, 1991), de modo que sua composição não deve influenciar os resultados de compatibilidade com a argamassa. A Tabela 11 contém a composição do cimento Portland, fornecida pelo fabricante.

Tabela 11 - Composição química do cimento Portland.

Materiais (%)	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	CO ₂	K ₂ O
Cimento CP V	18,93	5,23	2,94	64,16	0,73	2,88	2,88	0,87

Fonte: Dados fornecidos pelo fabricante - Holcim.

Os agregados utilizados na composição do concreto foram areia média e brita 1, ambos caracterizados conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009). Na superfície do concreto foi utilizado um retardador de pega denominado RT-35, fornecido pela empresa Decapo Minasit (localizada em Belo Horizonte, MG) com o intuito de deixar a superfície rugosa (após lavagem com jato de água) e aumentar a aderência com a argamassa de reparo aplicada.

3.2 Método

3.2.1 Formulações estudadas

Para determinar as formulações mais adequadas à compatibilização entre o substrato de concreto com cimento Portland e a argamassa de MAA foram propostas, inicialmente, 21 formulações com 5 diferentes proporções entre os precursores aluminossilicatos MK e BFS, conforme a Tabela 12.

Como descrito no item 3.1.1 deste trabalho, foi fixada a proporção agregado/aglomerante para todas as formulações, e para cada combinação de aglomerantes foi variada a relação molar SiO₂/Al₂O₃, de modo que fosse possível avaliar a influência de tais parâmetros no comportamento das argamassa produzidas e realizar a correlação dos resultados obtidos com os dados previstos pela literatura. Além disso, a razão molar H₂O/Na₂O também foi alterada, a fim de garantir que as misturas apresentassem a trabalhabilidade adequada e,

concomitantemente, evitar que houvessem alterações significativas no desempenho mecânico devido ao excesso de água livre.

Tabela 12 - Formulações de argamassas álcali-ativadas para a compatibilização com o substrato.

Nomenclatura ¹	SiO ₂ /Al ₂ O ₃	MK/BFS	H ₂ O / Na ₂ O	Solução / aglomerante	SiO ₂ / Na ₂ O no ativador
2.0-100/0	2.0	100/0	24,10	0,90	0,01
2.5-100/0	2.5	100/0	15,50	0,88	0,81
2.75-100/0	2.75	100/0	13,00	0,90	1,10
3.0-100/0	3.0	100/0	12,00	0,98	1,34
2.5-80/20	2.5	80/20	18,00	0,82	0,47
3.0-80/20	3.0	80/20	12,50	0,83	1,06
3.4-80/20	3.4	80/20	11,00	0,92	1,40
3.8-80/20	3.8	80/20	10,63	1,06	1,68
2.5-60/40	2.5	60/40	21,00	0,74	0,00
3.0-60/40	3.0	60/40	14,00	0,71	0,67
3.4-60/40	3.4	60/40	11,00	0,74	1,06
3.6-60/40	3.6	60/40	11,00	0,80	1,23
3.8-60/40	3.8	60/40	10,50	0,85	1,37
3.0-40/60	3.0	40/60	17,50	0,63	0,12
3.4-40/60	3.4	40/60	12,50	0,60	0,58
3.8-40/60	3.8	40/60	10,50	0,64	0,94
4.2-40/60	4.2	40/60	10,00	0,73	1,23
3.6-20/80	3.6	20/80	17,00	0,57	0,05
3.8-20/80	3.8	20/80	15,00	0,57	0,26
4.2-20/80	4.2	20/80	11,00	0,54	0,61
4.6-20/80	4.6	20/80	10,00	0,59	0,91

Nota:

¹ A nomenclatura das formulações corresponde à relação sílica/alumina (SiO₂/Al₂O₃) e à porcentagem dos percussores utilizados (MK/BFS).

Dentre as 21 formulações iniciais de MAA, 5 foram escolhidas, ou seja, aquelas que apresentaram comportamento mais favorável à compatibilização com o substrato, com relação aos valores encontrados de resistência à compressão e módulo de elasticidade. A análise da retração foi realizada por três métodos distintos, sendo eles: variação dimensional linear segundo a NBR 15261 (ABNT, 2005), determinação da retração com restrição das argamassas aplicadas sobre substrato de concreto segundo a EN 12617 (BRITISH STANDARD, 2002) e avaliação da retração com restrição sobre dispositivos concentradores de tensão segundo a ASTM C1579 (ASTM, 2006). Para a análise da retração sobre o substrato de concreto também foi realizada a influência da adição de fibras curtas de polipropileno, de variações da razão agregados/aglomerantes, da realização de cura e da variação da área de aplicação. As 5 formulações selecionadas estão destacadas na Tabela 13.

Tabela 13 - Detalhamento da composição das formulações adotadas para a moldagem das argamassas de reparo.

Formulação	SiO ₂ / Na ₂ O	Na ₂ O/ Al ₂ O ₃	H ₂ O/ Na ₂ O	Na ₂ SiO ₃ / NaOH	Água extra	Solução/ Aglomerante
3.0-100/0	1,34	0,75	12,00	2,39	0,12	0,98
3.0-80/20	1,06	0,75	12,50	1,32	0,16	0,83
3.6-60/40	1,23	0,90	11,00	2,27	0,08	0,80
4.2-40/60	1,23	1,05	10,00	2,77	0,03	0,73
3.6-20/80	0,05	0,90	17,00	0,03	0,32	0,57

3.2.2 Procedimento de mistura

3.2.2.1 Argamassas álcali-ativadas

A mistura e a moldagem das argamassas, foram feitas segundo procedimentos padronizados. Tais procedimentos foram realizados no laboratório de materiais do Departamento de Engenharia Civil (DEC) do CEFET-MG. A mistura foi iniciada com a pesagem das matérias primas, em uma balança da marca BEL *Engineering*, com capacidade de $3200 \pm 0,03$ g. Após a pesagem dos agregados, em três diferentes frações granulométricas, foi realizada a homogeneização dos mesmos. Assim como os aglomerantes (BFS e MK) foram pesados separadamente e em seguida homogeneizados. A mistura exotérmica das soluções ativadoras foi feita com a adição da água extra ao hidróxido de sódio, com posterior incorporação ao silicato de sódio. A solução, mantida em recipiente hermeticamente fechado, foi transferida (após 24 horas de modo a se estabilizar em temperatura ambiente) para o recipiente da argamassadeira, ao qual os aglomerantes foram adicionados. Após a adição completa dos precursores, a argamassadeira foi ligada em velocidade baixa, por aproximadamente 30 segundos. Em seguida, mantendo-se o funcionamento do equipamento, os agregados foram gradualmente adicionados. O equipamento foi desligado para a realização da raspagem dos materiais acumulados nas paredes e na pá. Por fim, a argamassadeira foi ligada por mais 1 minuto, em velocidade alta.

Para as formulações em que foram adicionadas fibras de PP, foi realizada primeiramente a desaglomeração manual das fibras. Em seguida, o material foi pesado e sua incorporação foi feita na argamassa (já misturada de acordo com o método descrito) gradativamente, com a argamassadeira em funcionamento. Após a completa adição das fibras a argamassadeira foi novamente ligada na velocidade máxima, por 30 segundos.

3.2.2.2 Concreto com cimento Portland

O concreto utilizado na composição do substrato foi dosado de maneira a atingir resistência mecânica de 30 MPa, por meio do método do *American Concrete Institute* (ACI) (AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 2008). A mistura dos materiais constituintes do concreto foi realizada no laboratório do DEC do CEFET-MG em uma betoneira com capacidade para 400

litros. Primeiramente, foi realizada a pesagem dos materiais obedecendo o traço descrito na Tabela 14.

Tabela 14 - Traço do concreto [kg/m³].

Cimento	Areia	Brita	Água/cimento (a/c)
1,00	2,46	3,88	0,65

O processo de mistura do concreto foi realizado com a mistura da brita e de metade da água na betoneira, por um minuto. Na sequência, foram adicionados o cimento, a areia e do restante da água, misturando-se por dois minutos. Foi realizada a raspagem do excesso de materiais das paredes e pás do equipamento e a mistura por mais dois minutos, seguindo-se as recomendações da norma NBR 12655 (ABNT, 2006).

3.2.3 Avaliação do comportamento mecânico das argamassas e do concreto

Para a realização dos ensaios de avaliação do comportamento mecânico, resistência à compressão simples e determinação do módulo de elasticidade estático, dos concretos e argamassas, foram seguidos os seguintes procedimentos:

- Os corpos de prova de concreto foram submetidos ao capeamento com enxofre, conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003b), para garantir a regularização da superfície.
- Os corpos de prova de argamassas álcali-ativadas foram retificados, também conforme a NBR 5738 (ABNT, 2003b), utilizando-se o equipamento de corte da marca Metkon, modelo Servocut 301 - MM.
- Os CPs de concreto foram ensaiados na prensa universal EMIC, modelo DL 30000 com capacidade 2000 kN. Já os CPs de argamassa foram ensaiados na mesma prensa, contudo, na célula de carga de 300 kN.

Na avaliação da resistência à compressão simples, os CPs foram ensaiados com 28 dias de cura no laboratório de mecânica dos pavimentos e de materiais do departamento de engenharia de transportes (DET) do CEFET-MG. Foram seguidos os requisitos da NBR 5739 (ABNT, 2007), tanto para os corpos de prova de concreto, quanto para os corpos de prova de argamassa. Ambos os ensaios ocorreram sob uma velocidade de carregamento de 0,25 MPa/s. Foram ensaiados três corpos de prova de dimensões 100x200 mm para o concreto, e três corpos de prova de dimensões 50x100 mm para cada formulação de argamassa e do graute comercial, totalizando 69 CPs.

Para a determinação do módulo de elasticidade estático, seguiram-se os preceitos da NBR 8522 (ABNT, 2008), utilizando-se *strain gauges* mecânicos. Os ensaios foram realizados aos 28 dias no laboratório de mecânica dos pavimentos e de materiais do DET, no mesmo equipamento em que foram realizados os ensaios de resistência à compressão simples. Para a determinação do módulo de elasticidade, também foram utilizados três corpos de prova de

cada formulação. A tensão de ruptura utilizada no protocolo de ensaio foi determinada por meio da média encontrada para os ensaios de compressão simples. A taxa de incremento utilizada no ensaio foi de 0,45 MPa/s, aplicada de forma cíclica por quatro etapas. Foram ensaiados três corpos de prova de dimensões 100x200 mm para o concreto, e três corpos de prova de dimensões 50x100 mm para cada formulação de argamassa e do graute comercial, totalizando 69 CPs.

3.3 Avaliação da retração

3.3.1 Variação dimensional linear

A determinação da variação dimensional linear, ou retração livre, foi determinada de acordo com os procedimentos da NBR 15261 (ABNT, 2005), semelhantes aos propostos pela EN 12617-1 (BRITISH STANDARD, 2002) e conforme os procedimentos avaliados por Mobili *et al.*, (2016) citados no item 2.4.1 deste trabalho.

Para isso foram moldados 3 corpos de prova para cada formulação e o graute, com dimensões de 25x25x285 mm, totalizando 18 CPs. Após a moldagem as formas foram cobertas com plásticos e armazenadas em condições ambientes de temperatura e umidade. A desmoldagem ocorreu após 24 horas, seguida da realização da medida do comprimento de referência. As medidas posteriores ocorreram nas idades de 4, 7, 14, 21 e 28 dias, para que fosse possível correlacionar as variações com os demais ensaios de avaliação da retração das argamassas. Além do registro da variação dimensional foi realizada a pesagem de cada corpo de prova (em uma balança com capacidade de $1500 \pm 0,002$ g) nas idades determinadas, para que também fosse possível avaliar a variação de massa e correlacioná-la com os resultados encontrados.

A medida da variação dimensional linear foi realizada com o auxílio de um relógio comparador digital, modelo Mitutoyo 543-390 Absolute ID-C (IP42) com precisão de 0,001mm, capacidade 12,7 mm e exatidão 0,003 mm. Para cada corpo de prova foram realizadas 4 medidas, uma em cada lado do prisma, mantendo-se sempre a mesma posição do corpo de prova e o sentido de rotação do CP.

Com os dados obtidos foi calculado o comprimento médio de cada corpo de prova, assim como sua variação dimensional em relação ao comprimento inicial. A variação média entre os 3 corpos de prova de cada formulação foi utilizada no cálculo da média de variação dimensional de cada formulação, para cada idade avaliada.

3.3.2 Retração com restrição sob substrato de concreto

Para a realização da avaliação da retração por secagem com restrição, utilizou-se como parâmetro as prescrições normativas da norma europeia EN 12617-4 (BRITISH STANDARD,

2002). Foram realizadas alterações no procedimento normativo por questões logísticas. Além disso, o modelo de avaliação proposto foi formulado considerando-se as experiências relatadas por Mauroux *et al.*, (2012) descritas no item 2.4.1 do presente trabalho.

Foram moldados 11 painéis, um para cada uma das 5 formulações avaliadas e sua variável com a adição de 0,25% em volume de fibras de PP, além do graute. Tais painéis foram compostos pelo substrato de concreto com 80 mm de altura e dimensões da base de 400x400 mm, acrescido pela argamassa de reparo, com espessura de 20 mm. Após 15 horas decorridas desde a moldagem foi realizada a desforma e a exposição dos agregados, por meio do jateamento de água pressurizada e da escarificação da superfície em que foi aplicado o retardador de pega com escova de aço. Os substratos foram posteriormente submersos em um tanque com água saturada de cal durante 27 dias. Com 7 dias de antecedência à aplicação das argamassas, os substratos foram retirados do tanque e deixados em condições ambiente de temperatura e umidade para que estivessem secos no momento da aplicação. As argamassas confeccionadas foram aplicadas sobre os substratos de concreto (ver Figura 15), os quais foram previamente limpos, visando evitar a contaminação da interface e a perda de aderência entre os materiais. Após a aplicação de todo o material, foi realizado o adensamento em mesa vibratória por 30 segundos.

Os painéis com as argamassas aplicadas foram armazenados em condições ambiente de temperatura e umidade, sendo armazenadas no laboratório do DEC. Foi mantido um espaçamento mínimo de 100 ± 10 mm entre as amostras. A desmoldagem foi realizada com 24 horas seguida da alteração da posição dos painéis, que estavam inicialmente na posição horizontal, para a vertical. Em seguida, os painéis foram analisados quanto à evolução das fissuras provenientes da retração.



Figura 15 - Aplicação da argamassa de reparo no substrato de concreto.

A avaliação da retração por secagem com restrição foi realizada durante 28 dias para todas as formulações, nos seguintes intervalos de tempo: 1, 4, 7, 14, 21 e 28 dias. As observações da tendência à fissuração das amostras foram realizadas com a utilização de marcador permanente de ponta fina para delinear a evolução das fissuras, paquímetro digital para medir o comprimento das fissuras, lupa para auxiliar na detecção da ocorrência das fissuras, fio de algodão maleável para viabilizar uma medição mais precisa das fissuras não lineares, e dispositivo de registro digital de imagens.

