

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

FELIPE HIRATA BIANCHIN

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS
PRODUZIDOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE E
FISSURADOS NAS PRIMEIRAS IDADES**

Porto Alegre
Janeiro de 2018

FELIPE HIRATA BIANCHIN

**AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS
PRODUZIDOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE E
FISSURADOS NAS PRIMEIRAS IDADES**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Departamento de Engenharia Civil da
Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientadora: Angela Borges Masuero

Orientadora: Denise Carpena Coitinho Dal Molin

Porto Alegre
Janeiro de 2018

FELIPE HIRATA BIANCHIN

AVALIAÇÃO DA AUTOCICATRIZAÇÃO EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE E FISSURADOS NAS PRIMEIRAS IDADES

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pelas Professoras Orientadoras da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 09 de janeiro de 2018

Profª Angela Borges Masuero
Dra. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul
Orientadora

Profª Denise Carpena Coitinho Dal Molin
Dra. Pela Universidade de São Paulo
Orientadora

BANCA EXAMINADORA:

**Profª Angela Borges Masuero
(UFRGS)**
Dra. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

**Profª Denise Carpena Coitinho Dal Molin
(USP)**
Dra. Pela Universidade de São Paulo

**Eng. Lucília Maria Bernardino da Silva
(UFRGS)**
Dra. Pela Universidade Federal do Rio
Grande do Sul

**Eng. Vanessa Giaretton Cappellesso
(UFRGS)**
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Dedico este trabalho aos meus pais,
por me mostrarem ao longo da vida a importância do amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Roseli, Claudemir e Antônio. Sempre estiveram ao lado nessa caminhada longa, me guiando e apoiando no que foi possível. Sem vocês eu nunca teria chegado até aqui. Vocês são o maior exemplo de amor que pude ter ao longo de toda vida. Muito obrigado por cada palavra de conforto, cada conselho e incentivo, tudo que tenho e sou devo a vocês. Se na vida nos encontramos diante de alguns tropeços, sei que são as primeiras pessoas que estarão lá para me levantar, e por isso sou imensamente grato.

Agradeço também aos meus irmãos, que na medida certa souberam compartilhar alguns dos melhores momentos que vivi. Agradeço a vocês, Maria Fernanda e Arthur, pela cumplicidade. Vocês sabem que se existe alguém em que meu poderia confiar o suficiente para reclamar da vida, dar boas risada, compartilhar um segredo ou seja lá o que for, vocês são quem melhor me entenderiam. Sou imensamente grato por ter crescido ao lado de vocês.

Agradeço aos demais familiares, avós, tios, tias e primos que apesar de hoje estarem bastante dispersos e distantes também me mostraram valores importantes que também fazem de mim quem eu sou. Devo um agradecimento ainda mais especial às minhas avós Maria e Sunta pela imensa sabedoria e pelas inúmeras histórias que remontam todo o meu passado, que incluí o tempo em que sequer era nascido.

Agradeço as professoras Denise e Angela, orientadoras deste trabalho, pelo seu conhecimento e pelo auxílio prestado ao longo de toda essa caminhada que não se limitou ao TCC, mas que tive o prazer de vivenciar durante os anos de academia. Tenho enorme admiração pelo amor ao que fazem. Vocês contribuíram muito para o meu crescimento como pessoa e como profissional.

Agradeço também aos demais professores que tive. Certamente não vou lembrar de todos, mas sem dúvida os melhores e os piores. Independentemente disso, todos foram essenciais, por terem compartilhado seu conhecimento. Devo a vocês tudo o que sei hoje.

Agradeço a engenheira Lucília, relatora e banca desse trabalho, pela imensa contribuição dada por sua criteriosa leitura e apreciação deste trabalho. Certamente os seus apontamentos, sugestões e correções ajudaram a tornar esse trabalho melhor em cada aspecto.

Agradeço a todos os amigos e colegas, que ao longo dessa caminhada me fizeram rir e chorar pelos motivos certos, e que me ensinaram a amar a vida e ter bons motivos para aproveitar cada minuto dela.

Agradeço aos meus colegas de trabalho pelo convívio e pelos ensinamentos que vão além da sala de aula. Agradeço a Sandra, Luciana, Leonardo, Maria Helena, Valter, Vânia, João, Alessandra, Santiago, Eduardo, Fernando e Cynthia. Também agradeço aos diretores da Engenhosul, Marco, Helmar e Aquiles, pela oportunidade de estágio, que contribuiu fortemente para minha formação.

Agradeço ao Felipe, pela ajuda especial nas atividades de laboratórios e sobretudo pelo companheirismo e amizade.

Agradeço a Vanessa, amiga e colega em vários momentos. Obrigado por compartilhar seu acervo que constituiu grande parte das referências bibliográficas por mim utilizadas. Agradeço também pelas ideias e pela ajuda em todos os momentos dessa pesquisa.

Agradeço a Karina, Clarissa e Sofia, amigas com quem tive a oportunidade de dividir os ótimos momentos durante uma fase de muitas mudanças. Sou grato por ter conhecido vocês e por terem me apoiado num período em que estive distante daqueles que sempre estiveram ao meu lado.

