

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

IAN CÉSAR AMOS ESTEVES

EFEITO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA NA DURABILIDADE DE
CONCRETOS CONVENCIONAIS FISSURADOS

CURITIBA

2019

IAN CÉSAR AMOS ESTEVES

EFEITO DA AUTOCICATRIZAÇÃO AUTÓGENA NA DURABILIDADE DE
CONCRETOS CONVENCIONAIS FISSURADOS

Dissertação entregue como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Construção Civil pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, da Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Ronaldo Alves de Medeiros Junior

CURITIBA

2019

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

E79e

Esteves, Ian César Amos

Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade de concretos convencionais fissurados [recurso eletrônico] / Ian César Amos Esteves . – Curitiba, 2019.

Dissertação – Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós – Graduação em Engenharia de Construção Civil, 2019.

Orientador: Ronaldo Alves de Medeiros Junior.

1. Concreto armado. 2. Concreto – Deterioração. 3. Cimento Portland. I. Universidade Federal do Paraná. II. Medeiros Junior, Ronaldo Alves de. III. Título.

CDD: 620.136

Bibliotecária: Vanusa Maciel CRB- 9/1928



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
CONSTRUÇÃO CIVIL - 40001016049P2

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE CONSTRUÇÃO CIVIL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **IAN CÉSAR AMOS ESTEVES** intitulada: **Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade de concretos convencionais fissurados**, sob orientação do Prof. Dr. RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR, que após terem inquirido o aluno e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 16 de Agosto de 2019.

RONALDO ALVES DE MEDEIROS JUNIOR

Presidente da Banca Examinadora (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

LAILA VALDUGA ARTIGAS

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

RICARDO PIERALISI

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

MARCELO HENRIQUE FARIAS DE MEDEIROS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

“Só existe saber na invenção, na reinvenção, na busca inquieta, impaciente, permanente, que os seres humanos fazem do mundo, com o mundo e com os outros. Busca esperançosa também.”

Paulo Freire, patrono da Educação Brasileira

A Márcia, Paulo, Igor e Milena.
À dádiva imensa de compartilhar,
de longe ou de perto, esta vida com eles.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é apresentado em um momento em que as Universidades Públicas Brasileiras e seus membros vêm sendo constantemente agredidas por parte da população, nas redes sociais e nos discursos de algumas autoridades. Diante desse contexto, tenho o dever de expressar minha gratidão, primeiramente como cidadão brasileiro, às Universidades Públicas, seus bons professores, funcionários e estudantes, pelo empenho em produzir quase todo o conhecimento científico nacional, por proporcionarem espaço aberto ao compartilhamento de opiniões, ideias e talentos, essenciais para a formação de uma nação soberana e socialmente desenvolvida. Além disso, agradeço como estudante e pesquisador, uma vez que dentro de uma Universidade Pública cresci como engenheiro civil, acadêmico e indivíduo. É válido lembrar também que todos os trabalhos brasileiros citados nesta dissertação foram desenvolvidos por membros de Universidades Públicas.

Sou grato às Trabalhadoras e aos Trabalhadores brasileiros, que, mesmo de forma involuntária, com seu trabalho e contribuição, financiam a educação básica e superior brasileiras e, desta forma, proporcionaram a mim e a tantos outros a oportunidade de aprender, fazer pesquisa e ensinar. A estas e estes devo meu comprometimento na construção de uma sociedade mais justa, responsável e inclusiva.

Agradeço a Deus, a força maior, por ter me cercado de pessoas incentivadoras e por ter me capacitado a buscar e concretizar meus objetivos.

Agradeço a meu orientador, Ronaldo, pela dedicação, paciência e contribuição constante não só no desenvolvimento desta pesquisa, mas também nas minhas atividades ao longo do mestrado.

Agradeço às graduandas Letícia, Mayara e Heloísa, que contribuíram nesta pesquisa em seus trabalhos de conclusão de curso e de iniciação científica nas atividades de laboratório e enriqueceram este trabalho com suas sugestões e questionamentos.

Expresso minha gratidão aos colegas e amigos de mestrado José Roberto, Sabrina e Gabriela cuja companhia e colaboração foram fundamentais ao desenvolvimento desta dissertação. Pelo mesmo motivo agradeço outros colegas graduandos e pós-graduandos que por algum momento ajudaram nas atividades de laboratório.

Sou imensamente grato a meus familiares e amigos que, cada um à sua maneira, me apoiaram ao longo da trajetória que trilhei até o desenvolvimento deste trabalho. Destaco aqui meus pais, exemplos e apoio de toda a vida; meu irmão, amigo e companhia de todas as horas e minhas avós Lourdes e Thereza e em memória de meus avôs Francisco e Adão, cujos ensinamentos são essenciais na minha formação.

A minha noiva, Milena, sempre companheira, paciente, disposta a ouvir e tornar os momentos mais leves.

Agradeço também aos técnicos de laboratório, às funcionárias e funcionários do CESEC que muitas vezes ajudaram para as atividades. Destaco aqui o auxílio do técnico Ricardo Volert pela contribuição no desenvolvimento de alguns procedimentos usados neste trabalho.

Agradeço à Itambé pelos cimentos doados para o desenvolvimento desta pesquisa.

Agradeço à CAPES pela bolsa cedida ao longo do mestrado e ao CNPq e à Fundação Araucária por terem cedido à Universidade alguns dos equipamentos empregados no programa experimental proposto.

RESUMO

O concreto é um dos materiais mais consumidos no mundo, uma vez que oferece boa resistência à compressão com alta viabilidade econômica e técnica. Contudo, quando submetido à tração, esse material apresenta desempenho limitado, sendo sua resistência a essa solicitação até mesmo desconsiderada em cálculos estruturais. Portanto, as estruturas compostas de concreto estão suscetíveis à fissuração, o que contribui para o ingresso e transporte de agentes deletérios, podendo comprometer sua durabilidade. Já no final do século XIX, notou-se a capacidade de selagem natural das fissuras de estruturas de contenção e condução de água, o que viria ser posteriormente chamado de autocicatrização autógena. Atualmente, esse fenômeno, seus mecanismos e os fatores que influem sobre ele vêm sendo amplamente estudados e discutidos, favorecendo o desenvolvimento de concretos e compósitos cimentícios de alta capacidade de recuperação própria de regiões fissuradas. Diante disso, pergunta-se, observando-se condições de dosagem propícias, se os concretos convencionais produzidos com cimentos disponíveis no mercado, quando fissurados, podem também ter sua durabilidade beneficiada pela ocorrência de autocicatrização. Este trabalho tem como objetivo explorar a autocicatrização e seus efeitos sobre a durabilidade de concretos fissurados, analisando a influência do tipo de cimento empregado na produção e também da idade do concreto no momento da ocorrência da fissuração. Para isto, corpos de prova de concreto produzidos com cimentos CP V ARI, CP II Z e CP IV (que têm diferentes teores de cinzas volantes) foram submetidos à fissuração aos 7 dias e aos 28 dias. Posteriormente, séries de ensaios foram realizada no dia da fissuração e depois de 28 dias e 84 dias em ciclos de molhagem e secagem, para estimular os mecanismos de autocicatrização. Os ensaios realizados visaram a observação da resistência à compressão, absorção por imersão, profundidade de carbonatação acelerada e carga passante e profundidade atingida por cloretos através do ensaio de migração rápida. Os resultados obtidos demonstraram efeitos mais pronunciados da autocicatrização para concretos contendo cinzas volantes quando o parâmetro analisado está mais voltado à massa de concreto interior dos corpos de prova (velocidade de ultrassom, absorção e resistência ao ingresso de cloretos). Tratando-se dos efeitos da autocicatrização sobre a resistência à carbonatação, notou-se melhora no desempenho para concretos contendo cimento sem substituições. Relativo à idade, observou-se que, no geral, para a fissuração gerada aos sete dias há melhor eficiência do que quando a mesma é gerada aos 28 dias. Sendo assim, a ocorrência da autocicatrização é totalmente dependente do estágio da hidratação do concreto, uma vez que o mecanismo principal é a hidratação de partículas anidras recém expostas pela fissuração. Quando trata-se de autocicatrização na superfície do concreto, os efeitos parecem ser mais potencializados por um outro mecanismo: a colmatação das fissuras por precipitação de carbonatos em suas paredes.

Palavras-chave: Concreto fissurado. Autocicatrização autógena. Durabilidade. Cinzas volantes.

ABSTRACT

Concrete is one of the most produced materials in the world because it offers good compressive strength with high economic and technical viability. However, when subjected to tension, this material presents limited performance, and its tensile strength is even ignored in structural designs. Therefore, concrete structures are susceptible to cracking, contributing to the penetration and transport of deleterious agents, which may compromise their durability. At the end of the nineteenth century, a natural sealing capacity of cracks in concrete dams and pipes was noted, what would later be called autogenous self-healing. Nowadays, this phenomenon, its mechanisms and its intervening factors have been widely studied and discussed, favouring the development of concretes and cementitious composites with high recovery capacity of cracked regions. In view of this, it is asked whether the conventional concretes produced with cements available in the market, observing propitious mix proportions, may also have their durability benefited by the occurrence of self-healing. This work aims to explore conventional concrete self-healing and its effects on durability, analysing the influence of cement type and concrete age at the time of cracking. For this, concrete specimens produced with CP V ARI, CP II Z and CP IV cements (which have different fly ash contents) were cracked by compression at 7 days and at 28 days. Subsequently, series of tests were performed on the day of cracking and after 28 days and 84 days under wetting and drying cycles, to stimulate self-healing mechanisms. Tests were carried out to obtain the compressive strength, water absorption, rapid chlorides permeability, chloride depth after migration test and carbonation depth under accelerated conditions. The results obtained demonstrate the beneficial effects of self-healing on concrete containing fly ash when the analysed parameter is more focused on the concrete bulk of the test specimens (ultrasonic velocity, absorption and resistance to chloride ingress). About the effects of self-healing on the carbonation resistance, it was noticed a more significant improvement in performance for concrete containing cement without substitutions. Regarding age, it was observed that, in general, for the cracking generated at seven days there is better efficiency than when it is generated at 28 days. Thus, the occurrence of self-healing is totally dependent on the hydration stage of the concrete, since the main mechanism is the hydration of anhydrous particles exposed by cracking. When self-healing is observed on the surface of the concrete, the effects seem to be more potentiated by another mechanism: the clogging of cracks by precipitation of carbonates in their walls.

Key-words: Cracked concrete. Autogenous self-healing. Durability. Fly ash.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – VELOCIDADE DE CORROSÃO PARA CONCRETO COM CIMENTO PORTLAND E RELAÇÃO A/C 0,40	18
FIGURA 2 – PERFIL LONGITUDINAL DE CARBONATAÇÃO PARA VIGA SUBMETIDA À FLEXÃO E À CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	20
FIGURA 3 – PORCENTAGEM DE FISSURAS FECHADAS DE ACORDO COM A ESPESSURA	24
FIGURA 4 – RESULTADOS DE RCPT DE SAHMARAN, YILDIRIM E ERDEM (2013)	27
FIGURA 5 – INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C NA QUANTIDADE DE PARTÍCULAS NÃO HIDRATADAS	31
FIGURA 6 – FISSURAS APÓS 28 DIAS EM EXPOSIÇÃO AO AR EM (a) E À ÁGUA EM (b)	32
FIGURA 7 – FATORES PARA ATENDIMENTO AO PRIMEIRO OBJETIVO.....	40
FIGURA 8 – FATORES PARA ATENDIMENTO AO SEGUNDO OBJETIVO	41
FIGURA 9 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO.....	43
FIGURA 10 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO	44
FIGURA 11 – RESULTADOS DO TESTE PARA (a) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E (b) ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS	47
FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE DATAS DE ENSAIO	48
FIGURA 13 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE VELOCIDADE DE ONDAS ULTRASSÔNICAS	49
FIGURA 14 – PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO.....	51
FIGURA 15 – DIVISÃO DO CORPO DE PROVA EM DISCOS	52
FIGURA 16 – REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE RCPT	52
FIGURA 17 – REPRESENTAÇÕES DO ENSAIO DE COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA.....	54
FIGURA 18 – VU PARA GRUPOS VA07	56
FIGURA 19 – VU PARA GRUPOS IV07	56
FIGURA 20 – VU PARA GRUPOS VA28.....	57
FIGURA 21 – VU PARA GRUPOS II28.....	57

FIGURA 22 – VU PARA GRUPOS IV28	57
FIGURA 23 – REDUÇÃO APÓS FISSURAÇÃO NO DIA 0	59
FIGURA 24 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	61
FIGURA 25 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NÃO FISSURADO	62
FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA GRUPOS F E N	62
FIGURA 27 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA ENTRE DIA 0 E DIA 84	63
FIGURA 28 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO	64
FIGURA 29 – ABSORÇÃO POR IMERSÃO DO CONCRETO NÃO FISSURADO ...	65
FIGURA 30 – ABSORÇÃO PARA GRUPOS NÃO FISSURADOS E FISSURADOS NO DIA 0	66
FIGURA 31 – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO PARA GRUPOS F E N	67
FIGURA 32 – REDUÇÃO DA ABSORÇÃO ENTRE DIA 0 E DIA 84	68
FIGURA 33 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (EXPOSIÇÃO DE 90 DIAS A $5,0\pm0,5\%$ DE CO_2 , UMIDADE RELATIVA DE $60\pm5\%$, TEMPERATURA DE $30\pm2^\circ C$)	69
FIGURA 34 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO NÃO FISSURADO	70
FIGURA 35 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA GRUPOS FISSURADOS E NÃO FISSURADOS NO DIA 0	71
FIGURA 36 – FASES DO COMPORTAMENTO DO CILINDRO DE CONCRETO COM O AUMENTO DO CARREGAMENTO DE COMPRESSÃO	71
FIGURA 37 – COMPARAÇÃO DA CARBONATAÇÃO NO DIA 0 E NO DIA 84 PARA GRUPOS F E N	72
FIGURA 38 – REDUÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO OBTIDA A PARTIR DO DIA 0 E A PARTIR DO DIA 84	73
FIGURA 39 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DO ENSAIO DE RCPT	74
FIGURA 40 – CARGA PASSANTE NO CONCRETO NÃO FISSURADO	75
FIGURA 41 – CARGA PASSANTE PARA GRUPOS FISSURADOS E NÃO FISSURADOS NO DIA 0	76

FIGURA 42 – COMPARAÇÃO DA CARGA PASSANTE NO DIA 0 E NO DIA 84 PARA GRUPOS F E N	78
FIGURA 43 – REDUÇÃO DA CARGA PASSANTE ENTRE DIA 0 E 84	79
FIGURA 44 – MÉDIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COLORIMETRIA PARA CLORETOS	80
FIGURA 45 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE RESULTADOS DE RCPT E DE ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA	80
FIGURA 47 – PROFUNDIDADE DE CLORETOS NO CONCRETO NÃO FISSURADO	81
FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE ATINGIDA POR CLORETOS NO DIA 0 E NO DIA 84 PARA GRUPOS F E N	82
FIGURA 48 – REDUÇÃO DA PROFUNDIDADE ENTRE O DIA 0 E O DIA 84	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – SUMÁRIO DE TRABALHOS CITADOS NA SEÇÃO 3	34
TABELA 2 – GRUPOS DE COMBINAÇÕES DOS FATORES DE CONTROLE	42
TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS CIMENTOS EMPREGADOS	42
TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO	43
TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO	44
TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS	45
TABELA 7 – PENETRABILIDADE DE CLORETOS DE ACORDO COM A CARGA PASSANTE	53
TABELA 8 – QUADRO-RESUMO DE ENSAIOS E CORPOS DE PROVA	55
TABELA 9 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS	83

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	JUSTIFICATIVA.....	10
1.2	OBJETIVOS	12
1.3	ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	12
2	FISSURAÇÃO DO CONCRETO	13
2.1	COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO E FISSURAÇÃO	14
2.2	DURABILIDADE DO CONCRETO FISSURADO.....	15
3	AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO	22
3.1	INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO	23
3.2	INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS COMPONENTES	26
3.2.1	Aglomerantes e adições minerais.....	26
3.2.2	Relação água/aglomerante.....	30
3.3	INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO	31
3.4	ANÁLISE GERAL DE BIBLIOGRAFIA APRESENTADA.....	33
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
4.1	PARÂMETROS EXPERIMENTAIS.....	38
4.2	MATERIAIS	42
4.3	MÉTODO	45
4.3.1	Moldagem dos corpos de prova	45
4.3.2	Indução de fissuração.....	45
4.3.3	Tratamento pós-fissuração	46
4.3.4	Ensaios.....	47
4.3.5	Análise Estatística	55
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1	PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS	56
5.2	RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.....	61
5.3	ABSORÇÃO POR IMERSÃO	64
5.4	CARBONATAÇÃO ACELERADA.....	68
5.5	MIGRAÇÃO RÁPIDA DE CLORETOS	73
5.6	PROFUNDIDADE DE INGRESSO DE CLORETOS.....	79
5.7	ANÁLISE GERAL	82
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86

6.1	CONCLUSÕES.....	86
6.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	87
	REFERÊNCIAS.....	89

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, a durabilidade passou a ser objeto de atenção na tomada de decisão de projetistas de estruturas de concreto armado, assim como as propriedades mecânicas dos materiais empregados e o custo inicial de um empreendimento. Isto pode ser entendido como consequência da maior percepção das implicações socioeconômicas que permeiam a durabilidade das estruturas, uma vez que os custos e impactos de reparo e substituição passaram a ser contabilizados no custo total de uma obra (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

Avanços substanciais acerca da durabilidade das estruturas em concreto armado foram observados nas últimas três décadas. A causa principal para isso é o aprofundamento do conhecimento acerca da interação de líquidos e gases agressivos com os meios porosos. Por isso, tornou-se possível o desenvolvimento de modelos matemáticos que pudessem prever e quantificar a deterioração em função do tempo, associando mecanismos de transporte, ambiente, material e demais fatores influentes (MEDEIROS, ANDRADE e HELENE, 2011).

Neville (2015) destaca a relação entre durabilidade e a facilidade de ingresso e transporte de fluidos no interior do concreto, sendo a água, o gás carbônico e o oxigênio os mais relevantes. A movimentação desses fluidos através do concreto é diretamente influenciada pelo volume, configuração e interconectividade dos poros da pasta de cimento. Assim sendo, pode-se afirmar que a fissuração do concreto, ao contribuir com a interconectividade dos poros e aumentar a área de contato dos fluidos com a massa de material, tem papel fundamental na durabilidade das estruturas em concreto, devendo então ser inibida.

Nas últimas décadas, notou-se a propriedade intrínseca ao concreto de recuperar sua continuidade comprometida pela fissuração através da chamada autocicatrização autógena. Esse fenômeno consiste na hidratação de partículas anidras do concreto a partir do ingresso de água pelas fissuras recém-formadas, ou mesmo da formação de carbonatos a partir do ingresso de gás carbônico. A potencialização de tal característica tornou-se objeto de pesquisas, desenvolvendo-se também métodos de autocicatrização autônoma, com a inclusão de microcápsulas e outros materiais contendo agentes cicatrizantes (REPETTE, 2011).

Diversos trabalhos apresentam melhoria em parâmetros diretamente ligados a durabilidade de compósitos cimentícios fissurados por autocicatrização, atribuída a

inclusão de materiais suplementares como a escória de alto forno e as cinzas volantes, as quais são comumente adicionados ao cimento comercialmente disponível no Brasil. Diante do exposto, pergunta-se se os concretos convencionais produzidos com tais cimentos, quando fissurados, podem também ter sua durabilidade beneficiada pela ocorrência de autocicatrização. Neste trabalho, entende-se como convencional o concreto sem inclusão de fibras, aditivos ou adições cristalizantes, comumente empregados em pesquisas sobre concretos autocicatrizantes. Contudo, visando potencializar a autocicatrização, condições de dosagem favoráveis à sua ocorrência foram adotadas nesta pesquisa como elevado consumo de aglomerantes e baixo relação água/cimento.

1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista a contribuição da fissuração do concreto na redução da vida útil das estruturas em concreto armado, fazem-se importantes os estudos na mitigação dessas falhas. Neste contexto, este trabalho mostra-se relevante nas estratégias de redução dos impactos econômicos, ambientais e sociais ocasionados por limitações à durabilidade do concreto ao contribuir com os estudos acerca de concretos autocicatrizantes, ou seja, concretos com capacidade de recompor sua continuidade e estanqueidade, prejudicadas pela fissuração. Além disso, busca-se a partir do material empregado nesta pesquisa, obter resultados mais representativos em relação ao concreto de estruturas de em ambiente externo.

O concreto é o produto industrializado mais consumido no mundo, sendo responsável pela construção de edifícios e obras essenciais para a manutenção das atividades humanas (JOHN, 2011). Inconvenientemente, a este material são atribuídos impactos ambientais altamente prejudiciais ao longo de seu ciclo de vida, seja na sua produção, através das emissões de gases contribuintes ao efeito estufa e do consumo exacerbado de água e energia elétrica, seja no seu descarte, ao exigir grandes áreas para sua deposição.

Segundo estimativas do Ministério da Ciência e Tecnologia (2014), a produção de cimento nacional foi responsável pela emissão de aproximadamente 25 Gt de gás carbônico em 2012. Isto representa 29,6% das emissões de toda a indústria brasileira no ano. Segundo o SNIC (2010), foram produzidas, no Brasil, 59 Mt de cimento no ano de 2010. Para o mesmo ano, John (2011) estimou que o volume de

cimento produzido corresponderia a uma demanda de 325 Mt de agregados e 38 Mt de água apenas para o amassamento de concreto. Apesar dos altos índices de impacto ambiental apresentados, a indústria cimenteira do Brasil apresenta-se entre as menos poluentes no mundo (SNIC, 2014).

Postos os impactos ambientais ocasionados pela produção de concreto, evidencia-se a importância da redução no consumo deste material a partir de avanço científico e tecnológico. Neste contexto, é correto introduzir os estudos acerca da durabilidade das estruturas de concreto armado, relacionados à manutenção de características desejáveis do material ao longo do tempo, e intimamente ligados ao prolongamento da vida útil das construções.

Cabe citar aqui também que a redução de emissão de poluentes, e a aplicação consciente de recursos naturais e financeiros são objetos de interesse social frente às atuais preocupações em relação aos efeitos do aquecimento global sobre a produção de alimentos e a qualidade de vida dos indivíduos. Além disso, a contenção de gastos com manutenção de estruturas permite maiores investimentos em políticas de redução do déficit de habitação e infraestrutura, sobretudo nos países em desenvolvimento. Sendo assim, é possível afirmar que, de certa forma, a produção de concretos mais duráveis colabora para o desenvolvimento social sustentável.

Tecnicamente, ao observar os estados da arte relativos à autocicatrização de materiais cimentícios apresentados em Tittelboom e Belie (2013), Tang, Kardani e Cui (2015) e Huang *et al.* (2016), nota-se predominância de pesquisas analisando a ocorrência de autocicatrização e seus efeitos sobre a durabilidade utilizando-se de compósitos cimentícios que não contêm agregados graúdos e com presença de fibras sintéticas. Sabe-se que, ao alterar o teor de cimento no volume total e também a configuração das fissuras obtidas, a utilização de tais compósitos potencializa a autocicatrização. Contudo, tendo em vista as dificuldades executivas e o alto custo desses materiais, sabe-se que a aplicação dele para situações práticas é bastante restrita, não representando o material da maioria das estruturas de concreto sujeitas à fissuração e expostas às condições ambientais que possibilitam a autocicatrização. Assim sendo, este trabalho, ao utilizar-se de concreto mais próximo do convencional, sem fibras e com aplicação de compressão, contribui para o meio técnico ao representar o material componente de grande parte das estruturas de concreto armado expostas ao ambiente e vulneráveis à deterioração.

1.2 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo a análise da autocicatrização autógena por meio de seus efeitos na durabilidade de concretos convencionais contendo cimentos comerciais brasileiros.

Especificamente, a pesquisa aqui apresentada visa:

- I. Analisar a influência da substituição de parte do clínquer por cinzas volantes, comum à produção dos cimentos CP II Z e CP IV RS na fissuração e autocicatrização do concreto;
- II. Investigar as implicações da idade do concreto quando ocorre a fissuração (7 ou 28 dias) na autocicatrização e em seus efeitos sobre a durabilidade do concreto.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho é dividido em seis seções principais. A primeira é a seção introdutória que traz a contextualização e o problema de pesquisa, além da justificativa e o objetivo deste trabalho.

A segunda seção apresenta aspectos teóricos da fissuração do concreto: suas causas, fatores influentes e implicações tanto ao desempenho mecânico do material, quanto para sua durabilidade, utilizando-se de publicações relevantes e atualizadas, que demonstram o estado-da-arte em relação ao assunto. Este mesmo delineamento é seguido na terceira seção, onde a autocicatrização autógena do concreto é explanada, tratando de fatores que auxiliam a sua ocorrência.

O capítulo quatro apresenta o programa experimental desenvolvido para o atendimento dos objetivos propostos. Nele estão descritos e justificados as escolhas e classificação de fatores e níveis de pesquisa, de materiais utilizados, bem como os ensaios realizados. Em seguida, no quinto capítulo está a apresentação e discussão dos resultados obtidos a partir do programa experimental realizado.

Por último, na sexta seção, são apresentadas conclusões geradas pela discussão dos resultados e são sugeridas pesquisas para desenvolvimento futuro considerando pontos com necessidade de maior esclarecimento abordados neste trabalho.

2 FISSURAÇÃO DO CONCRETO

A fissuração é descrita por Carmona e Carmona-Filho (2013) como a manifestação patológica mais recorrente em estruturas de concreto armado. Isto ocorre pois, apesar de ter uma resistência altamente satisfatória quando se trata de compressão, o concreto tem resistência relativamente baixa à tração. Ainda que a função principal do concreto nos elementos estruturais seja resistir aos carregamentos de compressão, é inevitável que este seja submetido à tração. Esse tipo de solicitação acontece não só quando o material está recebendo um carregamento, ou então uma sobrecarga, mas também por outros fenômenos. Dentre estes estão o assentamento plástico e deformação de formas, a retração por perda de água, variações volumétricas diferenciais por temperatura, deslocamentos impostos e reações expansivas como a reação álcali-agregado, ataque por sulfatos e corrosão das armaduras (CARMONA e CARMONA-FILHO, 2013).

Além de uma manifestação patológica, as fissuras são uma ameaça à durabilidade do concreto, sendo a sua restrição apontada pela norma brasileira que orienta o projeto de estruturas de concreto armado, NBR 6118 (ABNT, 2014), como uma medida de mitigação de mecanismos deletérios como a carbonatação, o ingresso de cloretos e a lixiviação. Portanto, a mesma norma estabelece limites para a fissuração que variam de 0,4 mm para situações mais favoráveis (baixa agressividade ambiental e concreto simplesmente armado) a 0,2 mm para situações mais desfavoráveis (alta agressividade ambiental ou concreto com protensão em baixa agressividade ambiental). A NBR 6118 (ABNT, 2014) é ainda mais restrita ao tratar de estruturas de concreto protendido em regiões de agressividade ambiental moderada ou alta, exigindo que se verifique os estados limite de início de fissuração e o estado limite de descompressão, para o qual não há tração na seção do elemento estrutural.

Tendo em vista o prejuízo que as fissuras podem causar ao desempenho das estruturas em concreto, este capítulo discute os fatores que contribuem para a formação de fissuras nas primeiras idades e também nas idades mais avançadas do concreto. Além disso, trata-se aqui dos prejuízos dessa manifestação patológica ao desempenho mecânico e à durabilidade no concreto, sobretudo em relação aos mecanismos de favorecimento à corrosão.

2.1 COMPORTAMENTO MECÂNICO DO CONCRETO E FISSURAÇÃO

Antes mesmo de haver o carregamento do concreto, as fissuras têm início nas interfaces de aderência entre os agregados graúdos e a pasta de cimento; isto ocorre por variações volumétricas desta última já no processo de hidratação. Quando carregado à compressão, o concreto não apresenta fissuras adicionais até aproximadamente 30% da sua resistência. A partir desse percentual há o aumento de abertura e extensão das fissuras já formadas nas zonas de transição. Quando atingidos 70% da resistência, as microfissuras passam a se propagar pela argamassa, interconectando-se e formando fissuras contínuas e geralmente paralelas à direção do carregamento. Em carregamentos contínuos e cíclicos, as fissuras aumentam mesmo sem a necessidade de aumento da carga em relação à resistência. Diversos estudos apresentam que a fissuração é função das deformações aplicadas no concreto, independente da forma como elas são aplicadas (ACI, 2001).

Quando o concreto é submetido à tração decorrente de flexão, a fissuração inicia-se e propaga-se de forma similar, tendo sua propagação também iniciada nas zonas de transição interfacial, onde já há pequenas fissuras decorrentes da variação volumétrica da pasta de cimento. Com o aumento do carregamento há a extensão e interligação de fissuras, até sua ruptura, que ocorre sob tensões bastante inferiores à resistência à compressão (aproximadamente 14% da resistência à compressão para concretos convencionais e 9% para concretos de resistência superior a 50 MPa). Sendo assim, o aço contribui não só para o aumento da capacidade de carga de elementos de concreto armado submetidos à flexão, mas também para a restrição de fissuras a limites aceitáveis expressos em normas (AHMED, MALLICK e HASAN, 2016).

De acordo com Akçaoglu (2017), a fissuração sob carregamento depende da resistência mecânica da zona de transição interfacial, da qualidade da matriz cimentícia, além da relação de resistência entre a matriz e a zona de transição. Neste contexto, o mesmo autor afirma que agregados e relações água/cimento maiores tornam a zona de transição mais crítica, propensa a acelerar a fissuração em certos níveis de tensão. Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2004) afirmam que agregados maiores favorecem a concentração de maior número de fissuras em regiões mais estreitas e próximas da zona de transição. Além disso, segundo Akçaoglu (2017), para concretos submetidos à compressão, fatores relacionados à forma dos agregados graúdos,

como o grau de intertravamento e a concentração de tensões no seu entorno, são determinantes no comportamento da fissuração do concreto, sobretudo quando as matrizes cimentícias têm maior qualidade.

Tratando-se do concreto já fissurado, diversas pesquisas demonstram a influência da fissuração sobre o desempenho mecânico do concreto. Zhang (1997) afirma que a presença de fissura no concreto é um fator determinante para sua resistência à compressão, sendo ainda mais influente para concretos de menor resistência. Vejdirektoratet (1993), citada por Zhang (1997), ao verificar a resistência compressão de corpos de prova de concreto fissurados, analisou que, geralmente, a capacidade de carga à compressão reduz à medida que o número de fissuras no concreto é maior. Usando corpos de prova de concretos autoadensáveis com fibras de vidro, Takagi *et al.* (2018) notaram a redução da resistência à compressão em até 13% após a indução de fissuras por carregamento com 90% da tensão de ruptura à compressão do concreto.

Sisomphon, Coporuglu e Koenders (2013) observaram uma queda de até um quinto da rigidez de prismas de compósitos cimentícios com fibras, depois de submetidos à fissuração por flexão em três pontos. Além disso, notou-se queda na capacidade de deflexão e carga dos corpos de prova fissurados, porém em menor escala.

2.2 DURABILIDADE DO CONCRETO FISSURADO

A literatura demonstra que a fissuração é um fator de grande influência no ingresso e transporte de fluidos no concreto, tornando-o mais suscetível aos mecanismos de deterioração, sobretudo a carbonatação e ingresso de cloretos, que possibilitam o início da corrosão do aço que compõe as estruturas de concreto armado.