Após a avaliação das 5 formulações aplicadas sobre o substrato com e sem a adição de fibras, foi escolhida a formulação com a menor incidência de retração. Foram realizadas, para a formulação 3.0 80/20, intervenções tais como o aumento da relação agregados/aglomerantes, do percentual de fibras e da execução de curas úmida e térmica, com a finalidade de reduzir a ocorrência de fissuração por retração nas argamassas. A primeira suposição da possível causa da grande ocorrência de fissuras foi a perda acelerada de água. Portanto foi realizada a umidificação do substrato antes da aplicação da argamassa e, imediatamente após a moldagem até a idade de 7 dias os painéis foram protegidos por lona. Tal intervenção foi realizada com o intuito de minimizar a evaporação e simular um procedimento possível de ser realizado em uma situação real de reparo estrutural. Ainda avaliando a variável cura, foi moldado um painel cuja cura térmica foi realizada em estufa por 24 horas a 40 ± 5 °C. A relação agregados/aglomerantes também foi alterada, suprimindo o requisito inicial proposto de manter a trabalhabilidade, e tal relação foi aumentada de 1.5 para 2.5. O percentual de fibras também foi aumentado de 0,25% para 0,75% com o intuito de conter o desenvolvimento das fissuras. E, finalmente, foi avaliado um painel cuja aplicação da argamassa foi feita no centro do substrato, com dimensões de 200x200 mm, de modo a analisar se a incidência de fissuras acentuada ocorreu devido ao efeito de borda das argamassas. A Tabela 15 ilustra a combinação de tais procedimentos, destacadas com o preenchimento das células na cor cinza, totalizando na análise de 11 painéis com variações da formulação 3.0 80/20.

Tabela 15 - Variações avaliadas da formulação 3.0 80/20.

Formulação 3.0 80/20		Fibras de PP (%)			Efeito borda
Agregados/aglomerantes	Tipo de cura	0	0,25	0,75	
1.5	Ambiente				
	Lona e umidificação do substrato				
	Térmica				
2.5	Ambiente				
	Lona e umidificação do substrato				

3.3.3 Retração com restrição por meio de dispositivos concentradores de tensão

O segundo método de avaliação da retração com restrição foi adaptado conforme as prescrições da norma ASTM C1579 (ASTM, 2006), os procedimentos avaliados por Rahmani

et al. (2012), citados no item 2.4.1 deste trabalho. Contudo, foram mantidas as condições ambientes de cura, para fins comparativos com os demais processos de avaliação da retração realizados no presente estudo. Para a moldagem dos corpos de prova foram confeccionadas fôrmas em compensado naval, com dimensões de 355x560x12 mm, em cuja base foram acrescentados dispositivos concentradores de tensões, conforme a Figura 16.

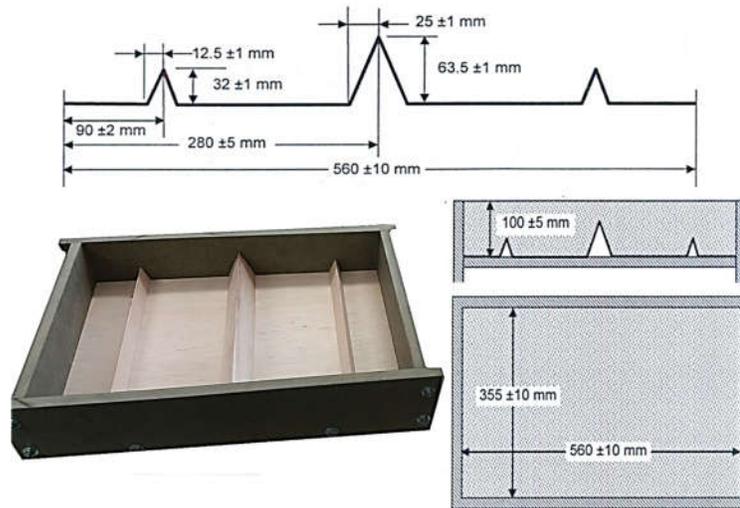


Figura 16 - Forma utilizada e dimensões segundo a ASTM C1579 (ASTM, 2006).
Fonte: ASTM C1579 (ASTM, 2006) - adaptado.

Após 24 horas contadas a partir da moldagem das argamassas, as laterais das fôrmas foram retiradas, como ilustrado na Figura 17, mantendo-se as bases indutoras de tensões por um período de 7 dias em condições ambientes de temperatura e umidade, assim como os dois métodos avaliativos anteriormente descritos. Esse período foi determinado de acordo com os resultados da análise anterior, em que percebeu-se que, a partir dos 7 dias de cura, o crescimento e o surgimento de novas fissuras estabilizou-se. As fissuras foram monitoradas e medidas nas idades de 1, 4, e 7 dias.



Figura 17 - Indução da retração com restrição das argamassas segundo a ASTM C1579 (adaptada).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização das matérias primas

A Figura 18 apresenta as curvas granulométricas dos agregados dolomíticos, dos precursores aluminossilicatos (BFS e MK) e as curvas de difração de raios X dos precursores. A curva granulométrica dos agregados (Figura 18 a)) é composta pelos agregados combinados (55% (1,2mm) + 25% (2,4mm) + 20% (4,8mm)). A adoção das faixas granulométricas utilizadas nas argamassas álcali-ativadas, enquadrou-se na zona ótima de utilização NBR 7211 (ABNT, 2009). A fixação dos agregados na zona ótima de utilização foi de fundamental importância para a moldagem das argamassas, uma vez que o diâmetro de partículas dos precursores é muito pequeno, e a presença de silicato na solução ativadora, cuja viscosidade é alta, dificultam muito a homogeneização da mistura. A adição dos agregados melhorou a trabalhabilidade das argamassas moldadas.

Por meio da análise do gráfico da Figura 18 b), percebe-se que o metacaulim é significativamente mais fino que a escória de alto forno, característica que afeta a trabalhabilidade, uma vez que quanto maior a área superficial, maior a demanda de solução (DAMINELI, 2013; NEVILLE, 2016). Desta forma, as argamassas produzidas com um maior percentual de metacaulim necessitam da adição de uma maior quantidade de solução em detrimento às argamassas com maior percentual de escória, para um mesmo intervalo de trabalhabilidade.

Na análise dos gráficos de difração de raios X, percebe-se que os precursores utilizados apresentam comportamento predominantemente amorfo (Figura 18 c)). Contudo, o MK contém picos cristalinos de quartzo, caulinita, muscovita, hematita e ilita (Figura 18 d)). Tais picos podem ser explicados pela presença de impurezas em sua composição e também pela calcinação incompleta da caulinita. A escória de alto forno, por sua vez, apresenta picos cristalinos para a gehlenita, mineral característico da composição de escórias provenientes da produção de ferro-gusa, e, também para a akermanita.

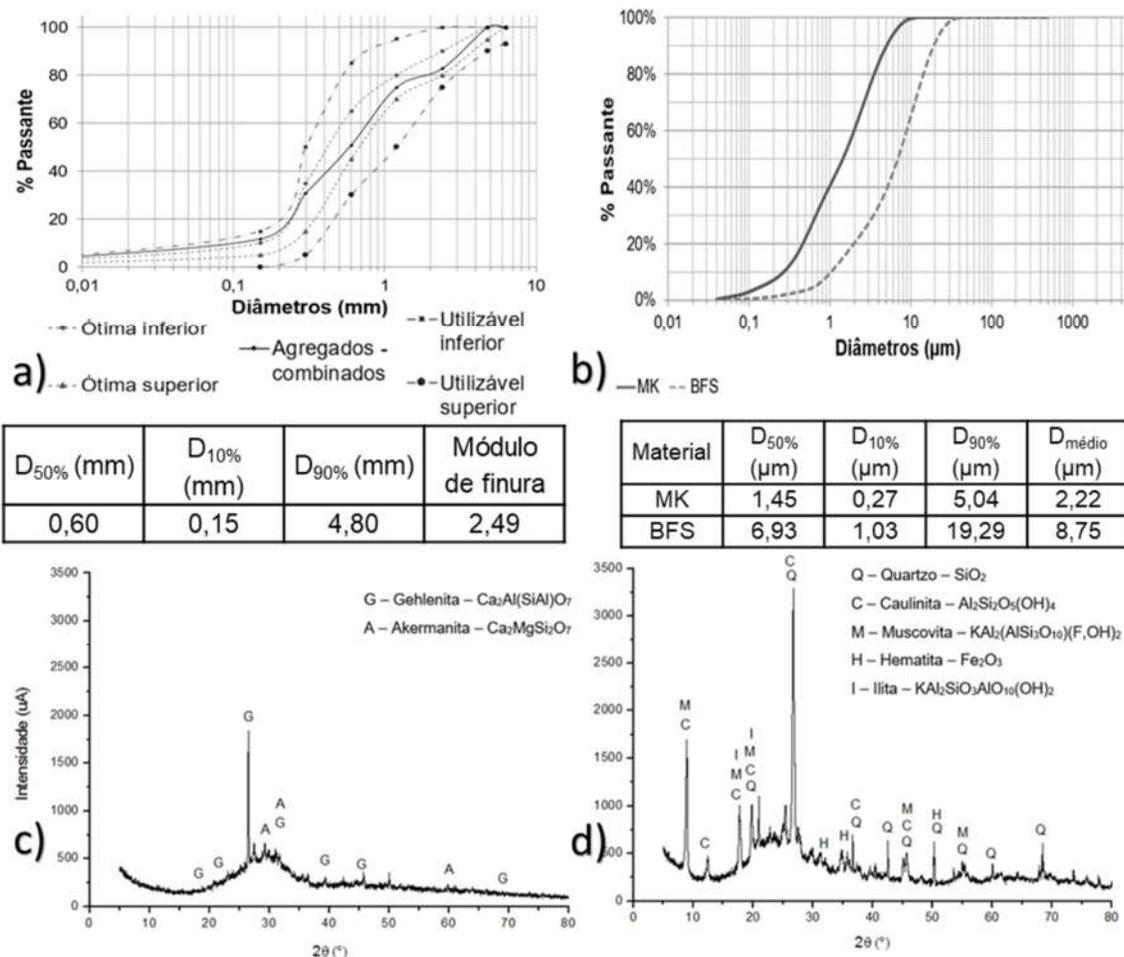


Figura 18 - a) Composição granulométrica dos agregados; b) Composição granulométrica dos precursores; c) DRX escória; d) DRX metacaulim.

A massa específica unitária dos precursores aluminossilicatos, determinada por picnometria, foi de 2,861 g/cm³ para a BFS e de 2,587 g/cm³ para o MK. Os agregados utilizados no concreto foram a brita (1+2), cuja dimensão máxima característica encontrada foi de 25mm, e a areia lavada, com módulo de finura 2,19 e D₅₀ de 300µm.

4.2 Avaliação do comportamento mecânico

Os valores médios encontrados no ensaio de resistência à compressão simples e de módulo de elasticidade estático para o concreto de cimento Portland e do graute industrializado utilizado como referência, estão expostos na Tabela 16. O concreto, dosado pelo método ACI apresentou parâmetros de resistência conforme a previsão de cálculo, ou seja, superior a 30 MPa.

Tabela 16 - Resultados do desempenho mecânico do concreto e do graute de referência.

Material	Resistência à compressão (MPa)	Desvio padrão	Módulo de elasticidade estático (GPa)	Desvio padrão
Concreto	32,75	0,96	26,80	0,59
Graute	51,90	1,70	20,40	0,62

Os valores médios encontrados no ensaio de resistência à compressão e de módulo de elasticidade para as 21 formulações de argamassas álcali-ativadas estão expostos na Figura 19 (a e b) e na Tabela 17.

Tabela 17 - Resistência à compressão e módulo de elasticidade estático das argamassas álcali-ativadas (média e desvio padrão)

Formulação		Resistência à compressão (média)	Desvio padrão	Módulo de elasticidade estático (média)	Desvio padrão
SiO ₂ /Al ₂ O ₃	MK/BFS				
2,00	100/0	1,16	0,08	0,77	0,06
2,50	100/0	13,07	0,45	5,13	0,06
2,75	100/0	39,14	2,57	15,20	0,70
3,00	100/0	49,32	4,56	15,27	1,02
2,50	80/20	2,63	0,09	1,80	0,61
3,00	80/20	49,94	0,61	15,20	0,36
3,40	80/20	57,70	1,70	17,20	0,36
3,80	80/20	65,62	3,21	16,60	0,82
2,50	60/40	1,15	0,07	0,87	0,15
3,00	60/40	13,17	0,41	6,47	0,60
3,40	60/40	52,34	4,93	16,47	0,95
3,60	60/40	59,00	2,04	18,50	0,68
3,80	60/40	61,27	2,95	16,30	0,00
3,00	40/60	5,23	0,85	6,90	0,14
3,40	40/60	37,20	0,74	16,50	0,35
3,80	40/60	57,79	1,97	18,70	0,82
4,20	40/60	53,65	3,76	16,40	0,72
3,60	20/80	41,74	1,41	16,35	0,78
3,80	20/80	51,69	1,37	19,65	3,32
4,20	20/80	82,53	5,05	28,00	0,89
4,60	20/80	82,52	4,04	24,80	0,85

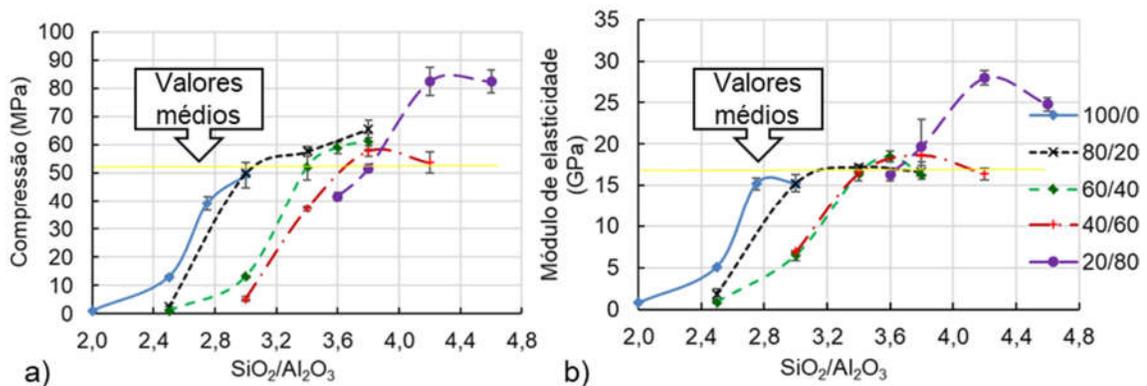


Figura 19 - Comportamento mecânico das argamassas álcali-ativadas.

A determinação das formulações a serem aplicadas sobre o substrato ocorreu com a preconização dos seguintes fatores:

- Foram escolhidas as formulações que apresentaram valores médios dos parâmetros de resistência à compressão simples e módulo de elasticidade estático, destacados pelas linhas amarelas (horizontal) nos gráficos.
- Adotou-se uma formulação por composição de precursores (MK/BFS) sendo elas: 100/0, 80/20, 60/40, 40/60 e 20/80;
- Foi determinado que as formulações selecionadas nos dois critérios supracitados seriam escolhidas de modo a se repetir a razão sílica/alumina e viabilizar a análise da influência desse parâmetro no comportamento das argamassas.

Dado o exposto, as formulações escolhidas foram: 3.0 100/0, 3.0 80/20, 3.6 60/40, 4.2 40/60 e 3.6 20/80. A formulação 4.2 20/80 não pôde ser adotada em função da dificuldade na moldagem, haja visto que ocorreu uma pega rápida quando realizada uma mistura com maior volume do que o utilizado na confecção dos corpos de prova cilíndricos utilizados na caracterização mecânica das argamassas.

4.3 Avaliação da retração com variação da razão sílica/alumina e da composição dos precursores

4.3.1 Variação dimensional linear

A Figura 20 a) e c) apresenta os resultados da variação dimensional linear livre das argamassas álcali-ativadas e do graute utilizado como referência, assim como a variação percentual média de suas respectivas massas (Figura 20 b) e d)). A variação dimensional das argamassas não ocorreu de forma regular nos ciclos de medição, havendo a ocorrência de pequenas expansões e retrações lineares. Estas podem estar associadas à variação das

condições ambientes de temperatura e umidade, visto que o coeficiente de dilatação térmico dos MAA é superior ao do concreto (GONDIM, 2005; MAZZA, 2010).