Agradeço aos amigos do Norie. Muito obrigado pela ajuda que me deram e pela amizade. Aos professores, mestrandos e doutorandos: Juliana, Marina, Cristina, Eugênio, Laís, Ana Passuelo, João Masuero, Anile, Ana Paula K, Ana Paula M, Daniel, Mauro, Anderson, Carina, Marlon, Abrahão, Fernanda, Guilherme, Muriel, Ariane, Gisele, Rafaela, Simone, Lucília, Natália e Tiago.

Aos bolsistas com quem trabalhei: Guilherme Masuero, Guilherme Fuhr, Guilherme Púglia, Guilherme Anacleto, Anne, Josi, Luis, Vanessa, Bruno Lansini, Bruno Mondini, Caroline Giordani, Davi, Alexandre, Allan, Gabriela, Amanda, Bianca, Francine, Gustavo e Juliana.

Agradeço aos laboratoristas Ari e Airton. A ajuda de vocês foi essencial, obrigado pelo auxílio nos trabalhos do programa experimental.

Agradeço aos bolsistas do laboratório e todos que contribuíram de alguma forma com esse trabalho.

A todas essas pessoas e a outras que não mencionei, estendo meus agradecimentos.

Agradeço ao Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE) por disponibilizar o Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído (LAMTAC) para a realização da pesquisa.

“... contanto que eu chegue a algum lugar - completou Alice, para se explicar melhor.
- Ah, mas com certeza você vai chegar, desde que caminhe bastante.”

Lewis Carroll

RESUMO

A cicatrização autógena em concretos é um fenômeno que resulta da hidratação de grãos de cimento Portland anidros presentes no compósito e que promove o fechamento das fissuras que possam surgir ao longo de sua vida útil. Apesar de já ter sido constatada e ser amplamente conhecida, ainda é uma propriedade sobre a qual não se tem completo domínio no sentido de entender sua capacidade e seu potencial uso para minimizar a ocorrência de manifestações patológicas. Sabe-se que ocorrências graves estão associadas à formação de fissuras nas estruturas de concreto, muitas vezes podendo representar a redução do desempenho e da vida útil das edificações ou gastos elevados com terapias de recuperação. Isso configura um cenário contrário à sustentabilidade para o setor da construção. No que diz respeito à engenharia, sabe-se que dispor de boas práticas, seja nas etapas de planejamento ou execução dos projetos, é indispensável para minimizar os efeitos que possam gerar a fissuração. Nesse contexto, a utilização de novos materiais e tecnologias facilmente ganha espaço no mercado ao propor melhorias de desempenho ou otimização do processo executivo. No entanto, para que possam ser aplicados, esses materiais devem ser testados e investigados até que se possa atestar sua efetividade, de modo a comprovar que seu uso não desencadeia efeitos deletérios. Sendo assim, esse trabalho propõe uma análise experimental realizada em concretos fissurados nas primeiras idades para avaliar o fenômeno da autocicatrização da matriz cimentícia. Estas análises visam comparar o fechamento das fissuras ao longo do tempo em concretos produzidos com materiais usuais (cimento, brita e areia) e concretos com aditivo impermeabilizante por cristalização, material cuja utilização tem ganhado maior visibilidade no mercado, recentemente. Para isso, foram moldados diferentes traços de concreto variando-se consumo de cimento, relação água/aglomerante e também o uso ou não do aditivo impermeabilizante. Aos 7 dias, depois de terem sido desmoldados e curados em condições ideais (cura úmida por imersão à temperatura constante, conforme NBR 5738:2015) as amostras receberam um carregamento por compressão de 85% da carga de ruptura. Alguns espécimes foram mantidos íntegros (sem o carregamento), como amostras de referência ou controle, a fim de validar a ocorrência das fissuras e seu posterior fechamento. Por fim, foram realizados ensaios mecânicos de resistência à compressão, e de penetração de íons cloreto para avaliar sua durabilidade. Os ensaios foram realizados aos 28 e 56 dias após a data da moldagem. Os resultados obtidos indicam aumento do desempenho mecânico dos concretos fissurados para relações água/aglomerante de 0,43, não sendo constatada diferença estatística significativa nos demais traços. Além disso, os concretos contendo aditivo tiveram um aumento mais significativo da resistência à compressão (mesmo que o uso do produto altere o comportamento da resistência original do concreto) tendendo a diminuí-la para relações água/aglomerante menores. Com relação a durabilidade, foi constatado aumento da penetração de íons cloreto devido ao carregamento e o uso do aditivo não teve influência significativa com base nos resultados obtidos.