A contribuição da fissuração nos mecanismos de transporte dos compósitos cimentícios é confirmada por Ghasemzadeh *et al.* (2016). Nessa pesquisa, realizou-se uma série de ensaios relacionados ao transporte de fluidos e cloretos no interior de corpos de prova de argamassa, com fissuração induzida por ciclos de gelo e degelo. Inicialmente, por ensaios de emissão acústica, os pesquisadores acompanharam o desenvolvimento dos danos no interior da argamassa ao longo dos ciclos e constataram que nos primeiros ciclos há aumento na quantidade de fissuras, enquanto

que nos ciclos seguintes, há aumento apenas na abertura das fissuras. A partir desse ensaio, Ghasemzadeh *et al.* (2016) definem o grau de dano do material como a relação entre o tempo de percurso de uma onda no concreto não danificado e o tempo de percurso de uma onda no concreto danificado. Ao realizar ensaios de penetração rápida de cloretos (RCPT), os autores observaram um aumento linear da penetrabilidade de cloretos em baixos níveis de dano, e uma estabilização em níveis de danos maiores, trazendo dúvidas quanto à aplicabilidade do ensaio em graus de dano superiores a 20%. Já a resistividade elétrica do material decai a taxas mais altas quando os níveis de danos são menores, e passam a decair mais lentamente com o avanço do dano em níveis mais altos. A absorção capilar inicialmente cresce com o aumento da fissuração, até um certo ponto quando, a níveis mais altos decresce, até uma estabilização. A permeabilidade ao ar cresce exponencialmente para todos os níveis de fissuração e o mesmo ocorre com a permeabilidade à água por percolação.

Picandet *et al.* (2009) estudaram a permeabilidade de gás e água em concretos com e sem fibras, com fissuração induzida por compressão diametral. De acordo com os autores, a permeabilidade, tanto à água quanto ao ar, apresentou resultados similares nas primeiras leituras do ensaio, crescendo cubicamente com o aumento da abertura das fissuras. Além disso, os autores afirmaram que, quando adicionadas fibras ao concreto, nota-se maior tortuosidade e rugosidade nas fissuras, o que reduz significativamente a permeabilidade nestas. Nas leituras mais tardias, os autores observaram redução da permeabilidade da água, diferente do que ocorria com a permeabilidade do ar, sendo assumido, portanto, que há interação desta com a matriz cimentícia, podendo reduzir a abertura das fissuras. Rastiello *et al.* (2014) confirmam as conclusões de Picandet *et al.* (2009), adotando uma metodologia de ensaio diferente, onde as leituras de permeabilidade acontecem simultaneamente à aplicação de carregamento diametral, reduzindo o efeito da interação entre a água e a matriz cimentícia ao longo do tempo.

Contrariamente, Akhavan, Shafaatian e Rajabipour (2012) notaram uma relação quadrática entre o aumento da abertura de fissuras e a permeabilidade. Contudo, este estudo diferencia-se pela utilização de argamassas e não concreto, como os outros trabalhos. Akhavan, Shafaatian e Rajabipour (2012) analisaram também a influência da tortuosidade e rugosidade das fissuras na permeabilidade do material. Os pesquisadores concluíram que, como esperado, o aumento nesses

parâmetros causa redução da permeabilidade, sendo a tortuosidade altamente significativa, podendo representar reduções de 4 a 6 vezes no coeficiente de permeabilidade de diferentes amostras com fissuras de espessura semelhante.

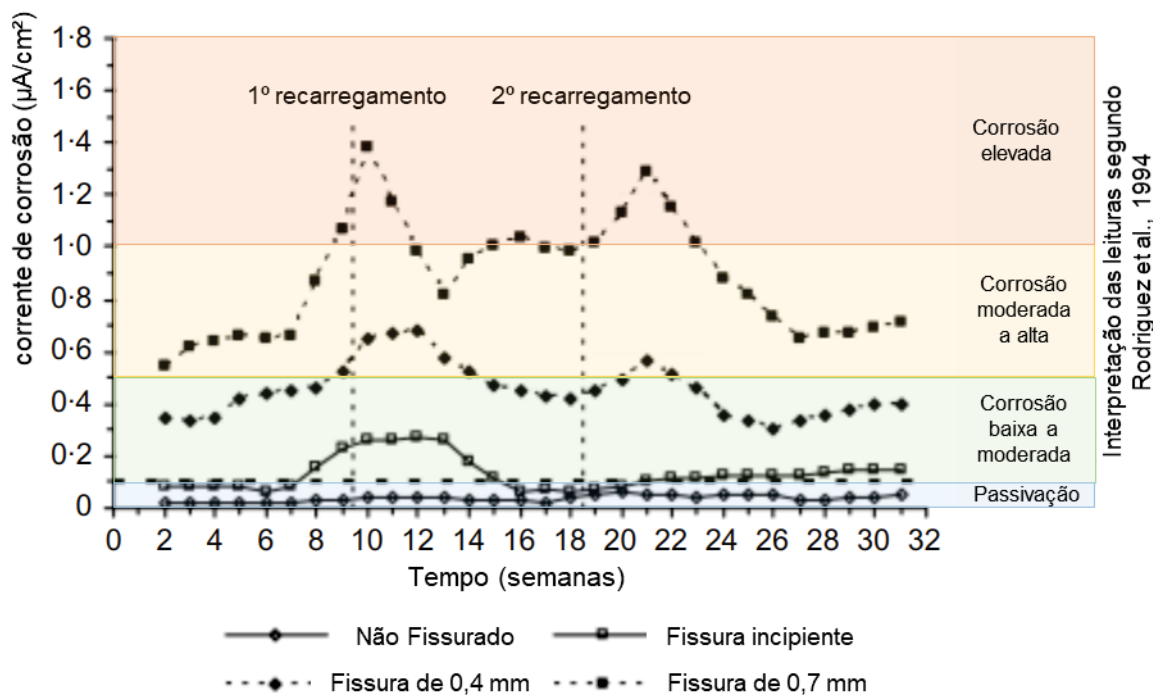
Liu *et al.* (2016) estudaram a permeabilidade de compósitos cimentícios com fibras e cinzas volantes sob diferentes deformações por aplicação de tração direta. Inicialmente, os pesquisadores notaram que, com o aumento no número e abertura de fissuras ocasionados pelo incremento de carga de tração, havia aumento do coeficiente de permeabilidade e de sua variação entre amostras de um mesmo grupo de combinação de fatores. Além disso, os autores afirmaram que a espessura das fissuras se mostrou mais influente na permeabilidade que a sua quantidade. Isto foi confirmado pelos autores por meio da realização do ensaio de permeabilidade em corpos de prova com indução de fissuras únicas, variando entre 0,03 mm e 0,1mm.

Otieno, Alexander e Beushausen (2010) estudaram o efeito da espessura e atividade de fissuras sobre a corrosão do aço em vigas de concreto com diferentes composições, expostas a ciclos de imersão em solução com cloreto de sódio por três dias, seguido de secagem ao ar por quatro dias. As fissuras foram induzidas por flexão em três pontos e foram classificadas em três níveis: incipiente (indução parou assim que a primeira fissura foi visualizada), mantida com espessura de 0,4 mm e mantida com espessura de 0,7 mm. A manutenção da espessura das fissuras nas duas últimas classes ocorreu desde o momento de indução até o fim dos ciclos de molhagem e secagem por meio de um dispositivo criado pelos pesquisadores.

Ao ler a velocidade de corrente de corrosão periodicamente, os autores notaram que a presença de fissura acelerou a corrosão (tanto em sua iniciação, quanto propagação) induzida por íons cloreto ao favorecer o transporte de massa para o interior do concreto, sendo que, a corrosão mostrou-se mais severa para as vigas com fissuras mais espessas (Figura 2). Contudo, a redução da relação água/cimento e, principalmente, a presença de escória de alto forno como substituição de parte do cimento reduziram a sensibilidade da corrosão à existência e espessura das fissuras. Essa redução, segundo os autores, ocorre porque a resistividade do concreto passa a ser superior, prejudicando o funcionamento das células corrosivas. Outro fator que é observado por Otieno, Alexander e Beushausen (2010) é o recarregamento e reabertura das fissuras, que, como esperado, contribuíram para o processo corrosivo,

sobretudo de barras já despassivadas, ao reativar fissuras possivelmente autocicatrizadas e danificar ainda mais as zonas de transição interfaciais.

FIGURA 1 – VELOCIDADE DE CORROSÃO PARA CONCRETO COM CIMENTO PORTLAND E RELAÇÃO A/C 0,40



FONTE: adaptado de Otieno, Alexander e Beushausen (2010).

Complementarmente, Shao-Feng, Chun-Hua e Rong-Gui (2011) observaram o aumento da difusão de cloretos em vigas fissuradas expostas a ciclos semelhantes aos analisados por Otieno, Alexander e Beushausen (2010). Por meio da geração de perfis de cloreto ao longo das fissuras, os pesquisadores concluíram, ao final de 15 ciclos, que o aumento das espessuras de fissuração causou acréscimo no teor e na difusão de cloretos, quando consideradas fissuras com espessura entre 0,125 e 0,476 mm.

Outras pesquisas também exploraram a relação entre a abertura das fissuras e o ingresso de cloretos, chegando a conclusões similares às já expostas, como a de Ismail *et al.* (2008), em argamassas com fissuras entre 0,006 mm e 0,325 mm, e Jang, Kim e Oh (2011), em corpos de prova cilíndricos de concreto submetidos a fissuração por compressão diametral. Neste último, notou-se pouca variação do coeficiente de difusão de cloretos em corpos de prova que continham fissuras de até 0,08 mm, o qual os autores chamam de limite de abertura de fissura para favorecimento ao ingresso de cloretos. É feita a ressalva de que este valor limite varia de acordo com

outros fatores, sobretudo a composição do concreto. Ademais, Jang, Kim e Oh (2011) afirmam que a substituição de parte do cimento por cinzas volantes e o aumento da classe de resistência do concreto não alteram a geometria das fissuras. Contudo, esses fatores possibilitam a redução da difusão de cloretos, tanto para o concreto fissurado como para o concreto não fissurado. Quando alterada a dimensão máxima característica (DMC) dos agregados graúdos, os mesmos pesquisadores notaram similaridade na difusão de cloretos, concluindo assim, que não há influência das DMCs estudadas (13 mm e 25 mm) no transporte de cloretos para o interior do concreto fissurado.

Para as pesquisas previamente descritas, as fissuras têm localização e geometria facilmente identificáveis, o que não acontece em alguns casos, como das fissuras causadas por compressão. Wang *et al.* (2016) analisaram as características da fissuração induzida por compressão em corpos de prova cilíndricos (como já exposto na seção 2.1) e como elas afetam a difusão de cloretos. Segundo esse trabalho, o coeficiente de difusão na direção do carregamento de compressão é geralmente maior que na direção perpendicular, sendo em média 50% maior nos corpos de prova cuja fissuração foi induzida com 80% do carregamento máximo. Isto ocorre porque a orientação das fissuras segue majoritariamente os planos paralelos à aplicação de carga. Já quanto à densidade de fissuras (relação entre a área ocupada por fissuras e a área total da seção analisado), observa-se que, no geral, há o aumento da difusão com o aumento da densidade. Porém, para este fator, os autores destacam uma grande dispersão, causada por uma alta influência da abertura da fissura principal dentre o total de fissuras, além da tortuosidade e da orientação de todo o conjunto de fissuras.

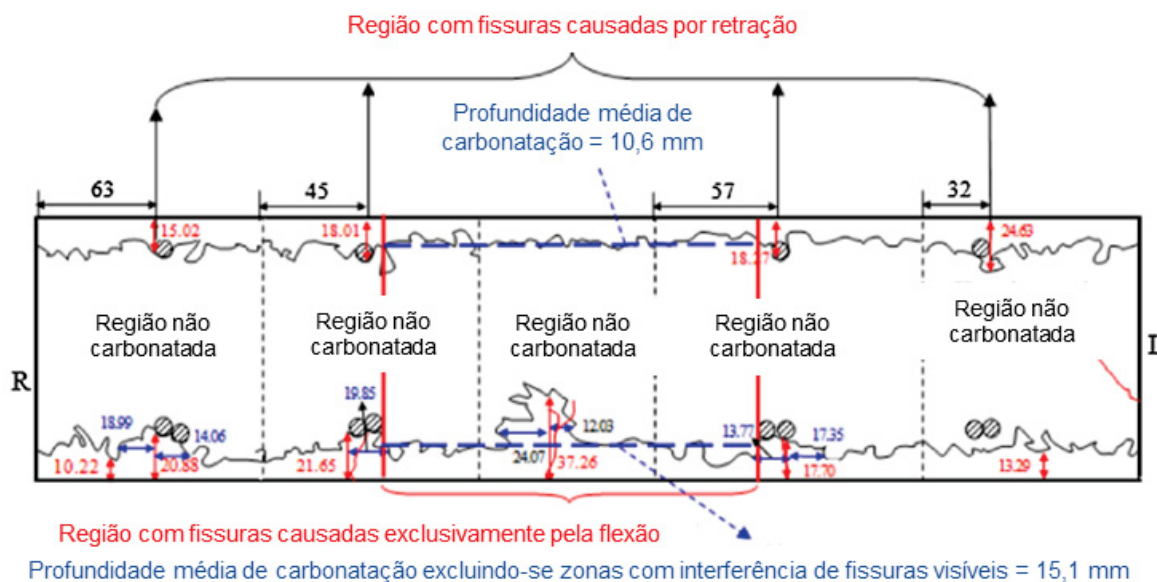
Ao analisar as profundidades atingidas pelos íons cloreto por meio de colorimetria, Wang *et al.* (2016) evidenciaram a importância das chamadas fissuras principais (fissuras mais espessas dentre as fissuras de uma mesma seção) na difusão desses íons. Notou-se, como esperado, que os cloretos atingem maiores profundidades nessas fissuras, sobretudo as de abertura superior a 0,1 mm, e também que a variação da tortuosidade das fissuras passou a ser significativa apenas quando estas estavam com espessuras entre 0,15 e 0,37 mm.

Cheng *et al.* (2016) analisaram os efeitos de três fatores sobre a corrosão induzida por cloretos: abertura de fissuras, ciclos de gelo/degelo e carbonatação

acelerada. Para cada fator os autores estabeleceram três níveis, sendo os níveis de abertura de fissuras de 0 mm, 0,1 mm e 0,2 mm. Dentre os fatores estudados, a fissuração mostrou-se, por vários métodos estatísticos, o fator de maior influência dentre os analisados, sendo que suas variações de nível ocasionaram maiores perdas de massa do aço imerso em concreto e maiores danos ao desempenho mecânico dos corpos de prova analisados.

Outro mecanismo de iniciação da corrosão, a carbonatação, é estudada em concretos fissurados por Wang *et al.* (2018). Esses autores produziram vigas de concreto com cimento com e sem substituições por cinzas volantes e escória de alto forno e aplicaram carregamento de flexão em dois pontos até que fossem geradas fissuras entre 0,1 mm e 0,5 mm. Em seguida, mantiveram os corpos de prova em sazonalamento para posterior inclusão em câmara de carbonatação. Ao medir a profundidade de carbonatação por aspersão de indicador de pH, Wang *et al.* (2018) observaram que a frente se aprofundava bastante nas regiões próximas às fissuras de tração (Figura 2), sobretudo na região central da viga, onde as fissuras eram mais abertas e profundas. Além disso, a carbonatação mostrou-se mais avançada nas vigas produzidas com concreto de maior relação água/aglomerante, como esperado.

FIGURA 2 – PERFIL LONGITUDINAL DE CARBONATAÇÃO PARA VIGA SUBMETIDA À FLEXÃO E À CARBONATAÇÃO ACELERADA



FONTE: adaptado de Wang et al. (2018)

Já para os diferentes tipos de aglomerante, notou-se maior resistência naqueles produzidos sem substituição do cimento, enquanto o concreto fissurado com

substituição por cinzas volantes mostrou os piores resultados. É importante ressaltar que isto ocorre mesmo em concretos não fissurados, pela redução na reserva alcalina do concreto, como demonstrado por Medeiros *et al.* (2017). Contudo, quando há a fissuração, os riscos envolvidos são maiores, reduzindo a vida útil do elemento estrutural.

Através da pesquisa realizada para esta revisão bibliográfica, notou-se que os artigos mais recentes acerca da fissuração e suas consequências têm se concentrado nos efeitos das fissuras na resistência do concreto ao ingresso de agentes deletérios, com perceptível predominância de estudos com cloretos. É também notável que alguns trabalhos incluem as considerações da autocicatrização ao longo dos ensaios realizados. É importante ressaltar que as pesquisas que envolvem os efeitos da fissuração sobre os mecanismos de deterioração têm justamente como desafio a análise da ocorrência simultânea e interação do ingresso de agentes deletérios com a autocicatrização. Isto porque os ensaios de ingresso de agentes são no geral acelerados, o que não permite uma observação contemporânea destes com a autocicatrização. Assim sendo, são importantes as pesquisas que envolvam a análise destes fenômenos de forma natural, em condições que se assemelhem às condições de exposição das estruturas em campo.

3 AUTOCICATRIZAÇÃO DO CONCRETO

A autocicatrização do concreto pode ser entendida como o fechamento de fissuras e recuperação de características de desempenho (como a resistência mecânica e a resistência a agentes deletérios) sem a necessidade de intervenção direta sobre o dano, ocorrendo por mecanismos intrínsecos ao material ou pela presença de elementos e materiais incluídos ao concreto com essa finalidade. Huang *et al.* (2016) dividem a autocicatrização do concreto em quatro tipos: a) autógena; b) baseada em adições cristalizantes; c) baseada na ação de bactérias e d) baseada em agentes adesivos. Levando em consideração os objetivos deste trabalho, será considerada apenas a autocicatrização autógena nesta seção.

A capacidade de recuperação da integridade do concreto fissurado de contenção de água, galerias e tubos era percebida já no final do século XIX. Contudo, análises mais sistemáticas acerca desse mecanismo desenvolveram-se ao longo do século XX, quando não só a redução da permeabilidade foi estudada, mas também as reações envolvidas e fatores influentes. Com o avanço dos estudos de tecnologia do concreto, passou-se também a estudar o efeito da autocicatrização no desempenho mecânico do concreto e no transporte de cloretos para seu interior (HEARN, 1998; HUANG *et al.*, 2016).

Segundo Tittelboom e Belie (2013), assim que ocorre a fissuração, a autocicatrização autógena se dá por dois mecanismos principais: o primeiro é a hidratação de componentes anidros com o ingresso de umidade; o segundo diz respeito a solubilização de hidróxidos de cálcio nas proximidades das fissuras, seguida da precipitação de carbonatos de cálcio devido ao contato com o dióxido de carbono atmosférico. Em estruturas em contato direto com a água, como barragens e dutos, ocorre também o bloqueio físico por carreamento de sedimentos externos ao concreto, ou até mesmo de partículas do próprio material.

Alguns dos fatores influentes nos mecanismos de autocicatrização autógena relatados na biografia, assim como os ganhos no desempenho de concretos e outros compósitos cimentícios ocasionados pela autocicatrização são apresentadas nas seções que seguem.

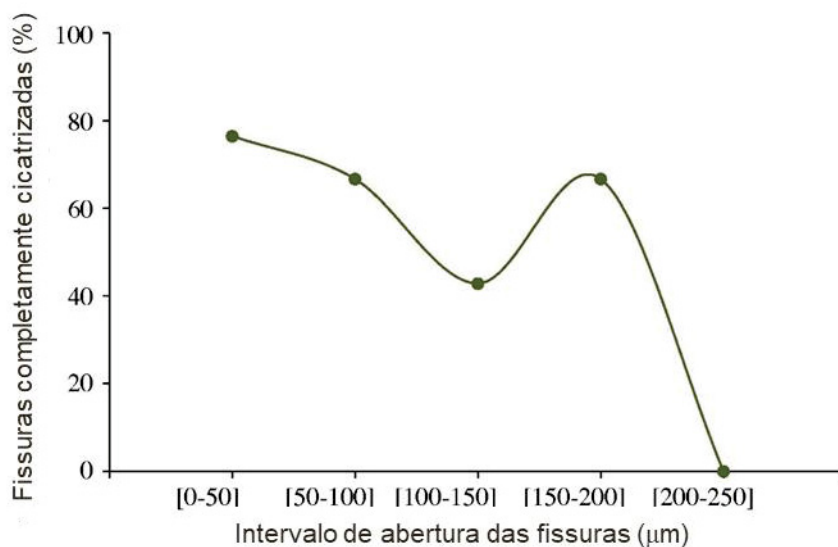
3.1 INFLUÊNCIA DA FISSURAÇÃO

Dois parâmetros são de grande importância quando considerada a influência da fissuração no sucesso da autocicatrização do concreto e demais compósitos cimentícios: a idade da ocorrência e a espessura das fissuras. Na literatura constam muitos exemplos de estudos voltados a essa consideração, contudo, há grande dificuldade de definir uma idade de ocorrência ou abertura ideais para que a autocicatrização seja eficiente. Há exemplos que demonstram limite de 0,005 mm (JACOBSEN; SELLEVOLD, 1995; SAHMARAN *et al.*, 2008) como valor máximo para ocorrência da autocicatrização, enquanto há outros exemplos em que esse limite chega a 0,3 mm (CLEAR, 1985). Essa disparidade acontece porque a autocicatrização depende muito dos materiais que compõem os compósitos cimentícios e das condições ambientais a que as fissuras estão expostas. No geral, pode-se afirmar que a autocicatrização é mais eficiente para fissuras geradas nas primeiras idades do material e para fissuras menos espessas (HEARN, 1998; TITTELBOOM e BELIE, 2013; HUANG *et al.*, 2016).

Reinhardt e Jooss (2003) observaram a permeabilidade de concretos de alto desempenho ao longo do tempo contendo fissuras geradas por compressão diametral com aberturas de até 0,20 mm. Ao fim de duas semanas de percolação de água pela fissura, os autores observaram que a redução do fluxo inicial se mostrou alta para todas as classes de fissuras. Contudo, a percolação final em relação à inicial foi menor para as fissuras de menor espessura, estando próxima a 2% para fissuras com cerca de 0,05 mm, e de 14% para aquelas com cerca de 0,15 mm.

Tittelboom *et al.* (2012) observaram, por análise de imagem, fechamento completo de 50% a 80% do total de fissuras que tinham espessura de até 0,2 mm em diferentes corpos de prova, depois de 42 dias imersos em água. Nesse estudo, utilizou-se corpos de prova prismáticos de argamassas, que continham escórias de alto forno ou cinzas volantes, fissurados por flexão em três pontos. Nos corpos de prova com fissuras superiores a 0,2 mm os autores notaram pouca autocicatrização, sendo insuficiente para preenchê-las completamente. Os resultados podem ser visualizados na Figura 3.

FIGURA 3 – PORCENTAGEM DE FISSURAS FECHADAS DE ACORDO COM A ESPESSURA



FONTE: adaptado de Tittelboom *et al.* (2012)

Darqueness *et al.* (2016) acompanharam os efeitos da autocicatrização em fissuras geradas aos 7 dias de idade em argamassas por meio de ensaios de migração rápida de cloretos. Os autores notaram boa eficiência na redução da penetrabilidade de cloretos para fissuras até 0,1 mm quando adicionadas escórias de alto forno a estes materiais. Segundo Darqueness *et al.* (2016), o sucesso para a autocicatrização em fissuras relativamente espessas, como as geradas nesta pesquisa, só foi possível pela alta disponibilidade de partícula não hidratadas. Isto ocorreu tanto pela idade de início do processo de autocicatrização, quanto pela substituição de parte do cimento por escórias, que têm hidratação mais lenta que o cimento Portland puro.

Heide e Shlangen (2007) observaram a influência da idade de fissuração em um período inicial de hidratação, induzindo a fissura por flexão em três pontos até a abertura de 0,50 mm em corpos de prova de concreto. Após a fissuração, os pesquisadores mantiveram os corpos de prova imersos em água por 14 dias e então verificaram a resistência à tração por flexão em relação à obtida no momento da fissura. Os autores notaram que esta relação é reduzida de 90%, quando o material tem fissura gerada 20 horas após a moldagem, para 50%, quando o material tem fissura gerada 72 horas após a moldagem. É importante aqui destacar que a recuperação do desempenho dos elementos estruturais estudados por Heide e Shlangen (2007) poderia atingir valores mais altos, caso os corpos de prova fossem mantidos por mais tempo em imersão. Tal fato demonstra que as fissuras geradas nas

primeiras idades do concreto, sobretudo as relativas à variação térmica decorrente da hidratação e à retração autógena do concreto, têm alta possibilidade de recuperação por autocicatrização autógena.

Zhong e Yao (2008) analisaram a fissuração do concreto gerada em diferentes idades (7, 14 e 28 dias) e em diferentes níveis de carregamento por compressão. Apesar de não apresentarem características das fissuras geradas, os autores acompanharam o dano gerado e sua recuperação ao longo do tempo por meio de leituras de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas (VU) e também por ensaios de ruptura por compressão. De acordo com os resultados, a recuperação de resistência do concreto foi superior a 100% para grande parte dos danos gerados até o décimo quarto dia em concretos convencionais, e até o terceiro dia para concretos de alto desempenho. Essa diferença entre os tipos de concreto ocorre porque a hidratação do concreto de alto desempenho descrito no trabalho em questão ocorre a taxas elevadas, reduzindo a possibilidade de recuperação para fissuras geradas já após o terceiro dia.

Outro ponto de atenção no trabalho de Zhong e Yao (2008) é a existência de uma porcentagem de dano (VU depois da fissuração / VU antes da fissuração) ótima, onde a recuperação das características mecânicas do concreto é máxima. Como esperado, esse valor ótimo varia de acordo com o concreto e a idade de indução de danos, estando próximo de 60% após o pré-carregamento aos 7 dias para concretos convencionais. Segundo os autores isto ocorre porque a níveis baixos de dano, há pouca fissuração, reduzindo o ingresso de agentes da autocicatrização (água e gás carbônico), enquanto que para níveis muito altos há fissuras excessivamente espessas, o que reduz a capacidade de autocicatrização.

Kan e Shi (2012) apresentam um outro ponto de vista em relação à idade de ocorrência de fissuração frente à autocicatrização. Ao induzirem a fissuração com diferentes idades (3, 7, 28, 56 e 90 dias) e níveis de carregamento de tração (0,3, 0,5, 1,0 e 2,0% de deformação) em compósitos cimentícios com fibras, com e sem substituição de parte do cimento, os autores observaram que nem sempre os compósitos fissurados em idades inferiores eram os que tinham maior recuperação de frequência de ressonância ao longo de ciclos de molhagem e secagem. Ao analisar a configuração das fissuras, Kan e Shi (2012) observaram que, assim como os corpos de prova produzidos contendo cinzas volantes, os corpos de prova fissurados em

idades mais tardias tinham fissuras mais distribuídas, isto é, maior número de fissuras com menor abertura média. Por esta razão, os corpos de prova fissurados aos 90 dias e aos 56 dias apresentavam as maiores taxas de recuperação para todos os níveis de carregamento, seguidos de perto da recuperação do material fissurado com 3 dias, do qual espera-se quantidade maior de partículas não hidratadas.

3.2 INFLUÊNCIA DOS MATERIAIS COMPONENTES

3.2.1 Aglomerantes e adições minerais

Tendo em vista os mecanismos de autocicatrização autógena descritos por Tittelboom e Belie (2013), é possível concluir que o teor de aglomerantes, bem como sua composição, estão entre os principais fatores influentes sobre a autocicatrização de concretos e demais compósitos cimentícios.

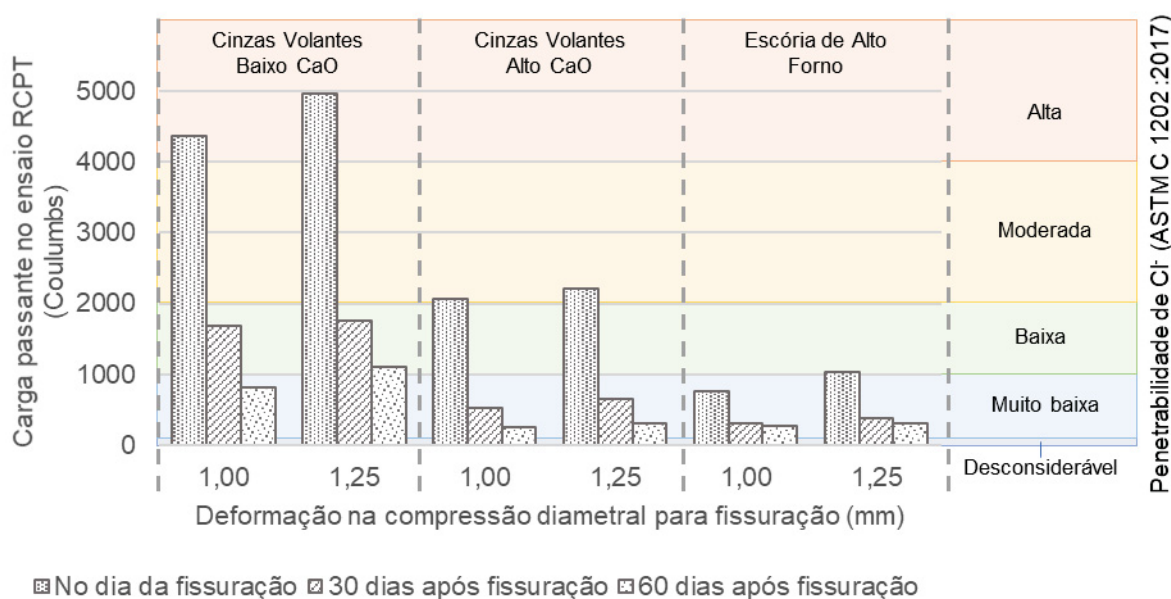
Qian *et al.* (2009) ensaiaram diversas vigas feitas de compósitos cimentícios contendo diferentes proporções de cimento, materiais suplementares, areia e pós inertes. Para ensaios de flexão e observação por meio de microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de raio X, os autores notaram maior eficiência na recuperação de características acometidas pela fissuração para as dosagens que continham maior relação aglomerantes/pós. Isto é esperado, já que com um teor maior de aglomerantes há, conseqüentemente, mais partículas não hidratadas e portlanditas, reagentes para a formação de cristais C-S-H e carbonatos de cálcio no processo de autocicatrização.

Diversos trabalhos atentam-se aos efeitos da substituição de parte do cimento por escória de alto forno e cinzas volantes, bastante comum na composição de cimentos comerciais, na autocicatrização do concreto. Tittelboom *et al.* (2012) observaram a evolução da autocicatrização em argamassas e pastas de cimento contendo escórias de alto forno e cinzas volantes – fissuradas e mantidas em ciclos de molhagem e secagem – por meio de calorimetria, análise de imagem de fissuras, ensaio de permeabilidade e resistência à flexão. Os pesquisadores notaram que os compósitos contendo apenas cimento Portland tinham maior rapidez na hidratação de partículas anidras, contudo havia menor disponibilidade de tais partículas quando não havia substituições. Além disso, observou-se, pela análise de imagens, melhor eficiência na autocicatrização com compósitos sem substituição, enquanto que os resultados de permeabilidade demonstraram o contrário, tendo melhor eficiência para

compósitos com substituição. Titelboom *et al.* (2012) atribuíram essa contrariedade à predominância do mecanismo de hidratação nas argamassas com substituição. Isto é explicado pela maior quantidade de partículas anidras e menor disponibilidade de hidróxidos de cálcio proporcionada pelas substituições, situação oposta à do compósito contendo apenas cimento proveniente de clínquer. Ainda que os efeitos de aut cicatrização tenham sido bastante eminentes na maioria dos ensaios, não se observou o mesmo ao se ensaiar o desempenho mecânico dos corpos de prova produzidos.

Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013) também analisaram os efeitos da escória de alto forno e de dois tipos de cinzas volantes (com teores distintos de óxido de carbono e sílica em sua composição) na aut cicatrização de compósitos cimentícios com fibras. Diferente da pesquisa anterior, neste trabalho os autores induziram a fissuração nos corpos de prova por compressão diametral aos 60 dias, quando o concreto já tinha um estágio de hidratação mais avançado. Notou-se, por ensaios de migração rápida de cloretos (RCPT), aumento acentuado da penetrabilidade desses íons após a indução de fissuração. Contudo, para todos os tipos de compósitos cimentícios, houve queda considerável deste parâmetro após períodos de 30 e 60 dias de imersão dos corpos de prova em água (Figura 4).

FIGURA 4 – RESULTADOS DE RCPT DE SAHMARAN, YILDIRIM E ERDEM (2013)



FONTE: Adaptado de Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013)

Por observação microscópica, Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013), comprovaram a presença de produtos de autocicatrização, assim como o efeito das adições sobre a eficiência desse fenômeno. Os pesquisadores observaram que, após 60 dias de imersão, os compósitos com cinzas volantes contendo baixo teor de óxido de cálcio recuperou totalmente fissuras até 0,03 mm, enquanto os compósitos com cinzas volantes com teor de CaO superior tiveram eficiência para a cicatrização de fissuras de até 0,05 mm de espessura, e aqueles com escória demonstraram melhor autocicatrização, fechando completamente fissuras de até 0,1 mm.

Ao analisar os produtos de autocicatrização, Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013) observaram predominância de calcita e silicatos de cálcio hidratados para compósitos com escória, e predominância apenas de C-S-H para compósitos com cinzas volantes. Isto é compreensível, pois as cinzas volantes têm atividade pozolânica favorecendo a precipitação de C-S-H, enquanto as escórias têm maior teor de CaO, favorecendo não só a formação de C-S-H, mas também a formação de grandes quantidades de carbonato de cálcio, potencializando a autocicatrização. Assim como no trabalho de Titelboom *et al.* (2012), Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013) evidenciam a importância da disponibilidade de portlandita (Ca(OH)_2) e da carbonatação desses compostos para a autocicatrização.

Takagi *et al.* (2018) estudaram a autocicatrização em concretos autoadensáveis com fibra utilizando cimentos CP V ARI, CP II E e CP III. Após a indução de fissuras por compressão com 90% da tensão de ruptura, os autores observaram redução da resistência à compressão e aumento na penetrabilidade de cloretos e na absorção de água por capilaridade. Contudo, após a imersão em solução saturada de cal em água Takagi *et al.* (2018) notaram melhora nesses parâmetros ao longo do tempo, sobretudo para concretos produzidos com cimento contendo escórias (CP II E e CP III). A recuperação da carga de ruptura chegou até 30% após 56 dias de imersão, enquanto a redução na absorção por capilaridade foi de até 39% após 28 dias de imersão. Com este mesmo período, a penetrabilidade de cloretos diminuiu 37% para os concretos com CP III. O concreto com esse tipo de cimento apresentou melhores resultados por conter o maior teor de escória (próximo a 55% da massa de aglomerante). Isto permite maior conteúdo de partículas não hidratadas na idade da fissuração, o que favorece a autocicatrização, como já apontado por Titelboom *et al.* (2012) e Sahmaran, Yildirim e Erdem (2013).

Na *et al.* (2012) observaram o efeito da substituição de parte do cimento por cinzas volantes sobre a autocicatrização de argamassas fissuradas por ciclos de gelo e degelo. Os autores concluíram que a recuperação da resistência a tração e compressão é superior para argamassas que continham cinzas volantes frente às que tinham apenas cimento Portland. Esse efeito se deve principalmente à hidratação de partículas anidras, somada à ação pozolânica do material, tendo em vista que, após a fissuração, os corpos de prova foram submetidos à imersão em água a 20°C e 40°C, sendo a autocicatrização ainda mais rápida para esta última temperatura. Além disso, analisou-se neste trabalho profundidade de carbonatação acelerada antes e depois da fissuração e também depois de quatro semanas de imersão para autocicatrização. Mostrou-se que, apesar da redução de concentração de hidróxidos de cálcio típica de cimentos com pozolanas, as profundidades de carbonatação foram significativamente reduzidas com o aumento dos teores de cinzas volantes, reafirmando a colaboração desta adição para a autocicatrização por formação de cristais de C-S-H.

Ozbay *et al.* (2013) analisaram a permeabilidade a cloretos e o desempenho mecânico de compósitos cimentícios com fibras e altos teores de cinzas volantes (substituição de aproximadamente 55% e 70% do cimento). Por meio de observação de imagens na data da fissuração e depois de 30 e 60 dias de cura, em ciclos de molhagem e secagem ou imersão contínua em água, concluiu-se que o preenchimento das fissuras é superior com o aumento do teor de cinzas volantes. Tal superioridade ocorre, segundo os autores, porque no momento da indução de fissuração o material com maior teor de adição estava em estágio de hidratação menos avançado, o que, para o material utilizado, possibilitou maior quantidade de fissuras com espessura média inferior e também aumentou a quantidade de partículas não hidratadas disponível. Nota-se também que a permeabilidade de cloretos dos corpos de prova submetidos à fissuração converge para níveis similares àqueles dos corpos de prova não fissurados, principalmente para os corpos de prova com fissuras menos espessas.

Termkhajornkit *et al.* (2009) observaram o efeito da substituição de parte do cimento por cinzas volantes em pastas de cimento fissuradas naturalmente por retração. Neste trabalho, os autores notaram que, após o tempo destinado para autocicatrização, as pastas de cimento contendo cinzas volantes tiveram maior aumento de resistência à compressão e maior redução de vazios capilares do que

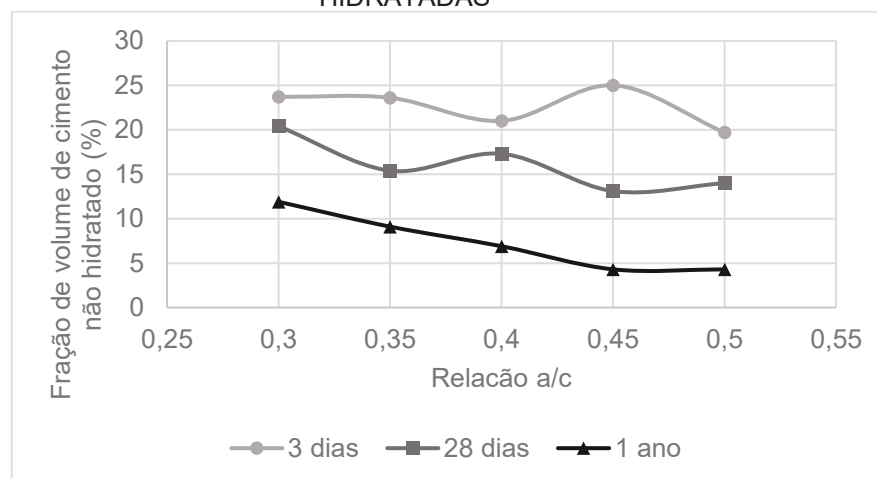
aquelas que não continham o material. A difusão de cloretos também é reduzida em maior escala para pastas contendo o material pozzolânico. Segundo os autores, a quantidade de partículas anidras na idade em que grande parte da fissuração por retração acontece é superior para compósitos com maiores teores de cinzas volantes. É importante destacar nesta pesquisa os ganhos de capacidade mecânica, ressaltando o mecanismo de formação de cristais de C-S-H por hidratação de partículas anidras e por ação pozzolânica.

3.2.2 Relação água/aglomerante

Tittelboom *et al.* (2012), ao comparar a eficiência da autocicatrização em compostos cimentícios com fibras produzidos com relação água/cimento (a/c) de 0,40 e 0,50, por meio de ensaios de percolação de água em discos de concreto com fissuras geradas por compressão diametral, observaram maior redução dos coeficientes de permeabilidade ao longo do tempo para o compósito com menor relação a/c. Ao analisar curvas cumulativas de produção de calor, observou-se maior acúmulo de calor para as argamassas de menor relação a/c após a fissuração, indicando a hidratação de cimento não hidratado em maior quantidade.

Yio *et al.* (2014) observaram o grau de hidratação de pastas de cimento com diferentes relações a/c variando de 0,30 a 0,50. Por meio de microscopia eletrônica de retro difração e de análise de imagens, os pesquisadores quantificaram o volume de poros, produtos hidratados e cimento não hidratado para amostras mantidas em câmara úmida por três dias, 28 dias e um ano. Dos dados apresentados no trabalho, é possível concluir que, no geral, para maiores relações a/c tem-se menos partículas anidras ao longo do tempo. A Figura 5 demonstra alguns dos dados contidos em Yio *et al.* (2014).

FIGURA 5 – INFLUÊNCIA DA RELAÇÃO A/C NA QUANTIDADE DE PARTÍCULAS NÃO HIDRATADAS



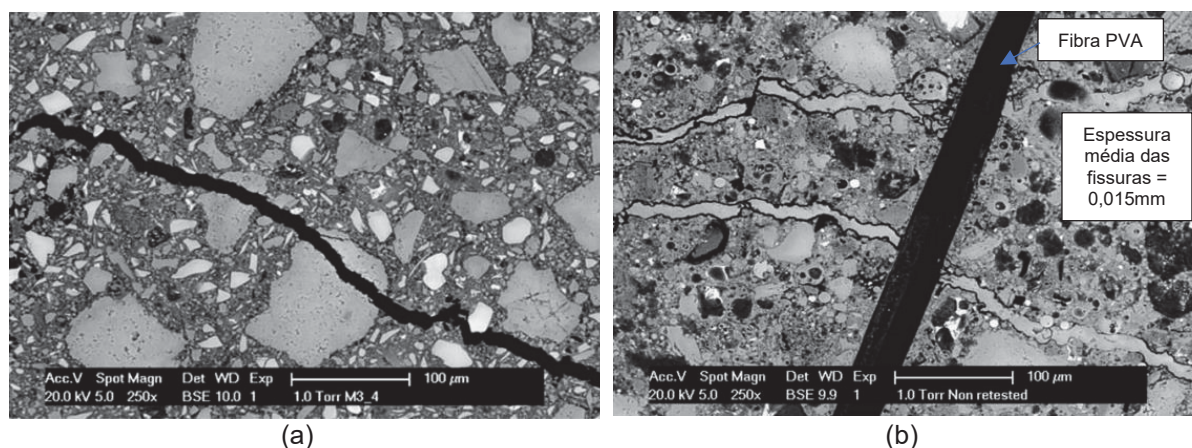
FONTE: Adaptado de Yio *et al.* (2014)

3.3 INFLUÊNCIA DOS AMBIENTES DE EXPOSIÇÃO

Analizando os mecanismos de autocicatrização expostos por Tittelboom e Belie (2013), já é possível inferir a necessidade de água para sua ocorrência. Além disso, para que haja a precipitação de carbonatos, é necessário o ingresso de gás carbônico para o interior das fissuras. Algumas pesquisas que demonstram a importância do suprimento de água e dióxido de carbono pelo ambiente ao qual os elementos fissurados estão expostos para a ocorrência de autocicatrização são apresentadas a seguir.

Sahmaram, Yildirim e Erdem (2013) constataram redução significativa na migração de cloretos em corpos de prova e compósitos de cimentos com fibras tanto expostos ao ar a condições climáticas padrão de laboratório, quanto continuamente imersos em água. Contudo, esta última condição demonstrou reduções mais pronunciadas, o que evidencia que a hidratação de partículas anidras apresenta resultados mais eficazes no aumento da resistência do concreto fissurado diante do ataque de cloretos. Qian *et al.* (2009) também observaram maior eficiência na autocicatrização de compósitos cimentícios continuamente imersos em água, demonstrando capacidade de deflexão e resistência à tração na flexão superiores às aquelas obtidas antes da fissuração, o que não ocorreu para os corpos de prova mantidos em exposição ao ar. A Figura 6 apresenta imagens de fissuras após o período de 28 dias nos diferentes ambientes de exposição.

FIGURA 6 – FISSURAS APÓS 28 DIAS EM EXPOSIÇÃO AO AR EM (a) E À ÁGUA EM (b)

FONTE: adaptado de Qian *et al.* (2009)

De maneira mais detalhada, Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013) observaram os efeitos das condições ambientais de exposição de compósitos cimentícios com fibras fissurados sobre a autocicatrização. Os autores analisaram a deflexão, rigidez e resistência de corpos de prova prismáticos, fissurados por flexão em três pontos, após 28 dias de exposição nas condições imerso em água, ciclos de molhagem e secagem, e exposição ao ar em condições padrão de laboratório. Considerando apenas as dosagens com mecanismo autógeno de autocicatrização, pode-se observar que os corpos de prova condicionados a ciclos de molhagem e secagem obtiveram resultados superiores para todos os parâmetros, chegando a superar até mesmo a resistência à tração na flexão de corpos de prova não fissurados. Já os corpos de prova mantidos ao ar tiveram os piores resultados em todos os parâmetros, demonstrando autocicatrização insignificante. Tais resultados reafirmam a essencialidade de água para o processo de autocicatrização, tendo em vista sua necessidade para a solubilização e hidratação de substâncias envolvidas. Além disso, como esperado, a alternância entre imersão e contato com o ar favoreceu a formação de carbonatos, potencializando a autocicatrização.

Uma alternativa aos ciclos de molhagem e secagem para estudos de autocicatrização em laboratório é apresentada no trabalho de Choi *et al.* (2016), no qual os pesquisadores forneceram gás carbônico aos corpos de prova previamente fissurados imersos, por meio de bombeamento de bolhas de CO₂ no líquido de imersão. Em paralelo, os autores também analisaram a influência da composição de líquidos de imersão, utilizando-se de água e de solução saturada de cal em água. Através deste programa experimental, Choi *et al.* (2016) concluíram que ao manter

alto o teor de hidróxidos de cálcio no concreto, a solução saturada de cal contribuía para a autocicatrização, apresentando a recuperação da região fissurada de maneira mais rápida e eficiente por formação de silicatos de cálcio hidratados e precipitação de carbonatos de cálcio.

Herbert e Li (2013) estudaram a influência da exposição ao meio ambiente na autocicatrização em corpos de prova de compósitos cimentícios com fibras de PVA e alto teor de cinzas volantes. Nesta pesquisa, corpos de prova prismáticos foram submetidos à fissuração por tração e em seguida foram mantidos em área externa, sob as condições climáticas naturais, em Ann Arbor, cidade dos Estados Unidos com alta amplitude térmica (-11,7°C a 32,8°C) e vários eventos pluviométricos ao longo do ano. Os pesquisadores monitoraram a ocorrência de autocicatrização nos corpos de prova por ensaios de frequência de ressonância e também pelo recarregamento até uma deformação pré-determinada em períodos diferentes, para grupos distintos. Notou-se que a recuperação da rigidez e da resistência dos corpos de prova até a primeira fissura no processo de pré-carregamento chegava a 100%, sendo mais relevante em períodos mais chuvosos e quentes. Além disso, Herbert e Li observaram flutuação da frequência de ressonância após períodos chuvosos, caindo para 95% do valor antes da fissuração e logo retornando a 105% do mesmo valor. Atribui-se essa oscilação à dissolução e lavagem de carbonatos causada pelas precipitações, seguida da carbonatação de hidróxidos em períodos de estiagem.

3.4 ANÁLISE GERAL DE BIBLIOGRAFIA APRESENTADA

A Tabela 1 apresenta informações relevantes sobre os trabalhos apresentados na Seção 3, tendo em vista os fatores relevantes a este trabalho. Os trabalhos de Estado da Arte (HUANG *et al.*, 2016; HEARN, 1998; TITTELBOOM e BELLIE, 2013;) e aqueles que não têm relação direta com o tema autocicatrização (YIO *et al.*, 2014) não são apresentados nesta tabela.

TABELA 1 – SUMÁRIO DE TRABALHOS CITADOS NA SEÇÃO 3

<i>continua</i>					
Trabalho	Materiais	Indução de fissuras	Exposição após fissuração	Ensaio	Principais conclusões
Reinhardt e Jooss (2003)	Concreto com sílica ativa e cinzas volantes, contendo armadura	Compressão diametral com classificação posterior das fissuras (0,05, 0,10 e 0,20 mm)	Ensaio de percolação contínua	Percolação de água com pressão constante	Maiores reduções da percolação ao longo do tempo para fissuras menos espessas.
Tittelboom <i>et al.</i> (2012)	Pastas de cimento e argamassa com diferentes relações a/c e teores de cinzas volantes e escórias	Flexão em três pontos para análise visual e resistência mecânica / compressão diametral para permeabilidade.	Imersão em água	Calorimetria de titulação isotérmica, investigação microscópica, permeabilidade, resistência mecânica à flexão.	Pouca autocicatrização para corpos de prova com fissuras superiores a 0,2 mm. Predominância do mecanismo de re-hidratação para cimento com substituições e do mecanismo de formação de carbonatos para cimentos sem substituição.
Darqueness <i>et al.</i> (2016)	Argamassas contendo ou não escórias de alto forno	Compressão diametral	Imersão em água	Porosimetria por intrusão de mercúrio, Migração acelerada de cloretos, Calorimetria semi-adiabática.	Adição de escórias eleva a disponibilidade de partículas não hidratadas, aumentando a redução da penetrabilidade de cloretos causada pela autocicatrização.
Heide e Shlangen (2007)	Argamassas com cimento puro e com substituição de escórias	Flexão por três pontos até abertura pré-determinada	Imersão e água com e sem aplicação de compressão	Flexão por três pontos e permeabilidade	Há maior recuperação da resistência à flexão devido a autocicatrização para fissuras geradas nas primeiras horas de idade da argamassa.
Zhong e Yao (2008)	Concreto com cinzas volantes ou escórias	Compressão axial do concreto	Câmara úmida	Velocidade de ondas ultrassônicas	Há aumento da capacidade de autocicatrização com o aumento do grau de fissuração do concreto até um certo limite. Este limite é maior para concretos convencionais do que para concretos de alta resistência.

continua

Trabalho	Materiais	Indução de fissuras	Exposição após fissuração	Ensaios	Principais conclusões
Kan e Shi (2012)	Compósito cimentício com fibras de PVA e cinzas volantes	Tração uniaxial	Ciclos de imersão em água e secagem ao ar	Frequência de ressonância, tração uniaxial, espectroscopia EDS, microscopia de varredura	Presença de cinzas volantes e idades mais tardias favorecem o surgimento de fissuras mais finas e distribuídas, o que favorece a autocicatrização.
Sahmaram, Yildirim e Erdem (2013)	Compósitos cimentícios com fibras de PVA com e sem cinzas volantes ou escórias	Compressão diametral	Imersão em água, exposto ao ar ou ciclos de gelo/degelo	RCPT, observação microscópica, porosimetria por intrusão de mercúrio, microscopia de varredura, espectroscopia EDS.	A substituição de parte do cimento por materiais suplementares aumenta significativamente a capacidade de autocicatrização do concreto. Sendo esta mais eficiente quando há escórias, apesar de as cinzas volantes garantirem mais partículas não hidratadas.
Qian et al. (2009)	Compósitos cimentícios com fibras de PVA e diferentes teores de cinzas volantes, escórias e pó de calcário.	Flexão em 4 pontos até a deflexão de 2,4 mm.	Imersão em água e exposição ao ar.	Resistência à compressão, resistência à tração por flexão, capacidade de deflexão, microscopia de varredura e espectroscopia EDS.	A autocicatrização é mais eficiente quando há menores teores de pós inertes e quando há exposição à água após a fissuração.
Takagi <i>et al.</i> (2018)	Concreto autoadensável com fibras, escória e adições cristalizantes	Compressão axial com 90% da tensão média de resistência	Imersão em solução saturada de água e cal	Resistência à compressão, Absorção, RCPT.	A inclusão de escória e adições cristalizantes contribuem para a autocicatrização
Na <i>et al.</i> (2012)	Argamassas com diferentes teores de cinzas volantes	Ciclos de gelo/degelo	Imersão em água em diferentes temperaturas	Resistência à compressão e flexão, determinação do módulo de elasticidade, carbonatação acelerada, difratometria Rietveld, porosimetria por intrusão de mercúrio.	Recuperação de características mecânicas devido à autocicatrização é superior para compósitos contendo cinzas volantes que têm maiores teores de partículas anidras. A exposição a temperaturas mais elevadas contribui para a autocicatrização.

continua

Trabalho	Materiais	Indução de fissuras	Exposição após fissuração	Ensaios	Principais conclusões
Ozbay <i>et al.</i> (2013)	Compósito de cimentos com fibras de PVA e cinzas volantes	Compressão diametral até deformações pré-definidas	Imersão em água, exposição ao ar ou ciclos molhagem e secagem	Compressão diametral, análise por microscopia, RCPT, microscopia de varredura, espectroscopia EDS	Presença de cinzas volantes aumentou teor de partículas anidras no momento da fissuração e contribuiu para fissuras mais distribuídas e menos espessas, o que favoreceu a autocicatrização.
Termkhajornkit <i>et al.</i> (2009)	Pasta de cimento com diferentes teores de cinzas volantes	Retração autógena	Corpos de prova permaneceram selados para manutenção da umidade interna	Resistência à compressão, porosimetria por intrusão de mercúrio, determinação da difusão efetiva de cloretos por método acelerado (JSCE-G571-2003), difratometria Rietveld	Pastas contendo cinzas volantes apresentaram maior recuperação de resistência à compressão, estanqueidade e resistência à difusão de cloretos. Os autores demonstraram que este efeito se deve ao teor de partículas não hidratadas superior para pastas com substituição.
Sisomphon, Coporoglu e Koenders (2013)	Compósitos cimentícios com fibras de PVA e adições cristalizantes	Flexão em quatro pontos até a deflexão de 1,2 mm	Imersão em água com e sem substituição periódica, ciclos de molhagem/secagem e exposição ao ar	Quantificação de fissuras por análise visual, Flexão em 4 pontos, análise microscópica, microscopia de varredura, espectroscopia EDS	A condição de exposição é essencial para a ocorrência de autocicatrização, sendo a mais eficiente os ciclos de molhagem e secagem.

					conclusão
Trabalho	Materiais	Indução de fissuras	Exposição após fissuração	Ensaio	Principais conclusões
Choi <i>et al.</i> (2016)	Compósitos cimentícios com diferentes tipos de fibras (PVA, PE e PP)	Tração uniaxial	Imersão em água ou em solução saturada de cal com ou sem microbolhas de CO ₂ introduzidos por bombeamento	Coefficiente de permeabilidade, Micro-tomografia computadorizada, termogravimetria	Fibras polarizadas contribuem para a autocicatrização de fissuras na superfície e no interior do concreto. O carbonato de cálcio foi o composto predominante na autocicatrização. A inclusão de microbolhas no líquido de imersão de CO ₂ contribui para a autocicatrização. A autocicatrização é mais eficiente quando o concreto fissurado é imerso em solução saturada de cal.
Herbet e Li (2013)	Compósito cimentício com fibras de PVA e cinzas volantes	Tração direta até a deformação de 0,5% e 1,0%	Exposição ao ambiente externo natural.	Frequência de ressonância e tração direta.	O regime de chuvas e a temperatura ambiente influenciam diretamente a autocicatrização, sendo esta favorecida em períodos de alta temperatura e pluviometria.

FONTE: o autor (2019)

Como pode-se observar, há uma predominância de estudos com utilização de argamassas e fibras quanto se trata da autocicatrização do concreto. Como já apresentado na justificativa deste trabalho, tais estudos, apesar de serem muito relevantes ao avanço na discussão sobre o tema, utilizam-se de materiais de aplicação restrita, tendo em vista suas dificuldades executiva e seu elevado custo de produção. Assim sendo, reafirma-se a necessidade de utilização também de materiais mais próximos dos aplicáveis à prática, considerando-se assim estruturas de médio e grande porte, sujeitas à ocorrência de fissuração e expostas à umidade e também a agentes agressivos.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Esta seção apresenta os fatores de controle e os parâmetros fixos que compreendem esta pesquisa, além dos materiais utilizados e ensaios realizados.

4.1 PARÂMETROS EXPERIMENTAIS

Visando o atendimento dos objetivos deste trabalho, determinaram-se os fatores de controle (aqueles que variam) e os parâmetros fixos. Tratando-se do primeiro objetivo – a exploração da influência da presença de cinzas volantes em cimentos comerciais na autocicatrização e durabilidade do concreto fissurado – decidiu-se pela análise do fator “tipo de cimento” em três níveis: CP V ARI, CP II Z e CP IV RS, os quais serão chamados neste estudo de VA, II e IV. A decisão dos níveis baseou-se nas diferentes proporções de cinzas volantes que tais cimentos apresentam. Sendo assim, o cimento CP V ARI representa um nível de referência, uma vez que este não tem cinzas volantes em sua composição, ao passo que o cimento CP II Z representa um nível com baixo teor de cinzas volantes e o cimento CP IV RS representa um nível com alto teor de cinzas volantes.

Além disso, para que houvesse a possibilidade de analisar se os efeitos observados são decorrentes de um possível processo de autocicatrização ou se são meramente ocasionados pela continuidade das reações dos compostos do cimento, outro fator foi estipulado: a ocorrência de fissuração nos corpos de prova. Neste fator, há dois níveis: o primeiro, de referência, representa o concreto onde ocorre apenas a continuidade das reações do cimento, não havendo indução de fissuração para os grupos que compõem esse nível; o segundo, representa os corpos de prova onde há a possibilidade de autocicatrização, a qual só pode ocorrer em material fissurado, sendo portanto os corpos de prova deste nível submetidos à indução de fissuração. Esses níveis são apresentados nesta pesquisa pelas letras N e F, respectivamente.

Tendo determinados os fatores variáveis, apresentam-se os parâmetros fixos, os quais são: granulometria e composição dos agregados, proporção agregados/cimento (m), teor de argamassa, relação água/cimento, tempo e ambiente de cura antes da fissuração e ambiente de cura após a fissuração.

Os critérios de escolha dos agregados fundamentam-se na viabilidade de aplicação prática na região onde a pesquisa é desenvolvida e também na melhora das

condições de autocicatrização. Elegeu-se como agregado miúdo a areia natural, tendo em vista sua disponibilidade e sua comum aplicação em obras na região. Quanto ao agregado graúdo optou-se pela brita granítica, de alta disponibilidade e comum aplicação na região, com dimensão máxima característica (DMC) 9,5 mm. A escolha de uma DMC relativamente baixa teve a finalidade de favorecer a abertura de fissuras mais distribuídas pela matriz e menos espessas no concreto sob altas cargas de compressão, segundo o demonstrado por Akçaoglu, Tokyay e Çelik (2004). Tal morfologia de fissuração potencializa a autocicatrização autógena do concreto, como apontado por Kan e Shi (2012).

Para os parâmetros fixos relacionados ao traço, optou-se pela definição de teor de argamassa e relação água/cimento empregando-se o método descrito em Helene e Terzian (1992). Inicialmente, a relação cimento:agregados, em massa, foi fixada como 1:3,5, possibilitando a produção de um concreto de alto consumo de cimento, o que, segundo Qian *et al.* (2009) potencializa a autocicatrização, uma vez que há maior disponibilidade de partículas anidras e portlandita quando o teor de aglomerante é maior. Em seguida, estabeleceu-se o teor de argamassa ótimo para os agregados a partir da adição de cimento, areia e água em porções controladas, até que houvesse o fechamento dos vazios entre agregados graúdos, resultando em 55% da massa total de concreto. Por último, a relação água/cimento de 0,45 foi obtida pela adição de porções de água, com massa pré-definida, até que o abatimento do concreto contendo cimento CP V ARI, medido de acordo com a norma NBR NM 67:1998, atingisse 105 ± 25 mm.

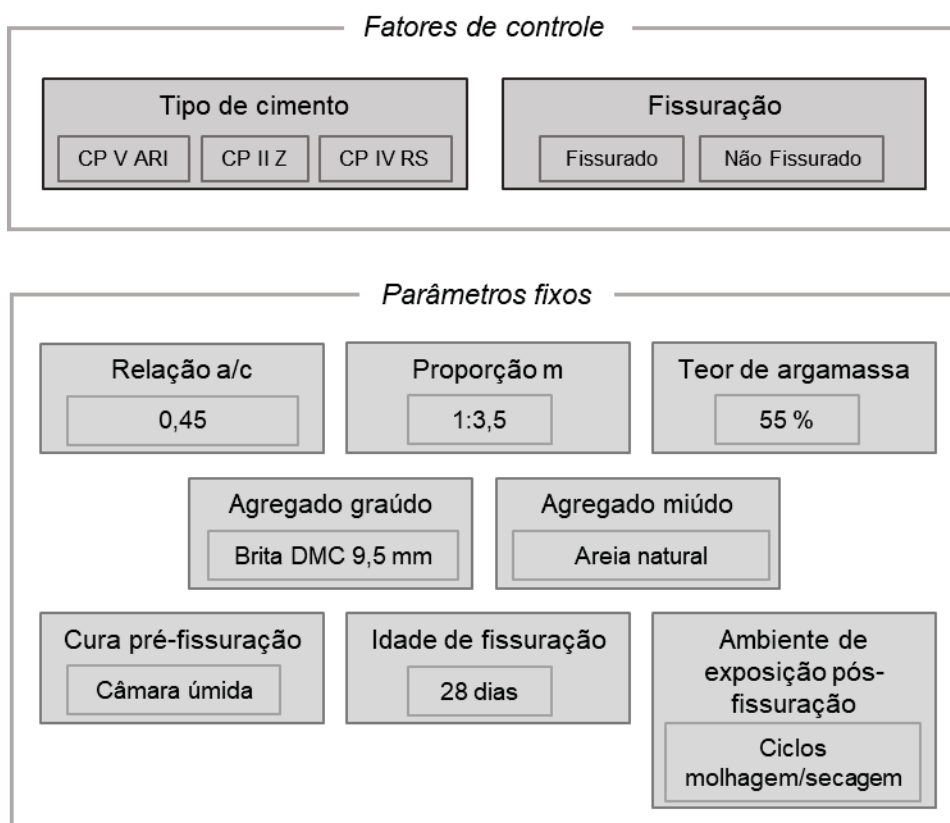
Para a cura após moldagem fixou-se a inserção dos corpos de prova em câmara úmida, com temperatura em $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%, em concordância com o recomendado pela norma NBR 5783 (ABNT, 2015). O tempo de manutenção em cura até a data de fissuração foi definido em 28 dias, considerando que este tempo é convencional em pesquisas de características do concreto, favorecendo a comparação dos resultados obtidos com os de outros trabalhos presentes na literatura.