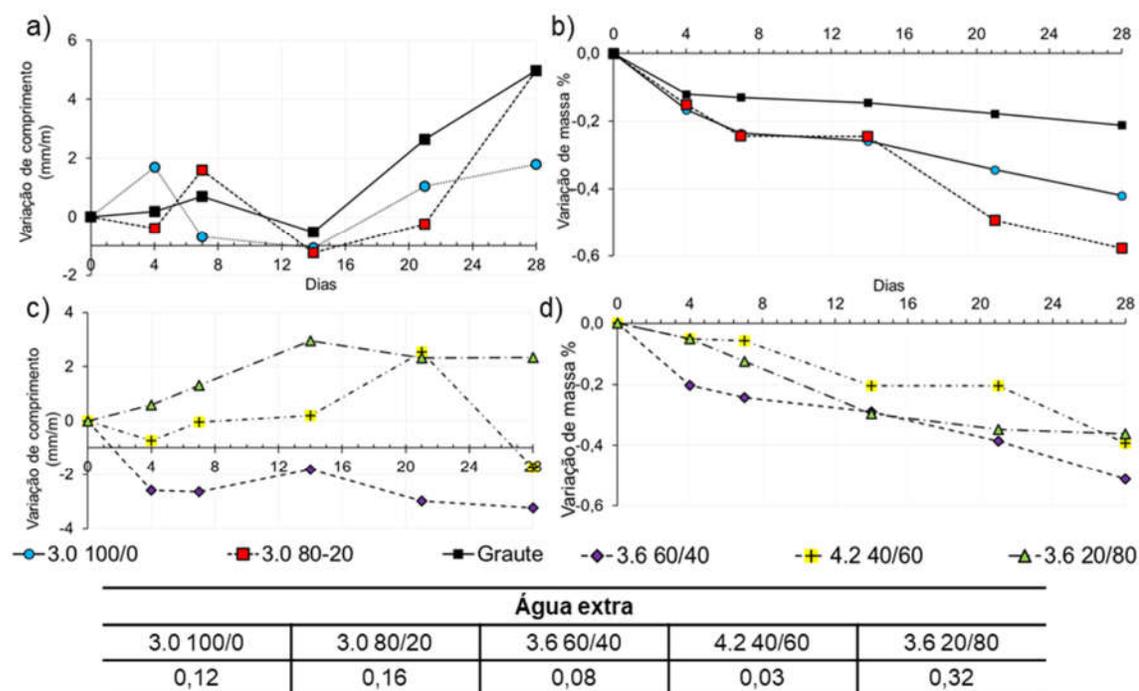


Figura 20 - a) e c) Variação percentual de massa das argamassas; b) e d) Variação linear dimensional das argamassas e do graute.

A variação dimensional também pode ter ocorrido em virtude da redução do tamanho e da forma dos produtos de hidratação devido às retrações autógena e plástica, corroborando com os estudos apresentados por Banthia; Nandakumar (2001); Ferraz (2009); Moreira (2009). Tal variação pode estar também atrelada ao gradiente térmico da reação de polimerização, que varia de acordo com a composição da solução ativadora, dos precursores, da distribuição e do tamanho dos poros (ABDEL-GAWWAD, 2014; GAO *et al.*, 2016; PALACIOS; PUERTAS, 2007; PUERTAS; TORRES-CARRASCO, 2014).

Observa-se que para argamassas com as formulações 3.0 100/0, 3.0 80/20, 3.6 20/80 e o graute ocorreu expansão dimensional aos 28 dias, sendo a formulação 3.0 80/20 a que apresentou comportamento mais semelhante ao do graute. Destaca-se que tal expansão pode contribuir para a melhoria de propriedades das argamassas tais como o aumento da aderência com o substrato e a redução da retração com restrição (ZHANG *et al.*, 2012, PEÇANHA, 2012). A expansão do graute pode ser justificada pela presença de aditivos químicos que o caracterizam como argamassa estrutural de baixa retração. Já para a formulação 3.6 60/40 houve a ocorrência de retração aos 28 dias, corroborando com os resultados previstos na

literatura (CARTWRIGHT *et al.*, 2014; MOBILI *et al.*, 2016). A argamassa com formulação 4.2 40/60 foi a que apresentou a menor variação linear ao final da análise, muito próxima a zero.

A variação percentual de massa das argamassas pode ser relacionada com a água extra adicionada às misturas para atingir a trabalhabilidade proposta. Como descrito na Tabela 13, as argamassas com maior teor de água extra adicionada são, em ordem decrescente: 3.6 20/80, 3.0 80/20, 3.0-100/0, 3.6 60/40 e 4.2 40/60. A formulação 3.6 20/80 pode ter apresentado menor redução de massa por conter o maior percentual de escória, conseqüentemente maior formação do gel C-A-S-H e fixação de água na matriz. Contudo, percebe-se que a perda de massa das argamassas não é proporcional à ocorrência de retração por variação dimensional linear livre, como sugerido por Ye *et al.* (2017). Tal evidência deve-se ao fato de que a argamassa que apresentou a maior variação percentual de massa no intervalo de tempo analisado, foi a que apresentou o comportamento mais próximo à argamassa de referência, ou seja, expansão linear.

A avaliação da variação linear livre das argamassas permitiu concluir que o graute e a formulação 3.0 80/20 apresentam comportamento muito semelhante, havendo uma expansão dimensional aos 28 dias. As formulações 3.0 100/0 e 3.6 20/80 também apresentam expansão, porém cerca de 60% menor que as anteriores. Já as formulações 3.6 60/40 e 4.2 40/60 apresentam retração aos 28 dias, sendo a primeira 30% superior à última. Desta forma, a análise da variação dimensional livre das argamassas não apresentou retração para quatro entre as cinco formulações analisadas. Com exceção da formulação 3.6 60/40, para a qual os valores encontrados possuem a mesma ordem de grandeza dos resultados encontrados por Duran Atiş *et al.* (2009), Lee *et al.* (2014) e Mobili *et al.* (2016). Com a realização dessa análise percebe-se que a avaliação da retração por variação dimensional livre não é um método que permite realizar a previsão da ocorrência de fissuras em argamassas álcali-ativadas quando essas possuem restrição de sua movimentação, quando aplicadas sobre substratos de concreto de cimento Portland.

4.3.2 Retração com restrição sob substrato de concreto

A ocorrência do desenvolvimento de fissuras na avaliação da retração com restrição das argamassas aplicadas sobre o substrato de concreto, teve início após 1 dia de observação para as formulações 3.0 100/0, 3.0 80/20, 3.6 60/40 e 3.6 20/80. A formulação 4.2 40/60 não apresentou fissuração no primeiro dia (Figura 21 a)). Contudo, no quarto dia de avaliação essa formulação apresentou a maior densidade de fissuras dentre as formulações estudadas. Além disso, a evolução de fissuras nessa última formulação permaneceu superior às demais até o final do período de estudo. Percebe-se também que, o desenvolvimento das fissuras ocorre de forma substancial no período compreendido entre o primeiro e o quarto dia após a

moldagem, etapa em que coexistem as retrações autógena, plástica e térmica nas argamassas. Observa-se pequena evolução adicional até os 7 dias, para todas as formulações analisadas com uma estagnação no desenvolvimento das fissuras após esse período. Além disso, é possível perceber que o mesmo comportamento ocorreu para as formulações com fibras (Figura 21 b)), ou seja, a adição de fibras de PP com o teor de 0,25% não contribuiu significativamente para a redução de fissuras.

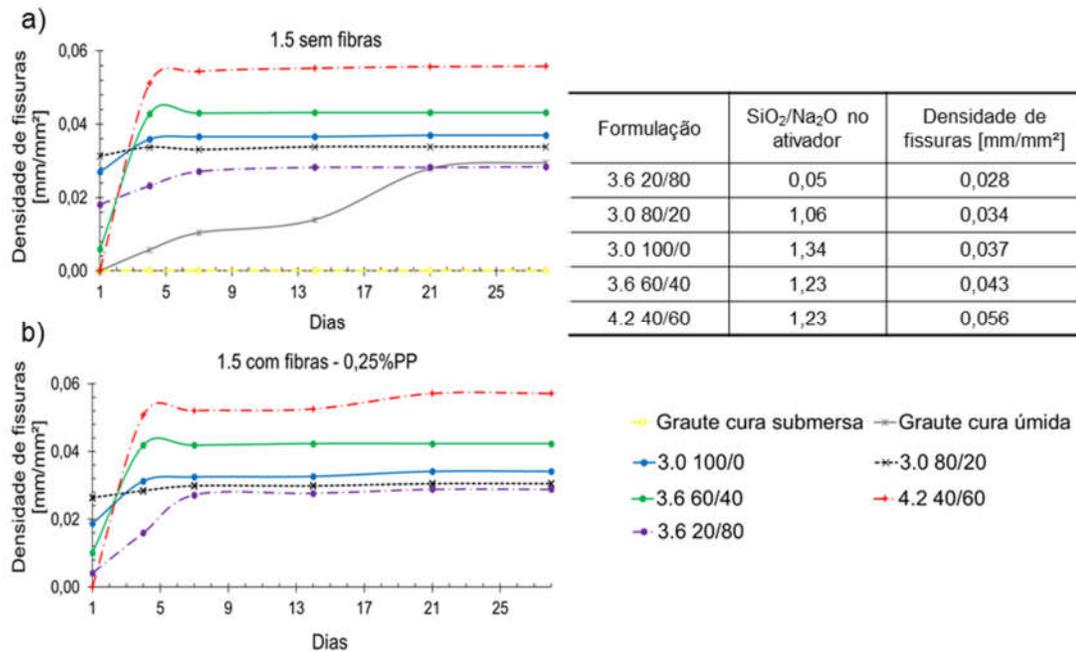


Figura 21 - Avaliação da retração segundo a EN 12617-4 (adaptado) para as formulações com razão agregados/aglomerante 1.5 a) sem adição de fibras e b) com 0,25% de fibras de PP.

De acordo com a análise do gráfico é possível perceber que para as formulações contendo silicato de sódio no ativador (3.0 10/0, 3.0 80/20, 3.6 60/40 e 4.2 40/60), foi observado o aumento da densidade de fissuras com o aumento do percentual de escória e da razão molar SiO₂/Al₂O₃. Tal relação aumenta com o aumento da quantidade de silicato na solução ativadora e também com o aumento do percentual de escória. Sabe-se que ambos os fatores combinados, ou mesmo isoladamente, contribuem para o aumento da incidência de retração nas argamassas álcali-ativadas (CARTWRIGHT *et al.*, 2014; PALACIOS; PUERTAS, 2007; YE *et al.*, 2017).

Já a formulação contendo 80% de escória como alomerante, apresentou a menor densidade de fissuras dentre as formulações avaliadas. Tal comportamento pode ser relacionado com a não utilização de silicato de sódio na solução ativadora. Contudo, sua utilização se mostrou inviável devido à grande e precoce ocorrência de eflorescência na argamassa, como previsto na literatura (HE *et al.*, 2001; PUERTAS *et al.*, 2006). Esse fenômeno pode ser observado

também microscopicamente, com o preenchimento parcial dos poros e fissuras da argamassa por pó lixiviados, como evidenciado na Figura 22. Além disso, foi possível perceber o deslocamento da camada de argamassa do substrato após os 28 dias de observação. Tais características evidenciam que a ocorrência de expansão e de lixiviação dos produtos de hidratação da formulação descrita, promoveu a falta de aderência entre essa e o substrato, além de contribuir para o aumento da espessura e da profundidade das fissuras.

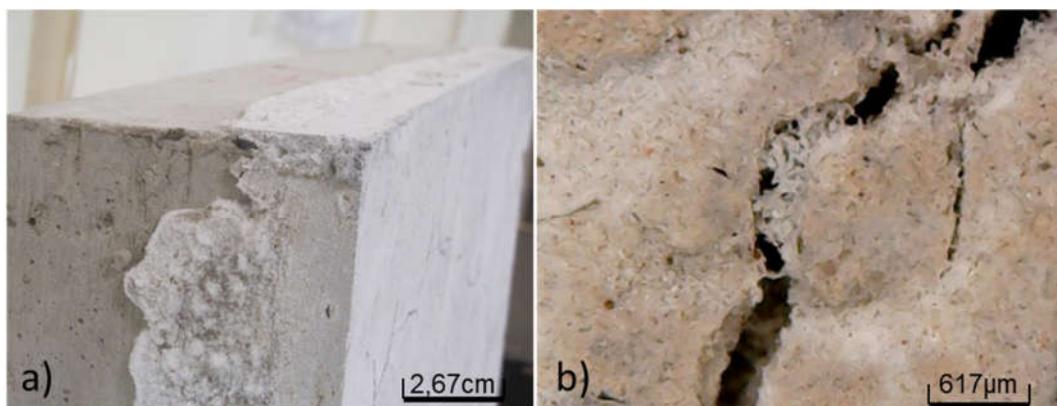


Figura 22 - Ocorrência de eflorescência - formulação 3.6 20/80 a) Observação macroscópica aos 3 dias após a moldagem; b) Observação microscópica aos 28 dias.

Por meio da análise do gráfico percebe-se que a substituição de 20% de metacaulim por escória contribuiu para a diminuição da densidade de fissuras, tornando o comportamento da formulação 3.0 80/20 mais próximo ao do graute utilizado como referência do que a argamassa contendo 100% de metacaulim. Já as substituições de 40% e 60% resultam no aumento da grandeza avaliada, corroborando com os resultados previstos na literatura (CARTWRIGHT; RAJABIPOUR; RADLI, 2014; PALACIOS; PUERTAS, 2007). O provável motivo para tal comportamento é que quanto maior o percentual de escória utilizado, maior a formação do gel C-A-S-H, semelhante ao gel C-S-H formado em argamassas compostas por cimento Portland. Sabe-se que a coexistência do gel com o silicato de sódio promove a maior ocorrência das fissuras oriundas da retração (BORGES *et al.*, 2016; HE *et al.*, 2001).

A Figura 23 consiste nos principais pontos da análise por microscopia ótica. Nas partes a) e b) é possível observar que houve o preenchimento parcial de uma fissura e de alguns poros da formulação 3.0 100/0 por carbonatos de sódio decorrentes do processo de eflorescência. Os fios de coloração esbranquiçada também compõe produtos identificados pela ocorrência desse fenômeno. A parte c) evidencia a zona de transição entre a matriz da formulação 3.0 100/0 e o agregado. É possível observar que houve uma fragilização do compósito na interface com o agregado e formação de material friável. Faz-se necessária uma investigação mais aprofundada sobre as razões que levam a tais ocorrências. A parte d) ilustra mais uma zona de transição fragilizada, desta vez na matriz da formulação 3.6 80/20. As partes e), f), g)

e h) ilustram as formulações 3.0 100/0, 3.0 60/40, 4.2 40/60 e 3.6 20/80 respectivamente, com adição de 0,25% de fibras de PP. É possível verificar pela análise das imagens, a atuação das fibras na restrição de abertura das fissuras e no interior de poros.

As Figura 24, 25 e 26 evidenciam a evolução das fissuras com 1, 7 e 28 dias das formulações sem fibras de PP e com 0,25%. Comparando-se tal desenvolvimento para uma mesma formulação, percebe-se que grande parte da densidade de fissuras das argamassas ocorre nos primeiros 4 dias. Essa ocorrência pode estar relacionada à coexistência da retração autógena (ou química) e da retração por secagem nesse período, corroborando com os dados da Figura 21. Contudo, percebe-se que o padrão de fissuração das argamassas 3.0 100/0, 3.0 80/20 e 3.6 20/80 é semelhante. Ou seja, as três formulações compõem argamassas com fissuras longas e retilíneas, cujo surgimento é mais substancialmente observado nas primeiras 24 horas.

Apesar da semelhança, a espessura média das fissuras da formulação 3.6 20/80 é maior (aproximadamente o dobro) que a das demais, devido à diferença na estrutura do gel formado por ser a única formulação dentre as avaliadas sem silicato de sódio na solução ativadora. A reação entre o hidróxido presente na solução ativadora com o cálcio presente na escória favorece a formação de carbonatos e sódio. Os carbonatos lixiviados para a superfície por eflorescência e em contato com o ar promovem a carbonatação acelerada, tornando a matriz porosa e friável.