Palavras-chave: Autocicatrização, fissuras nas primeiras idades, aditivo cristalizante

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1: Edificação com múltiplos pavimentos escorados (SALVADOR, 2007) | 28 |
| Figura 2: Recalque diferencial no edifício menor devido à interferência do seu bulbo de tensões, ocasionado pelo edifício maior (esquerda) e devido à heterogeneidade do solo (direita) (THOMAZ, 1989)..... | 30 |
| Figura 3: Evolução da quantidade de artigos publicados em materiais de cicatrização (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013) | 35 |
| Figura 4: Gráfico de custo e desempenho em função do tempo para infra-estrutura de alta qualidade (curvas B) normal (curvas A). (adaptado de VAN BREUGEL, 2007)..... | 36 |
| Figura 5: Desempenho e custo em função do tempo para estruturas construídas com material autocicatrizante. (adaptado de VAN BREUGEL, 2007) | 37 |
| Figura 6: Mecanismos de autocicatrização autógena no concreto (TER HEIDE, 2005): (a) formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio; (b) deposição de impurezas transportadas pela água ou de partículas desprendidas das paredes da fissura; (c) hidratação tardia de grãos anidros de cimento; (d) expansão da matriz de cimento | 39 |
| Figura 7: Densificação da matriz cimentícia causada pela hidratação adicional nas áreas adjacentes à fissura (HUANG et al., 2016) | 41 |
| Figura 8: Mecanismo de autocicatrização com uso de polímeros superabsorventes | 46 |
| Figura 9: Cicatrização autônoma com uso de cápsulas (à esquerda) e sistemas vasculares (à direita) contendo agentes químicos cicatrizantes (adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013) | 47 |
| Figura 10: Representação esquemática do programa experimental..... | 49 |
| Figura 11: Distribuição granulométrica do agregado miúdo | 50 |
| Figura 12: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone e aspecto visual do concreto no estado fresco..... | 53 |
| Figura 13: Formas metálicas de $\phi 100 \times 200$ mm (a) e $\phi 95 \times 190$ mm (b) utilizadas para produção das amostras de concreto | 55 |
| Figura 14: Mesa vibratória utilizada para o adensamento do concreto fresco no interior dos moldes..... | 56 |
| Figura 15: Cura inicial dos concretos sobre superfície plana rígida | 56 |
| Figura 16: Tanques de cura por submersão contendo água saturada de cal | 57 |
| Figura 17: Prensa hidráulica utilizada para realização do ensaio de compressão uniaxial..... | 58 |
| Figura 18: Base do corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) de retificados | 59 |

| | |
|---|----|
| Figuras 19: Posicionamento da amostra no equipamento de ensaios (a) e aspecto após ruptura (b) | 59 |
| Figuras 20: Identificação e demarcação das fatias internas a serem cortadas (a); amostras após o corte em fatias de 51 ± 3 mm de espessura para realização do ensaio de penetração de íons cloreto (b)..... | 60 |
| Figura 21: Exemplo de amostras de concreto após impermeabilização da superfície lateral com resina epoxídica..... | 60 |
| Figura 22: Corpos de prova imersos em água deionizada e deaerada | 61 |
| Figura 23: Conjunto utilizado na montagem da célula de ensaio: blocos de acrílico com cavidade para colocação das soluções de NaCl e NaOH, anéis de cobre e telas metálicas | 61 |
| Figura 24: agitador magnético utilizado para homogeneização das soluções de NaOH e NaCl. 61 | |
| Figura 25: Disposição experimental da célula de migração de cloretos | 62 |
| Figura 26: Representação esquemática da montagem do circuito para realização do ensaio de penetração de íons cloreto | 62 |
| Figura 27: Medições de corrente elétrica em cada uma das células dada pelos multímetros em miliAmpére (mA)..... | 63 |
| Figura 28: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água aglomerante para concretos ensaiados aos 7 dias de idade | 64 |
| Figura 29: Resistência a compressão média dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 28 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam a variabilidade interna do grupo considerando-se uma distribuição normal com nível de significância de 5% . 66 | |
| Figura 30: Resistência a compressão média dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 56 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam a variabilidade interna do grupo considerando-se uma distribuição normal com nível de significância de 5% 67 | |
| Figura 31: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 28 dias | 69 |
| Figura 32: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 56 dias | 69 |
| Figura 33 : Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência a compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 70 |
| Figura 34: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras não fissuradas | 70 |
| Figura 35: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras fissuradas aos 7 dias (direita) | 71 |

| | |
|--|----|
| Figura 36: Efeito da idade dos concretos/cura sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 71 |
| Figura 37: Efeito isolado da fissuração sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 72 |
| Figura 38: Efeito da interação entre a fissuração, relação água/aglomerante e idade dos concretos sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 73 |
| Figura 39: Efeito da interação entre a fissuração, relação água aglomerante e do uso de aditivo impermeabilizante dos concretos sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 75 |
| Figura 40: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água/aglomerante para concretos ensaiados aos 28 dias de idade | 75 |
| Figura 41: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água/aglomerante para concretos ensaiados aos 56 dias de idade | 76 |
| Figura 42: Carga elétrica passante média obtida no ensaio de penetração de íons cloreto dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 28 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam os resultados individuais obtidos no ensaio..... | 77 |
| Figura 43: Carga elétrica passante média obtida no ensaio de penetração de íons cloreto dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 56 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam os resultados individuais obtidos no ensaio..... | 78 |
| Figura 44: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 28 dias | 79 |
| Figura 45: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 56 dias | 79 |
| Figura 46: Efeito da relação água aglomerante sobre a penetração de íons cloreto. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 80 |
| Figura 47: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras não fissuradas | 80 |
| Figura 48: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras fissuradas aos 7 dias | 81 |
| Figura 49: Efeito da idade dos concretos/cura sobre a penetração de íons cloreto. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% | 81 |
| Figura 50: Efeito da idade e relação água/aglomerante sobre o potencial de recuperação do desempenho quanto à durabilidade por penetração de íons cloreto em concretos fissurados. As | |

barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5% 83

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|-----------|
| Tabela 1: Abertura permitida para fissuras segundo a norma americana (adaptado de ACI Committee 224)..... | 23 |
| Tabela 2: Diretrizes sobre a abertura de fissuras e especificação do concreto, relativas à durabilidade em função da agressividade do ambiente (adaptado de NBR 6118:2014) | 24 |
| Tabela 3: Grau de hidratação (%), determinado por análise de imagem BSE, gerado por sinais de elétrons retroespalhados. (adaptado de Gruyaert et al., 2010). | 41 |
| Tabela 4: Traço unitário dos concretos produzidos expressos em kg/kg de cimento. | 48 |
| Tabela 5: Consumo unitário dos materiais em cada traço expressos em kg/m ³ de concreto.... | 48 |
| Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo..... | 50 |
| Tabela 7: Caracterização física dos agregados graúdos..... | 51 |
| Tabela 8: Caracterização físico-químicas do aditivo impermeabilizante por cristalização..... | 52 |
| Tabela 9: Determinação das propriedades no estado fresco dos concretos produzidos | 55 |
| Tabela 10: Penetração de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM, 2012) | 63 |
| Tabela 11: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação | 64 |
| Tabela 12: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação | 65 |
| Tabela 13: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 56 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação | 66 |
| Tabela 14: ANOVA – Resistência à compressão uniaxial | 68 |
| Tabela 15: Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de penetração de íons cloreto aos 28 dias | 76 |
| <i>Tabela 16: Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de penetração de íons cloreto aos 56 dias</i> | <i>77</i> |
| Tabela 17: ANOVA – Carga elétrica passante no ensaio de penetração de íons cloreto..... | 78 |
| Tabela 18: Variação da penetração de íons cloreto em função do processo de fissuração por carregamento aos sete dias e potencial para diferentes traços e idades avaliados..... | 82 |

LISTA DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute (Instituto Americano do Concreto)

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CEB - Comitê Euro-Internacional do Betão (Comitê Euro-internacional do concreto)

CEM I – Equivalente ao Cimento Portland Comum, normatização utilizada pela indústria francesa de cimentos

CEM III – Equivalente ao Cimento Portland com escória de alto-forno, normatização utilizada pela indústria francesa de cimentos

CP I – Cimento Portland Comum (conforme normatização brasileira)

CP III – Cimento Portland com Escória de alto-forno (conforme normatização brasileira)

CP IV – Cimento Portland Pozolânico (conforme normatização brasileira)

fck – Resistência Característica do Concreto à Compressão

GU – Canadian General Use Portland Cement (Cimento de uso geral, normatização canadense)

JCI – Japan Concrete Institute (Instituto Japonês do Concreto)

LAMTAC – Laboratório de Materiais e Tecnologia do Ambiente Construído

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

NORIE – Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação

pH – Potencial de Hidrogênio

RILEM - Reunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, Systèmes de Construction et Ouvrages (Reunião Internacional dos Laboratórios de Ensaios)