Como ambiente de exposição após fissuração, optou-se pela manutenção dos corpos de prova em ciclos de alternância de molhagem por imersão e secagem ao ar, com a finalidade de garantir a ocorrência dos mecanismos de autocicatrização autógena expostos por Tittelboom e Belie (2013): hidratação de componentes anidros

pelo ingresso de umidade pelas fissuras e precipitação de carbonatos pela solubilização de hidróxidos e ingresso de gás carbônico. A essencialidade primeiramente da água e em seguida do dióxido de carbono disponível no ar para a ocorrência conjunta dos mecanismos de carbonatação é confirmada pelos experimentos de Sisomphon, Coporoglu e Koenders (2013). A partir deles, os pesquisadores evidenciam que a exposição dos compósitos cimentícios fissurados a ciclos de molhagem e secagem é mais benéfica à eficiência da autocicatrização do que a exposição apenas à umidade ou ao ar. Mais detalhes sobre os ciclos são expressos na Seção 4.3.

Um resumo com os fatores de controle e parâmetros fixos para o atendimento do objetivo principal da pesquisa é apontado na Figura 7.

FIGURA 7 – FATORES PARA ATENDIMENTO AO PRIMEIRO OBJETIVO



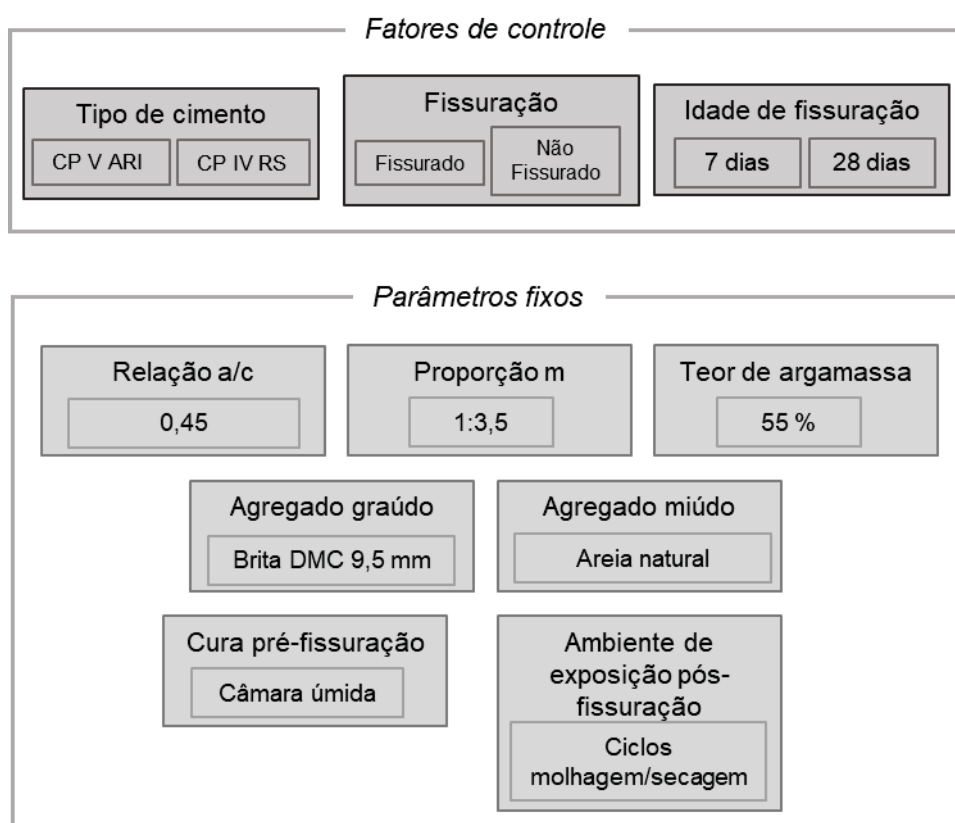
FONTE: o autor (2019)

Para o atendimento ao segundo objetivo – a análise da influência da idade da fissura na autocicatrização e durabilidade do concreto – o fator “idade da fissuração”, antes fixado em 28 dias, passa a ser variado, sendo explorado em dois níveis: fissuração aos 7 e aos 28 dias. O primeiro nível representa o concreto em suas primeiras idades, no período mais próximo da idade de desforma do concreto, como

apresentado na pesquisa de Vieira e Dal Molin (2011). O segundo nível aproxima-se das fissuras desenvolvidas quando o endurecimento do concreto está mais avançado, além de ser uma idade convencional em ensaios de concreto, possibilitando a comparação deste estudo com uma grande quantidade de pesquisas presentes na literatura. Optou-se por manter os três níveis do fator “tipo de cimento” apenas para o concreto fissurado aos 28 dias, subtraindo o nível CP II Z para os concretos cuja fissuração se dão ao 7º dia de idade. Tal manipulação mostrou-se necessária para tornar viável o programa experimental proposto, reduzindo a quantidade de corpos de prova moldados, fissurados e ensaiados.

A Figura 8 apresenta os fatores definidos para atendimento do segundo objetivo deste trabalho.

FIGURA 8 – FATORES PARA ATENDIMENTO AO SEGUNDO OBJETIVO



FONTE: o autor (2019)

Os grupos formados pela combinação dos níveis dos fatores variáveis desta pesquisa, considerando primeiro e segundo objetivos, são apresentados na Tabela 2.

TABELA 2 – GRUPOS DE COMBINAÇÕES DOS FATORES DE CONTROLE

		Fissurados			Não fissurados		
Tipo de cimento		CP V ARI	CP II Z	CP IV RS	CP V ARI	CP II Z	CP IV RS
Idade para a fissuração	7 dias	VA07F ²	-	IV07F ²	VA07N ²	-	IV07N ²
	28 dias	VA28F ^{1,2}	II28F ¹	IV28F ^{1,2}	VA28N ^{1,2}	II28N ¹	IV28N ^{1,2}
¹ Grupo aplicado ao atendimento do primeiro objetivo ² Grupo aplicado ao atendimento do segundo objetivo							

FONTE: o autor (2019)

4.2 MATERIAIS

Como já explicitado, os cimentos utilizados nesta pesquisa são dos tipos CP V ARI, CP II Z e CP IV RS. Para os lotes dos cimentos empregados, o teor de substituição de clínquer por cinzas volantes é, segundo o fabricante, aproximadamente 12% para o tipo CP II Z e 27 % para o tipo CP IV RS. Algumas características químicas, físicas e mecânicas são apresentadas na Tabela 3.

TABELA 3 – CARACTERÍSTICAS DOS CIMENTOS EMPREGADOS

Cimento		CP V ARI	CP II Z 32	CP IV RS 32
Al ₂ O ₃		4,17%	6,30%	9,90%
SiO ₂		18,73%	21,08%	28,88%
Fe ₂ O ₃		2,83%	3,11%	4,00%
CaO		61,43%	55,11%	45,82%
MgO		3,54%	3,26%	2,65%
SO ₃		3,22%	2,85%	2,23%
CaO livre		0,56%	0,50%	0,48%
Resíduos insolúveis		0,66%	10,11%	25,26%
Equivalente alcalino		0,65%	0,87%	1,18%
Tempo de pega (h:min)	Início	03:30	04:15	04:00
	Fim	04:15	05:00	05:00
Consistência normal		31,40%	28,40%	31,10%
Finura Blaine (cm ² /g)		4480	3630	4120
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	23,5	12,4	15,0
	3 dias	39,7	27,9	28,2
	7 dias	45,6	33,0	35,0
	28 dias	52,3	41,0	45,6

FONTE: Cimentos Itambé (2018)

Pode-se observar que o teor de sílica é maior para o CP IV e, em seguida, para o CP II Z, enquanto o teor de óxido de cálcio é menor para estes tipos. Isto é uma consequência da substituição de clínquer por cinzas volantes nesses cimentos. Além do mais, é importante observar a finura dos aglomerantes, já que estas têm influência sobre a autocicatrização. Pode-se notar que o CP V ARI é o mais fino, devido à sua característica requerida de rápida hidratação, típica desse tipo de cimento. Próxima à finura do CP V ARI está também a finura do cimento CP IV RS, que garante tempos de pega similares aos do cimento CP II Z, que tem menores teores de cinzas volantes e do qual se espera pega mais rápida quando nas mesmas condições de finura.

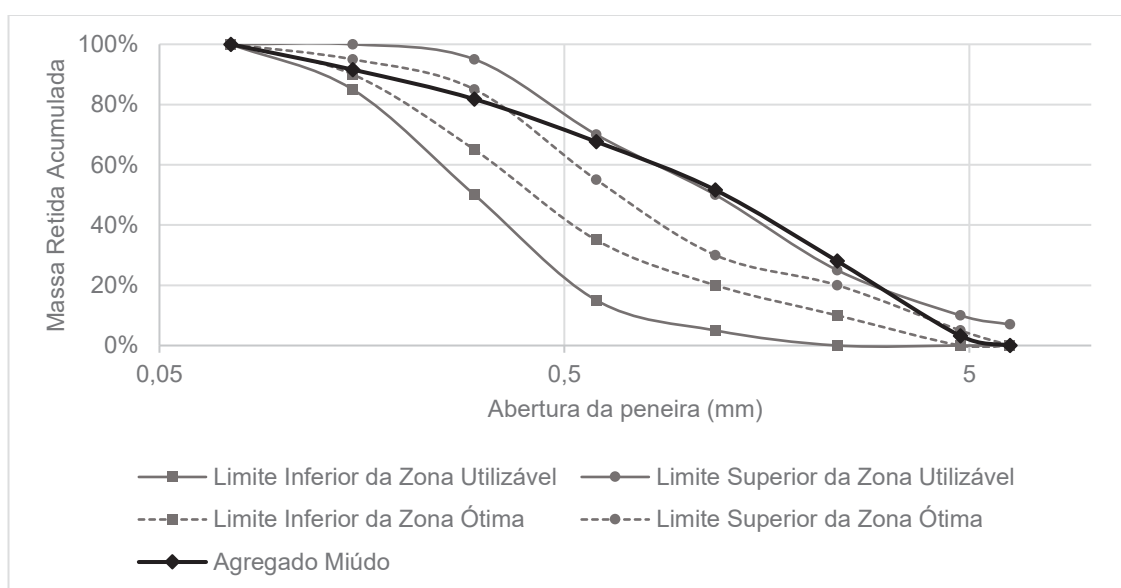
Em relação aos agregados miúdos, utilizou-se areia natural na produção do concreto empregado nessa pesquisa. Algumas de suas características físicas são apresentadas na Tabela 4 e sua curva granulométrica é apresentada na Figura 9.

TABELA 4 – CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO MIÚDO

Parâmetro		Norma
Massa específica (saturado superfície seca)	2,66 g/cm ³	NBR NM 52/2009
Massa unitária	1,63 g/cm ³	NBR NM 45/2006
Impurezas orgânicas	Mais claro que a solução padrão	NBR 7221/2012
Absorção de água	0,61%	NBR NM 30/2001

FONTE: Laboratório Alpes (2018)

FIGURA 9 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO MIÚDO



FONTE: Alpes (2017)

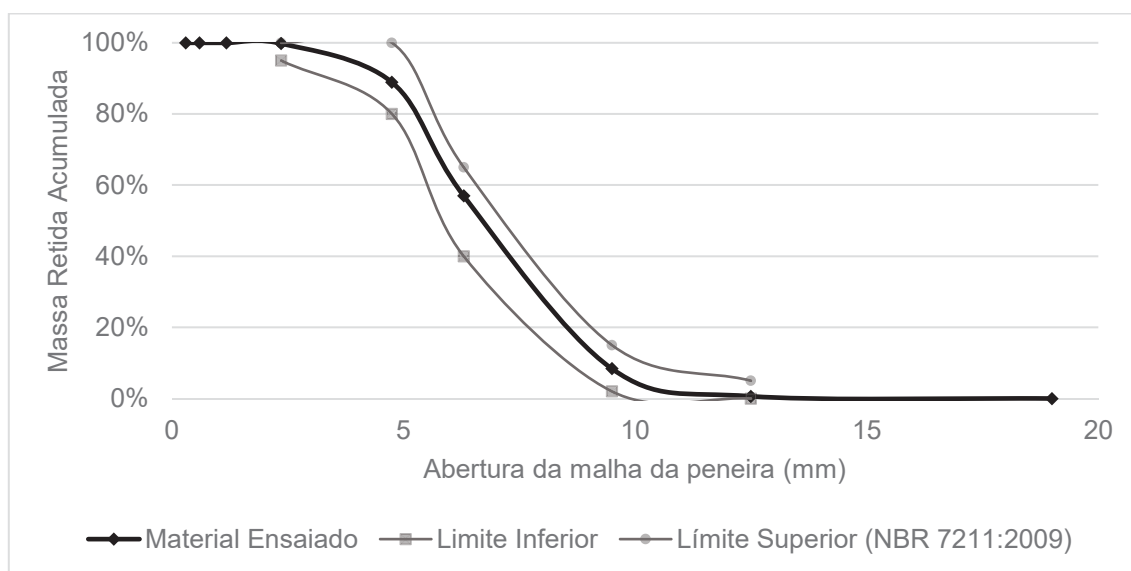
O agregado graúdo utilizado provém de rocha granítica e, de acordo com o exposto na seção 4.1, tem dimensão máxima característica de 9,5 mm. As características da brita utilizada são apresentadas na Tabela 5 e a curva granulométrica é apresentada na Figura 10.

TABELA 5 – CARACTERÍSTICAS DO AGREGADO GRAÚDO

Parâmetro		Norma
Massa específica - saturado superfície seca	2,54 g/cm ³	NBR NM 53/2009
Massa específica seco	2,57 g/cm ³	NBR NM 53/2009
Massa específica aparente	2,52 g/cm ³	NBR NM 53/2009
Absorção de água	0,80%	NBR NM 30/2000
Índice de forma	2,15	NBR 7809/2006
Dimensão máxima característica	9,5 mm	NBR NM 27/2001
Massa unitária - compactado	1,51 g/cm ³	NBR NM 45/2006
Massa unitária - solto	1,45 g/cm ³	NBR NM 45/2006
Material pulverulento	0,19%	NBR NM 46/2003

FONTE: Laboratório Alpes e o autor (2019)

FIGURA 10 – CURVA GRANULOMÉTRICA DO AGREGADO GRAÚDO



FONTE: o autor (2019)

Tendo em vista os fatores já abordados, os concretos produzidos têm seu traço, densidade, consumo de cimento, abatimento e resistência média à compressão aos 7 e 28 dias apresentados na Tabela 6.

TABELA 6 – CARACTERÍSTICAS DOS CONCRETOS

		VA	II	IV
Traço (c:a:p)		1 : 1,475 : 2,025		
Teor de argamassa		55%		
Relação a/c		0,45		
Densidade (kg/m ³)		2363,3	2372,2	2367,3
Consumo de cimento (kg/m ³)		477,4	479,2	478,2
Abatimento (mm)		105 ± 25	105 ± 25	105 ± 25
Resistência à compressão (MPa)	7 dias	35,9 ± 3,0	31,8 ± 1,0	27,1 ± 0,9
	28 dias	47,3 ± 2,9	34,6 ± 3,3	38,8 ± 2,2

FONTE: o autor (2019)

4.3 MÉTODO

4.3.1 Moldagem dos corpos de prova

Os corpos de prova foram moldados de acordo com o preconizado pela NBR 5783 (ABNT, 2015), sendo o concreto acomodado em formas metálicas cilíndricas com 10 centímetros de diâmetro e 20 centímetros de altura e adensado em mesa vibratória em uma camada até a ausência de bolhas na superfície, garantida em 12 segundos. Em seguida, as formas com concreto foram mantidas em superfície lisa e horizontal, com seu topo coberto com filme plástico por um dia. Posterior a esse período, houve o desmolde dos corpos de prova e o transporte destes para câmara úmida, com temperatura em $23 \pm 1^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar superior a 95%, local onde foram mantidos até a idade de fissuração.

4.3.2 Indução de fissuração

Nas idades definidas para a fissuração (7 ou 28 dias) realizou-se ensaio para determinação da resistência média à compressão dos concretos com os diferentes tipos de cimento. Tais parâmetros já foram demonstrados na Tabela 6. Tendo a resistência à compressão de cada concreto conhecida, foi possível definir a carga de indução à fissuração. A indução de fissuração escolhida para esta pesquisa constituiu-se da aplicação e manutenção de 80% da carga de ruptura dos corpos de prova por dois minutos. Esse processo de indução baseia-se nas características mecânicas do concreto apresentadas pela ACI 224R-01 (2001), que afirma que a propagação e interconexão de fissuras sob compressão tem início a partir do carregamento com

70% da carga de resistência, e por um teste piloto realizado para definição da intensidade e tempo de carregamento para indução.

O teste piloto levou considerou a aplicação de diferentes intensidades de carregamento em relação à carga média de ruptura à compressão (70% da f_{cm} , 80% da f_{cm} e 90% da f_{cm}) com manutenção por diferentes períodos (2 e 3 minutos). Nesse teste, foram destinados três corpos de prova do tipo VA28 para cada um dos sete grupos (um de referência, onde não se induziu a fissuração e outros seis combinando as intensidades e tempos de carregamento) para ensaios de resistência à compressão e medição da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas. No decorrer dos testes, os grupos com aplicação de 90% da carga resistente média tiveram ruptura de maioria ou todos seus corpos de prova durante o tempo de manutenção de carga, sendo desconsiderados da análise.

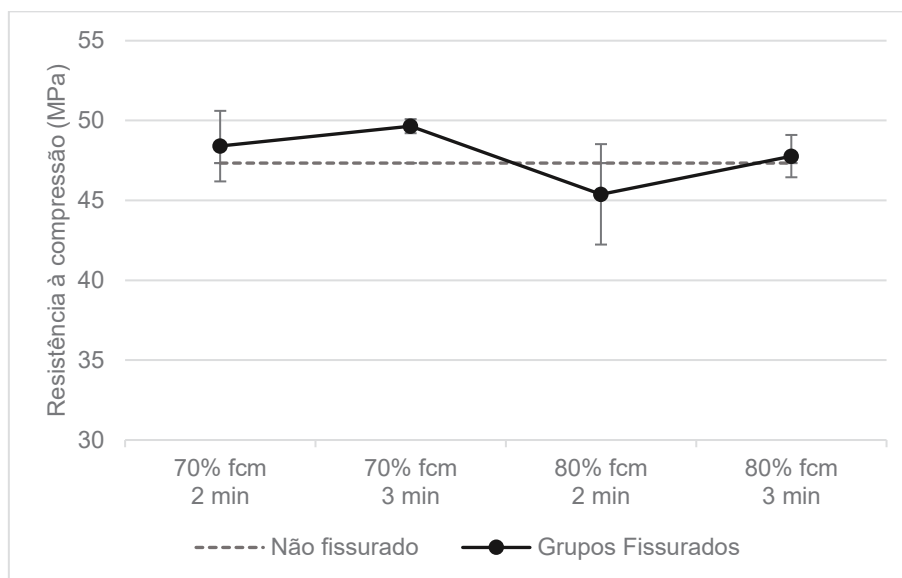
Ao analisar os resultados obtidos no teste (apresentados na Figura 11) por comparação múltipla de médias, com significância de 95%, observou-se que as mudanças na intensidade e duração de carregamento não causaram efeitos significativos na resistência à compressão dos grupos de análise. Tratando-se dos resultados de ultrassom, notou-se efeito significativo quando havia aumento da intensidade, mas não significativo quando havia aumento do tempo de indução. Isto posto, definiu-se que o melhor procedimento para a indução de fissuras seria o carregamento de 80%, mantido por apenas dois minutos.

4.3.3 Tratamento pós-fissuração

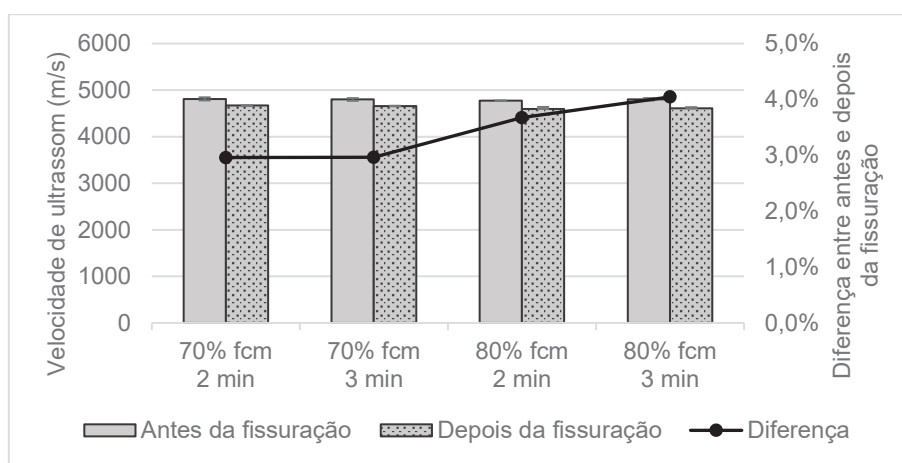
Após o processo de indução de fissuração, os corpos de prova foram submetidos a ciclos de molhagem e secagem semanais (total de 168 horas), com 78 horas de imersão em solução saturada de cal em água (10 g/L) com temperatura de $21\pm3^{\circ}\text{C}$ e 90 horas de secagem ao ar em ambiente com temperatura de $22\pm3^{\circ}\text{C}$, umidade relativa média de $75,4\% \pm 6,6\%$ e concentração de gás carbônico média de $0,075\% \pm 0,013\%$. A escolha da exposição em ciclos baseou-se no estudo de Sisomphon, Copuroglu e Koenders (2013), que indica maior eficiência de autocicatrização nesta condição tendo em vista a possibilidade de contato com a água e com o gás carbônico. A utilização de solução saturada de cal, baseou-se no melhor desempenho da autocicatrização neste meio, demonstrada por Choi *et al.* (2016), e

visou a manutenção de alto teor de hidróxido de cálcio no concreto, evitando a perda dos hidróxidos presentes na solução intersticial para o meio de imersão.

FIGURA 11 – RESULTADOS DO TESTE PARA (a) ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO E (b) ENSAIO DE PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS



(a)



(b)

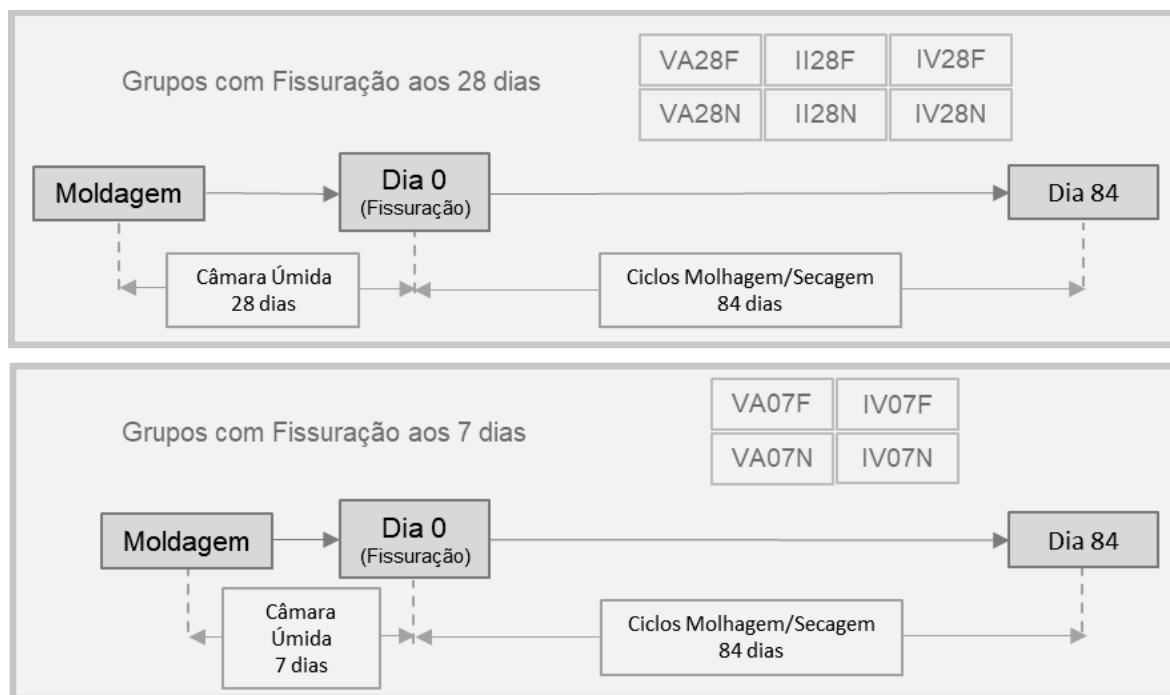
FONTE: o autor (2019)

4.3.4 Ensaios

Foram realizadas séries de ensaios para todos os grupos de combinações no dia da fissuração (dia 0) e 84 dias após a fissuração (dia 84). As séries são compostas de ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão, carbonatação acelerada e migração rápida de íons cloreto com colorimetria por nitrato de prata. Além destes, realizaram-se leituras semanais de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, visando acompanhar, em intervalos menores, a evolução da qualidade

dos concretos ensaiados ao longo do tempo. A Figura 12 apresenta um fluxograma representando as datas de ensaio.

FIGURA 12 – FLUXOGRAMA DE DATAS DE ENSAIO

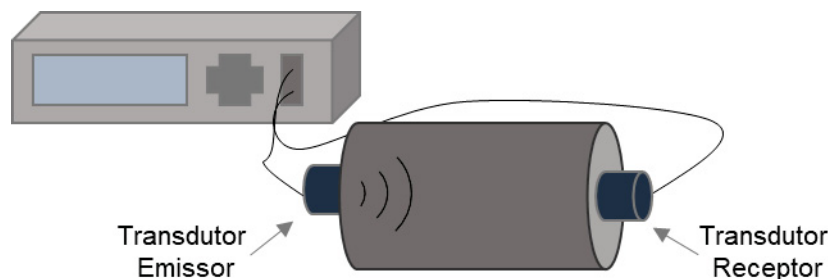


FONTE: o autor (2019)

a) *Determinação de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas*

Os ensaios de velocidade de propagação de ondas de ultrassom (VU), realizados semanalmente, respeitaram as recomendações da NBR 8802 (ABNT, 2013). Utilizaram-se transdutores de 54 kHz, recomendados para o concreto ensaiado, que foram acoplados sobre camada fina de gel, nas faces planas opostas de topo e base dos corpos de prova (Figura 13). Para cada grupo de ensaio foram reservados três corpos de prova, que foram acompanhados desde o dia seguinte à moldagem até o dia 84 após a fissuração. Com exceção do ensaio realizado logo após a desmoldagem, todos os corpos de prova tiveram suas VU medidas em condição saturado com superfície seca. Além disso, no dia 0, as velocidades foram medidas antes e depois da indução de fissuras, com a finalidade de observar o impacto da fissuração sobre os resultados.

FIGURA 13 – ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DA PROPAGAÇÃO DE VELOCIDADE DE ONDAS ULTRASSÔNICAS



FONTE: o autor (2019)

b) Resistência à compressão

Os ensaios de resistência à compressão seguiram as recomendações da norma NBR 5739 (ABNT, 2007). Foram reservados três corpos de prova para cada grupo de combinações de fatores para cada idade de ensaio, com exceção dos grupos de referência no dia 0, para os quais foram ensaiados 5 corpos de prova, tendo em vista que este resultado exigia maior precisão, uma vez que é base para a definição do carregamento de indução de fissuração dos corpos de prova. Para regularizar a aplicação de carga, utilizou-se disco de neoprene no topo dos corpos de prova.

c) Absorção por imersão

A absorção de água por imersão dos corpos de prova foi obtida a partir do preconizado pela norma norte-americana ASTM C-642 (ASTM, 2013): os corpos de prova foram mantidos em estufa com temperatura 110 ± 5 °C, até que a diferença entre leituras consecutivas em intervalo de 24 horas fosse inferior a 0,5%. Em seguida, os corpos de prova foram removidos da estufa e mantidos à temperatura ambiente, e, quando estabilizada a temperatura, foram imersos em água até que a constância de massa fosse obtida novamente, o que geralmente ocorria em 3 ou 4 dias. A absorção é definida pela massa de água absorvida em relação à massa do corpo de prova na condição seca, logo após a retirada da estufa. Para esse ensaio, foram reservados três corpos de prova para cada combinação de fatores em cada idade de ensaio.

Optou-se pela utilização do procedimento preconizada pela norma norte-americana por esta constar com um processo de imersão mais simples, tendo em vista a grande quantidade de corpos de prova ensaiados bem como as condições físicas de laboratório.

d) Carbonatação acelerada

Os ensaios de carbonatação acelerada têm início nas idades pré-estabelecidas (dia 0 e dia 84). Para tal, os corpos de prova após a cura foram alocados em câmara seca com temperatura controlada em $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ e umidade relativa do ar de $50\pm 2\%$ por 14 dias, visando o equilíbrio da temperatura e umidade interna do concreto com o meio externo. A duração do período de sazonalamento foi definida como o tempo, em dias, com valor múltiplo de sete, imediatamente posterior ao tempo de estabilização da massa dos corpos de prova (aproximadamente 11 dias). A adoção deste critério buscou evitar que o fim do sazonalamento coincidissem com feriados ou fins de semana, além de padronizar o mesmo período de sazonalamento para todos os corpos de prova ensaiados.

Posteriormente ao sazonalamento, os corpos de prova foram mantidos em câmara de carbonatação acelerada por 90 dias, com temperatura $30\pm 2^{\circ}\text{C}$, umidade relativa do ar de $60\pm 5\%$ e concentração de gás carbônico de $5,0\pm 0,5\%$. A temperatura adotada baseia-se nos estudos de Papadakis *et al.* (1991¹, citado por Pauletti, Possan e Dal Molin, 2007), que afirmam boas condições de carbonatação entre 20°C e 40°C , com pouca influência da variação da temperatura dentro desse intervalo. A umidade relativa do ar escolhida encontra-se dentro do intervalo ótimo para ocorrência de carbonatação (50 a 65%) apresentado por Papadakis *et al.* (1992², citado por Cascudo e Carasek, 2011). Para a concentração de CO_2 , Pauletti (2004) recomenda a adoção de teores abaixo de 6%, uma vez que concentrações muito elevadas podem acarretar em alterações microestruturais não observadas em condições naturais, as quais têm concentração entre 0,03% e 1%, segundo Neville (1997³, citado por Cascudo e Carasek, 2011). Além do mais, o teor de 5% é bastante frequente em pesquisas que envolvem carbonatação acelerada, como indicado por Pauletti, Possan e Dal Molin (2007), o que pode contribuir para a discussão dos resultados obtidos nesta pesquisa.

Ao fim do período de acondicionamento na câmara de carbonatação acelerada, os corpos de prova foram retirados e abertos em sua direção longitudinal por meio de

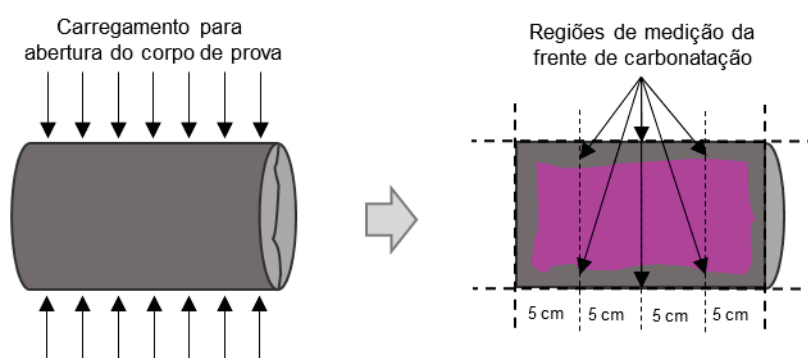
¹ PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Fundamental Modeling and Experimental Investigation of Concrete Carbonation. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 4, p. 363-373, 1991.