As formulações 3.6 60/40 e 4.2 40/60 por sua vez, apresentam padrão de fissuração semelhante entre si. As fissuras observadas possuem comprimento menor, entretanto são mais distribuídas e, quando realizada a quantificação da densidade de fissuras, possuem os resultados mais elevados. Esse fato deve-se, provavelmente ao aumento tanto ao aumento do teor de escória na composição dos precursores quanto ao aumento da utilização de silicato na solução ativadora. Observa-se também que, o surgimento substancial das fissuras de ambas formulações ocorre entre o quarto e o sétimo dias, diferentemente das anteriores. A presença de escória torna as reações químicas dos compósitos mais lenta, postergando o surgimento das fissuras.

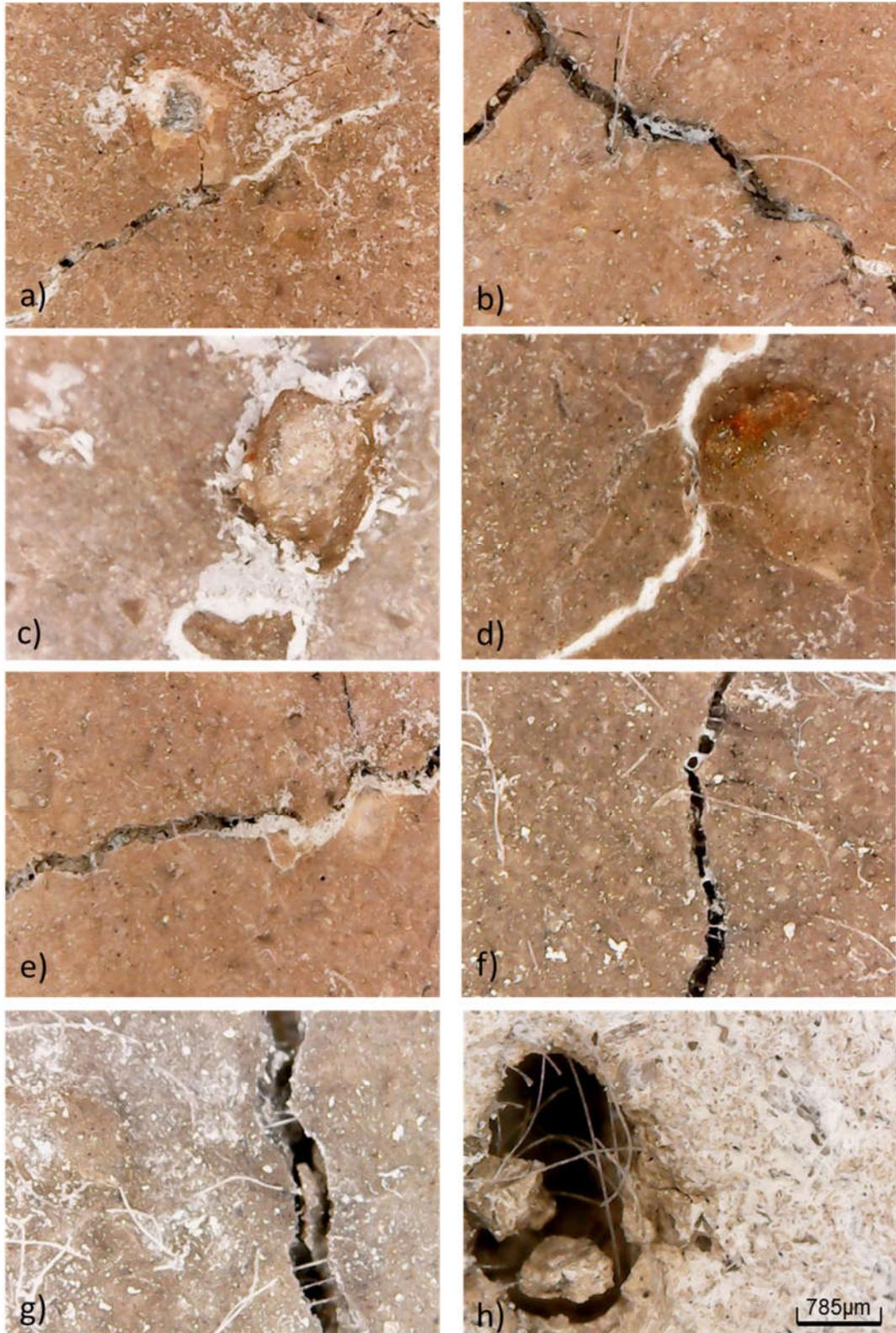
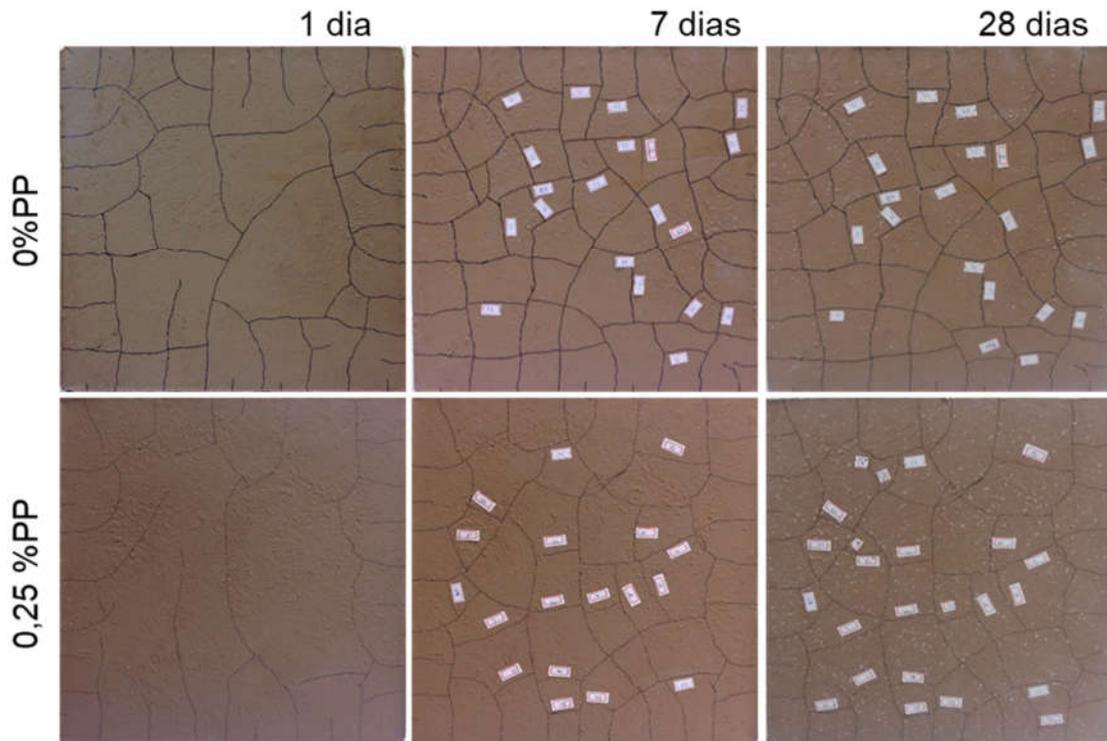


Figura 23 - Análise microscópica das argamassas: a) e b) (3.0 100/0) preenchimento de fissuras e poros por carbonatos; c) (3.0 100/0) zona de transição matriz/agregado; d) (3.6 80/20) zona de transição matriz/agregado; e) (3.0 100/0) adição de 0,25%PP; f) (3.0 60/40) adição de 0,25%PP; g) (4.2 40/60) adição de 0,25%PP e h) (3.6 20/80) adição de 0,25%PP.

a) 3.0 100/0



b) 3.0 80/20

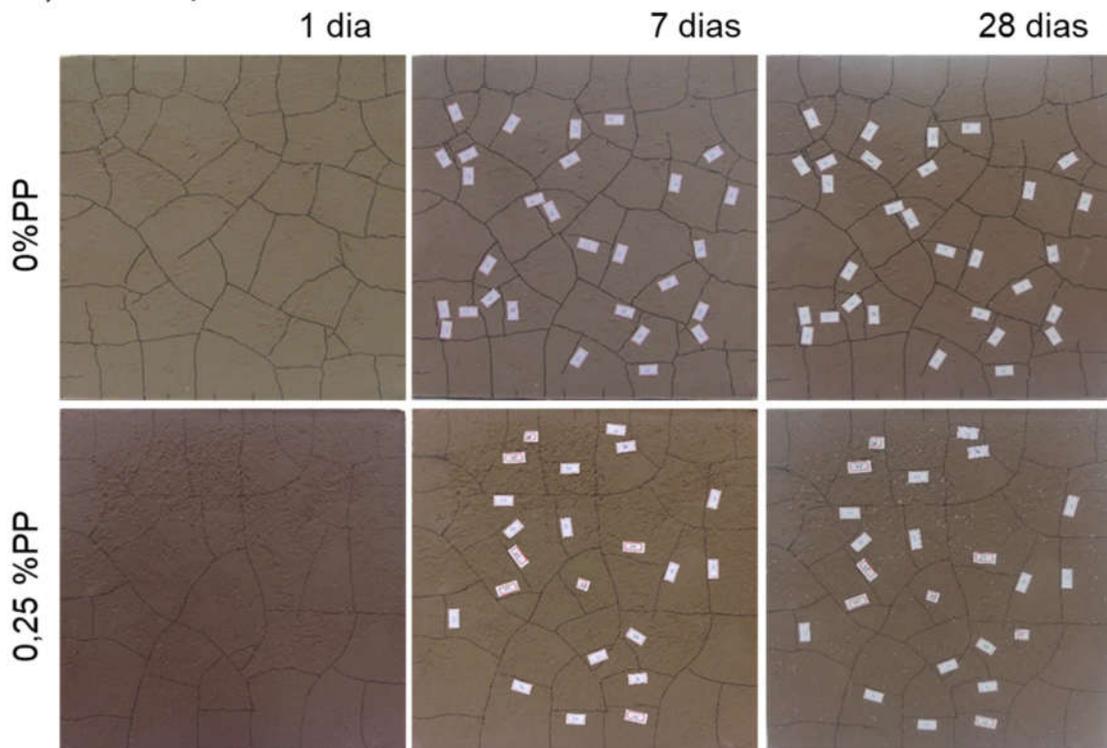
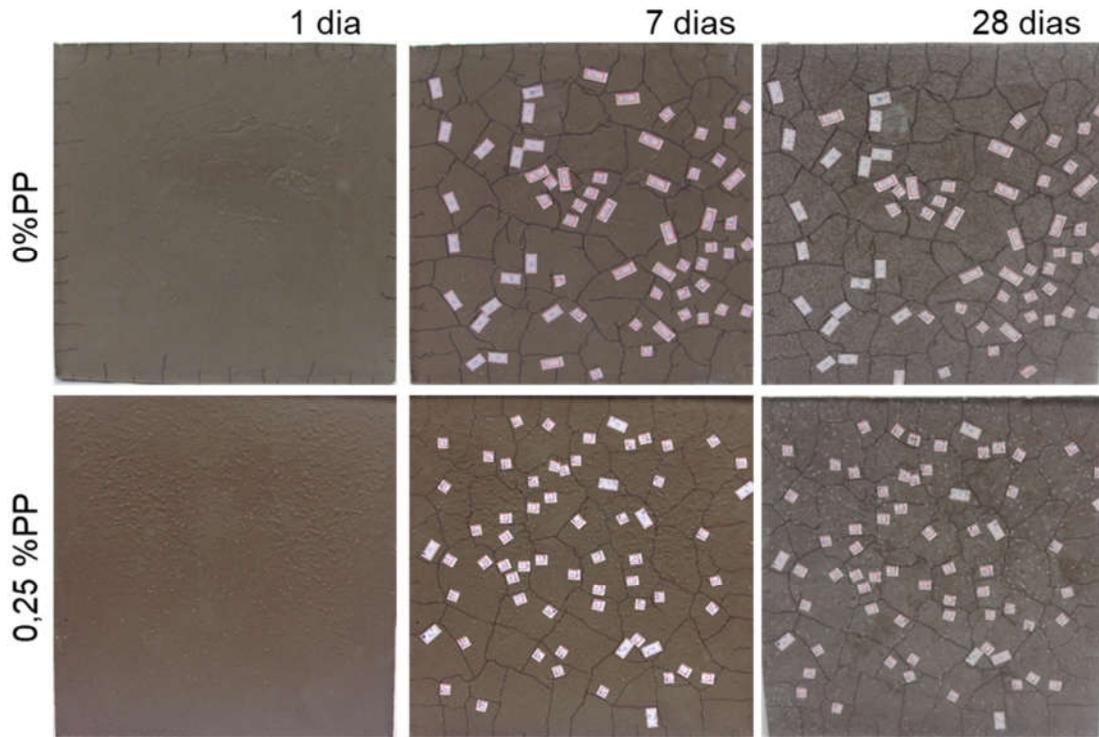


Figura 24 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações a) 3.0 100/0 e b) 3.0 80/20 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP.