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 17 |
| 2 | DIRETRIZES DA PESQUISA | 19 |
| 2.1 | QUESTÃO DA PESQUISA | 19 |
| 2.2 | OBJETIVOS DO TRABALHO | 19 |
| 2.2.1 | <i>Objetivo Principal.....</i> | <i>19</i> |
| 2.2.2 | <i>Objetivos Específicos.....</i> | <i>19</i> |
| 2.3 | HIPÓTESES | 19 |
| 2.4 | DELIMITAÇÕES | 19 |
| 2.5 | LIMITAÇÕES | 20 |
| 2.6 | DELINEAMENTO DA PESQUISA..... | 20 |
| 2.7 | ESTRUTURA DO TRABALHO | 21 |
| 3 | FISSURAÇÃO E DURABILIDADE | 22 |
| 3.1 | MECANISMOS DE FISSURAÇÃO | 24 |
| 3.1.1 | <i>Fissuração por assentamento plástico do concreto.....</i> | <i>25</i> |
| 3.1.2 | <i>Fissuração por dessecação superficial.....</i> | <i>26</i> |
| 3.1.3 | <i>Fissuração por movimentação das estruturas de suporte.....</i> | <i>27</i> |
| 3.1.4 | <i>Fissuração devida às variações térmicas ou ao teor de umidade.....</i> | <i>28</i> |
| 3.1.5 | <i>Fissuração por sobrecarga.....</i> | <i>29</i> |
| 3.1.6 | <i>Fissuração de longo prazo</i> | <i>30</i> |
| 3.2 | MECANISMOS DE TRANSPORTE DE ÁGUA E UMIDADE NO CONCRETO..... | 31 |
| 3.2.1 | <i>Absorção capilar</i> | <i>31</i> |
| 3.2.2 | <i>Difusão de vapor d'água.....</i> | <i>32</i> |
| 3.2.3 | <i>Água sob pressão.....</i> | <i>32</i> |
| 3.2.4 | <i>Entrada de água através das fissuras.....</i> | <i>33</i> |
| 4 | AUTOCICATRIZAÇÃO | 35 |
| 4.1 | TIPOS DE AUTOCICATRIZAÇÃO | 37 |
| 4.2 | MECANISMO DA CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA..... | 38 |
| 4.3 | FATORES QUE INFLUENCIAM A CICATRIZAÇÃO AUTÓGENA..... | 41 |
| 4.3.1 | <i>Influência da relação água/aglomerante e do consumo de cimento</i> | <i>41</i> |
| 4.3.2 | <i>Influência da cura e das condições do ambiente</i> | <i>42</i> |
| 4.3.3 | <i>Influência do tipo de cimento</i> | <i>43</i> |
| 4.3.4 | <i>Influência da idade do concreto.....</i> | <i>44</i> |
| 4.3.5 | <i>Influência do tamanho e tortuosidade das fissuras.....</i> | <i>44</i> |
| 4.4 | CICATRIZAÇÃO AUTÔNOMA..... | 45 |
| 5 | PROGRAMA EXPERIMENTAL..... | 48 |
| 5.1 | METODOLOGIA..... | 48 |
| 5.2 | MATERIAIS UTILIZADOS | 49 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5.2.1 | <i>Cimento</i> | 49 |
| 5.2.2 | <i>Agregado miúdo</i> | 49 |
| 5.2.3 | <i>Agregado graúdo</i> | 50 |
| 5.2.4 | <i>Água</i> | 51 |
| 5.2.5 | <i>Aditivo cristalizante</i> | 51 |
| 5.3 | PRODUÇÃO DO CONCRETO..... | 52 |
| 5.3.1 | <i>Mistura dos materiais</i> | 52 |
| 5.3.2 | <i>Moldagem dos corpos de prova</i> | 55 |
| 5.3.3 | <i>Cura</i> | 56 |
| 5.3.4 | <i>Fissuração</i> | 57 |
| 5.4 | ENSAIOS REALIZADOS..... | 58 |
| 5.4.1 | <i>Resistência à compressão uniaxial</i> | 58 |
| 5.4.2 | <i>Penetração de íons cloretos</i> | 59 |
| 6 | APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS | 64 |
| 6.1 | RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO UNIAXIAL..... | 64 |
| 6.1.1 | <i>Resultados aos 7 dias (data de fissuração)</i> | 64 |
| 6.1.2 | <i>Resultados aos 28 dias e 56 dias</i> | 65 |
| 6.1.3 | <i>Influência da relação água/aglomerante e idade sobre a resistência à compressão</i> | 68 |
| 6.1.4 | <i>Influência da fissuração sobre a resistência à compressão</i> | 72 |
| 6.1.5 | <i>Influência do uso do aditivo sobre a resistência à compressão e potencial de recuperação das propriedades mecânicas por autocatrização</i> | 74 |
| 6.2 | PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO | 76 |
| 6.2.1 | <i>Resultados aos 28 dias e 56 dias</i> | 76 |
| 6.2.2 | <i>Influência da relação água/aglomerante e idade sobre a durabilidade do concreto</i> | 79 |
| 6.2.3 | <i>Influência da relação água/aglomerante e a idade sobre o potencial de recuperação da durabilidade por autocatrização</i> | 82 |
| 7 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 84 |
| 7.1 | CONCLUSÕES | 84 |
| 7.2 | SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... | 84 |
| 8 | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 86 |
| | APÊNDICE A | 95 |
| | APÊNDICE B | 98 |

1 Introdução

A utilização de materiais cimentícios na construção está amplamente difundida em todo o mundo. Isso ocorre de tal maneira que muitos especialistas, com o intuito de frisar sua importância na atualidade, retomam com frequência o fato de que o concreto de cimento Portland é o material mais consumido depois da água. Segundo Metha e Monteiro (2014) esse consumo é da ordem de 19 bilhões de toneladas ao ano.

No entanto, alguns mecanismos de deterioração das estruturas executadas com esse material são inevitáveis. O aparecimento de fissuras, por exemplo, se faz presente desde idades iniciais que o concreto ainda se apresenta no estado plástico e podem manifestar-se durante toda sua vida útil. Dal Molin (1988) trata do fenômeno como parte integrante e inerente ao concreto armado e que deverá ocorrer em maior gravidade quanto menor for o nível de controle da qualidade durante as diferentes etapas do processo de construção. Segundo a autora, mesmo que todas as medidas preventivas sejam tomadas, garantir a integridade total dos elementos de concreto com relação à formação de fissuras nem sempre é possível.