² PAPADAKIS, V. G.; FARDIS, M. N.; VAYENAS, C. G. Hydration and carbonation of pozzolanic cements. **ACI Materials Journal**, v. 89, n. 2, p. 119-130, 1992.

³ NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

compressão diametral em prensa. Em seguida, foi aspergida solução de fenolftaleína em álcool e água, nas proporções recomendadas pela EN 14630 (CEN, 2006). Após 10 minutos da aspersão, foram feitas as leituras das frentes de carbonatação em seis regiões a partir da face lateral dos corpos de prova, como representado na Figura 14. O resultado da profundidade de carbonatação de cada corpo de prova foi tomado como a média do valor obtido em cada uma das doze leituras obtidas das duas partes divididas.

FIGURA 14 – PROCEDIMENTOS DO ENSAIO DE DETERMINAÇÃO DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO



FONTE: o autor (2019)

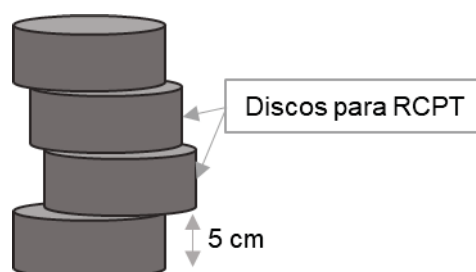
e) Migração rápida de cloretos

O ensaio de migração rápida de cloretos (RCPT) seguiu o preconizado pela ASTM C 1202 (ASTM, 2017). Foram reservados dois corpos de prova para cada grupo de combinações de fatores, os quais foram divididos em quatro discos, de aproximadamente cinco centímetros cada, com uso de disco de corte diamantado, sendo aproveitados para o ensaio apenas os discos centrais (Figura 15). A utilização de dois discos por corpo de prova apoia-se no trabalho de Medeiros, Hoppe-Filho e Helene (2009), segundo o qual, pode-se usar mais de uma fatia para cada corpo de prova sem perda da confiabilidade da representatividade da amostra, desde que ambas as faces retas das fatias sejam obtidas por serragem, evitando-se o aproveitamento da superfície de topo ou de base.

Posteriormente, os corpos de prova foram submetidos ao procedimento de saturação descrito na norma. Em seguida, os discos foram fixados a duas células de acrílico com uso de selante de silicone. O mesmo material de fixação foi utilizado para impermeabilização da lateral do disco exposta ao ambiente. Após um período de 12

horas para cura do selante, iniciou-se o ensaio propriamente dito, com preenchimento das células com as soluções descritas pela norma: uma com 3% de NaCl em água destilada e outra com concentração de 0,3 N (aproximadamente 0,12%) de NaOH no mesmo solvente. No interior de cada célula preenchida, posicionou-se uma placa de cobre, ligada por fio a uma fonte, que fornecia uma diferença de potencial de 60 V entre as células. Mediu-se a corrente passante pelo conjunto células e disco a cada 30 minutos ao longo de seis horas. O equipamento montado para o ensaio pode ser visto na Figura 16.

FIGURA 15 – DIVISÃO DO CORPO DE PROVA EM DISCOS



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 16 – REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE RCPT



FONTE: o autor (2019)

A carga passante total, variável de resposta do RCPT, representa a condutividade elétrica do concreto durante o período de leituras e é definida pela Equação 1.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (1)$$

Onde: Q é a carga passante em Coulombs, I_0 é a corrente (Amperes) imediatamente após a aplicação de potência e I_t é a corrente (Amperes) t minutos após a aplicação diferença de potencial.

De acordo com Shi (2004), o RCPT permite a obtenção de uma medida da condutividade elétrica do concreto que, indiretamente, permite uma leitura da penetrabilidade de cloretos. Ao passo que o teor de íons cloreto aumenta nas soluções dos poros do concreto, aumenta também a condutividade elétrica do material, tendo como resultados, maiores cargas passantes pelo concreto. Sendo assim, uma corrente alta indica penetrabilidade de cloretos também alta no concreto. Uma classificação da penetrabilidade de cloretos baseada na carga passante obtida no ensaio é apresentada na Tabela 7.

TABELA 7 – PENETRABILIDADE DE CLORETOS DE ACORDO COM A CARGA PASSANTE

Carga passante (Coulombs)	Penetrabilidade de cloretos
> 4000	Alta
2000 – 4000	Moderada
1000 – 2000	Baixa
100 -1000	Muito baixa
< 100	Desconsiderável

FONTE: adaptado da ASTM C 1202 (2017)

Apesar da obtenção de quatro discos a partir do corte de dois corpos para cada grupo de combinação de fatores, foram ensaiados três discos para cada grupo não fissurado (VA07N, IV07N, VA28N, II28N, IV28N) e quatro discos para cada grupo fissurado (VA07N, IV07N, VA28N, II28N, IV28N). A redução na quantidade de corpos de prova ensaiados para grupos não fissurados deu-se pela quantidade de equipamento disponível ao ensaio e considerando-se a menor variabilidade esperada nos resultados destes grupos frente aos que passaram pelo processo de indução de fissuras.

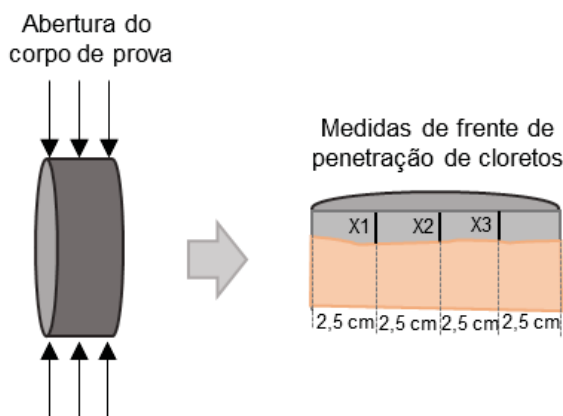
f) Colorimetria por aspersão de nitrato de prata

Tendo realizado os ensaios de migração rápida de cloretos, os mesmos corpos de prova foram submetidos a ensaio de aspersão de nitrato de prata. Assim, por meio de um ensaio relativamente simples e rápido, foi possível obter dados

complementares ao ensaio de RCPT. Tendo-se em consideração a forma acelerada de penetração de cloretos e o procedimento de ensaio não usual, os resultados obtidos são utilizados apenas com conotação comparativa dentre os grupos de análise deste estudo, o que é aceitável já que todos foram submetidos às mesmas condições de ensaio.

Para este teste, os discos de concreto retirados das células de ensaio de RCPT foram rompidos diametralmente por compressão e as faces recém expostas tiveram o pó removido por pincel e receberam aspersão de solução de nitrato de prata em água destilada, na proporção 0,1 N de AgNO_3 , conforme recomendado pela NT Build 492 (1999). Uma hora depois da aspersão foram feitas três medidas de frente de penetração de cloretos para cada uma das duas metades do disco, conforme apontado na Figura 17, utilizando paquímetro digital. A frente de penetração é definida como a região de coloração cinza claro, resultante da reação fotoquímica do nitrato de prata com os cloretos livres presentes no concreto.

FIGURA 17 – REPRESENTAÇÕES DO ENSAIO DE COLORIMETRIA COM ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA



FONTE: o autor (2019)

Para cada corpo de prova, foi considerada como profundidade de penetração de cloretos a média dos seis valores medidos nas duas metades ensaiadas.

Tendo apresentados todos os ensaios componentes do Método desta pesquisa, apresenta-se um quadro resumo com datas, quantidades e dimensões de corpos de prova utilizados na Tabela 8.

TABELA 8 – QUADRO-RESUMO DE ENSAIOS E CORPOS DE PROVA

Ensaio	Datas de realização	Quantidade de corpos de prova	Tipo de corpos de prova
Velocidade de ondas de Ultrassom	Semanal. Nos dias de fissuração foram feitas duas leituras, uma antes e outra após processo de indução.	3	Cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$
Resistência à compressão	Dia 0 e Dia 84	5 para grupos não fissurados no dia 0 e 3 para demais grupos e datas.	Cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$
Absorção por imersão	Dia 0 e Dia 84	3	Cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$
Carbonatação acelerada	Dia 0 e Dia 84	3	Cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$
Migração rápida de cloretos (RCPT)	Dia 0 e Dia 84	4 discos para grupos fissurados e 3 discos para grupos não fissurados.	Discos cilíndricos de $\varnothing 10 \times 5\text{cm}$ retirados de cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$
Colorimetria por aspersão de AgNO_3	Dia 0 e Dia 84	Mesmos corpos de prova do ensaio RCPT.	Discos cilíndricos de $\varnothing 10 \times 5\text{cm}$ retirados de cilíndricos $\varnothing 10 \times 20\text{cm}$

FONTE: o autor (2019)

4.3.5 Análise Estatística

Foi realizada a comparação múltipla de médias dos resultados através do teste de Tukey, com significância de 95%. As comparações realizadas e as conclusões obtidas pelos testes são apresentadas ao longo das discussões dos resultados na Seção 5.

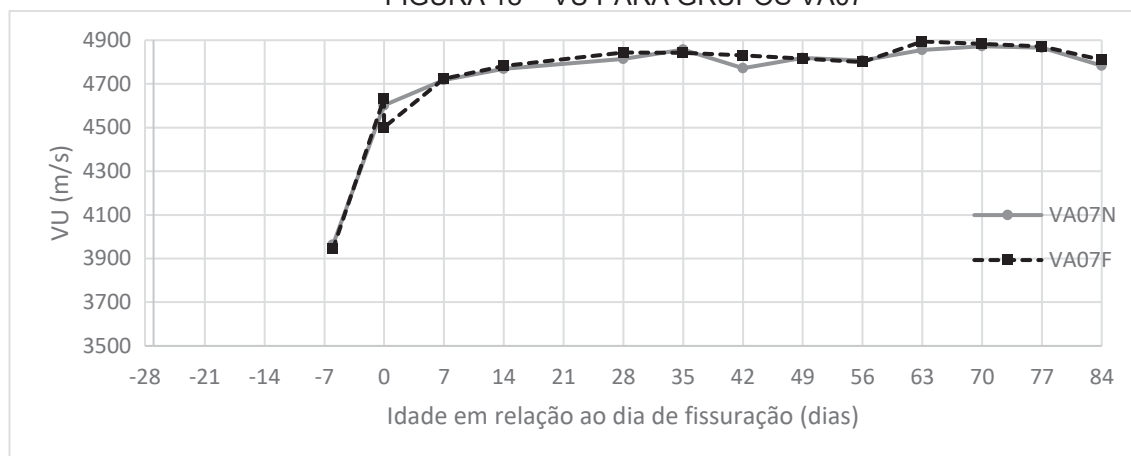
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados obtidos pelo programa experimental apresentado. Tais resultados serão, inicialmente, apresentados por tipo de ensaio e, ao final, serão abordadas as relações entre as variáveis de respostas bem como as semelhanças e diferenças nas tendências apontadas.

5.1 PROPAGAÇÃO DE ONDAS ULTRASSÔNICAS

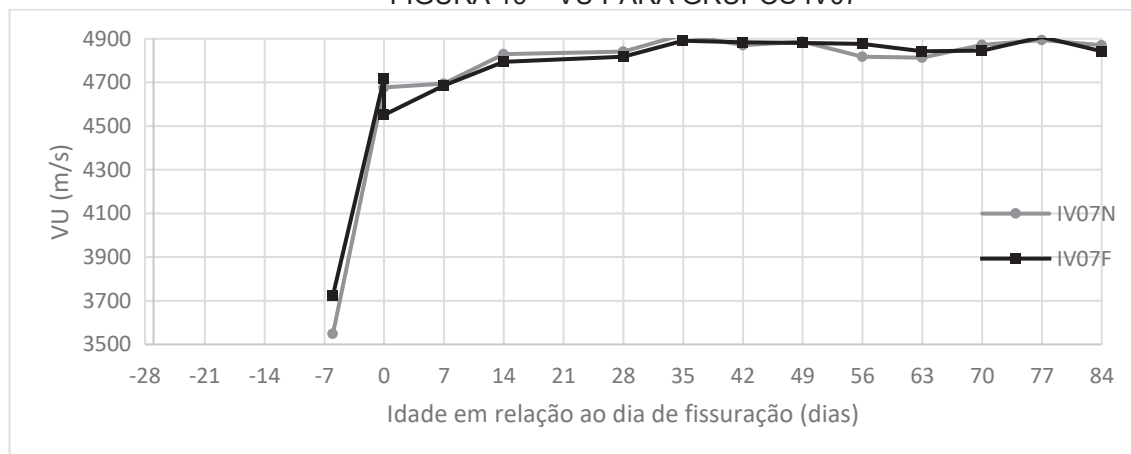
As médias das velocidades de ultrassom medidas para as datas pré-determinadas são apresentados para cada um dos grupos de combinação de fatores nas Figuras 18 a 22.

FIGURA 18 – VU PARA GRUPOS VA07



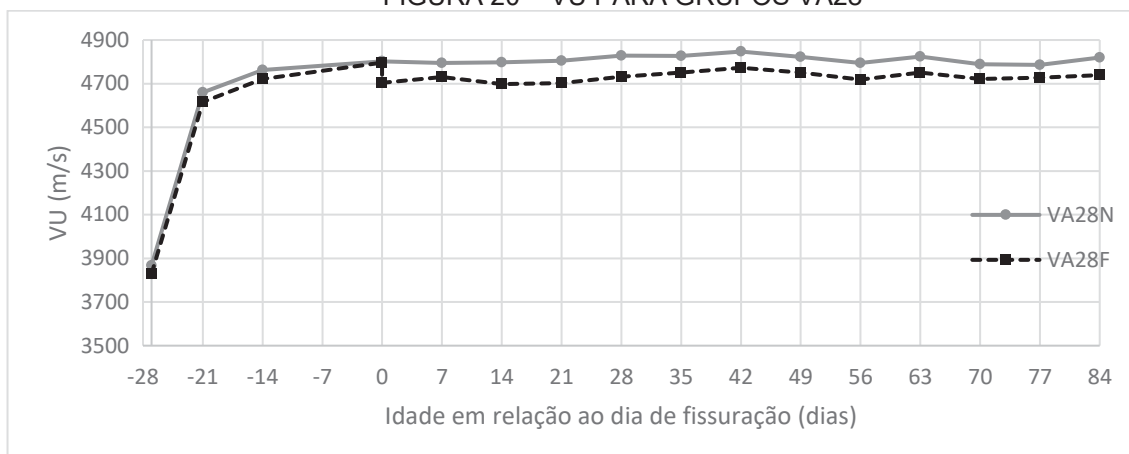
FONTE: o autor (2019)

FIGURA 19 – VU PARA GRUPOS IV07



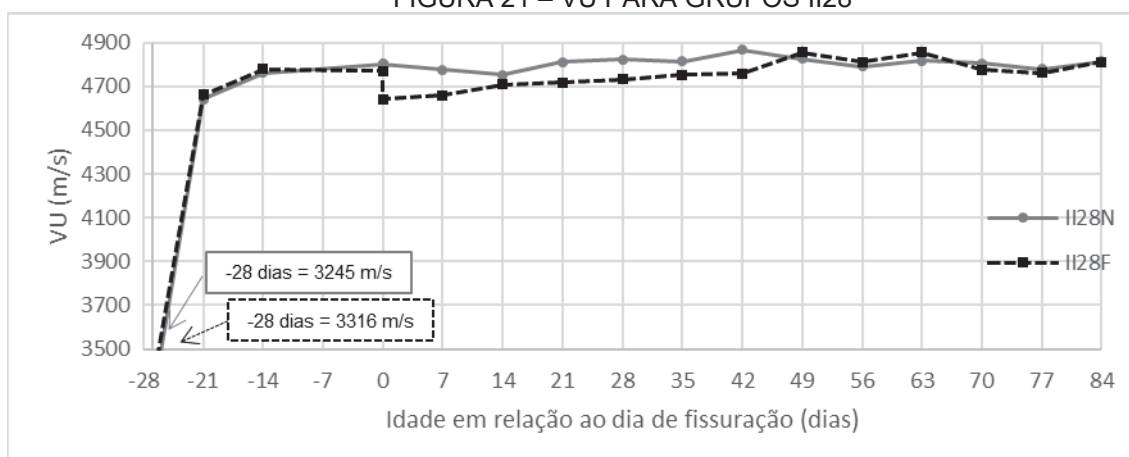
FONTE: o autor (2019)

FIGURA 20 – VU PARA GRUPOS VA28



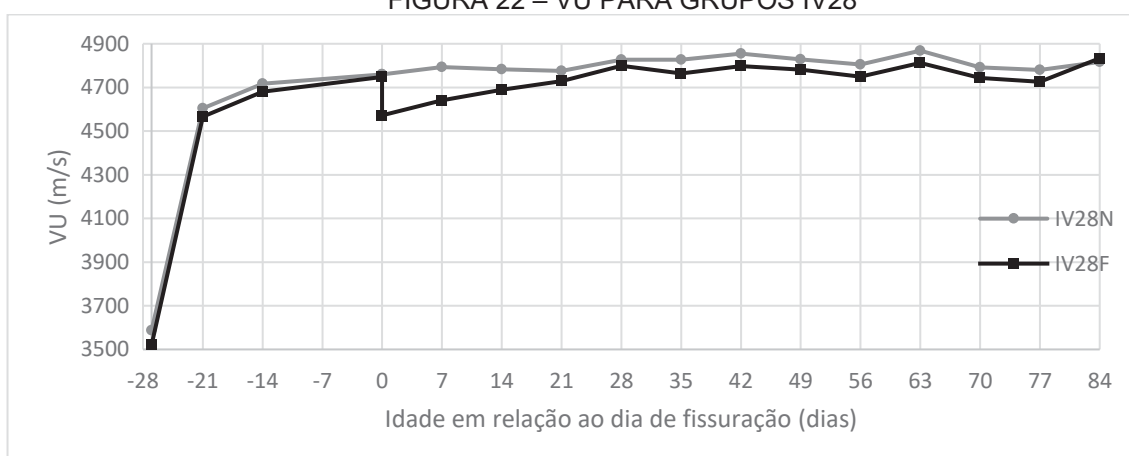
FONTE: o autor (2019)

FIGURA 21 – VU PARA GRUPOS II28



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 22 – VU PARA GRUPOS IV28



FONTE: o autor (2019)

Inicialmente, observa-se nos gráficos o crescimento acentuado da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas entre a primeira leitura, um dia após a moldagem, e a segunda leitura, aos sete dias de idade do concreto. Este

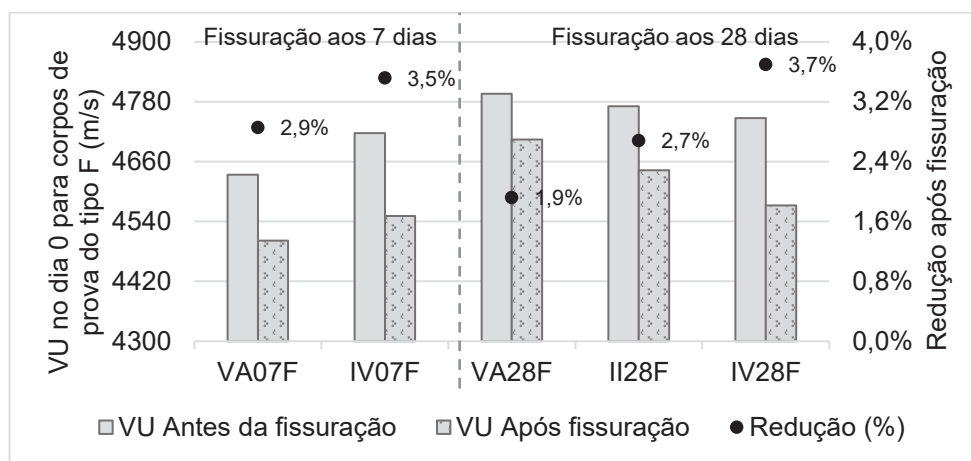
comportamento é esperado, uma vez que nos primeiros dias ocorre a maior parte da hidratação do cimento, sobretudo para o concreto produzido com o cimento CP V ARI, que não tem substituições do clínquer e possui maior superfície específica. Nota-se também que os corpos de prova produzidos com esse cimento têm as mais altas velocidades no primeiro dia, indicando sua maior velocidade de hidratação já nas primeiras 24 horas. Os resultados obtidos estão de acordo com o apresentado por Abo-Qudais (2005) que aponta o mesmo aumento expressivo de velocidade de ultrassom nas primeiras idades, seguida de uma redução nos ganhos, com estabilização a partir dos 28 dias para uma grande variedade de traços de concreto.

Analisando a redução de velocidade de ultrassom de corpos de prova dos grupos F logo após ao processo de indução de fissuras (dia 0), pode-se observar reduções mais expressivas para concretos contendo cinzas volantes, tanto para corpos de prova fissurados com 7 dias, quanto para aqueles fissurados aos 28 dias (Figura 23). Essa maior redução pode ser atribuída ao comportamento mais frágil do concreto contendo cinzas volantes nas idades estudadas, o que é comprovado pelo estudo de Lam, Wang e Poon (2008). Como a hidratação dos aglomerantes contendo pozolanas é mais lenta, espera-se que a pasta de cimento desses concretos contenha menos cristais resistentes nas primeiras idades, o que facilita o início e propagação de fissuras na ocorrência de carregamentos. Além disso, de acordo com Tangpagasit (2005), a resistência do concreto com cinzas volantes até os 28 dias de idade é afetada mais pelo efeito de empacotamento com preenchimento dos poros por partículas insolúveis, do que pelo efeito pozolânico. Complementarmente, Zhang (1995) afirma que há uma aderência fraca entre partículas não solubilizadas e a pasta de cimento, o que implica no início de desvios no estado linear de deformação e de propagação de fissuras em cargas (relativas à carga última) inferiores para concreto produzido com cinzas volantes, quando comparado ao produzido sem substituições.

Além disso, ao comparar as idades de fissuração, nota-se que as reduções da velocidade após fissuração são significativamente menores para o grupo VA28F (1,9%) em comparação com o grupo VA07F (2,9%). O mesmo não ocorre quando se compara a diminuição das velocidades após a fissuração do grupo IV28F (3,7%) e do grupo IV28N (3,5%), nos quais não há diferença significativa entre reduções. Mais uma vez, isto pode ser causado pela velocidade de reação mais baixa para concretos

pozolânicos, indicando que as mudanças na microestrutura entre os 7 e 28 dias de idade não foram suficientes para surtir efeito na fragilidade do concreto.

FIGURA 23 – REDUÇÃO APÓS FISSURAÇÃO NO DIA 0



FONTE: o autor (2019)

Em relação à ocorrência de autocicatrização, comparou-se graficamente e estatisticamente os valores obtidos para os corpos de prova submetidos à fissuração (F) e aqueles obtidos para os não submetidos (N). Das observações em gráfico (Figuras 18 a 22), entende-se que há três momentos: o primeiro, antes da fissuração, é marcado pelo crescimento das retas de maneira similar e coincidente entre grupos fissurados e não fissurados de mesmo cimento; o segundo, no dia da fissuração, é caracterizado por um distanciamento entre as retas F e N, indicando a redução de velocidade ocasionada pela fissuração dos corpos de prova dos grupos F; em seguida, em um terceiro momento, é possível analisar o comportamento após a fissuração, que pode indicar a ocorrência de autocicatrização (quando ocorre aproximação das retas afastadas no segundo momento) ou a não ocorrência da autocicatrização (quando é mantida uma diferença entre as retas ao longo do tempo, indicando manutenção dos efeitos da fissuração).

Inicialmente, pela visualização dos gráficos nas Figuras 18 a 22, para os grupos VA07 e IV07 nota-se que há a retomada da aproximação dos valores, perdida pela fissuração, já na semana seguinte (dia 7), indicando que já há a recuperação da velocidade perdida pelo processo de fissuração de forma rápida.

Para os grupos VA28, nota-se que a perda da VU ocorrida no dia da fissuração não é recuperada ao longo do tempo, permanecendo a reta representativa de VA28F inferior e praticamente paralela à reta representativa de VA28N. Já para os grupos

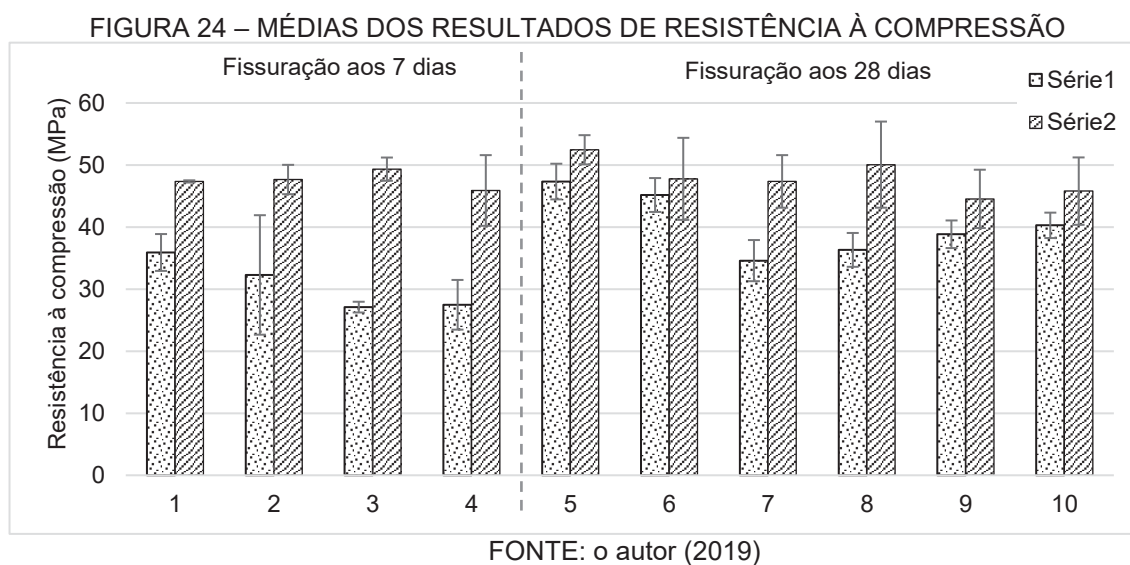
II28F e II28N é notável uma reaproximação de suas retas representativas após sete semanas depois da fissuração (dia 49). Os grupos produzidos com cimento CP IV, têm aproximação das retas nas três semanas posteriores à fissuração (dia 21), mantendo-se, a partir daí, com proximidade similar à observada antes do dia 0. Portanto, a partir desses resultados, conclui-se que a autocicatrização é mais rápida quanto maior é o teor de cinzas volantes.

Em suma, a partir da observação gráfica, afirma-se que a velocidade de autocicatrização foi maior quando a fissuração aconteceu nas primeiras idades do concreto, para ambos os tipos de cimento. Ao passo que, para fissuração ocorrida na idade de 28 dias, a autocicatrização ocorreu de forma mais lenta para cimentos pozolânicos e foi inexistente para o cimento CPV ARI. A partir destas inferências, pode-se afirmar que o fator de autocicatrização predominante foi a hidratação de partículas não hidratadas, uma vez que a autocicatrização: a) aconteceu mais rapidamente nas idades onde a hidratação era menos avançada; b) ocorreu de forma lenta em cimentos pozolânicos, que têm hidratação mais lenta que a do CP V ARI, quando a fissuração ocorre a idades mais avançadas; e c) não foi observada para os grupos contendo CPV ARI quando a fissuração ocorre em idades avançadas, quando este tem quase toda sua hidratação realizada.

Os resultados obtidos mostram concordância com os trabalhos de Tittelboom *et al.* (2012) e de Sahamran, Yildirim e Erdem (2013), que apontaram vantagem na autocicatrização de concretos produzidos contendo cinzas volantes frente àqueles compostos por cimentos sem substituições, quando o mecanismo principal é a hidratação de partículas ainda não hidratadas a partir da exposição das mesmas à água pela abertura de fissuras. Segundo esses pesquisadores, a presença de cinzas volantes retarda a hidratação das partículas, havendo então mais partículas não hidratadas nas idades de geração de fissuras, o que favorece a formação de silicatos de cálcio hidratados nas superfícies recém-expostas, ocasionando o preenchimento de vazios, uma vez que o produto gerado tem maior volume que os reagentes, e a retomada da monoliticidade, tendo em vista as características mecânicas favoráveis dos cristais de C-S-H.

5.2 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Como já citado na Seção 4.3, os ensaios de resistência à compressão foram realizados no dia da indução à fissuração (dia 0) e depois de 84 dias deste procedimento (dia 84). As médias para cada idade e para cada um dos grupos de análise são apresentadas na Figura 24, onde as barras de erro indicam os desvios-padrões das amostras.

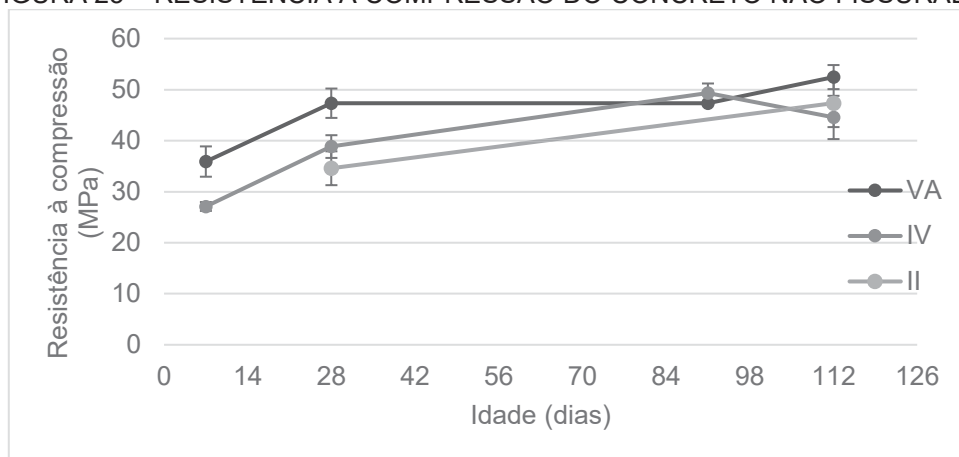


Inicialmente, observando-se apenas as amostras não submetidas à fissuração, é possível acompanhar a resistência à compressão em diferentes idades do concreto: 7 dias após moldagem (dia 0 dos grupos VA07N e IV07N), 28 dias após moldagem (dia 0 dos grupos VA28N, II28N e IV28N), 91 dias após moldagem (dia 84 dos grupos VA07N e IV07N) e 112 dias após a moldagem (dia 84 dos grupos VA28N, II28N e IV28N). Deve-se fazer a ressalva que as condições de cura são diferentes antes e depois do dia 0 de todos os grupos, contudo, ainda é possível fazer comparações entre as evoluções de cada tipo de cimento ao longo dos períodos, já que todos foram submetidos aos mesmos tratamentos. A Figura 25 apresenta os resultados de forma mais favorável a esta análise.