a) 3.6 60/40



b) 4.2 40/60

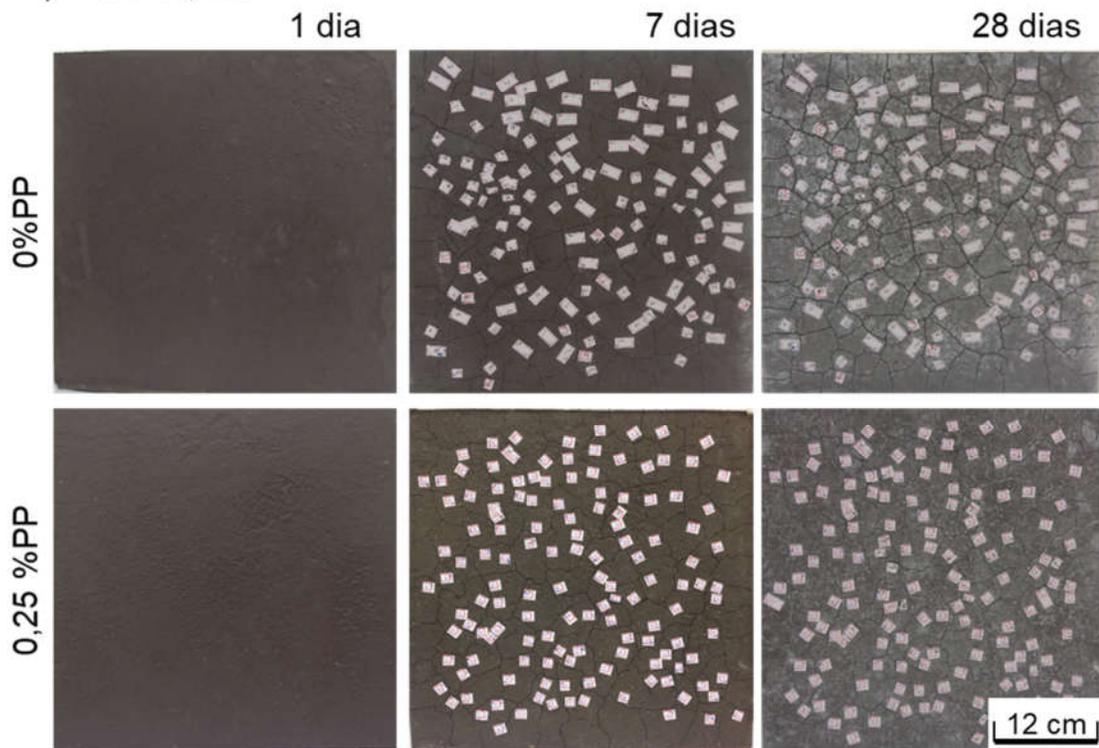
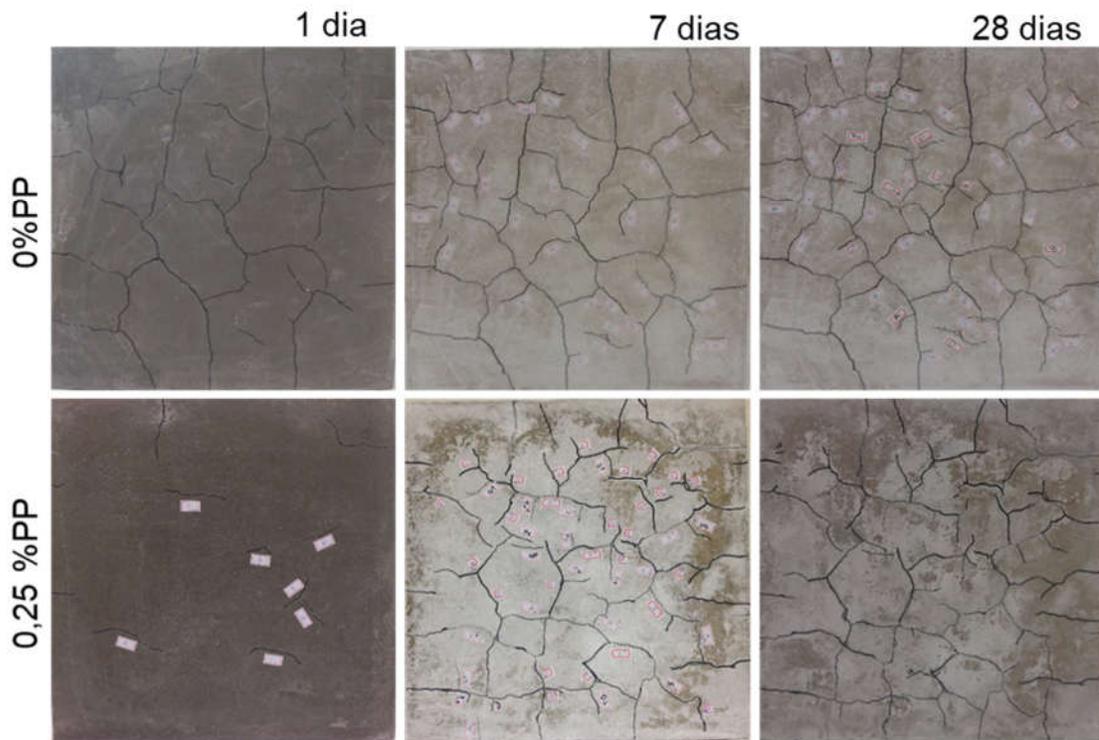


Figura 25 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações a) 3.6 60/40 e b) 4.2 40/60 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP.

a) 3.6 20/80



b) Graute

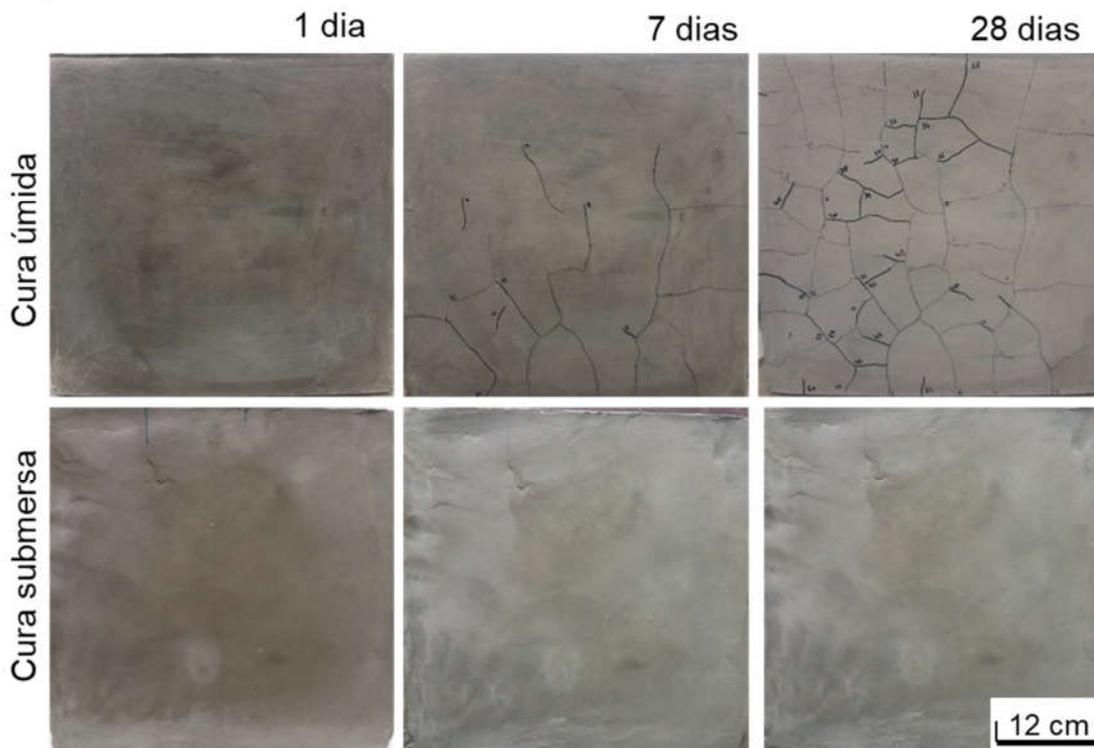


Figura 26 - Evolução das fissuras nas idades 1, 7 e 28 dias para as formulações 3.6 80/20 sem adição de fibras e com adição de 0,25% PP e do graute (cura úmida e cura submersa).

Dado os expostos, avaliou-se a influência do percentual de escória nas argamassas, aliado a outros parâmetros de suas respectivas composições. A Figura 27 a) evidencia que a ocorrência de fissuras nas argamassas tem variação diretamente proporcional aos valores médios encontrados para o módulo de elasticidade estático (ME), sendo as formulações com 40% e 60% de escória as que apresentam maior ME, e também a maior densidade de fissuras. Esse comportamento já não é observado em relação à relação H_2O/Na_2O . Diferentemente do esperado, constatou-se que as argamassas com maior razão molar para o parâmetro analisado apresentaram menor incidência de fissuração com restrição. Mais uma vez, reitera-se que a formulação 3.6 20/80 não possui silicato de sódio em sua composição, motivo pelo qual a razão molar H_2O/Na_2O foi a maior para essa formulação, o que também explica sua menor densidade de fissuras, apesar da maior quantidade de água utilizada.

Na Figura 27 b) é avaliada a influência da razão SiO_2/Na_2O no ativador correlacionada com a densidade de fissuras. Percebe-se que a variação da razão molar apresenta um comportamento semelhante com a variação da densidade de fissuras, evidenciando que esse parâmetro é um dos principais fatores que interfere em tal ocorrência nas argamassas alcali-ativadas, assim como o previsto pela literatura (CARTWRIGHT *et al.*, 2014; PALACIOS; PUERTAS, 2007; YE *et al.*, 2017). Percebe-se que a redução da densidade de fissuras é significativa quando a razão molar analisada é nula, sendo evidenciada pela formulação 3.6 20/80.

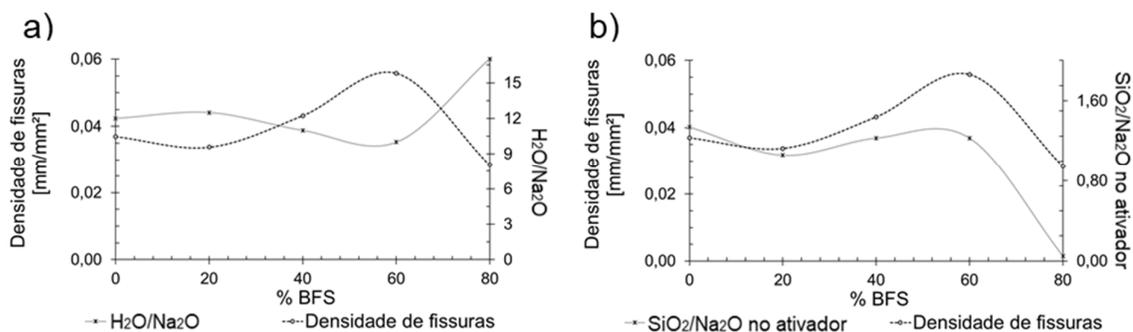


Figura 27 - a) Densidade de fissuras x H_2O/Na_2O ;
b) Densidade de fissuras x SiO_2/Na_2O .

4.3.3 Retração com restrição com dispositivo indutor de tensão

Percebe-se pela Figura 28 que até o teor de escória de 20% não houve desenvolvimento significativo de fissuras nas argamassas. Na formulação 3.0 100/0 foram registradas pequenas fissuras nas bordas, que puderam ter sua espessura medida por meio de processamento digital de imagens, como pode ser observado na Figura 29 a).

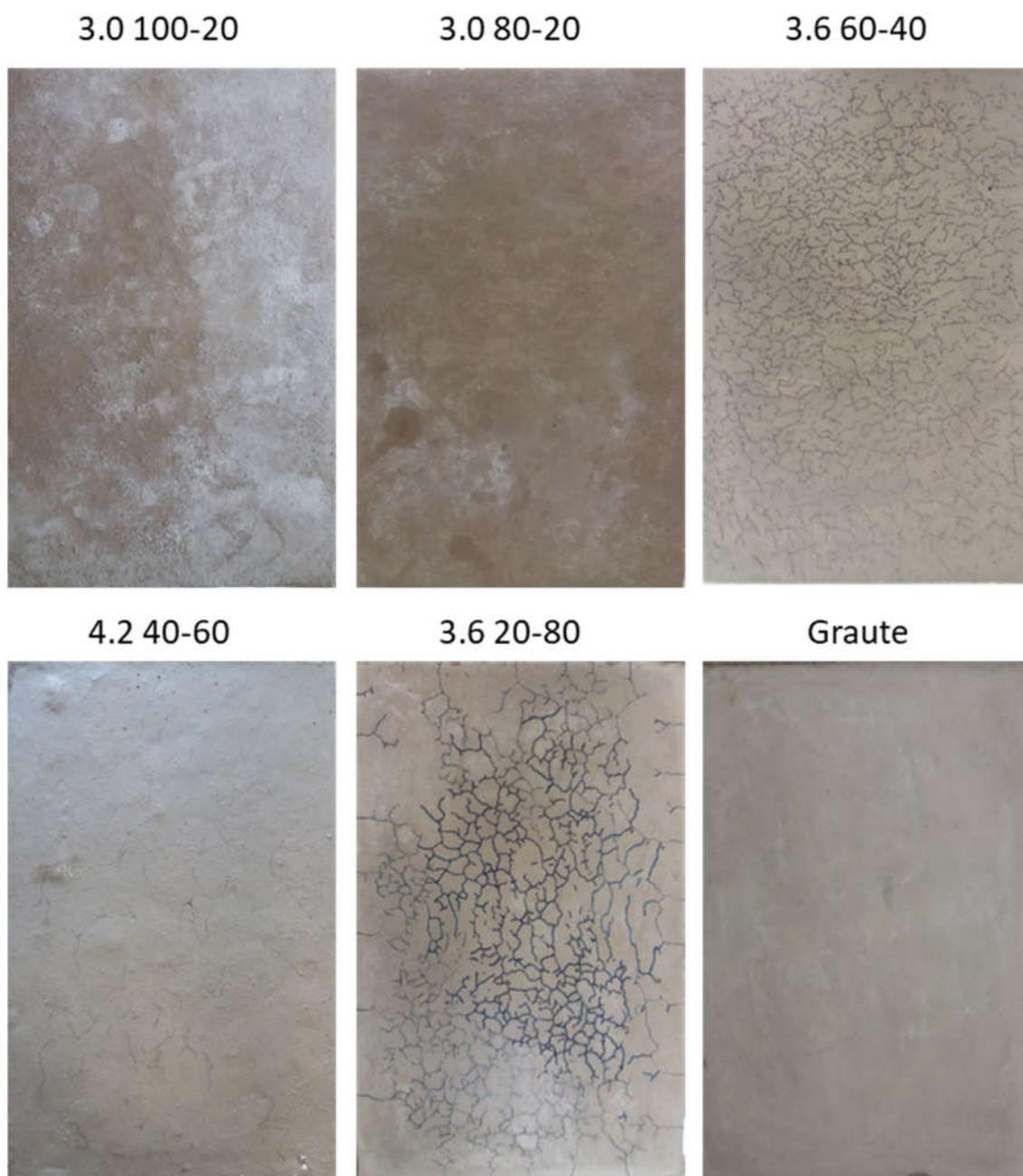


Figura 28 - Fissuração das argamassas aos 7 dias - segundo a ASTM C1579.

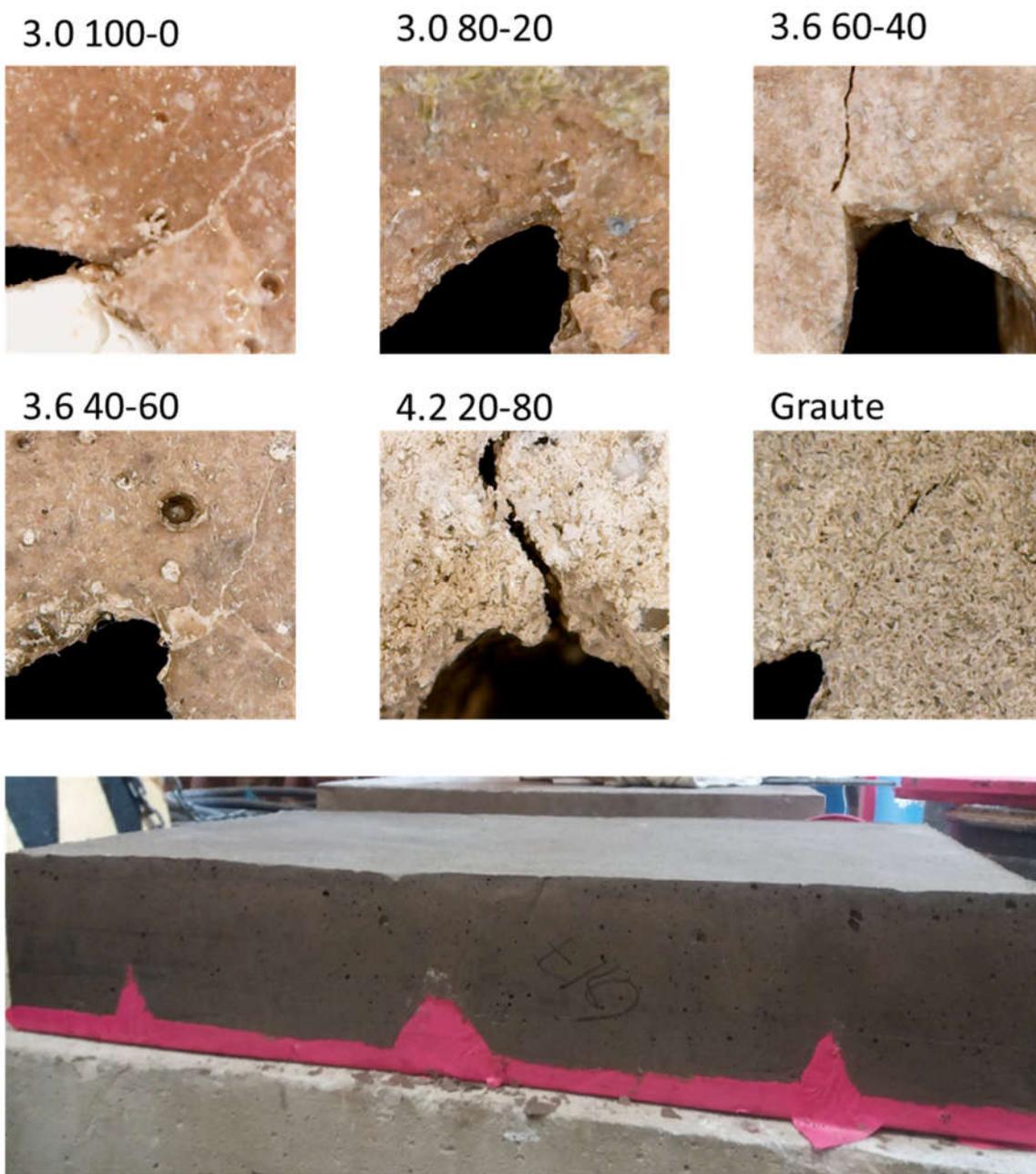


Figura 29 - Retração segundo a ASTM C1579 - a) Fissuras induzidas pelo dispositivo de tensão das formas; b) Vista lateral da realização da cura das argamassas com o fundo da forma por 7 dias.