O concreto é, reconhecidamente, bastante suscetível à formação de fissuras e, nos casos em que houver risco de comprometimento de sua durabilidade - que tende a ser maior, quanto maiores forem as aberturas dessas fissuras - é necessário recorrer ao tratamento e reparo (TAKAGI, 2013). Vários autores explicam que fissuras com aberturas elevadas (em geral superiores a 0,3 ou 0,4 mm) podem se tornar um caminho preferencial para ingresso de água e agentes agressivos, acelerando os mecanismos de degradação e reduzindo o cobrimento efetivo das armaduras (JOHNSON, 1973; DAL MOLIN, 1988; LEPECH e LI, 2006; SILVA FILHO e HELENE 2011). A fissuração, por causar a perda de estanqueidade, desencadeia o surgimento de manchas de umidade, eflorescências e formação de bolor, causando desconforto estético aos usuários. Além disso, fissuras podem contribuir para o aumento da deformabilidade das estruturas, havendo a necessidade de realização de reparos (DAL MOLIN, 1988).

No entanto, a manutenção e inspeção das estruturas requerem recursos financeiros elevados e, em casos de estruturas continuamente em serviço, como, por exemplo, estradas e túneis, essa tarefa pode ser ainda mais desafiadora (WU et al., 2012). Nesse cenário, a utilização intencional das propriedades autocicatrizantes do concreto apresenta um benefício considerável sob o ponto de vista econômico. Para Takagi (2013), além da redução dos custos com material e mão de obra, em relação às técnicas convencionais de tratamento - geralmente com injeção de resina - a consideração da autocicatrização também pode reduzir custos indiretos, já que dispensa a interdição, possibilitando o uso durante as atividades de manutenção.

A localização do dano e o tamanho ou escala das estruturas, conforme apontado por Wu et al. (2012), condicionam custos excepcionalmente altos que tornam a prática do diagnóstico e reparo praticamente proibitivos, mesmo que a princípio tais procedimentos sejam aplicáveis no âmbito técnico. Sob tais premissas, os referidos autores igualmente sugerem o reparo automático ou autocicatrização das fissuras como uma alternativa bastante atrativa para as estruturas.

Além dos benefícios técnicos e econômicos, os materiais autocicatrizantes também são promissores frente aos grandes desafios da atualidade, no sentido de promover a sustentabilidade do planeta. Segundo Schlangen e Joseph (2009), a melhoria do desempenho a ser potencialmente alcançada com a autocicatrização deve reduzir a demanda por novas estruturas, resultando na diminuição do consumo de matérias primas virgens e em especial o consumo de cimento, cuja produção demanda grande quantidade de energia além de responder por 5-7% das emissões totais de CO₂.

Por definição, a autocicatrização é a habilidade dos materiais de repararem fissuras de forma autônoma, ou seja, sem intervenções externas (GHOSH, 2009). Comparativamente aos outros materiais, o concreto se distingue por conter reservas de cimento anidro (em quantidade superior a 25% do total de cimento, especialmente em misturas com baixas relações água/aglomerante), que podem ser usadas com o propósito da autorreparação (LI e YANG, 2007). Apesar de existirem várias nomenclaturas diferentes, tais como cicatrização autógena, auto-selagem, reparação autógena, cicatrização natural, cicatrização autônoma, entre outras, os termos não são necessariamente sinônimos, já que alguns deles tendem a enfatizar um tipo de mecanismo em detrimento do outro. Esses mecanismos serão melhor abordados nos próximos capítulos.

Este trabalho propõe a avaliação do potencial de cicatrização do concreto através do uso de aditivo cristalizante. Esse aditivo é comumente caracterizado como um impermeabilizante, pois, assim como os demais sistemas de impermeabilização, bloqueia a passagem de umidade para o interior da estrutura, diferindo-se deles apenas por ser adicionado à mistura de concreto ainda no estado fresco, enquanto que os outros geralmente são aplicados à superfície já endurecida. Por evitar o transporte de umidade através do concreto, mecanismo que geralmente está associado à degradação do material, muitos autores apontam o uso de impermeabilizantes com a finalidade de estender a vida útil das estruturas (MUHAMMAD et al., 2015).

Nos concretos, fissurados ou não, o mecanismo de aumento da durabilidade obtido com o uso de cristalizantes se dá pela diminuição da porosidade capilar. Parte das reações e fechamento dos poros ocorre paralelamente à hidratação, quando o aditivo e o próprio cimento consomem a umidade excedente presente na mistura. Segundo Ferrara et al., 2014, contudo, esses aditivos também possuem a capacidade de promover reações de hidratação posteriores, toda vez que o cristalizante entrar em contato novamente com a água ou estiver submetido a um aumento significativo da umidade. Isso implica dizer que o cristalizante potencializa o fenômeno da autocicatrização, já que promove reações de hidratação secundárias toda vez que houver formação de fissuras sucedida pela entrada de água, mesmo em idades mais avançadas.

2 Diretrizes da pesquisa

As diretrizes para desenvolvimento do trabalho estão descritas nos próximos itens.

2.1 Questão da pesquisa

A questão a ser respondida através da pesquisa é: a incorporação de aditivo impermeabilizante por cristalização ao concreto potencializa o fenômeno da autocicatrização de fissuras características das primeiras idades?

2.2 Objetivos do trabalho

Os objetivos deste trabalho estão descritos nos itens a seguir, sendo classificados em principal e específicos.