A partir da Figura 25, é possível observar uma clara diferença na resistência inicial à compressão nas primeiras idades (7 e 28 dias), em que o concreto produzido com CP V ARI tem resistência à compressão maior que as dos concretos produzidos com cimentos pozolânicos (CP IV e CP II Z). Ao longo do tempo, essa diferença é reduzida, havendo convergência da resistência em idades mais avançadas. Esse

movimento é esperado, pois o cimento CP V ARI contém mais clínquer e possui partículas mais finas, justamente para potencializar a hidratação e o ganho de resistência nas primeiras idades. Esta tendência corrobora o que já foi indicado nos testes de velocidade de ondas de ultrassom.

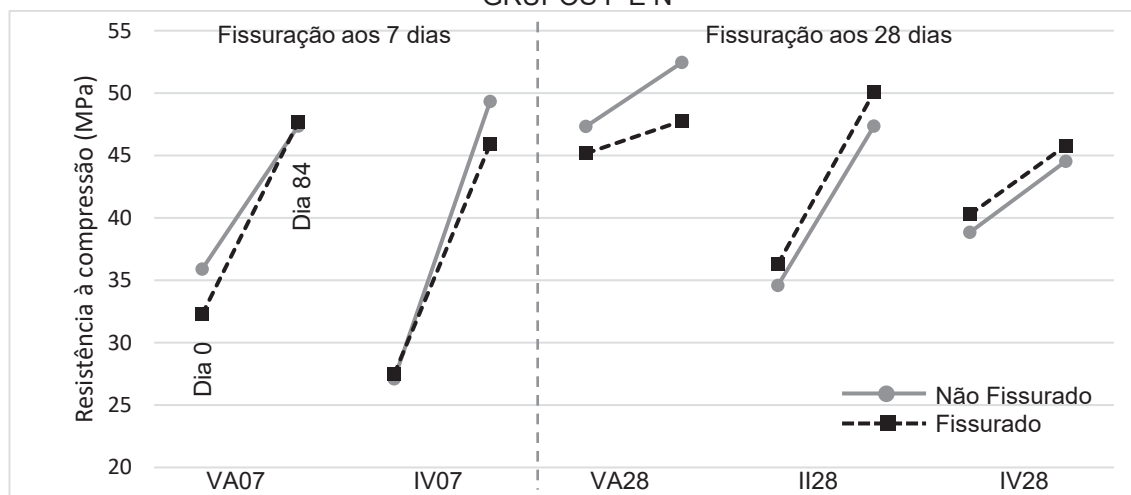
FIGURA 25 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO NÃO FISSURADO



FONTE: o autor (2019)

A Figura 26 apresenta os resultados obtidos demonstrando os dados para cada grupo no dia 0 e no dia 84 ligados por um segmento de reta. O paralelismo das retas indica que a resistência evoluiu de forma similar para os corpos de prova fissurados e não fissurados, a convergência das retas indica que, apesar da diferença causada pela fissuração, um processo de autocicatrização conferiu recuperação das perdas à peça fissurada, a divergência das retas indica acentuação das diferenças ao longo do tempo, provavelmente devido ao processo de fissuração.

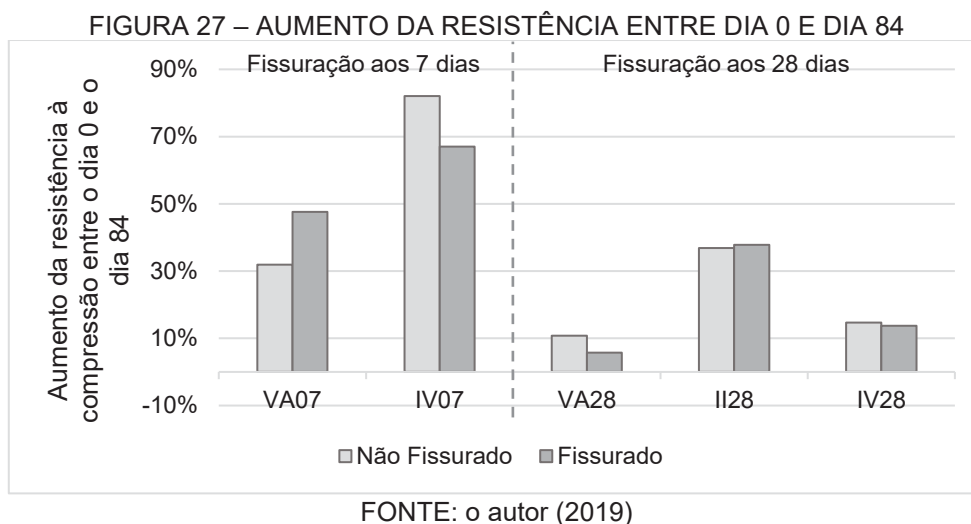
FIGURA 26 – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO PARA GRUPOS F E N



FONTE: o autor (2019)

Inicialmente, analisando, de forma visual através da Figura 26, os efeitos do processo de fissuração no dia 0, observa-se que aparentemente há diminuição da resistência à compressão apenas para os grupos produzidos com cimento CP V ARI. Contudo, todas as diferenças de média entre grupos fissurados e não fissurados no dia 0 não são significativas, de acordo com teste de Tukey, não sendo possível então afirmar que o processo de indução de fissuração tenha causado efeitos positivos ou negativos à resistência do concreto.

Em relação à autocicatrização, não é possível fazer afirmações acerca da sua ocorrência com base nos resultados obtidos para o ensaio de resistência à compressão, diferente do que foi observado nos ensaios de ultrassom. Isto pode ser visualizado na Figura 26 e na Figura 27. Há duas possibilidades relevantes para essa incerteza: em primeiro lugar, a ocorrência de autocicatrização observada no ensaio de ultrassom pode não ter causado efeitos significativos na resistência à compressão; em segundo, o processo de indução de fissuras pode não ter afetado de forma significativa a resistência à compressão a ponto de tornar notáveis efeitos de autocicatrização.



O trabalho de Takagi (2013) demonstra, de forma similar, pouca perda de resistência à compressão do concreto contendo cimento CP V ARI (3,3%) e pouca recuperação da resistência (3,9%) após 84 dias em imersão em água saturada com cal, reafirmando a baixa possibilidade de análise dos efeitos de fissuração e autocicatrização pelo ensaio de resistência à compressão. É válido registrar que nessa pesquisa de Takagi (2013) utilizou-se concreto autoadensável contendo fibras

de vidro, além de um carregamento para a indução de fissuras de 90% da carga média de ruptura, fatores que atribuem ao concreto potencialização tanto dos efeitos de fissuração quanto dos efeitos de autocicatrização.

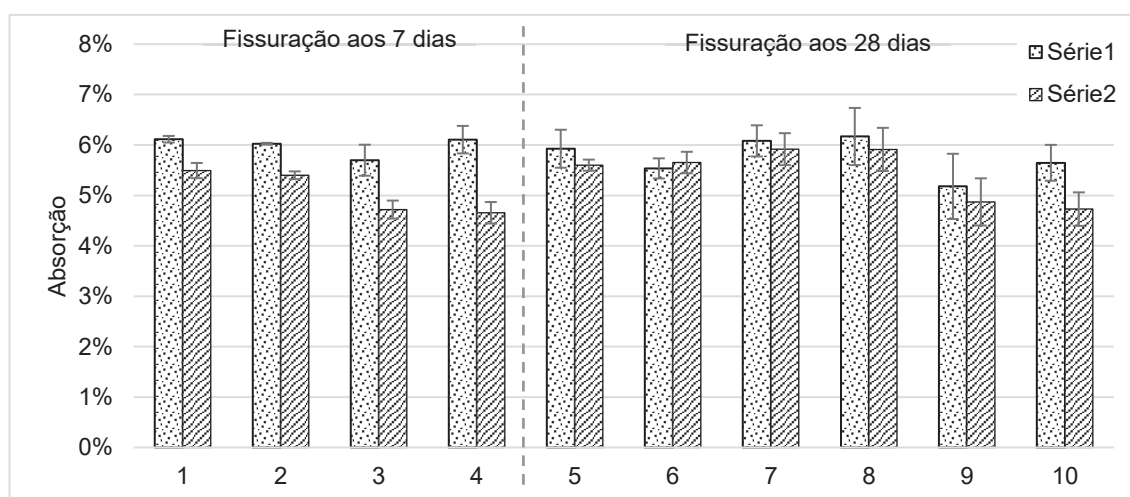
A Figura 27 representa as diferenças entre as médias obtidas no dia 0 e no dia 84 para cada grupo de análise. Para que a ocorrência de autocicatrização e seu efeito sobre a resistência possam ser constatados o aumento deve ser superior para o grupo fissurado frente ao grupo não fissurado, o que neste caso ocorre apenas para os grupos com fissuração aos sete dias de idade produzidos com cimento CP V ARI (VA07).

Concluindo, de acordo com os resultados do presente estudo, não se recomenda o uso do teste de resistência à compressão para avaliar a ocorrência de autocicatrização do concreto sob as condições de materiais e exposições adotadas nesta dissertação.

5.3 ABSORÇÃO POR IMERSÃO

As médias dos resultados de absorção por imersão de três amostras para cada grupo de combinação de fatores no dia da fissuração (dia 0) e 84 dias depois (dia 84) são apresentadas na Figura 28, juntamente com seus desvios-padrões.

FIGURA 28 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DE ABSORÇÃO POR IMERSÃO

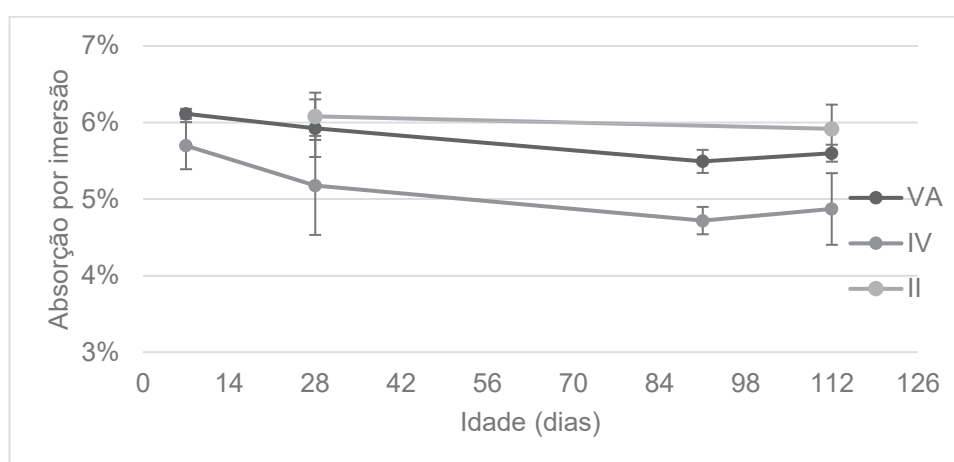


FONTE: o autor (2019)

Ao contrário dos ensaios de compressão, a maior velocidade de hidratação de corpos de prova produzidos com cimento CP V ARI não confere melhor desempenho

ao concreto quando se trata de absorção. Isto pode ser analisado na Figura 29, onde desde as primeiras idades, o concreto produzido com CP IV apresenta menor absorção de água quando imerso. Esta diferença é mantida até as últimas idades, onde há, aparentemente, uma estabilização das taxas de absorção com o passar do tempo. Isto pode ser atribuído a alterações na estrutura dos poros ocasionada pela adição de cinzas volantes, uma vez que, de acordo com Chindaprasirt, Jaturapitakkul e Sinsiri (2005), a adição de cinzas volantes confere redução no diâmetro médio dos poros, apesar de elevar, de forma menos significativa sua quantidade.

FIGURA 29 – ABSORÇÃO POR IMERSÃO DO CONCRETO NÃO FISSURADO

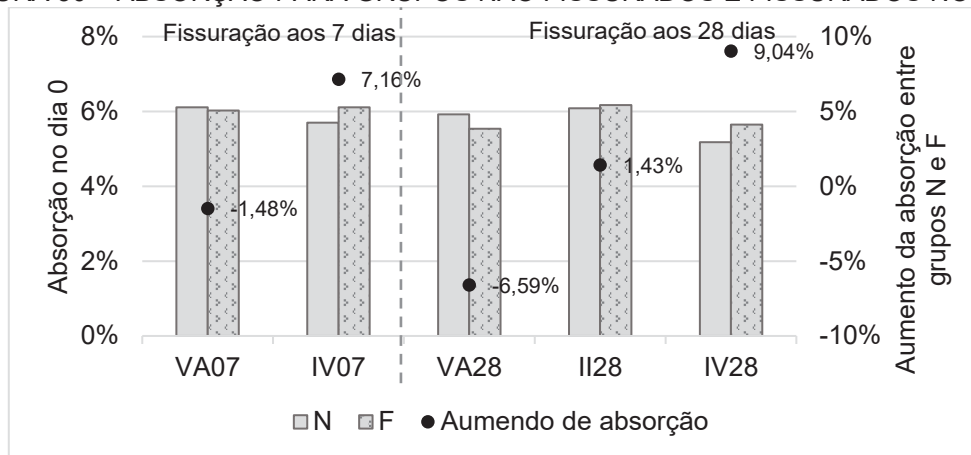


FONTE: o autor (2019)

Em relação à influência da fissuração na absorção por imersão do concreto no dia do processo de indução, o teste de Tuckey demonstra que as diferenças entre médias dos grupos não fissurados para os grupos fissurados não são significativas. Contudo, algumas tendências podem ser observadas na Figura 30: em primeiro lugar, há o aumento da absorção após fissuração para concretos contendo cinzas volantes, tanto para os grupos fissurados ao 7 dias, quanto para os grupos fissurados aos 28 dias, enquanto que para os grupos com cimento CP V ARI, o efeito é inverso, havendo redução da absorção com o processo de indução. Em segundo, os efeitos da fissuração são mais pronunciados quando esta ocorre aos 28 dias. Para a primeira observação, acredita-se que em concretos produzidos com CP V ARI o efeito da compactação dos corpos de prova pela aplicação de carregamento de compressão sobre a absorção tenha sido superior ao efeito ocasionado pela fissuração. Segundo Lam, Wang e Poon (2000), concretos contendo cinzas volantes são mais frágeis, ou seja, apresentam fraturas com menores deformações. De acordo com Tangpagasit

(2005), a resistência do concreto com cinzas volante nas primeiras idades é elevada pelo efeito de empacotamento de partículas e, segundo Zhang (1995) a aderência entre partículas não solubilizadas e a pasta é fraca, favorecendo a propagação de fissuras.

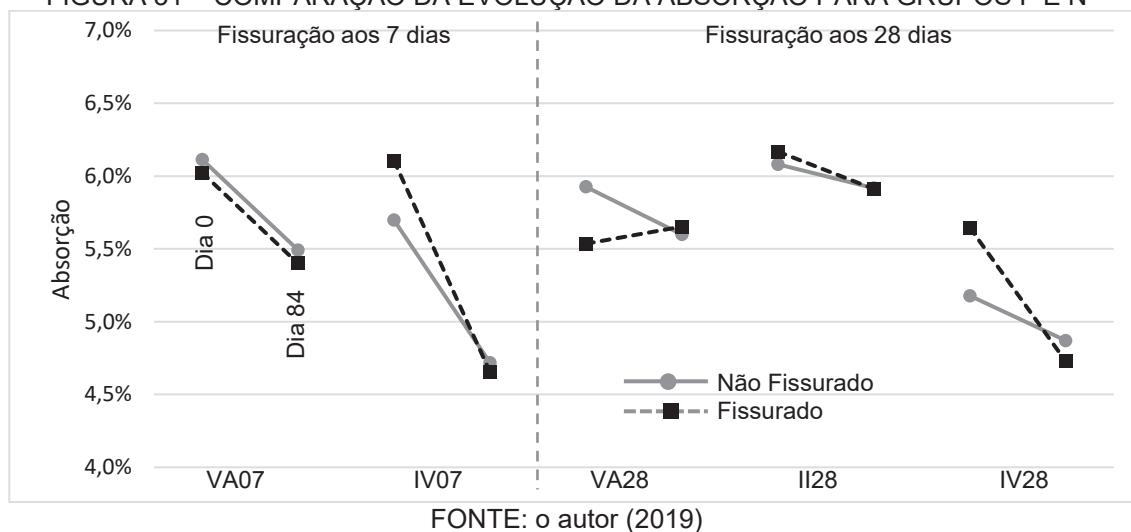
FIGURA 30 – ABSORÇÃO PARA GRUPOS NÃO FISSURADOS E FISSURADOS NO DIA 0



FONTE: o autor (2019)

Quanto à aut cicatrização, ao observar a Figura 31, nota-se que, para o concreto produzido com cimento CP V ARI, não há convergência e sim paralelismo na redução da absorção entre o dia 0 e o dia 84 para os grupos de análise de fissuração aos 7 dias (VA07N e VA07F), e aumento da absorção do grupo fissurado aos 28 dias (VA28F), ao passo que o grupo não fissurado e de mesma idade (VA28N) apresentou redução de absorção. Para os grupos VA07N e VA07F as tendências apontadas no gráfico são coincidentes com o esperado: a redução na absorção com o avanço da idade do concreto, tendo em vista a maior hidratação e a redução de vazios com o tempo. Já para os grupos VA28N e VA28F a tendência esperada de redução é seguida apenas pelo grupo que não foi submetida a indução. Contudo, é importante observar que as médias obtidas no dia 0 e o dia 84 para o grupo VA28F, são bastante próximas, e que para ambos os grupos, a diferença entre elas não é significativa, segundo o teste de Tuckey. Isto indica que o concreto atingiu sua capacidade mínima de absorção já com 28 dias, não havendo então alterações significativas para as idades futuras. Então, não havendo aumento da absorção devida à indução de fissuras no dia 0, não se pode esperar melhoras da absorção no dia 84 superiores às que são observadas para corpos de prova não fissurados, já que toda a capacidade de melhoria de absorção havia sido esgotada na data quando a análise se inicia (28 dias de idade).

FIGURA 31 – COMPARAÇÃO DA EVOLUÇÃO DA ABSORÇÃO PARA GRUPOS F E N



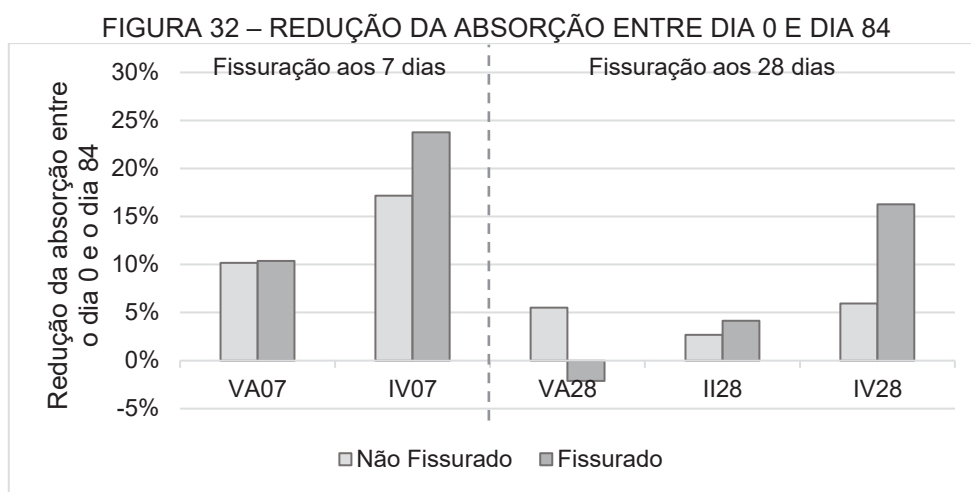
Ao analisar, também através da Figura 31, os grupos produzidos com cimento CP IV, é possível observar que há redução mais acentuada da absorção entre os dias 0 e 84 para os grupos IV07N e IV07F (respectivamente 17,2% e 23,8%) frente às reduções para os grupos IV28N e IV28F (respectivamente 5,95% e 16,28%). Contudo, nota-se convergência similar tanto para os concretos fissurados aos 7 dias quanto para aqueles fissurados aos 28 dias. Ao realizar-se o teste de Tuckey, obtém-se que a diferença de médias entre o dia 0 e o dia 84 só não é significativa para o concreto não fissurado com análise iniciada aos 28 dias (IV28N). Diferente dos cimentos CP V ARI, o cimento com alto teor de cinzas volantes (CPIV) tem a melhora de sua absorção retardada pela cinética mais lenta de reação do aglomerante, não estando a capacidade de redução da absorção esgotada na idade de 28 dias. Por esta razão ainda há a queda da absorção significativa para o grupo fissurado aos 28 dias de idade (IV28F), para os quais há a exposição de partículas não hidratadas no interior do material após o processo de indução de fissuras.

A tendência de reduções elevadas de absorção até os 28 dias, com baixas reduções a partir daí, é confirmada nos experimentos de Khatib (2008), segundo os quais para teores elevados de cinzas volantes há reduções levemente superiores na absorção entre os 28 e 56 dias de idades de concretos auto adensáveis, enquanto que para teores nulo ou baixos, a diferença de absorção nas duas idades era próxima de zero.

Quanto à evidência de efeito da autocicatrização apenas para concretos contendo cimento com maior teor de cinzas volantes, é importante repetir as afirmativas dos trabalhos de Tittelboom *et al.* (2012) e de Sahamran, Yildirim e Erdem (2013), que destacam o efeito de autocicatrização mais pronunciado em relação a hidratação de partículas anidras para concretos contendo cinzas volantes.

Em relação à análise estatística, o teste de Tuckey para indicação da significância das diferenças entre médias no dia da fissuração e depois dos ciclos de molhagem e secagem demonstrou diferença não significativa para quase todas as comparações feitas para corpos de prova fissurados aos 28 dias de idade. Contudo, a diferença é significativa para o grupo IV28F, confirmando a relevância da convergência notada.

A Figura 32 apresenta as reduções de absorção relativas entre o dia 0 e 84, nas quais pode-se constatar que há autocicatrização (mais redução para grupos fissurados frente aos não fissurados) apenas para grupos contendo cinzas volantes.



FONTE: o autor (2019)

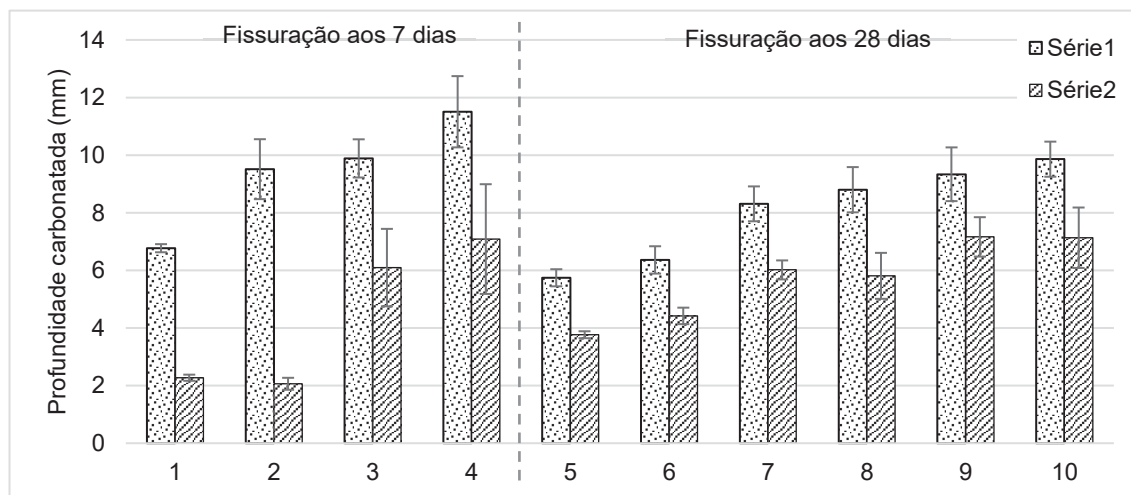
5.4 CARBONATAÇÃO ACELERADA

A Figura 33 representa em gráfico a média e os desvios-padrões de todos os resultados obtidos para cada grupo de combinações dos ensaios de medição de profundidade de carbonatação acelerada.

Ao observar o gráfico da Figura 33, fica clara a tendência de aumento da profundidade de carbonatação obtida com o aumento do teor de cinzas volantes, tanto no dia 0 quanto no dia 84. As profundidades de carbonatação maiores para concretos

contendo cinzas volantes são atribuídas à redução do teor de hidróxido de cálcio presente na matriz cimentícia o que favorece o aprofundamento da frente de carbonatação, como demonstrado nos estudos de Khunthongkeaw, Tangtermsirikul e Leelawat (2006), Hussain Bhunia e Singh (2017) e Medeiros *et al.* (2017).

FIGURA 33 – MÉDIAS DOS RESULTADOS DE PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO (EXPOSIÇÃO DE 90 DIAS A $5,0 \pm 0,5\%$ DE CO_2 , UMIDADE RELATIVA DE $60 \pm 5\%$, TEMPERATURA DE $30 \pm 2^\circ\text{C}$)



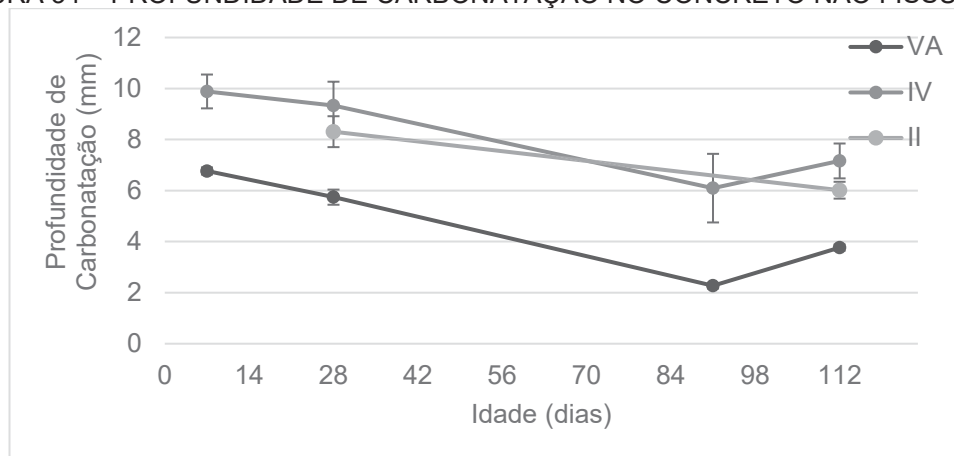
FONTE: o autor (2019)

Considerando apenas corpos de prova não fissurados (Figura 34), é possível observar a tendência de redução das profundidades de carbonatação com o avanço da idade e, conseqüentemente, da hidratação do concreto. O efeito de redução da profundidade de carbonatação para concretos levados à câmara de carbonatação em idades mais avançadas também é abordado por Atis (2003), que demonstrou que para concretos produzidos com diferentes teores de cinzas volantes há a redução da profundidade de carbonatação obtida à medida que os corpos de prova entravam em câmara de carbonatação com maior tempo de cura. Não se pode ignorar que em idades mais avançadas o concreto contendo cinzas volantes têm reduzida sua reserva alcalina, devido ao consumo de hidróxidos de cálcio necessários às reações pozolânicas. Contudo, de acordo com os resultados obtidos e com o explanado por Atis (2003), prevalece o efeito de redução atribuído a melhora na impermeabilidade do concreto ao gás carbônico, sobretudo na superfície.

Ainda através da visualização da Figura 34, é notável também um aumento da profundidade obtida entre a idade de 91 dias e a idade de 112 dias. Esta elevação não é esperada, levando-se em consideração que entre essas idades o grau de

hidratação avança ou pelo menos se mantém. Este movimento fora do convencional, pode ser atribuído à diferença de ambiente de cura dos corpos de prova. Ressalta-se que as idades 7 e 91 provêm de corpos de prova que foram mantidos em câmara úmida por 7 dias, e em ciclos de molhagem e secagem por 84 dias, enquanto os resultados das idades 28 e 112 provêm de corpos de prova mantido em câmaras úmida por 28 dias e ciclos por 84 dias. Isto demonstra que o início dos ciclos de molhagem secagem em idades mais precoces mostrou-se mais eficiente em elevar a resistência do concreto à carbonatação do que manter os corpos de prova por mais tempo em câmara úmida.

FIGURA 34 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO NO CONCRETO NÃO FISSURADO

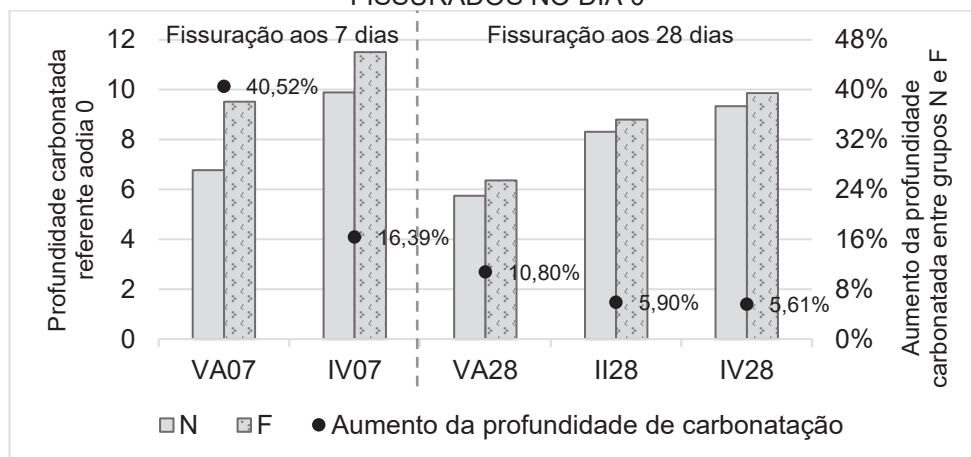


FONTE: o autor (2019)

Ao analisar os efeitos da fissuração na suscetibilidade dos concretos à carbonatação (Figura 35), nota-se que os grupos com cimento CP V ARI, apesar de terem profundidades de carbonatação menores, têm maior aumento da profundidade de carbonatação entre fissurados e não fissurados do que aqueles que contêm cinzas volantes. Isto contraria as tendências demonstradas para propagação de ondas de ultrassom (Figura 23) e para absorção (Figura 30), onde os concretos produzidos com cimento CP V ARI são menos afetados pela fissuração. Essa contradição pode ser atribuída à região de ocorrência e análise das variáveis de resposta: enquanto a propagação de ondas ultrassônicas e a absorção por imersão estão mais relacionadas à massa interna do concreto, a carbonatação ocorre e é medida a partir da superfície dos corpos de prova. Sendo assim, é possível que o processo de indução de fissuração tenha gerado efeitos diferentes no interior e na superfície, de acordo com os tipos de cimento. Isto pode ser atribuído a expansão lateral diferencial no centro em relação às extremidades do corpo de prova em contato com a prensa, tratada por

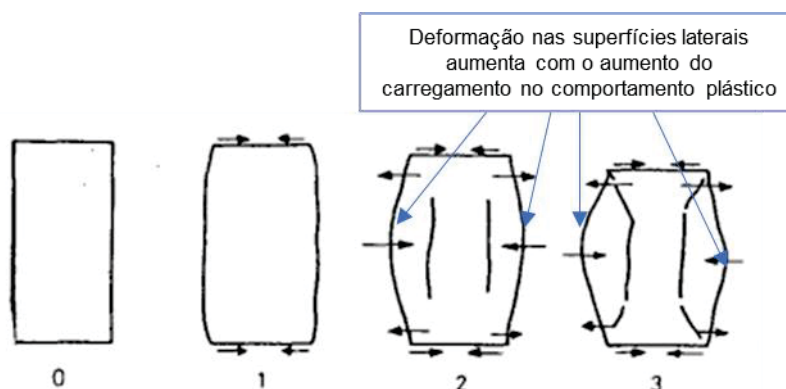
Kotsovos (1983) e apresentada na Figura 36. Havendo menor fragilidade para o concreto sem cinzas volantes, de acordo com o apontado por Lam, Wang e Poon (2000), há também maiores deformações nas superfícies, favorecendo a ocorrência de esforços de tração na região superficial central.