O comportamento de tais argamassas corrobora com os apresentados nas análises realizadas nos itens 4.3.1 e 4.3.2, em que as argamassas das formulações 3.0 100/0 e 3.0 80/20 tiveram a menor densidade de fissuras dentre as demais analisadas. Entretanto, acredita-se que devido ao grande volume de material utilizado para a moldagem dos corpos de prova desta análise o aumento na temperatura devido às reações exotérmicas de hidratação promoveram a auto cura térmica da argamassa 3.0 80/20. Após cerca de uma hora da moldagem foi constatado que o corpo de prova apresentava uma temperatura tão alta ao

ponto de ser intolerável ao toque. Sabe-se que a cura térmica favorece a aceleração da formação dos produtos de hidratação das argamassas álcali-ativadas, diminuindo a ocorrência de retração (ZANOTTI *et al.*, 2017). Na análise da Figura 29 é possível observar a ocorrência das fissuras na zona concentradora de tensão, provocada pelo fundo da fôrma, verificando-se a eficiência do método utilizado para o parâmetro avaliado. Percebe-se, também, que a espessura das fissuras geradas na profundidade das argamassas das formulações 3.0 100/0, 3.6 40/60 e 4.2 60/40 é menor do que as evidenciadas na área superficial. Já na formulação 3.6 20/80 a espessura das fissuras mais profundas induzidas pelo dispositivo é maior. Essa ocorrência deve-se provavelmente ao preenchimento pelo pó lixiviado por eflorescência de carbonatos e sódio na área superficial da argamassa, pois esse efeito é observado mais consideravelmente na superfície do que em profundidade.

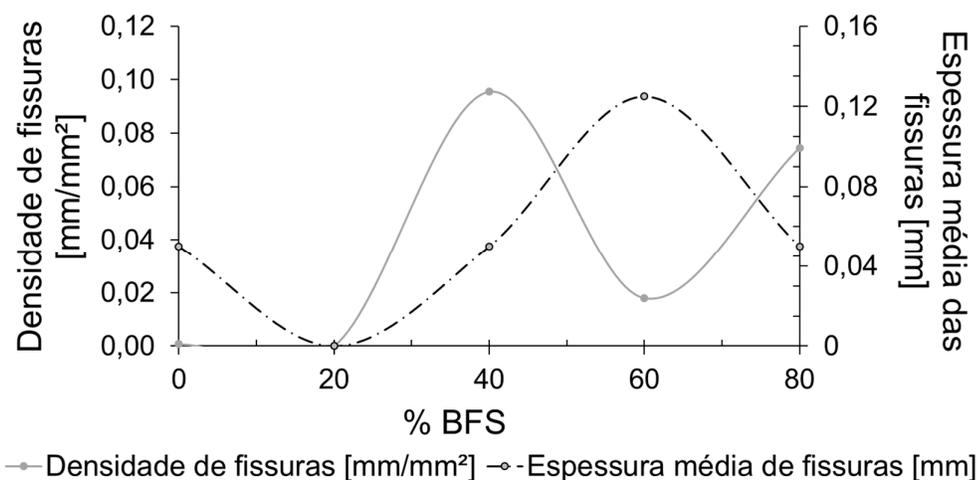


Figura 30 - Densidade de fissuras x espessura – aos 7 dias, segundo a ASTM C1579.

No gráfico apresentado na Figura 30 observa-se que a argamassa da formulação 3.6 40/60 apresentou densidade de fissuras semelhante à densidade apresentada pela formulação 3.6 80/20. Tal semelhança também foi observada na espessura média das fissuras de ambas as argamassas. Já a formulação 4.2 60/40 apresentou menor densidade de fissuras, comparada às anteriores, contudo a espessura média destas foi maior.

4.4 Avaliação da retração com variação da razão agregados/aglomerantes, do percentual de fibras e do procedimento de cura

De modo similar ao apresentado no item 4.3.1 do presente trabalho, a evolução da densidade de fissuras (ρ) segundo a EN 12617-4 para a formulação que apresentou melhor comportamento com relação a esse parâmetro 3.6 80/20 é apresentada na Figura 31. Como referência para a avaliação de tal parâmetro, foram plotadas também nesse item as curvas da densidade de fissuras do graute (cura úmida e submersa). Por meio da análise do gráfico

(Figura 31 a)) para as formulações com razão 1.5 agregados/aglomerantes, percebe-se que a cura úmida e submersa na formulação sem fibras causou um pequeno aumento de 8% no parâmetro analisado, quando comparada à argamassa com as mesmas variações com cura ambiente. Além disso, ambas formulações possuem ρ (densidade de fissuras em mm/mm²) cerca de 19% superior à do graute com cura úmida.

Na sequência, observa-se que a adição de fibras de polipropileno atua na redução da densidade de fissuras, sendo essa ainda 4% superior à do graute. Para as formulações com cura térmica e adição de 0,25% de fibras com realização de cura úmida, não houve variação significativa na ρ aos 28 dias. Contudo, observa-se que toda a fissuração da argamassa curada termicamente ocorreu no primeiro dia, diferentemente da argamassa com fibras, em que o aumento gradual desse parâmetro ocorreu predominantemente no intervalo de 1 a 4 dias.

Em relação ao graute, tais formulações apresentam uma redução média de 6%, já em relação à argamassa de MAA que não foi realizado um procedimento alternativo de cura, a redução observada na densidade de fissuras foi de aproximadamente 20%. A adição de 0,75% de fibras na argamassa promove redução de 28% em relação à argamassa de MAA e de 11% em relação ao graute. Além disso, observa-se que o uso de fibras promove retrardamento no aparecimento das fissuras. No primeiro dia de observação a ρ era de aproximadamente zero e o crescimento das fissuras foi observado substancialmente no período compreendido entre o primeiro e o quarto dia. Houve também uma redução significativa na ρ da formulação aplicada em área reduzida sobre o substrato (200x200 [mm]), sendo encontrados percentuais de 42% em relação à argamassa álcali-ativada e 8% em relação ao graute, evidenciando que o efeito de borda contribui significativamente para a ocorrência das fissuras.

Analisando as formulações com relação agregado/aglomerante igual a 2.5, (Figura 31 b)) observa-se que a que apresentou pior desempenho quanto ao desenvolvimento de fissuras foi a que sofreu alteração apenas na quantidade de agregados. Apesar de ter ocorrido redução de 13% na ρ quando comparada à mesma formulação com razão 1.5, quando comparada ao graute de referência apresentou aumento relativo de 8%. Na sequência, a realização de cura úmida promoveu desempenho muito similar ao do graute, com redução de 18% no parâmetro avaliado.

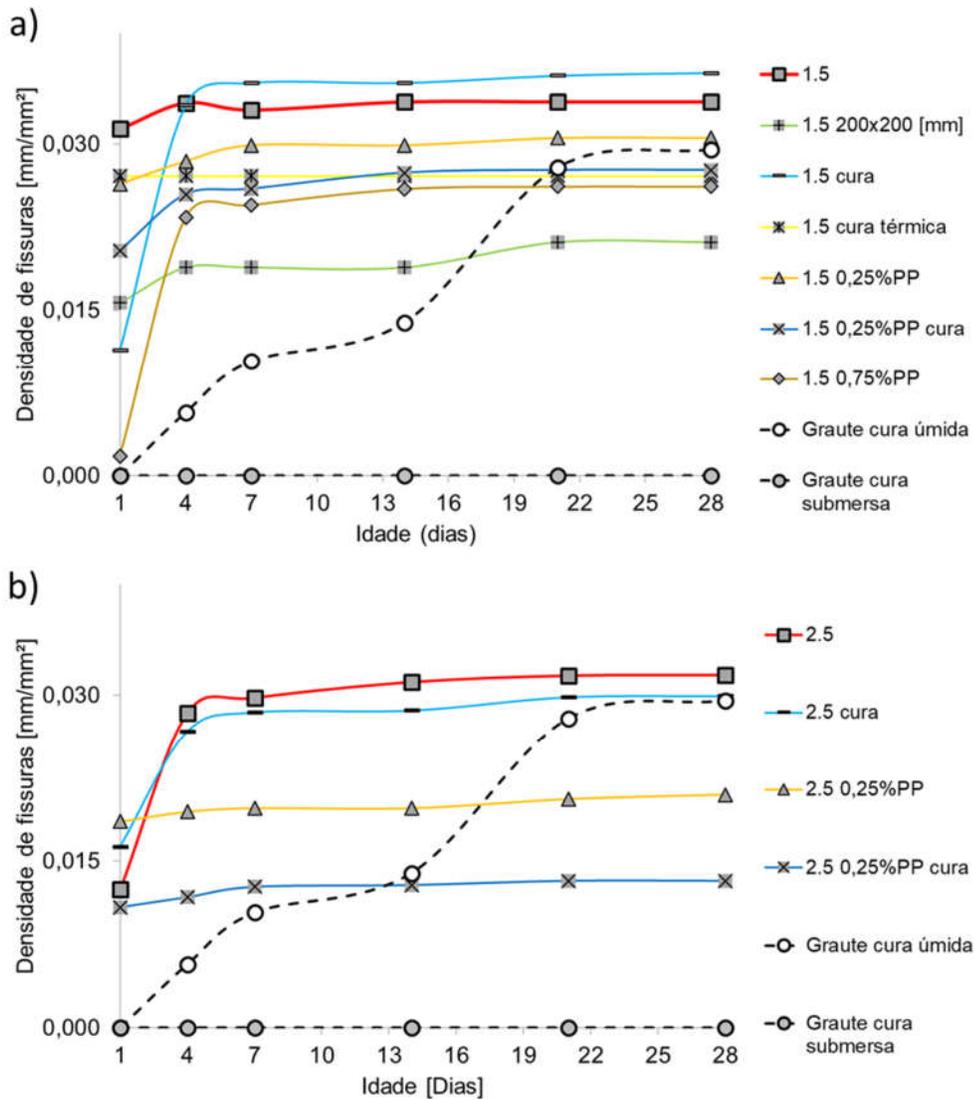


Figura 31 - Densidade de fissuras [mm/mm²] x tempo das variáveis da formulação 3.0 80/20.

A adição de 0,25% promove redução de 42% na ρ em relação às argamassas ativadas alcalinamente e 29% em relação ao graute. Percebe-se também que o desempenho apresentado para essa argamassa foi muito similar ao da argamassa com relação 1.5 agregados/aglomerante aplicada em área reduzida. Finalmente, a argamassa que apresentou a menor densidade de fissuras entre as combinações analisadas foi a com adição de 0,25% de PP e com realização de cura úmida. Em que foram encontrados valores percentuais de redução na densidade de fissuras de 61% em relação à argamassa com razão 1.5, sem fibras e sem cura e de 55% em relação ao graute.

Na Figura 32 podem ser observadas as fissuras nas argamassas aplicadas sobre o substrato aos 28 dias, além da imagem microscópica das argamassas que apresentaram menor e a maior densidade de fissuras entre as formulações avaliadas.

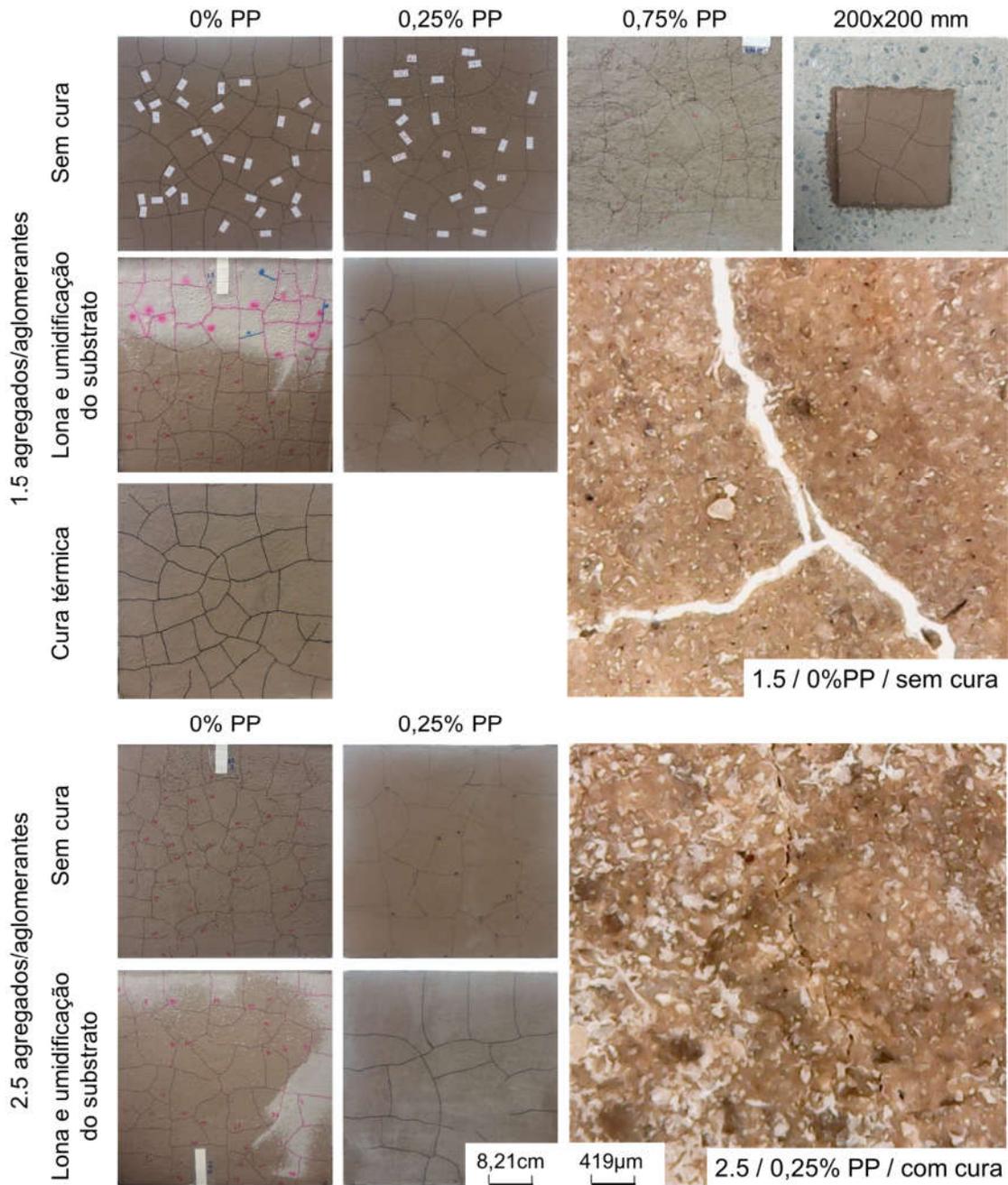


Figura 32 - Variáveis da formulação 3.0 80/20 - evolução das fissuras aos 28 dias.