2.2.1 Objetivo Principal

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar o potencial de autocicatrização de fissuras características das primeiras idades em concretos produzidos com e sem aditivo impermeabilizante por cristalização, comparando seu comportamento físico-mecânico ao de amostras irmãs de concreto não fissurado.

2.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos são:

- a) avaliar a influência da relação água/aglomerante nas propriedades mecânicas por meio do ensaio de resistência à compressão em concretos produzidos com e sem aditivo impermeabilizante por cristalização, em concretos fissurados, comparando seu comportamento ao de corpos de prova irmãs não fissurados, em diferentes idades (28 e 56 dias);
- b) para as mesmas condições descritas anteriormente, também avaliar o desempenho dos concretos produzidos quanto à durabilidade por meio do ensaio de penetração de íons cloretos estabelecendo as mesmas comparações relativas à idade e fissuração dos corpos de prova.

2.3 Hipóteses

As hipóteses desse trabalho são:

- a) concretos com baixa relação água/aglomerante possuem maior quantidade de cimento anidro em sua composição, o que poderá resultar em um maior potencial de autocicatrização após a fissuração;
- b) o produto impermeabilizante por cristalização usado como aditivo potencializa a autocicatrização nos concretos, podendo aumentar sua capacidade de recuperação das propriedades físico-mecânicas anteriores à ocorrência de fissuras;
- c) fissuras ocasionadas em concretos durante as idades iniciais possuem maior tendência ao fechamento uma vez que o curto intervalo de tempo é insuficiente para a ocorrência de boa parte das reações de hidratação. Portanto, a autocicatrização e a própria continuidade da hidratação inicial ocorrem simultaneamente.

2.4 Delimitações

A seguir estão descritas as delimitações relativas ao trabalho proposto:

- a) foi testado um único produto impermeabilizante por cristalização;
- b) a quantidade de aditivo adicionada à mistura corresponde a um dos valores indicados pelo fabricante (1,0 %);

- c) foi analisado apenas um tipo de cimento: CP IV;
- d) foram avaliadas três relações água/aglomerante: 0,43; 0,50 e 0,66;
- e) foram avaliados concretos fissurados por carregamento com 85% da carga de ruptura aos 7 dias de idade;
- f) todos os concretos foram submetidos às condições ideais de cura, conforme as prescrições da NBR 5738:2015;
- g) os ensaios foram realizados apenas nas idades de 28 e 56 dias;
- h) os materiais foram avaliados a partir dos ensaios mecânicos de resistência à compressão axial e de durabilidade por penetração de íons cloretos.

2.5 Limitações

A seguir estão descritas algumas limitações enfrentadas:

- a) os concretos foram fissurados com o carregamento com 85% da carga de ruptura aos 7 dias de idade. Sendo assim, as fissuras apresentaram variabilidades geométricas decorrentes tanto do traço do concreto, quanto das condições de carregamento, que não são objeto de análise dos resultados;
- b) por carecer de maiores informações a respeito do produto impermeabilizante, esse trabalho não se propôs a caracterizar as alterações químicas que podem ocorrer no concreto devido ao uso desse aditivo;
- c) não foram avaliados diferentes teores do produto que não os especificados pelo fabricante, o que impossibilita avaliar a existência de um teor ótimo ou relações de custo benefício do produto para diferentes consumos.

2.6 Delineamento da pesquisa

O delineamento deste trabalho abrange as seguintes etapas:

- a) pesquisa bibliográfica;
- b) planejamento e definição do programa experimental;
- c) moldagem dos concretos e execução dos ensaios;
- d) análise dos resultados;
- e) considerações finais.

Todo o embasamento teórico desse trabalho partiu da pesquisa bibliográfica, que se estendeu do início ao fim desse trabalho: nas etapas iniciais, sua importância é justificada pela contextualização do tema e pela reunião de informações fundamentais para o entendimento das etapas subsequentes. Durante o planejamento e definição do programa experimental, se fez presente na investigação sobre resultados já obtidos em trabalhos anteriores para que os resultados gerados nessa pesquisa tivessem maior validade possível, livres de possíveis intervenientes que pudessem torná-los pouco conclusivos nas etapas finais. A bibliografia também foi consultada para a realização dos ensaios, a fim de estabelecer padrões e técnicas convencionados no meio científico. Finalmente, nas análises dos resultados e conclusões a pesquisa bibliográfica foi utilizada com a finalidade de justificar e ratificar os dados obtidos nos ensaios.

A etapa de planejamento do programa experimental teve por objetivo definir as variáveis a serem estudadas, assim como os métodos de ensaios adequados que possibilitem a obtenção de resultados válidos e relevantes. A produção dos concretos, por exemplo, deve ser realizada cuidadosamente, para evitar o surgimento de outras variáveis não previstas. Portanto, a escolha dos materiais, moldagem, cura, uso de equipamentos, características ambientais e a realização dos ensaios devem atender níveis de padronização para que possa ser assegurada a confiabilidade sobre os resultados e conclusões deste trabalho.