FIGURA 35 – PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO PARA GRUPOS FISSURADOS E NÃO FISSURADOS NO DIA 0



FONTE: o autor (2019)

FIGURA 36 – FASES DO COMPORTAMENTO DO CILINDRO DE CONCRETO COM O AUMENTO DO CARREGAMENTO DE COMPRESSÃO

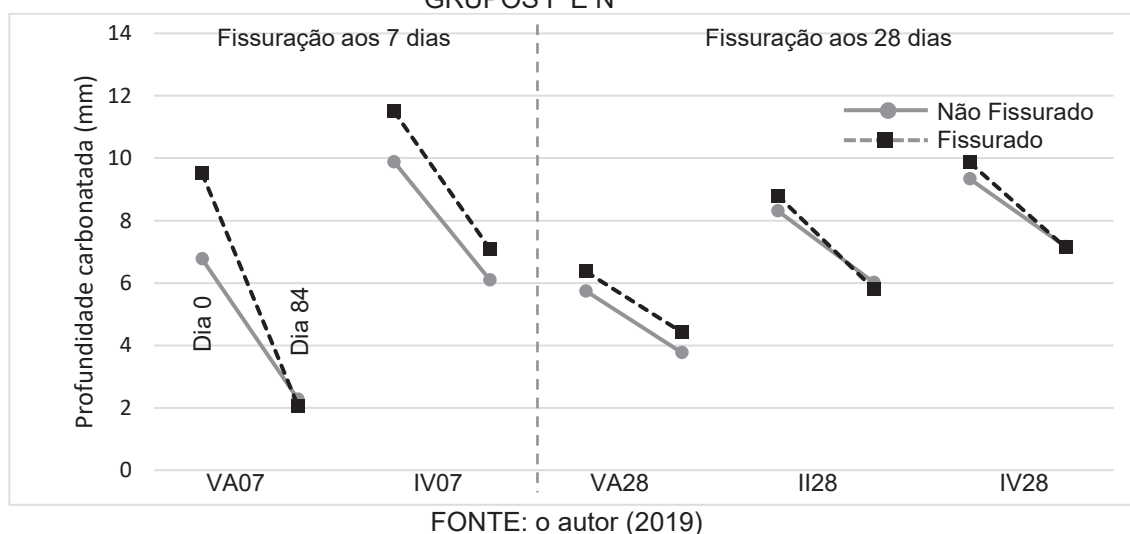


FONTE: adaptado de Kotsovos (1983).

Em relação à idade no momento da fissuração pode-se notar que as diferenças entre corpos de prova fissurados e não fissurados são menores quando a fissuração ocorre aos 28 dias, contrariando também o que foi observado nos ensaios de ultrassom e absorção. Para este caso, é possível que o maior tempo em cura tenha tornado a superfície, região onde a carbonatação ocorre, mais resistente à fissuração ou ao efeito da fissuração sobre a profundidade de carbonatação.

Tratando-se da observação das profundidades de carbonatação geradas a partir da data de fissuração (dia 0) e a partir do fim dos ciclos de molhagem e secagem (dia 84), nota-se que para os concretos produzidos com cimento CP V ARI há convergência das profundidades, indicando autocicatrização, quando a fissuração é induzida aos 7 dias (VA07), mas não quando ela ocorre ao 28 dias (VA28), como demonstrado na Figura 37. Tal efeito pode ser atribuído ao grau de hidratação menos avançado aos 7 dias, que favorece a autocicatrização por hidratação de partículas não hidratadas, de acordo com Tittelboom e Bellie (2013). Outro fator favorável é a maior abertura das fissuras de superfície após o processo de indução (Figura 35), que, segundo Ghasemzadeh et al. (2016), ocasiona maior permeabilidade de gases, sendo contribuindo para a colmatação das fissuras através da deposição de carbonatos, mecanismo relevante na autocicatrização de cimentos sem substituições, como apontou o estudo de Tittelboom et al. (2016).

FIGURA 37 – COMPARAÇÃO DA CARBONATAÇÃO NO DIA 0 E NO DIA 84 PARA GRUPOS F E N

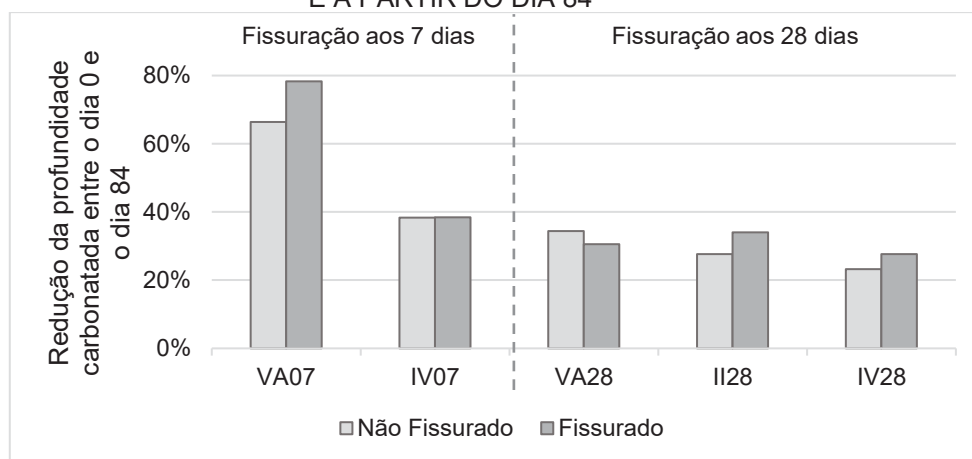


Para concretos contendo cinzas volantes, é notável a convergência indicativa de autocicatrização, mesmo que pouco acentuada, quando a fissuração ocorre aos 28 dias de idade, mas não quando esta ocorre aos 7 dias (Figura 37). Como nos concretos contendo cinzas volantes a deposição de carbonatos não é tão relevante, o dano maior causado pela indução de fissura aos 7 dias não favorece a autocicatrização ao permitir maior contato com o dióxido de carbono disponível no ambiente ao longo dos ciclos de molhagem/secagem, podendo, por outro lado, tê-la inibido ao dificultar o preenchimento da fissura a partir da hidratação das partículas

anidras recém-expostas, que é o mecanismo principal para concretos contendo cinzas volantes segundo Tittelboom *et al.* (2012).

A Figura 38 confirma a ocorrência de maiores reduções da profundidade carbonatada para concretos contendo CP V ARI quando fissurados aos 7 dias, e para concretos contendo cinzas volantes quando fissurados aos 28 dias.

FIGURA 38 – REDUÇÃO DA PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO OBTIDA A PARTIR DO DIA 0 E A PARTIR DO DIA 84



FONTE: o autor (2019)

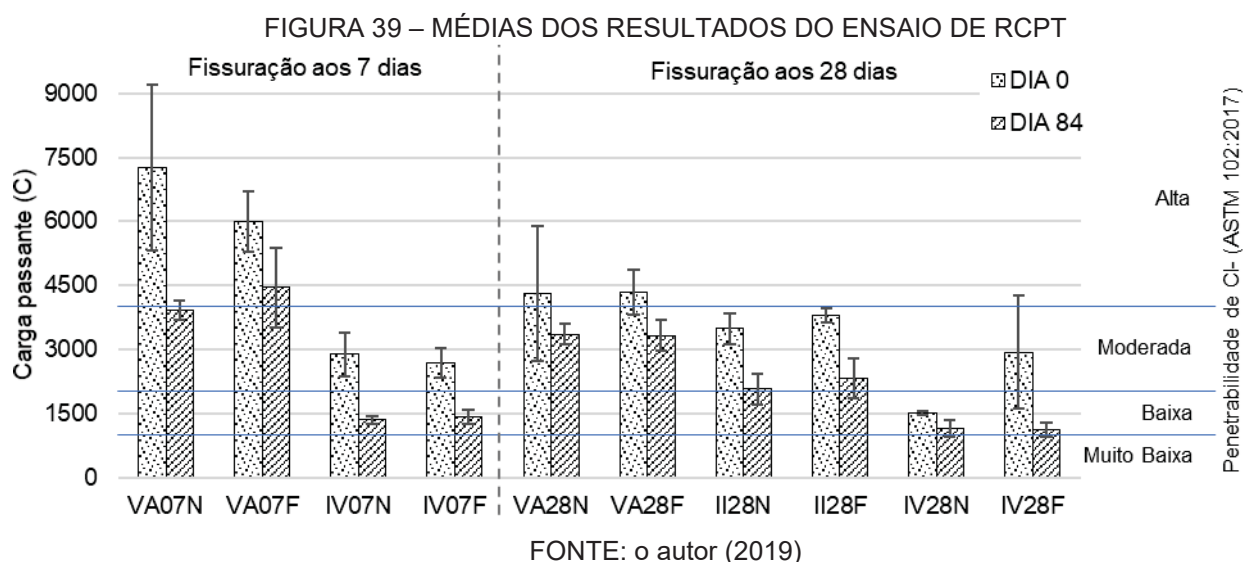
A melhoria da resistência do concreto à carbonatação de concretos fissurados, atribuída à autocicatrização potencializada pelo uso de cinzas volantes, é também demonstrada no trabalho de Na *et al.* (2012). Nesta pesquisa, os autores obtiveram eficiência de autocicatrização superior à aqui apresentada. Contudo, além de utilizaram-se de argamassa, os autores aplicaram cura pós fissuração com imersão em água aquecida e mantida a temperatura de 40° C, o que pode ter impulsionado a cinética das reações envolvidas.

5.5 MIGRAÇÃO RÁPIDA DE CLORETOS

As médias e desvios padrões de cargas passantes através dos discos de concreto pelo ensaio descrito na norma ASTM 1202:2017 para cada grupo de análise são apresentadas na Figura 39, onde também são explicitadas as classes de penetrabilidade de íons cloreto sugeridas pela mesma norma.

Em uma primeira análise, é clara a maior carga passante para os concretos contendo CP V ARI frente aos outros concretos, para todas as idades e condições de fissuração. Uma vez que para um teor intermediário de cinzas volantes (CP II) há também valores intermediários de carga passante, confirma-se a atuação das cinzas

volantes na redução da passagem de carga, indicando menor penetrabilidade de cloretos. Tais resultados estão de acordo com o trabalho de Chindaprasirt *et al.* (2007), que avalia os efeitos da inclusão de cinzas volantes no concreto sobre a resistência à migração de cloretos pelo ensaio de RCPT.

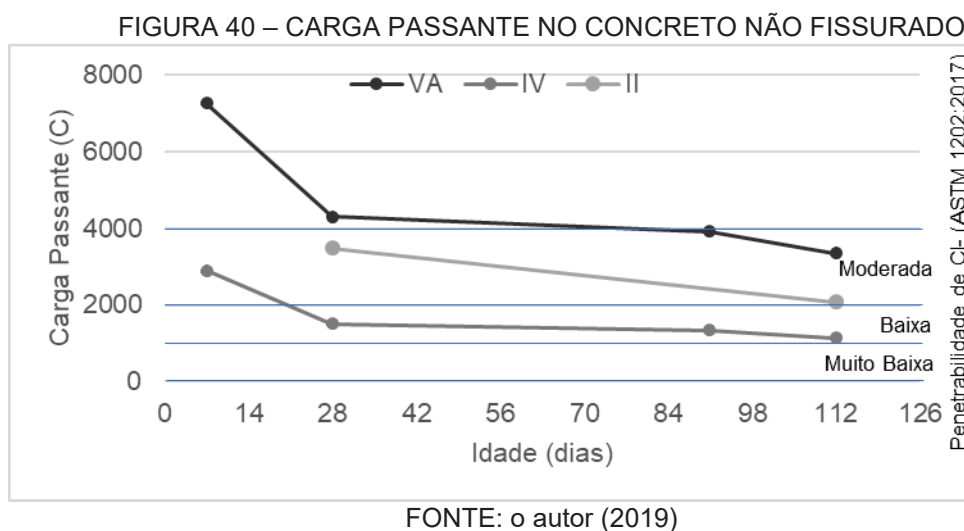


Dhir e Jones (1999) apontaram o maior teor de aluminatos com a subsequente formação de sais com cloretos combinados como um dos fatores principais para o aumento da resistência ao ingresso de cloretos em compósitos cimentícios contendo cinzas volantes. Entretanto, é importante ressaltar que, devido à aplicação de uma diferença de potencial de 60V entre as células de ensaio, o transporte de cloretos ocorre por migração iônica, de forma acelerada, dificultando, assim, a combinação de cloretos e componentes da matriz cimentícia. Isto posto, uma possível explicação para a menor penetrabilidade dos cloretos nos concretos contendo cinzas volantes, apresentada por Moffatt, Thomas e Fahim (2017), é que, ao ter parte do cimento substituída por cinzas volantes, altera-se a estrutura dos poros, tornando-os mais refinados e com ligações mais tortuosas, e reduz-se também a condutividade na solução intersticial do concreto, uma vez que há a sorção de álcalis pelos cristais de silicato de cálcio hidratados e o consumo de portlandita pela reação pozolânica.

Outra observação relevante a se apresentar é a variabilidade elevada nos resultados obtidos, sendo os coeficientes de variação superiores a 20% para os grupos VA07N (26,8%), VA28N (36,8%) e IV28N (45,2%) no dia 0. Primeiramente, estes grupos têm como característica comum a não ocorrência de fissuração, o que torna inesperada tamanha variabilidade, uma vez que o processo de indução traria

mais heterogeneidade à massa de concreto das amostras. Por outro lado, nota-se que os elevados coeficientes de variação ocorrem para ensaios no dia 0, isto é, em idades mais baixas, onde há maior sensibilidade dos corpos de prova a ruídos não observados nos fatores de análise contidos no programa experimental (como, por exemplo, a posição dos corpos de prova na câmara de cura e as variações no corte dos discos). No tocante ao tipo de cimento usado, não se nota relação ou tendência clara entre esse fator e a variabilidade. De forma geral, o ensaio RCPT envolve altas variabilidades, uma vez que a condutividade de corrente é relativa a todos os íons presentes na solução intersticial, as medições são feitas antes de o estado estacionário ser atingido e a diferença de potencial causa elevação da temperatura na célula de ensaio, como apontado por Stanish, Hooton e Thomas (2001).

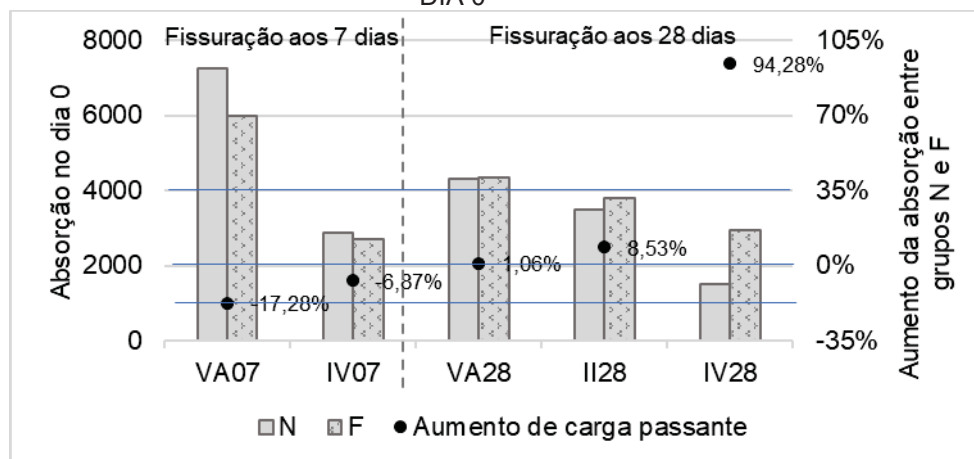
Observando apenas os resultados obtidos para os grupos não fissurados em diferentes idades (Figura 40), é nítida uma queda acentuada da carga passante da idade de 7 dias à idade de 28 dias, tanto para o concreto contendo CP V ARI, quanto para o concreto contendo CP IV. Estas reduções continuam, a taxas menores, até os 112 dias de idade, e acompanham a redução da porosidade apresentada também nos resultados de ultrassom e absorção por imersão.



Em relação às diferenças das médias de carga passante entre corpos de prova fissurados e não fissurados no dia 0 (Figura 41), quando ocorre o processo de indução de fissuras, é visível a redução da carga passante para os casos em que este ocorre aos 7 dias, principalmente para o concreto produzido com CP V ARI. Por outro lado, quando a indução ocorre aos 28 dias de idade, é notável um aumento da carga passante, sendo esta elevação mais acentuada para o concreto contendo o maior teor

de cinzas volantes (CP IV). De início, a tendência de maior comprometimento da resistência à migração de cloretos pelo processo de indução à fissuração para os grupos contendo cinzas volantes poderia ser atribuída à maior fragilidade deste concreto, apresentada pelo estudo de Lam, Wang e Poon (2008), e como observado também para o ensaio de velocidade de ondas de ultrassom.

FIGURA 41 – CARGA PASSANTE PARA GRUPOS FISSURADOS E NÃO FISSURADOS NO DIA 0



FONTE: o autor (2019)

Em relação aos resultados obtidos para os grupos com fissuração aos 7 dias, é possível que o procedimento de saturação dos corpos de prova, preconizado pela ASTM 1202:2017, tenha ocasionado hidratação de partículas não hidratadas expostas pela indução, contribuindo para aumentar resistência à passagem de carga no momento das leituras de corrente referentes ao dia 0. Isto pode explicar também por que, para a fissuração aos sete dias, há redução mais expressiva da carga passante do grupo fissurado frente ao grupo não fissurado para o cimento CP V ARI, que contém partículas finas e maior teor de clínquer, favorecendo hidratações rápidas, como a que pode ocorrer no ciclo de saturação de 24 horas recomendado pela norma. Isto é confirmado quando se analisa as comparações de médias semanais da velocidade de ultrassom entre grupos não fissurados (N) e fissurados (F) através do teste de Tuckey, o qual demonstra que para o grupo VA07 esta diferença deixou de ser significativa já na primeira leitura após o dia 0 (dia 7), indicando rápida recuperação da velocidade afetada pela indução de fissuração, ao passo que não houve significância de diferenças para o grupo IV07 nem mesmo após a fissuração no dia 0. Contudo, é importante considerar a já citada alta variabilidade dos resultados obtidos, principalmente nos grupos VA07N, VA28N e IV28N, o que pode tornar esta análise

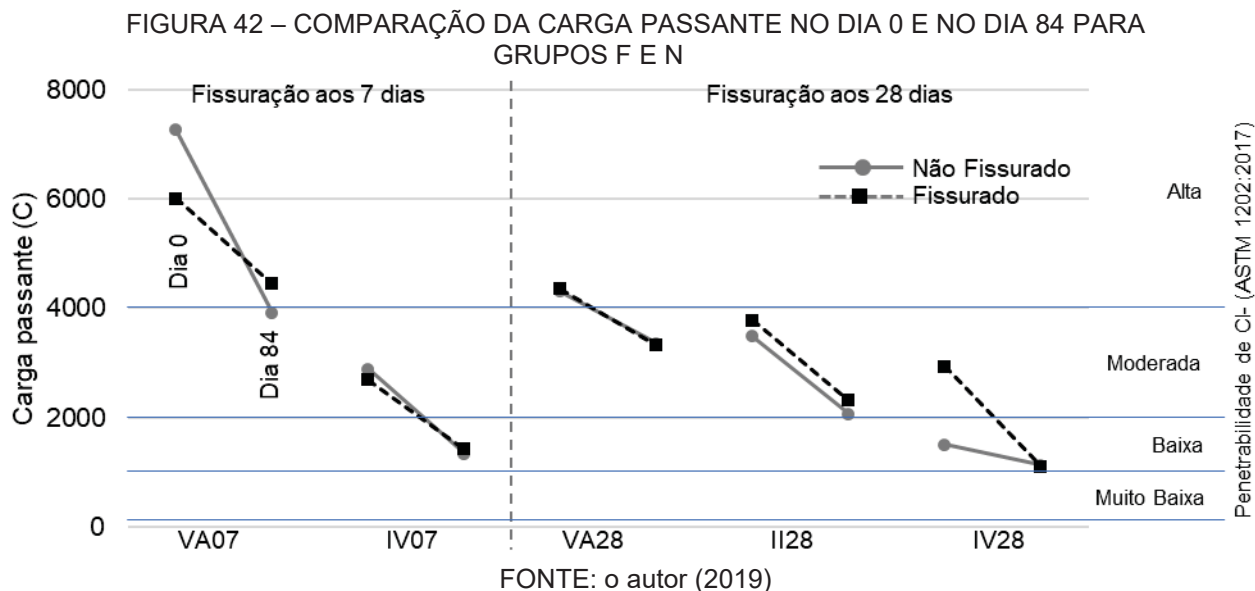
inválida, sendo recomendável então a realização de ensaios similares contendo maiores números de corpos de prova.

Nesse contexto, Jang, Kim e Oh (2011) observaram o efeito da configuração das fissuras geradas por compressão diametral na migração de cloretos pelo concreto. Os autores afirmam que abaixo de uma determinada espessura, entre 0,055 mm e 0,08 mm, não há diferença entre o concreto fissurado e o concreto não fissurado. Por outro lado, Wang *et al.* (2016), que em estudo similar ao de Jang, Kim e Oh (2011), porém com indução de fissuração por compressão axial, definiram que o limite da espessura para que a fissura influencie na carga passante é de 0,1 mm. Ambos os trabalhos citados defendem que para valores acima dos limites definidos, o impacto do aumento da espessura sobre a carga passante passa a ser elevado. Considerando os estudos apresentados, há também a possibilidade de o processo de indução aos 7 dias de idade não ter gerado fissuração com espessura significativa para influenciar a carga passante, sendo mais relevante a densificação promovida pelo carregamento de compressão.

Comparando graficamente as evoluções obtidas entre o dia 0 e o dia 84, há convergência clara apenas para os corpos de prova produzidos com cimento CP IV, com fissuração aos 28 dias (Figura 42). Primeiramente, ao observar as evoluções para os grupos de indução aos 7 dias de idade, é importante considerar que não houve aumento da penetrabilidade devido ao processo de indução, o que possivelmente compromete a verificação de ocorrência de autocicatrização. Como já discutido, admite-se a possibilidade do acontecimento desta já no processo de saturação proposto pela ASTM 1202:2017, superestimando o valor de carga penetrante no dia 0.

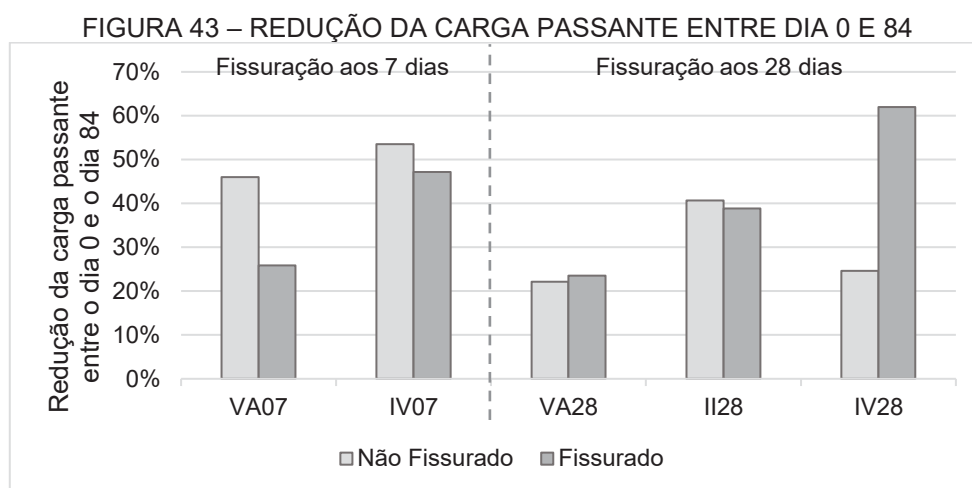
A convergência obtida para os grupos IV28 pode ser atribuída ao maior teor de material cimentício não hidratado contido na matriz dos concretos produzidos com substituição de parte do cimento por cinzas volantes. Essa justificativa é apresentada no estudo de Sahmaram, Yildirim e Erdem (2013) que analisou a quantidade de partículas não hidratadas por imagens de microscopia eletrônica de varredura. Nessa pesquisa foi analisado o efeito da autocicatrização sobre a migração rápida de cloretos, que demonstrou ser mais proeminente para compósitos cimentícios com fibras produzidos com substituição de parte do cimento por cinzas volantes. É importante ressaltar aqui que, além da diferença nos materiais empregados no

compósito, o trabalho de Sahmaram, Yildirim e Erdem (2013) diferencia-se do trabalho aqui apresentado pela forma de indução de fissuras, realizada por compressão diametral, garantindo que suas espessuras fossem iguais ou superiores a 0,1 mm.



O mesmo efeito de autocicatrização mais efetiva para concretos contendo cinzas em ensaios de RCPT foi constatado por Ozbay *et al.* (2013), que ao variar os ambientes de exposição pós-fissuração observaram também que as reduções de carga passante são ainda mais expressivas para concretos fissurados submetidos à imersão contínua, do que ao ciclos de molhagem-secagem, demonstrando que o mecanismo de autocicatrização predominante para concretos contendo cinzas volantes é a hidratação de partícula anidras. Termkhajornkit *et al.* (2009) chegaram à mesma conclusão acerca do efeito das cinzas volantes sobre a autocicatrização, por meio de outro ensaio envolvendo a penetrabilidade de cloretos, medindo a difusão por meio da norma japonesa JSCE-G571-2003.

A Figura 43 apresenta a evolução da carga passante obtida entre o dia 0 e o dia 84. Pode-se apenas constatar efeitos de autocicatrização sobre a carga passante para IV28, uma vez que apenas este possui diferenças significativas para IV28N e IV28F.



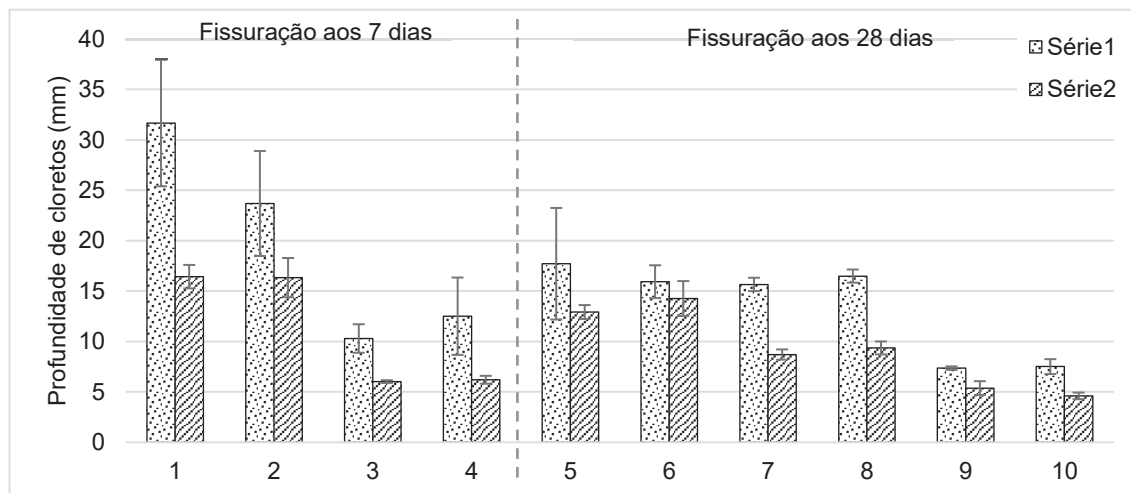
FONTE: o autor (2019)

5.6 PROFUNDIDADE DE INGRESSO DE CLORETOS

A Figura 44 apresenta as médias e desvios-padrões obtidos para os grupos de análise no ensaio de aspersão de nitrato de prata, para corpos de prova submetidos ao ensaio de penetração rápida de cloretos (RCPT). Nela, pode-se constatar as mesmas tendências gerais observadas no ensaio de RCPT: maior penetração de cloretos para concreto contendo cimento sem cinzas volantes (CP V ARI) e menor penetração para idades mais avançadas.

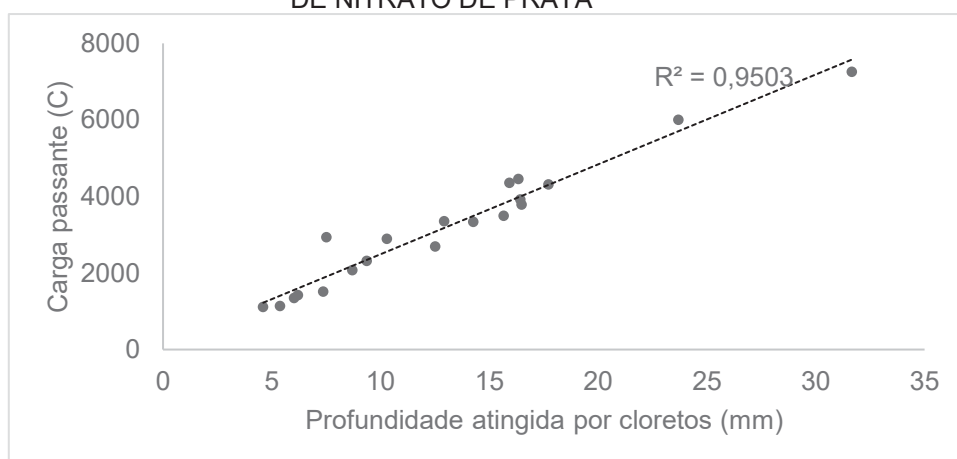
Ao se aplicar a regressão linear para relacionar os resultados de carga passante e a profundidade indicada pelo ensaio de colorimetria, observa-se uma correlação forte da profundidade atingida por cloretos com a carga passante, sendo obtido coeficiente (R^2) superior a 0,95 (Figura 45). Isto indica que a carga passante demonstra um bom resultado da suscetibilidade do concreto ao ingresso de cloretos, quando este é impulsionado por migração elétrica de forma acelerada. Este é um resultado esperado, tendo em vista que ambos os ensaios se utilizaram dos mesmos corpos de prova submetidos ao mesmo processo de aceleração do ingresso de cloretos. Outros trabalhos também apresentam altos coeficientes de correlação entre profundidade atingida por cloretos medida por colorimetria e a carga passante medida por ensaio RCPT, como o de Medeiros, Hoppe-Filho e Helene (2009), com $R^2=0,74$, e Hino-Júnior (2019), com $R^2= 0,886$.