Através da análise das imagens, pode-se perceber que nas formulações em que foi realizada a cura houve a ocorrência maior da lixiviação de produtos oriundos da eflorescência. Contudo, as manchas esbranquiçadas possuem características sensivelmente diferentes das apresentadas nas demais avaliações e formulações. Percebe-se que esse material não se

encontra solto e sob forma de filetes e pó, estando bem aderido à superfície. Entretanto observou-se o preenchimento parcial das fissuras por tal material, assim como discutido anteriormente. Outra variável a ser observada é a espessura das fissuras das formulações comparadas. Foi constatado que a argamassa com relação 1.5, sem fibras e sem cura apresentou espessura média de fissuras 77% inferior à argamassa com razão 2.5, com 0,25% de fibras e cuja cura úmida foi realizada.

5 CONCLUSÕES

Através da análise dos resultados obtidos com a realização deste trabalho, conclui-se que a retração de argamassas álcali-ativadas é relacionada com as matérias-primas utilizadas em sua composição, assim como à concentração do ativador alcalino. Foi possível realizar uma correlação entre as principais possíveis intervenções a serem realizadas como medidas mitigatórias ao aparecimento de fissuras oriundas da retração autógena e plástica das argamassas utilizadas. Mediante às avaliações realizadas com o objetivo de simular condições ambientes e de aplicação semelhantes às ocorridas em obras de reparo estrutural, fez-se a comparação do desempenho das argamassas com um graute estrutural industrializado. Este último, na situação mais desfavorável de cura realizada, apresentou densidade de fissuras por vezes maior que as de algumas formulações de MAA estudadas, como indicado na Figura 31. Assim sendo, é possível assim validar a hipótese inicial de tal utilização para os materiais álcali-ativados.

Com a avaliação das 21 formulações iniciais de MAA, foi possível realizar a compatibilização de 5 formulações de argamassas álcali-ativadas por meio da análise das características mecânicas indicadas à essa utilização. Encontrou-se pelo menos uma formulação por faixa de composição dos precursores cuja compatibilização foi alcançada. Além disso, constatou-se que as razões molares $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ são os principais determinantes dos resultados de desempenho mecânico analisados.

A taxa de crescimento das fissuras foi avaliada para todas as formulações com a execução de 3 diferentes metodologias. Em todos os métodos avaliados o comportamento de retração das argamassas foi semelhante, sendo as formulações compostas por 80% e 100% de metacaulim as que apresentaram o melhor desempenho segundo o parâmetro avaliado. Já as formulações compostas por 60% e 40% de metacaulim apresentaram grande densidade de fissuras e ocorrência de eflorescência, sendo menos indicadas para a utilização como argamassa de reparo estrutural.

A formulação com 80% de escória apresentou o comportamento muito adverso em todos os métodos de avaliação, associada muito provavelmente à não utilização de silicato de sódio na solução ativadora. Apesar de apresentar densidade de fissuras semelhante às com maior teor de metacaulim, a espessura das fissuras foi a maior dentre as formulações avaliadas em todos os métodos de análise. Esse comportamento levou ao deslocamento de partes da argamassa aderida ao substrato, evidenciando a não recomendação dessa argamassa para utilizações estruturais.

Por meio da análise dos resultados apresentados, percebeu-se que muitos autores recomendam a utilização das argamassas álcali-ativadas como alternativa para reparo estrutural devido à sua baixa retração, quando avaliada por meio da variação dimensional linear. Contudo, a aplicação de tais argamassas no substrato de concreto e com dispositivos concentradores de fissuras no fundo durante a fase plástica, promoveu grande ocorrência de fissuras em tais argamassas. Portanto, é necessária a avaliação microestrutural e química desses materiais para que possam ser descritos os mecanismos que levam a esse comportamento macroestrutural. Ressalta-se também que na ocorrência desse fenômeno há a influência de variáveis tais como o aumento da temperatura, provocado pelas reações químicas de geopolimerização e o gradiente térmico da cura ambiente. A avaliação da ocorrência de fissuras é um fenômeno muito sutil, cuja determinação demanda instrumentos com maior precisão do que os métodos disponíveis nessa pesquisa. Além disso, ainda não foram plenamente estabelecidos os processos envolvidos nas reações de produção dos MAA influenciados pela composição química das formulações que podem ser determinantes na compreensão do fenômeno avaliado.

A adição de 0,25% de fibras curtas (6 mm) de polipropileno nas argamassas estudadas, aplicadas sobre o substrato, não gerou influência considerável na redução da ocorrência de fissuras. Percebeu-se que mesmo para a argamassa com melhor desempenho em relação à densidade de fissuras, a 3.0 80/20, e a menor redução com adição de fibras, a redução foi de apenas 10%. Além disso, o efeito de tal adição foi prejudicial para a argamassa com 20% de metacaulim, havendo um aumento de 2% na densidade de fissuras com a adição de fibras.

Por meio das variações entre a razão agregado/aglomerante (1.5 e 2.5), realização de cura (cura ambiente, cura úmida e cura térmica), área de aplicação (efeito borda) e percentual de fibras (0%, 0,25% e 0,75%), foi possível perceber que as intervenções realizadas individualmente não promovem redução significativa na ocorrência de fissuras. As maiores reduções foram observadas com a combinação de duas ou mais intervenções, chegando-se à redução considerável de 61% em relação à argamassa com razão 1.5, sem fibras e sem cura e de 55% em relação ao graute. Dado o exposto, a análise dos resultados apresentados neste trabalho permite concluir que as argamassas álcali-ativas apresentam comportamento mecânico favorável à utilização como reparo estrutural, assim como sugerem também os resultados encontrados na avaliação dimensional linear. Contudo, quando há restrição de sua movimentação, tais argamassas apresentam alta densidade de fissuras.

A ocorrência de eflorescência nas argamassas estudadas é um fator que necessita ser estudado com maior rigor. Percebe-se que até certo ponto, esse efeito sugere-se como benéfico, atuando no preenchimento dos poros e fissuras. Contudo, as formulações que

experimentaram maior ocorrência desse efeito apresentaram desempenho inferior para a variável densidade de fissuras. Desta forma, conclui-se que as argamassas álcali-ativadas possuem características que as tornam potenciais alternativas à utilização como reparo estrutural, apresentando formulações com densidade de fissuras menor que a do graute de referência e maior resistência mecânica, contudo ainda devem ser realizadas maiores investigações para que possa ser entendido melhor os mecanismos de formação das fissuras e de eflorescência nas argamassas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-GAWWAD, H. A. Effect of Reactive Magnesium Oxide on Properties of Alkali-Activated Slag-Cement Pastes. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 8, p. 37–47, ago. 2014.

ABDOLHOSSEINI Q. *et al.* Evidence on the dual nature of aluminum in the calcium-silicate-hydrates based on atomistic simulations. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 95, n. 3, p. 1128–1137, 2012.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5733 - Cimento Portland – Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro. ABNT, 1991.

_____. **NBR 5738 - Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro. ABNT, 2003b.

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

_____. **NBR 7211 - Agregados para concreto – especificação**. Rio de Janeiro. ABNT, 2009.

_____. **NBR 8522 - Concreto - Determinação do módulo de elasticidade à compressão**. Rio de Janeiro. ABNT, 2008b.

_____. **NBR 12655 - Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento**. Rio de Janeiro. ABNT, 2006.

_____. **NBR 13276 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Preparo da mistura e determinação do índice de consistência**. Rio de Janeiro. ABNT Técnicas, 2002.

_____. **NBR 15261 - Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da variação dimensional (retração ou expansão linear)**. Rio de Janeiro. ABNT, 2005.

_____. **NBR 15575 - Edificações habitacionais – Desempenho**. Rio de Janeiro. ABNT, 2013.

_____. **NBR NM 248 - Composição Granulométrica dos Agregados**. Rio de Janeiro. ABNT, 2003a.

AGUIRRE-GUERRERO, A. M. *et al.* A novel geopolymers application: Coatings to protect reinforced concrete against corrosion. **Applied Clay Science**, v. 135. October, p. 437–446, 2016.

ALVES, J. R. **Levantamento das manifestações patológicas em fundações e estruturas nas edificações, com até dez anos de idade, executadas no estado de Goiás**. Dissertação, Universidade Federal de Goiás, 2009.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary**. American Concrete Institute, 2008.

ARITO, P. A. *et al.* Towards improved cracking resistance in concrete patch repair mortars. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV**, n. 1995, p. 657–662, 2016.

American Society for Testing and Materials. **C1579 - Standard Test Method for Evaluating Plastic Shrinkage Cracking of Restrained Fiber Reinforced Concrete**. ASTM, 2006.

_____. **C1581M-16 - Standard test method for determining age at cracking and induced tensile stress characteristics of mortar and concrete under restrained shrinkage**. American Society for Testing and Materials, 2016.

BAKHAREV, T. *et al.* Alkali activation of Australian slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 1, p. 113–120, 1999.

- BANTHIA, N.; NANDAKUMAR, N. Carbon fiber reinforced concrete in parking garage repair. **Proceedings of the 3rd International Conference on Concrete under Severe Conditions Environment and Loading**. Anais. 2001
- BARICEVIC, M. *et al.* Utilization of polypropylene fibre reinforced cement composites as a repair material: A review. **Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV: Proceedings of the 4th**. 2015.
- BERNAL, S. A. Carbonatación de concretos producidos en sistemas binarios de una escoria siderúrgica y un metacaolín activados alcalinamente. **Escuela de Ingeniería de Materiales**. Tese, Universidad del Valle. Cali, Colombia, 2009.
- BERNAL, S. A. *et al.* Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags. **Cement and Concrete Research**, v. 40, n. 6, p. 898–907, 2010.
- BERNAL, S. A. *et al.* Effect of binder content on the performance of alkali-activated slag concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, p. 1–8, 2011.
- BERNAL, S. A. *et al.* Natural carbonation of aged alkali-activated slag concretes. **Materials and Structures**, v. 47, n. 4, p. 693–707, 2014.
- BERNAL, S. A.; PROVIS, J. L. Durability of alkali-activated materials: Progress and perspectives. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 97, n. 4, p. 997–1008, 2014.
- BHUTTA, A. *et al.* Flexural behavior of geopolymer composites reinforced with steel and polypropylene macro fibers. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 31–40, 2017.
- BJONTEGAARD, O.; SELLEVOLD, E. J. Autogenous and thermal deformations main trondheim. **IPACS - Improved Production of Advanced Concrete Structures**, 2001.
- BORGES, P. H. R. *et al.* Estudo comparativo da análise de ciclo de vida de concretos geopoliméricos e de concretos à base de cimento Portland composto (CP II). **Ambiente Construído**, v. 14, n. 2, p. 153–168, 2014.
- BORGES, P. H. R. *et al.* Performance of blended metakaolin/blast furnace slag alkali-activated mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 71, p. 42–52, 2016.
- BRITISH STANDARD. **EN 12617-4 - Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods**. Bruxelas, 2002.
- CABRAL, A E. B. *et al.* Shrinkage modeling for recycled aggregate concretes produzidos com agregados reciclados. **Ibracon structures and materials journal**, 2010. v. 3, n. 1, p. 1–23.
- CARASEK, H.; CASCUDO, O. Descolamento de revestimentos de argamassa aplicados sobre estruturas de concreto – estudos de casos brasileiros. **APFAC**, 2007.
- CARTWRIGHT, C. *et al.* Shrinkage characteristics of alkali-activated slag cements. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 7, p. 1–9, 2014.
- CASTEL, A.; FOSTER, S. J. Bond strength between blended slag and Class F fly ash geopolymer concrete with steel reinforcement. **Cement and Concrete Research**, v. 72, p. 48–53, 2015.
- CHOI, J.-I. *et al.* Ultra-high-ductile behavior of a polyethylene fiber-reinforced alkali-activated slag-based composite. **Cement and Concrete Composites**, 2016. v. 70, p. 153–158.
- COLLINS, F.; SANJAYAN, J. G. Strength and shrinkage properties of alkali- activated slag concrete containing porous coarse aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 29, n. 5, p. 659–666, 1999.
- CONTROLS GROUP. **Determination of restrained expansion of mortar and concrete. three gang moulds, UNI 8147/UNI 8148**. Disponível em: <<http://www.controls->

group.com/eng/concrete-testing-equipment/determination-of-restrained-expansion-of-mortar-and-concrete-three-gang-moulds.php>. Acesso em: 30 maio. 2017.

CORINALDESI, V. *et al.* Lightweight plasters containing plastic waste for sustainable and energy-efficient building. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 337–345, 2015.

CORINALDESI, V.; NARDINOCCHI, A. Experimental study on cracking behaviour of fiber reinforced concretes by ring test. **Institute of Research Engineers and Doctors**, USA, p. 68–74, 2014.

DAMINELI, B. L. **Conceitos para formulação de concretos com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. Tese, Universidade de São Paulo, 2013.

DAVIDOVITS, J. Properties of geopolymer cements. Joseph Davidovits Geopolymer Institute, Saint-Quentin, France. **Geopolymer Institute**, p. 1–19, 1994.

DURAN ATIŞ, C. *et al.* Influence of activator on the strength and drying shrinkage of alkali-activated slag mortar. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 1, p. 548–555, 2009.

DUXSON, P. *et al.* Geopolymer technology: The current state of the art. **Journal of Materials Science**, v. 42, n. 9, p. 2917–2933, 2007.

FAGURY, S. C. **Concretos e pastas de elevado desempenho: contribuição aos estudos de reparos estruturais e ligações entre concretos novo e velho, com tratamento da zona de interface**. Dissertação, Universidade de São Paulo, 2002.

FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ, A. *et al.* The role played by the reactive alumina content in the alkaline activation of fly ashes. **Microporous and Mesoporous Materials**, v. 91, n. 1–3, p. 111–119, 2006.

FERRAZ, A. L. N. **Avaliação de retração e fluências do concreto auto-adensável para aplicação em elementos pré-moldados**. Tese, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

FILHO, A. A. Q. *et al.* **Sumário Mineral**. Cimento: ISSN 0101 2053. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, 2015.

FREITAS, C. **Estudo do desempenho mecânico de concreto com adição de partículas de borracha para aplicação como material de reparo em superfícies hidráulicas**. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, 2007.

GANESAN, N. *et al.* Durability characteristics of steel fibre reinforced geopolymer concrete. **Construction and Building Materials**, v. 93, p. 471–476, 2015.

GAO, Y. *et al.* Experiment research on mix design and early mechanical performance of alkali-activated slag using response surface methodology (RSM). **Ceramics International**, v. 42, n. 10, p. 11666–11673, 2016.

GARCÍA-LODEIRO, I. *et al.* Alkali-aggregate reaction in activated fly ash systems. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 2, p. 175–183, 2007.

GARTNER, E. M.; MACPHEE, D. E. A physico-chemical basis for novel cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 736–749, 2011.

GERALDO, R. H. **Aglomerante álcali-ativado contendo lodo de eta e cinza de casca de arroz**. Dissertação, Universidade Estadual de Campinas, 2016.

GERALDO, R. H. *et al.* Alkali-activated binder containing wastes: a study with rice husk ash and red ceramic. **Cerâmica**, v. 63, n. 365, p. 44–51, 2017.

GOMES, C. E. M. Alternative binder for fibercement building materials. **Advanced Materials Research**, v. 753–755, p. 616–622, 2013.

GONDIM, F. L. **Estudo da interface entre o concreto e o material de reparo mediante microscopia**. Dissertação, Universidade Federal de Uberlândia, 2005.