FIGURA 44 – MÉDIA DOS RESULTADOS DOS ENSAIOS DE COLORIMETRIA PARA CLORETOS



FONTE: o autor (2019)

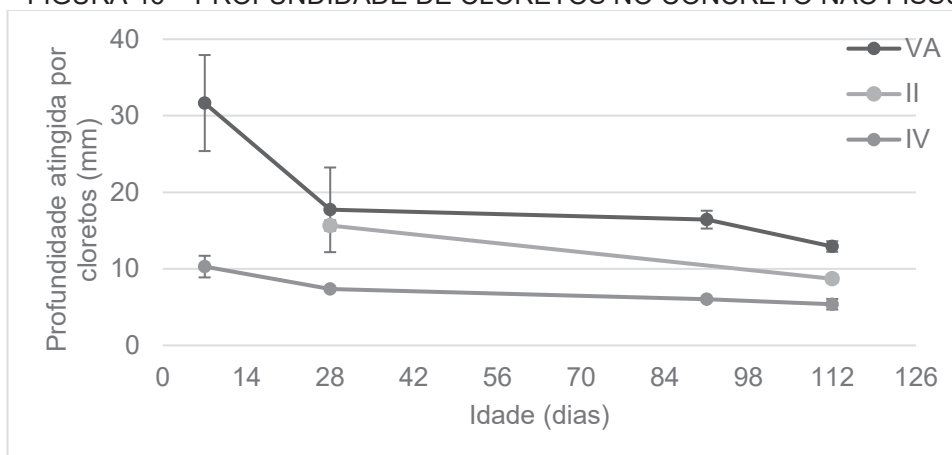
FIGURA 45 – REGRESSÃO LINEAR ENTRE RESULTADOS DE RCPT E DE ASPERSÃO DE NITRATO DE PRATA



FONTE: o autor (2019)

Observando-se apenas corpos de prova não fissurados ao longo da idade do concreto (Figura 46), obtém-se a redução das profundidades atingidas pelos íons cloreto com o avanço da idade do concreto, de maneira similar à observada para a carga passante no ensaio de RCPT (Figura 40). Além disso, os cloretos avançam menos para os grupos que contêm cinzas volantes (II e IV), sendo a avanço menor quanto maior é o teor de substituição do cimento. Tendo em vista a correlação indicada na Figura 45, esta similaridade de comportamento corresponde ao esperado, sendo válidas as mesmas observações acerca da influência das cinzas volantes e do avanço da hidratação na resistência do concreto à migração de cloretos.

FIGURA 46 – PROFUNDIDADE DE CLORETOS NO CONCRETO NÃO FISSURADO



FONTE: o autor (2019)

Em relação à autocicatrização, apesar da correlação entre os resultados do ensaio RCPT e do ensaio de aspersão, há pequenas discordâncias em relação à convergência dos resultados. Diferente das cargas passantes, as profundidades atingidas por cloretos apresentam convergência para os grupos contendo cimento CP IV com fissuração aos 7 dias (IV07) e maior redução da profundidade medida para os grupos VA07, VA28 e IV28 (Figura 47). Essas discordâncias são provavelmente ocasionadas pela pouca diferença entre as médias, associada à alta variabilidade. Isto é confirmado pelo teste de Tuckey, pelo qual todas as diferenças entre médias não fissuradas e fissuradas para mesmo cimento e idade de indução são iguais, tanto no dia 0, quanto no dia 84. Contudo, ao analisar a redução das profundidades entre o dia 0 e o dia 84 (Figura 48), nota-se que para os grupos contendo cimento pozolânico (IV07 e IV28) a redução é mais significativa para os corpos de prova que passaram pela indução à fissuração, indicando possibilidade de autocicatrização nestes casos. Como já discutido, a presença de cinzas volantes potencializa os efeitos de autocicatrização, quando analisada a resistência ao ingresso de cloretos (TERMKHAJORNKIT *et al.*, 2009; SAHMARAM; YILDIRIM; ERDEM, 2013; OZBAY *et al.*, 2013).

FIGURA 47 – COMPARAÇÃO DA PROFUNDIDADE ATINGIDA POR CLORETOS NO DIA 0 E NO DIA 84 PARA GRUPOS F E N

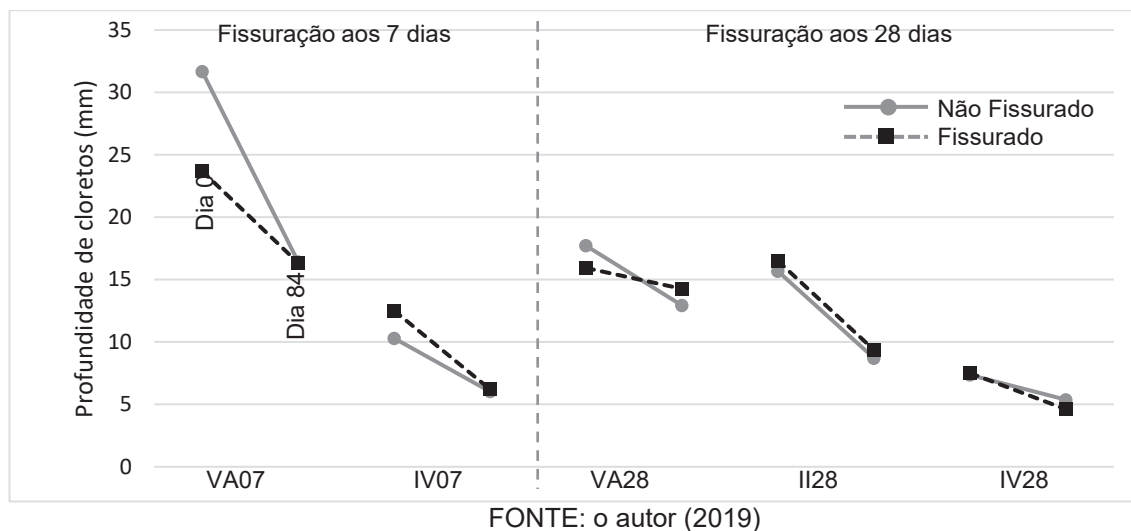
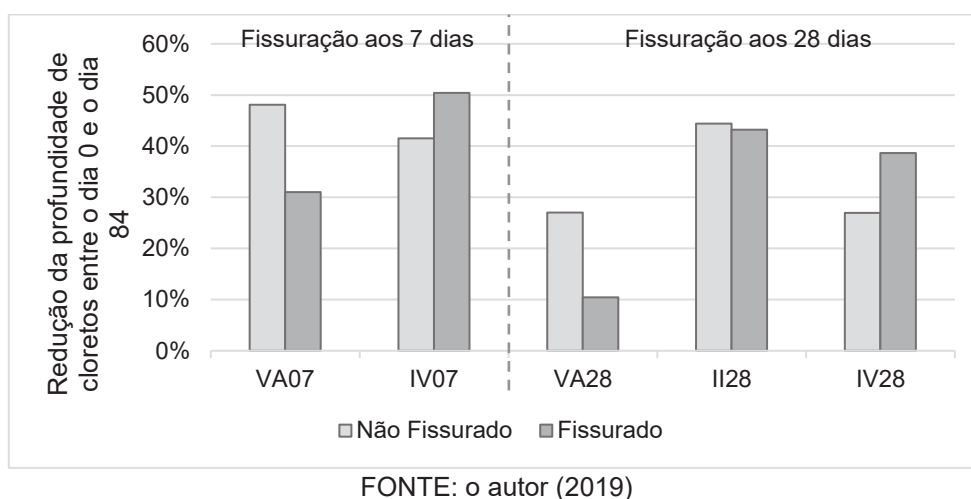


FIGURA 48 – REDUÇÃO DA PROFUNDIDADE ENTRE O DIA 0 E O DIA 84



5.7 ANÁLISE GERAL

A Tabela 9 apresenta um sumário das observações obtidas nos resultados apresentados ao longo do Capítulo 5.

TABELA 9 – SUMÁRIO DOS RESULTADOS

	Evolução não fissurado	Fissuração	Autocicatrização
Ultrassom	Elevação acelerada na primeira semana, sobretudo para cimento CP V ARI. Estabilização a partir dos 28 dias de idade.	Redução de VU mais acentuada para grupos contendo CP IV. Redução menos acentuada para VA28. Redução intermediária para VA07 e II28.	Autocicatrização rápida para ambos os grupos com fissuração aos 7 dias. Convergência lenta para grupos com cinzas volantes fissurados aos 28 dias. Convergência inexistente para VA28.
Resistência à compressão	Elevação acelerada na primeira semana, sobretudo para cimento CP V ARI. Resistências similares para os três tipos de cimento aos 122 dias.	Redução de resistência à compressão apenas para grupos contendo cimento CP V ARI.	Há autocicatrização apenas para VA07.
Absorção por imersão	Redução regular e similar para todos os tipos de cimento.	Redução da absorção após fissuração para grupos contendo CP V ARI. Elevação da absorção para grupos contendo cinzas volantes.	Autocicatrização para grupos contendo cinzas volantes (IV 07, II28 e IV28)
Carbonatação	Redução regular e similar para todos os tipos de cimento. Há aumento entre 91 e 122 dias, justificado pelas diferenças de ambiente de cura.	Aumento da profundidade de carbonatação após fissuração são mais elevados quando a fissuração ocorre aos 7 dias e para grupos contendo cimento CP V ARI.	Autocicatrização para VA07 e, em menor escala, para II28 e IV28.
RCPT	Redução acentuada da carga passante entre 7 dias e 28 dias, e a taxas menores a partir dos 28 dias.	Redução na carga passante quando a indução de fissuras ocorre aos 7 dias. Aumento na carga passante quando a indução ocorre aos 28 dias. Elevação acentuado entre IV28N e IV28F.	Autocicatrização nos grupos contendo maior teor de cinzas volantes (IV07 e IV28). Sendo pouco relevante para grupo com fissuração aos 07 dias.
Colorimetria	Redução acentuada da profundidade atingida por cloretos entre 7 dias e 28 dias, e a taxas menores a partir dos 28 dias.	Sem tendências relevantes acerca da idade de fissuração e do tipo de cimento.	Autocicatrização nos grupos contendo maior teor de cinzas volantes (IV07 e IV28).

FONTE: o autor (2019)

Pode-se observar que, em geral, a evolução do concreto não fissurado baseia o comportamento esperado com o aumento da idades do concreto e o avanço da hidratação, representando a melhora do desempenho para o parâmetro analisado. Em outras palavras, enquanto a melhora no desempenho para o ensaio de ultrassom significa o aumento da velocidade de propagação das ondas, a melhora no

desempenho para o ensaio RCPT é representada pela redução da carga passante. Além disso, é possível observar que, em geral, nas primeiras idades há avanços mais acentuados nos parâmetros analisados, indicando que, para idades superiores, há uma tendência de estabilização das variáveis de respostas, o que é uma consequência da cinética das reações de hidratação do cimento, que passa a ser reduzida à medida que a quantidade de partículas anidras é também reduzida. Sendo esta quantidade de grãos não hidratados importante para as reações de autocicatrização, confirma-se a relevância da análise das velocidades de aumento ou diminuição das variáveis de resposta ao longo do tempo.

Em relação à fissuração, nota-se que, de maneira geral, para ensaios com observação da massa total de concreto (ultrassom, absorção e RCPT), os efeitos da fissuração são maiores quando esta ocorre aos 7 dias em grupos com altos teores de cinzas volantes, podendo então ser associada ao menor avanço da hidratação nessas idades e comportamento mecânico menos dúctil para os concretos com este tipo de cimento. Já para o ensaio de carbonatação acelerado, os efeitos são mais acentuados quando o cimento utilizado não contém cinzas volantes, indicando maior susceptibilidade dos efeitos de fissuração na superfície para concretos contendo cimento CP V ARI.

No que diz respeito à autocicatrização, de forma geral, prevalecem as observações encontradas na literatura: quando há maior teor de cinzas volantes há maior autocicatrização por hidratação de partículas não hidratadas, e pouco efeito da precipitação de carbonatos nas fissuras; quando há maior teor de cimento proveniente do clínquer, há maior disponibilidade de hidróxido de cálcio, contribuindo também para a autocicatrização por precipitação de carbonatos, enquanto o mecanismo de hidratação de partículas anidras é prejudicado pela maior velocidade de reação do CP V ARI.

Mediante o exposto, esta pesquisa distingue-se de grande parte dos trabalhos presentes na literatura ao demonstrar a ocorrência de autocicatrização em concretos convencionais, mesmo que de forma mais sutil que as argamassas e compósitos cimentícios empregados de forma recorrente nos métodos de publicações recentes, e ao apresentar a possível diferença dos efeitos de fissuração observados considerando a região na qual são feitas as medições de ensaio (interior ou superficial). Tal diferença foi demonstrada na Seção 5.4, na qual, ao contrário do

observado para velocidade de ultrassom e absorção, os efeitos da fissuração foram mais nocivos à resistência do concreto à carbonatação para concretos contendo cimento CP V ARI, quando comparados com concretos contendo cimentos com cinzas volantes (CP IV e CP II Z).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÕES

A partir dos ensaios de propagação de ondas ultrassônicas, resistência à compressão, absorção por imersão, carbonatação acelerada, migração rápida de cloretos e colorimetria com nitrato de prata, realizados para corpos de prova no dia da fissuração e após a manutenção em ciclos de molhagem e secagem por 84 dias, produzidos com cimentos CP V ARI, CP II Z e CP IV, com indução de fissuração por compressão aos 7 dias de idade e aos 28 dias, são traçadas as seguintes conclusões:

- Os ensaios de ultrassom apontaram que a recuperação da velocidade de propagação a níveis similares aos obtidos sem ocorrência de indução de fissuras ocorre de forma rápida (inferior a uma semana) quando a fissuração ocorre em idades inferiores (7 dias) para concretos contendo ou não cinzas volantes. Quando a fissuração ocorre aos 28 dias, a recuperação é mais lenta e ocorre apenas quando os corpos de prova são produzidos com cimentos contendo cinzas volantes, confirmando a dependência do estágio de hidratação da matriz cimentícia para a ocorrência da autocicatrização.
- O volume de vazios, representado pela absorção de água pelo concreto por imersão é reduzido pelo processo de indução de fissuração quando se utiliza cimento CP V ARI e elevado pelo mesmo processo quando se utiliza cimentos com cinzas volantes. Isto pode indicar maior efeito de compactação do que de fissuração para os concretos sem substituição, que, de acordo com a literatura apresentada possui poros com diâmetros maiores e comportamento mais dúctil do que os concretos contendo cinzas volantes. Assim sendo, deve-se reconsiderar a utilização de compressão para indução de fissuras ao utilizar aglomerantes que causem diferenças na microestrutura e comportamento mecânico do concreto, quando em condições semelhantes às usadas nesta dissertação.
- Os efeitos de autocicatrização são desiguais na superfície e no interior do concreto. Isto se deve à diferença nos mecanismos predominantes de autocicatrização. Uma vez que a superfície tem contato com dióxido de carbono facilitado, é de se esperar que ocorra não só a hidratação de partículas anidras, mas também a colmatação da fissura por precipitação de carbonatos. Isto é

indicado ao se comparar os resultados obtidos nos ensaios de ultrassom, absorção e RCPT com os resultados de ensaios de carbonatação. Enquanto nos primeiros houve maior impacto da autocicatrização em concretos contendo cinzas volantes, no último o efeito da autocicatrização sobre a carbonatação de concretos sem substituição foi maior. Este efeito ocorre pela maior presença de portlandita no cimento CP V ARI, que favoreceu o mecanismo de colmatação das fissuras por precipitação de carbonatos.

- Como amplamente difundido na literatura, a autocicatrização é potencializada com a presença de cinzas volantes na composição do concreto. Para os ensaios que não analisavam apenas o concreto superficial (como é o caso da carbonatação), havia melhores benefícios relacionados à autocicatrização para os grupos produzidos com CP IV, reafirmando que a maior presença de partículas anidras causada pela cinética mais lenta de hidratação destes cimentos contribui para o fechamento de fissuras no momento que estas expõem as partículas não hidratadas à umidade.
- Ao comparar a eficiência da autocicatrização nos parâmetros medidos nesta pesquisa com as eficiências de autocicatrização das pesquisas citadas na discussão teórica, observa-se que esta pesquisa tem efeitos de autocicatrização mais sutis que as presentes na bibliografia. Isto é consequência da utilização de concretos contendo agregados e sem a presença de fibras, indicando que, em situações práticas de estruturas de concreto fissuradas e expostas à umidade, a ocorrência de autocicatrização possa ser menor do que a observada em pesquisas utilizando compósitos aprimorados.

6.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista a inviabilidade de análise visual tanto da configuração de fissuras, quanto dos produtos de autocicatrização gerados em seu interior, recomenda-se que outros estudos analisem os efeitos dos fatores aqui apresentados utilizando-se de outros processos de indução de fissuras, como a compressão diametral e a flexão.

Propõe-se também a realização de estudos acerca da influência da dimensão máxima característica dos agregados na autocicatrização. Como estes gerarão

configurações de fissuras diferentes, é importante que seja apresentada com clareza a configuração obtida, possibilitando também a análise da influência da tortuosidade, espessura e o comprimento das fissuras na autocicatrização. Além disso, aprofundar-se-ia a discussão relacionada à ocorrência de autocicatrização em situações práticas de estruturas expostas à umidade.

Ademais, sugere-se que o efeito da autocicatrização sobre a resistência ao ingresso de cloretos seja analisado a partir de outra metodologia de ensaio que permita a ocorrência de combinação de cloretos com componentes da matriz cimentícia e também a ocorrência de autocicatrização simultânea ao transporte de cloretos pelo concreto.

REFERÊNCIAS

ABO-QUDAIS, S. A. Effect of concrete mixing parameters on propagation of ultrasonic waves. **Construction and building materials**, v. 19, n. 4, p. 257-263, 2005.

AKHAVAN, A., SHAFATIAN, S. M. H.; RAJABIPOUR, F. Quantifying the effects of crack width, tortuosity, and roughness on water permeability of cracked mortars. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 2, p. 313-320, 2012.

AKÇAOĞLU, T. Determining aggregate size & shape effect on concrete microcracking under compression by means of a degree of reversibility method. **Construction and Building Materials**, v. 143, p.376-386, jul. 2017.

AKÇAOĞLU, T.; TOKYAY, M.; ÇELİK, T. Effect of coarse aggregate size and matrix quality on ITZ and failure behavior of concrete under uniaxial compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 26, n. 6, p. 633-638, 2004.

AHMED, M.; MALLICK, J.; HASAN, M. A. A study of factors affecting the flexural tensile strength of concrete. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 28, n. 2, p. 147-156, 2016.

ALPES LABORATÓRIO DE PESQUISAS E ENSAIOS FÍSICOS DE SOLOS. **Relatório de Ensaio EFA 0045.17**. Curitiba: Alpes, 2017. 16 p.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). **ACI 224R-01**: Control of Cracking in Concrete Structures. Farmington Hills, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **C 1202**: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. West Conshohocken, 2017.

_____. **C 642**: Standard Test Method for Density, Absorption, and Voids in Hardened Concrete. West Conshohocken, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 67**: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – Procedimento. Rio de Janeiro, 1998.

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

_____. **NBR 8802**: Concreto endurecido – Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.

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

_____. **NBR 5783**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

ATIŞ, C. D. Accelerated carbonation and testing of concrete made with fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 17, n. 3, p. 147-152, 2003.

BARBOSA, R. A.; HANSEN S. G.; HANSEN, K. K.; HOANG, L. C.; GRELK, B. Influence of alkali-silica reaction and crack orientation on the uniaxial compressive strength of concrete cores from slab bridges. **Construction and Building Materials**, v. 176, p. 440-451, 2018.

CARMONA, T. G.; CARMONA-FILHO, A. **Fissuração nas estruturas de concreto – Boletim Técnico.** ALCONPAT, 2013.

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ações da Carbonatação no Concreto. In: ISAIA, B. Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Ibracon, 2011. p. 849-886.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION (CEN) **EN 14630: Products and systems for the protection and repair of concrete structures - Test methods - Determination of carbonation depth in hardened concrete by the phenolphthalein method.** Bruxelas, 2006.

CHENG, Y.; ZHANG, Y.; JIAO, Y.; YANG, J. Quantitative analysis of concrete property under effects of crack, freeze-thaw and carbonation. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 106-115, 2016.

CHINDAPRASIRT, P. CHOTITHANORM, C.; CAO, H. T.; SIRIVIVATNANON, V. Influence of fly ash fineness on the chloride penetration of concrete. **Construction and Building Materials**, v. 21, n. 2, p. 356-361, 2007.

CHOI, H.; INOUE, M.; KWON, S.; CHOI, H.; LIM, M. Effective Crack Control of Concrete by Self-Healing of Cementitious Composites Using Synthetic Fiber. **Materials**, Basel, v. 9, n. 4, p.248-262, 2016.

CLEAR, C. A. **The Effects of Autogenous Healing upon the Leakage of Water through Cracks in Concrete.** Slough: Cement and Concrete Association:, 1985.

DARQUENNES, A.; OLIVIER, K.; BENBOUDJEMA, F.; GAGNÉ, R. Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 113, p. 1017-1028, 2016.

DESNERCK, P.; LEES, J. M.; MORLEY, C. T. Bond behaviour of reinforcing bars in cracked concrete. **Construction and Building Materials**, v. 94, p. 126-136, 2015.

DHIR, R. K.; JONES, M. R. Development of chloride-resisting concrete using fly ash. **Fuel**, v. 78, n. 2, p. 137-142, 1999.

GHASEMZADEH, F.; RASHETNIA, R.; SMYL, D.; POUR-GAHZ, M. A comparison of methods to evaluate mass transport in damaged mortar. **Cement and Concrete Composites**, v. 70, p. 119-129, 2016.

HEARN, N. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: what is the difference? **Materials and Structures**, v. 31, n. 8, p. 563, 1998.

HELENE, P. R. L.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. PINI, 1992.

HEIDE, N.; SCHLANGEN, E. Self-healing of early age cracks in concrete. In: **Proceedings of the First international conference on Self Healing Materials**. 2007. p. 18-20.

HERBERT, E. N.; LI, V. C. Self-healing of microcracks in engineered cementitious composites (ECC) under a natural environment. **Materials**, v. 6, n. 7, p. 2831-2845, 2013.

HINO-JÚNIOR, J. R. **Penetração de cloreto em concreto de diferentes resistências e teores de adição pozolânica a partir da comparação de diferentes normas técnicas**. Dissertação (Mestrado) – Pós-Graduação em Engenharia de Construção Civil, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2019.

HUANG, J.; CHEN, M.; SUN, J. Mesoscopic characterization and modelling of microcracking in cementitious materials by the extended finite element method. **Theoretical and Applied Mechanics Letters**, v. 4, n. 4, 2014.

HUANG, H.; YE, G.; QIAN, C.; SCHLANGEN, E. Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, v. 92, p. 499-511, 2016.

HUSSAIN, S.; BHUNIA, D.; SINGH, S. B. Comparative study of accelerated carbonation of plain cement and fly-ash concrete. **Journal of Building Engineering**, v. 10, p. 26-31, 2017.

ISMAIL, M.; TOUMI, A.; FRANÇOIS, R.; GAGNÉ, R. Effect of crack opening on the local diffusion of chloride in cracked mortar samples. **Cement and concrete research**, v. 38, n. 8-9, p. 1106-1111, 2008.

JACOBSEN, S.; SELLEVOLD, E. J. Self-healing of high strength concrete after deterioration by freeze/thaw. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 1, p. 55-62, 1996.

JANG, S. Y.; KIM, B. S.; OH, B. H. Effect of crack width on chloride diffusion coefficients of concrete by steady-state migration tests. **Cement and Concrete Research**, v. 41, n. 1, p. 9-19, 2011.

JOHN, V. M. Concreto Sustentável. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1843-1871.

KAN, L.; SHI, H. S. Investigation of self-healing behavior of engineered cementitious composites (ECC) materials. **Construction and Building Materials**, v. 29, p. 348-356, 2012.

KHATIB, J. M. Performance of self-compacting concrete containing fly ash. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 9, p. 1963-1971, 2008.

KOTSOVOS, M. D. Effect of testing techniques on the post-ultimate behaviour of concrete in compression. **Materiaux et construction**, v. 16, n. 1, p. 3-12, 1983.

KHUNTHONGKEAW, J.; TANGTERMSIRIKUL, S.; LEELAWAT, T. A study on carbonation depth prediction for fly ash concrete. **Construction and building materials**, v. 20, n. 9, p. 744-753, 2006.

LAM, L.; WONG, Y. L.; POON, C. S. Degree of hydration and gel/space ratio of high-volume fly ash/cement systems. **Cement and Concrete Research**, v. 30, n. 5, p. 747-756, 2000.

LIM, C. C.; GOWRIPALAN, N.; SIRIVIVATNANON, V. Microcracking and chloride permeability of concrete under uniaxial compression. **Cement and Concrete Composites**, v. 22, n. 5, p. 353-360, 2000.

LIU, H.; Zhang, Q.; Gu, C.; SU, H.; LI, V. C. Influence of micro-cracking on the permeability of engineered cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 72, p. 104-113, 2016.

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE-FILHO, J.; RAISDORFER, J. W.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Partial replacement and addition of fly ash in Portland cement: influences on carbonation and alkaline reserve. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 2, n. 1, p. 4, 2017.

MEDEIROS, M. H. F.; ANDRADE, J. J. O.; HELENE, P. Durabilidade e Vida Útil de Estruturas de Concreto. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 773-808

MEDEIROS, M. H. F.; HOPPE FILHO, J.; HELENE, P. Influence of the slice position on chloride migration tests for concrete in marine conditions. **Marine structures**, v. 22, n. 2, p. 128-141, 2009.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO. Estimativas Anuais de Emissões de Gases do Efeito Estufa no Brasil. Brasília: MCTI, 2014. Disponível em: <http://www.mct.gov.br/upd_blob/0235/235580.pdf>. Acesso em: 23 mar. 2017.

MOFFATT, E. G.; THOMAS, M. D. A.; FAHIM, A. Performance of high-volume fly ash concrete in marine environment. **Cement and Concrete Research**, v. 102, p. 127-135, 2017.

NA, S. H.; HAMA, Y.; TANIGUCHI, M. KATSURA, O., SAGAWA, T. ZAKARIA, M. Experimental investigation on reaction rate and self-healing ability in fly ash blended cement mixtures. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 7, p. 240-253, 2012.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2015.

OTIENO, M. B.; ALEXANDER, M. G.; BEUSHAUSEN, H. D. Corrosion in cracked and uncracked concrete—influence of crack width, concrete quality and crack reopening. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 6, p. 393-404, 2010.

OZBAY, E.; SAHMARAN, M.; LACHEMI, M.; YUCEL, H. E. Self-Healing of Microcracks in High-Volume Fly-Ash-Incorporated Engineered Cementitious Composites. **ACI Materials Journal**, v. 110, n. 1, 2013.

PAULETTI, C. **Análise comparativa de procedimentos para ensaios acelerados de carbonatação**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

PAULETTI, C.; POSSAN, E.; DAL MOLIN, D. C. C. Carbonatação acelerada: estado da arte das pesquisas no Brasil. **Ambiente construído**. Porto Alegre. v. 7, n. 4, p. 7-20, 2007.

PICANDET, V.; KHELIDJ, A.; BELLEGOU, H. Crack effects on gas and water permeability of concretes. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 6, p. 537-547, 2009.

QIAN, S. ZHOU, J.; ROOIJ, M. R.; SCHLANGEN, E.; YE, G.; BREUGEL, K. Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 9, p. 613-621, 2009.

RAMEZANIANPOUR, A. A.; MALHOTRA, V. M. Effect of curing on the compressive strength, resistance to chloride-ion penetration and porosity of concretes incorporating slag, fly ash or silica fume. **Cement and concrete composites**, v. 17, n. 2, p. 125-133, 1995.

RASTIELLO, G.; BOULAY, C.; PONT, D.; TAILAHN, J. L.; ROSSI, P. Real-time water permeability evolution of a localized crack in concrete under loading. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 20-28, 2014.

REINHARDT, Hans-Wolf; JOOSS, Martin. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 981-985, 2003.

REPETTE, W. L. Concreto para fins especiais e de última geração. In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 1807-1842.

SAHMARAN, M.; KESKIN, B. S.; OZERKAN, G.; YAMAN, O. I. Self-healing of mechanically loaded self-consolidating concretes with high volumes of fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 30, n. 10, p. 872-879, 2008.

SAHMARAN, M.; YILDIRIM, G.; ERDEM, T. K. Self-healing capability of cementitious composites incorporating different supplementary cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 35, n. 1, p. 89-101, 2013.

SHAO-FENG, Z.; CHUN-HUA, L.; RONG-GUI, L. Experimental determination of chloride penetration in cracked concrete beams. **Procedia Engineering**, v. 24, p. 380-384, 2011.

SHI, C. Effect of mixing proportions of concrete on its electrical conductivity and the rapid chloride permeability test (ASTM C1202 or ASSHTO T277) results. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 3, p. 537-545, 2004.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DE CONCRETO (SNIC). Relatório Anual 2010. Rio de Janeiro: SNIC, 2011. Disponível em: http://www.snic.org.br/pdf/relatorio2010-11_web.pdf. Acesso em: 23/03/2017.

_____. Relatório Anual 2013. Rio de Janeiro: SNIC, 2014. Disponível em: <http://www.snic.org.br/pdf/RelatorioAnual2013final.pdf>. Acesso em: 23/03/2017.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Effect of exposure conditions on self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 217-224, 2013.

STANISH, K. D.; HOOTON, R. D.; THOMAS, M. D. A. **Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review**. No. FHWA Contract DTFH61-97-R-00022. Estados Unidos. Federal Highway Administration, 2001.

TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. 2013. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, São José dos Campos, 2013.

TAKAGI, E. M.; LIMA, M. G.; HELENE, P.; MEDEIROS-JUNIOR, R. A. Self-healing of self-compacting concretes made with blast furnace slag cements activated by crystalline admixture. **International Journal of Materials and Product Technology**, v. 56, n. 1-2, p. 169-186, 2018.

TERMKHAJORNKIT, P. NAWA, T.; YAMASHIRO, Y.; SAITO, T. Self-healing ability of fly ash–cement systems. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 3, p. 195-203, 2009.

TITTELBOOM, K.; GRUYAERT., RAHIER, H.; BELIE, N. Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, v. 37, p. 349-359, 2012.

TITTELBOOM, K. V.; BELIE, N. Self-healing in cementitious materials – A review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182-2217, 2013.

VEJDIREKTORATET (DIREÇÃO RODOVIÁRIA DINAMARQUESA) (Dinamarca). **Ryå-broen - Forsøg med silicabeton - Egenskabsudvikling 1981-1993**: Betons holdbarhed rapport nr. 6. Copenhagen: Broområdet, 1993.

VIEIRA, G. L.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação da resistência à compressão, resistência à tração e formação de microfissuras em concretos produzidos com diferentes tipos de cimentos, quando aplicado um pré-carregamento de compressão. **Ambiente construído**. Porto Alegre. Vol. 11, n. 1, p. 25-40, 2011.

WANG, H. L. DAI, J. G.; SUN, X. Y.; ZHANG, X. L. Characteristics of concrete cracks and their influence on chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 216-225, 2016.

WANG, X. H.; VAL. D. V.; ZHENG, L.; JONES, M. R. Influence of loading and cracks on carbonation of RC elements made of different concrete types. **Construction and Building Materials**, v. 164, p. 12-28, 2018.

YIO, M. H. N; PHELAN, J. C.; WONG, H. S.; BUENFEL, N. R. Determining the slag fraction, water/binder ratio and degree of hydration in hardened cement pastes. **Cement and Concrete Research**, v. 56, p. 171-181, 2014.

ZHANG, J. P. **Strength of cracked concrete**. Department of Structural Engineering and Materials, Technical University of Denmark, 1997.

ZHONG, W.; YAO, W. Influence of damage degree on self-healing of concrete. **Construction and building materials**, v. 22, n. 6, p. 1137-1142, 2008.