- GUPTA, R. **Development, application and early-age monitoring of fiber-reinforced “crack-free” cement-based overlays**. Thesis, University of British Columbia, 2008.
- HABERT, G. *et al.* An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current research trends. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 11, p. 1229–1238, 2011.
- HE, J. *et al.* Resistance of alkali-activated slag mortars to carbonation. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 216–224, 2001.
- HEARD, W. F. *et al.* Material characterization of fiber reinforced concrete for improved blast performance. Anais. **Structures Congress**, 2011.
- HEATH, A. *et al.* The potential for using geopolymer concrete in the UK. **Construction Materials**, v. 166, n. CM4, p. 195–203, 2013.
- HELENE, P. A nova NB 1/2003 (NBR 6118) e a vida útil das estruturas de concreto. **II Seminário de patologia das edificações do Leme / UFRGS**. Anais. Porto Alegre: 2004
- HERWEGH, M. *et al.* Hygrical shrinkage stresses in tiling systems: Numerical modeling combined with field studies. **Cement and Concrete Composites**, v. 55, p. 1–10, 2015.
- HU, S. *et al.* Bonding and abrasion resistance of geopolymeric repair material made with steel slag. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 3, p. 239–244, 2008.
- HUSEIEN, G. F. *et al.* Effect of metakaolin replaced granulated blast furnace slag on fresh and early strength properties of geopolymer mortar. **Ain Shams Engineering Journal**, 2016.
- ITALIAN STANDARDS. **EN UNI 8147 - Not Metallic Expansive Agents For Cement Mixings - Determination Of Restrained Expansion Of Mortar**, 2008.
- JET MATERIALS. Length comparator, digital – **Jet Materials**. Disponível em: <<http://jetmaterials.com/shop/length-comparators/length-comparator-digital/>>. Acesso em: 30 maio. 2017.
- JUENGER, M. C. G. *et al.* Advances in alternative cementitious binders. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 12, p. 1232–1243, 2011.
- KOMNITSAS, K. A. Potential of geopolymer technology towards green buildings and sustainable cities. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 1023–1032, 2011.
- KOMNITSAS, K.; ZAHARAKI, D. Geopolymerisation: a review and prospects for the minerals industry. **Minerals Engineering**, v. 20, n. 14, p. 1261–1277, 2007.
- KONOFAL, W. U. *et al.* **Estudo da trabalhabilidade em argamassas e concretos com utilização de RCD**. Encontro de engenharia e tecnologia dos Campos Gerais, 2013.
- KORMANN, A. C. M. *et al.* Study of the performance of four repairing material systems for hydraulic structures of concrete dams. **Cerâmica**, v. 49, p. 48–54, 2003.
- KRIZAN, D.; ZIVANOVIC, B. Effects of dosage and modulus of water glass on early hydration of alkali-slag cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1181–1188, 2002.
- KUENZEL, C. *et al.* Influence of sand on the mechanical properties of metakaolin geopolymers. **Construction and Building Materials**, v. 66, p. 442–446, 2014.
- KURTZ, S.; BALAGURU, P. Comparison of inorganic and organic matrices for strengthening of rc beams with carbon sheets. **Structural Engineering**, v. 127, n. 2002, p. 35–42, 2009.
- LAMBRECHTS, A. steel-and synthetic fibre reinforced concrete which fibre to use for which application and why? **Dramix**, 2009.
- LEE, N. K. *et al.* Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages. **Cement and Concrete Composites**, v. 53, p. 239–248, 2014.

- LEE, W. K. W.; VAN DEVENTER, J. S. J. The effect of ionic contaminants on the early-age properties of alkali-activated fly ash-based cements. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 4, p. 577–584, 2002.
- MACCAFERRI. **FibroMac - Características técnicas das fibras de reforço do concreto**, 2008.
- MARANAN, G. *et al.* Bond Stress-Slip Behavior : Case of GFRP Bars in Geopolymer Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 27, n. 1988, p. 1–9, 2015.
- MAUROUX, T. *et al.* Study of cracking due to drying in coating mortars by digital image correlation. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 7, p. 1014–1023, 2012.
- MAZZA, S. C. **Estudo das propriedades mecânicas e da aderência do sistema argamassa de reparo com cimento geopolimérico/substrato de concreto com cimento Portland**. Dissertação, Universidade Federal da Bahia, 2010.
- MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. Tese, Universidade de São Paulo, 2008.
- MELO NETO, A. A. *et al.* Drying and autogenous shrinkage of pastes and mortars with activated slag cement. **Cement and Concrete Research**, v. 38, n. 4, p. 565–574, 2008.
- MENON, N. V. **Estudo experimental de sistemas de reforço ao cisalhamento em vigas de concreto armado utilizando-se polímero reforçado com fibras de carbono (PRFC)**. Tese, Universidade Federal de Santa Catarina, 2008.
- MIRANDA, J. M. *et al.* Corrosion resistance in activated fly ash mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 6, p. 1210–1217, 2005.
- MOBILI, A. *et al.* Metakaolin and fly ash alkali-activated mortars compared with cementitious mortars at the same strength class. **Cement and Concrete Research**, v. 88, p. 198–210, 2016.
- MONTEIRO, R. DOS S. **Estudo da influência de diferentes composições de agregados na obtenção e caracterização do concreto autoadensável**. Dissertação, Universidade Federal de Alagoas, 2015.
- MOREIRA, K. A. W. **Estudo Das Manifestações Patológicas Na Produção De Pré-Fabricados De Concreto**. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2009.
- NATALI, A. *et al.* Novel fiber-reinforced composite materials based on sustainable geopolymer matrix. **Procedia Engineering**, v. 21, p. 1124–1131, 2011.
- NAZARI, A. *et al.* Properties of geopolymer with seeded fly ash and rice husk bark ash. **Materials Science & Engineering**, v. 528, n. 24, p. 7395–7401, 2011.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5a ed. Porto Alegre: Bookman Editora, 2016.
- PACHECO-TORGAL, F. Tungsten mine waste geopolymeric binder : Preliminary hydration products investigations. **Construction and Building Materials**. v. 23, p. 200–209, 2009.
- PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Are geopolymers more suitable than Portland cement to produce high volume recycled aggregates HPC? **Construction and Building Materials**, v. 36, p. 1048–1052, 2012.
- PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Alkali-activated binders: A review. Part 2. About materials and binders manufacture. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 7, p. 1315–1322, 2008a.
- PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Bond Strength Between Concrete Substrate And Repair Materials. Comparisons Between Tungsten Mine Waste Geopolymeric Binder Versus Current Commercial Repair. **Seventh International Congress on Advances in Civil Engineering**. Anais. Istanbul: 2006

- PACHECO-TORGAL, F. *et al.* Adhesion characterization of tungsten mine waste geopolymeric binder. Influence of OPC concrete substrate surface treatment. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 3, p. 154–161, 2008b.
- PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Effect of carbonation on alkali-activated slag paste. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 89, n. 10, p. 3211–3221, 2006.
- PALACIOS, M.; PUERTAS, F. Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 37, n. 5, p. 691–702, 2007.
- PAULA, A. *et al.* A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. Porto Aleg: **Ambiente Construído**, 2010. n. 1, p. 167–176.
- PEÇANHA, E. **Estudo sobre retração, permeabilidade, porosidade, resistência à compressão e módulo de elasticidade do concreto geopolimérico**. Dissertação, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2012.
- PRETTO, M. E. J. **Influência da rugosidade gerada pelo tratamento superficial do substrato de concreto na aderência do revestimento de argamassa**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande, 2010.
- PROVIS, J. J. L. *et al.* Advances in understanding alkali-activated materials. **Cement and Concrete Research**, v. 78, p. 110–125, 2015.
- PROVIS, J. L. *et al.* Correlating mechanical and thermal properties of sodium silicate-fly ash geopolymers. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 336, n. 1–3, p. 57–63, 2009.
- PROVIS, J. L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? **Materials and Structures**, v. 47, p. 11–25, 2014.
- PROVIS, J. L.; BERNAL, S. A. Geopolymers and Related Alkali-Activated Materials. **Annual Review of Materials Research**, p. in press, DOI 10.1146/annurev-matsci-070813-113515, 2014.
- PROVIS, J. L. *et al.* The role of particle technology in developing sustainable construction materials. **Advanced Powder Technology**, v. 21, n. 1, p. 2–7, 2010.
- PROVIS, J. L. *et al.* Do geopolymers actually contain nanocrystalline zeolites? A reexamination of existing results. **Chemistry of Materials**, v. 17, n. 12, p. 3075–3085, 2005.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymerisation kinetics. 2. Reaction kinetic modelling. **Chemical Engineering Science**, v. 62, n. 9, p. 2318–2329, 2007.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Geopolymers. Structures, Processing, Properties and Industrial Applications. **Elsevier**, 2009.
- PROVIS, J. L.; VAN DEVENTER, J. S. J. Alkali activated materials. **Springer Netherlands**, 2014.
- PUERTAS, F. *et al.* Mechanical and durable behaviour of alkaline cement mortars reinforced with polypropylene fibres. **Cement and Concrete Research**. v. 33, n. 12, p. 2031–2036, 2003.
- PUERTAS, F. *et al.* A model for the C-A-S-H gel formed in alkali-activated slag cements. **Journal of the European Ceramic Society**, v. 31, n. 12, p. 2043–2056, 2011.
- PUERTAS, F. *et al.* Carbonation process of alkali-activated slag mortars. **Journal of Materials Science**, v. 41, n. 10, p. 3071–3082, 2006.
- PUERTAS, F.; TORRES-CARRASCO, M. Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 95–104, 2014.

- RAHMANI, T. *et al.* Application of different fibers to reduce plastic shrinkage cracking of concrete. **RILEM Bookseries**, v. 4, n. July, 2012.
- RASHAD, A. M. Alkali-activated metakaolin: A short guide for civil Engineer – An overview. **Construction and Building Materials**, v. 41, p. 751–765, 2013.
- RATU, R. N. **Development of polypropylene fiber as concrete reinforcing fiber**. 2016. Thesis, University of British Columbia.
- RIBEIRO, D. *et al.* **Corrosão em estruturas de concreto armado: Teoria, controle e métodos de análise**. Elsevier Brasil, 2015.
- RIDTIRUD, C. *et al.* Factors affecting the shrinkage of fly ash geopolymers. **International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials**, v. 18, n. 1, p. 100–104, 2011.
- SHI, C. *et al.* New cements for the 21st century: The pursuit of an alternative to Portland cement. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 7, p. 750–763, 2011.
- SIDDIQUE, R.; KLAUS, J. Influence of metakaolin on the properties of mortar and concrete: A review. **Applied Clay Science**, v. 43, n. 3–4, p. 392–400, 2009.
- SIERRA-BELTRAN, M. G. *et al.* Characterization of sustainable bio-based mortar for concrete repair. **Construction and Building Materials**, v. 67, n. PART C, p. 344–352, 2014.
- SILVA, F. G. **Estudo de concretos de alto desempenho frente à ação de cloretos**. Tese: Universidade de São Paulo, 2006.
- SILVA, T. J.; MONTEIRO, N. F. Evaluation method for safety conditions of buildings during the structural repair of columns a recuperação estrutural dos pilares. **Revista IBRACON de estruturas e materiais**. v. 3, n. 1, p. 95–115, 2010.
- SILVA JR., J. Z. R.; HELENE, P. **Boletim técnico da Escola Politécnica da USP - Departamento de Engenharia de Construção Civil - Argamassa de Reparo**. São Paulo, 2001.
- SIVAKUMAR, A.; SANTHANAM, M. A quantitative study on the plastic shrinkage cracking in high strength hybrid fibre reinforced concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 7, p. 575–581, 2007.
- STOLZ, C. M. *et al.* **Influência da interação entre os parâmetros reológicos de argamassas e a área potencial de contato de substratos na aderência de argamassas de revestimento**. Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.
- STRUBLE, L.; KIM, E.; GÓMEZ-ZAMORANO, L. Overview of geopolymer cement. **Geopolymer Binder Systems**, v. 1566 STP, p. 1–10, 2013.
- SU, H. *et al.* Mechanical properties of ceramic fiber-reinforced concrete under quasi-static and dynamic compression. **Materials & Design**, v. 57, p. 426–434, 2014.
- TEMP, A. L. **Avaliação de revestimentos de argamassa à permeabilidade ao vapor de água**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria, 2014.
- THOMAS, R. J. *et al.* On drying shrinkage in alkali-activated concrete: Improving dimensional stability by aging or heat-curing. **Cement and Concrete Research**, v. 91, p. 13–23, 2017.
- TOLEDO FILHO, R. D. *et al.* Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 5, p. 537–546, 2005.
- TORRI, E. K. Otimização granular para reduzir o volume de pasta mantendo mesma trabalhabilidade – **Concreto de alto desempenho. XXVI Salão UFRGS 2014**. Anais. Rio Grande do Sul: 2014
- TOUTANJI, H. *et al.* Flexural behavior of reinforced concrete beams externally strengthened with CFRP sheets bonded with an inorganic matrix. **Engineering Structures**, v. 28, n. 4, p. 557–566, 2006.

- TRIGO, A. P. M. *et al.* A técnica de dopagem no tratamento da zona de interface: ligações entre concreto novo e velho. **Ambiente Construído**, n. 1, p. 167–176, 2010.
- UENG, T. H. *et al.* Adhesion at interface of geopolymer and cement mortar under compression: An experimental study. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 204–210, 2012.
- VAN DEVENTER, J. S. J. *et al.* Technical and commercial progress in the adoption of geopolymer cement. **Minerals Engineering**, v. 29, p. 89–104, 2012.
- VASCONCELOS, E. *et al.* Concrete retrofitting using metakaolin geopolymer mortars and CFRP. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 8, p. 3213–3221, 2011.
- WANG, H. *et al.* Reduction in wear of metakaolinite-based geopolymer composite through filling of PTFE. **Wear**, v. 258, n. 10, p. 1562–1566, 2005.
- WAZIEN, A. Z. W. *et al.* Review on Potential of Geopolymer for Concrete Repair and Rehabilitation. **MATEC Web of Conferences**. Anais.2016
- YE, H. *et al.* Understanding the drying shrinkage performance of alkali-activated slag mortars. **Cement and Concrete Composites**, v. 76, p. 13–24, 2017.
- YIP, C. K. *et al.* The coexistence of geopolymeric gel and calcium silicate hydrate at the early stage of alkaline activation. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 9, p. 1688–1697, 2005.
- ZAMBOTTO, D. **Estudo preliminar dos efeitos da reação álcali-agregado nas respostas estruturais de reação álcali-agregado nas respostas estruturais de pavimentos de concreto**. Dissertação: Universidade Camilo Castelo Branco, 2014.
- ZANOTTI, C. *et al.* **Bond Strength of Pva Fiber Reinforced Geopolymer Repair To Portland Cement**. v. 1, n. 604, p. 90–100, 2016.
- ZANOTTI, C. *et al.* Bond strength between concrete substrate and metakaolin geopolymer repair mortar: Effect of curing regime and PVA fiber reinforcement. **Cement and Concrete Composites**, v. 80, p. 307–316, 2017.
- ZANOTTI, C. *et al.* Towards sustainable repairs : substrate-repair interface mode-I fracture analysis Cristina. Int. J. Sustainable **Materials and Structural Systems**, v. 1, n. 3, p. 265–281, 2014.
- ZHANG, H. Y. *et al.* Characterizing the bond strength of geopolymers at ambient and elevated temperatures. **Cement and Concrete Composites**, v. 58, p. 40–49, 2015.
- ZHANG, Z. *et al.* The reactivity of fly ash in geopolymer synthesis: a qualification study by FTIR. **Proceedings of the 8th Asian-Australasian Conference on Composite Materials 2012 (ACCM 8)**, n. November, p. 6–8, 2012.
- ZHANG, Z. *et al.* Potential application of geopolymers as protection coatings for marine concrete III. Field experiment. **Applied Clay Science**, v. 67–68, n. 1–2, p. 57–60, 2012.



PPGEC – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av Amazonas, 7675, Belo Horizonte-MG
www.civil.cefetmg.br/mestrado