As etapas de moldagem e execução dos ensaios abrangem uma série de atividades práticas realizadas em laboratório, que foram executadas segundo o cronograma estabelecido na etapa de planejamento. Entre as atividades dessa etapa estão a caracterização dos materiais, moldagem, desforma e cura dos corpos de prova de concreto, e a realização dos ensaios de desempenho físico-mecânico e de durabilidade para aquisição dos dados para análise.

Após a realização dos ensaios, foi feita a avaliação dos resultados. Esta etapa é a parte essencial do trabalho, visto que avalia o desempenho do produto estudado para diferentes relações água/aglomerante e diferentes idades, comparativamente a um concreto sem o uso do aditivo. Por meio de análises estatísticas dos dados obtidos nos ensaios, foi definida a significância dos resultados, viabilizando a análise comparativa do desempenho dos concretos estudados.

Por fim, na etapa de considerações finais, está apresentada uma discussão sobre o comportamento dos materiais testados, apresentando-se as conclusões obtidas a partir dos resultados. Também estão apresentadas nessa seção do trabalho as dificuldades enfrentadas durante sua execução e as sugestões para a realização de trabalhos futuros relacionados ao mesmo tema.

2.7 Estrutura do trabalho

Esse trabalho está dividido em seis capítulos. O primeiro capítulo introduz e situa o tema no contexto da construção civil. O segundo capítulo se refere às diretrizes da pesquisa, tratando de seus objetivos, hipóteses, delimitações e limitações que irão delinear o trabalho ao longo dos capítulos seguintes. O terceiro e quarto capítulos discorrerão de forma mais aprofundada sobre o tema proposto. Por meio de revisão bibliográfica, serão abordados com maior detalhe na terceira parte desse trabalho os fenômenos de fissuração, sua relação com a degradação das estruturas de concreto, e também as definições de diferentes mecanismos da autocicatrização em concretos. Esses dois capítulos têm a finalidade familiarizar o leitor com o tema, expondo diferentes abordagens e pontos de vista. O programa experimental e método de pesquisa são apresentados no quinto capítulo, contendo a caracterização e a descrição dos materiais utilizados, bem como a produção dos concretos, preparação das amostras e os ensaios executados. No sexto capítulo estão apresentados os resultados dos experimentos, o tratamento estatístico dos dados, sua interpretação e análise. Nesse capítulo, outros trabalhos serão referenciados, de forma a consolidar ou contrapor as respostas obtidas. Por fim, no sétimo e último capítulo, são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa.

3 Fissuração e durabilidade

A ocorrência de fissuras nas estruturas de concreto nem sempre é apontada como danosa a ponto de desencadear mecanismos graves de degradação. Além disso, não existe na literatura, mesmo sendo algo discutido há bastante tempo, um consenso acerca da sua gravidade. Não existe, também, consenso quanto às tolerâncias que devem ser consideradas para assegurar que o material fissurado tenha um tempo de vida prolongado. Mesmo assim, o fenômeno é quase sempre um bom indicativo das anomalias impostas ao concreto e por isso é, muitas vezes, o ponto de partida no diagnóstico das manifestações patológicas.

Levando-se em conta a sua geometria, geralmente caracterizada pela extensão, abertura e profundidade, para muitos autores, as fissuras tendem a ser mais graves quanto maiores forem esses parâmetros. Entre as principais razões apontadas estão a possibilidade de entrada de água e agentes agressivos para camadas mais internas do concreto, juntamente com o aumento da superfície exposta.

Alguns estudos realizados no Brasil contendo levantamentos da degradação em estruturas em concreto armado apontam percentualmente a ocorrência de fissuras entre as manifestações patológicas graves relatadas. Desses, destacam-se os trabalhos de Dal Molin (1988) e Nince (1996). Nesses trabalhos, as ocorrências de fissuras nas estruturas são apontadas entre as principais manifestações patológicas relatadas podendo ser de 30%, 46,2%, 22,7% e 60,2%, como relatado por Nince, nos estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Distrito Federal, respectivamente, e de 66%, segundo Dal Molin no Rio Grande do Sul.

Outros levantamentos menos abrangentes, mas que também complementam a lista de trabalhos realizados nesse sentido são os de Barriquelo (2012) e Silva (2014). Barriquelo (2012) investigou um conjunto de 90 obras de habitação de interesse social e relatou a ocorrência de fissuras na supra estrutura, em 71 delas. Por sua vez, Silva (2014) enumera o problema em 20, de 30 obras analisadas no estado do Ceará.

Nesse ponto, cabe salientar que a disposição geográfica das edificações tem influência direta sobre as análises dos levantamentos de cada tipo de manifestação patológica. Por exemplo, em cidades costeiras, as chances de haver corrosão nas armaduras do concreto são aumentadas devido à concentração de cloretos presentes no ambiente. Em linhas gerais, a literatura indica que a ocorrência de fissuras representa em torno de 21% das manifestações patológicas no Brasil (MACHADO, 2002; HELENE, 2003). Em Porto Alegre, especificamente, a ocorrência de fissuras é mais frequente devido à movimentação térmica decorrente da dilatação e contração das estruturas submetidas às variações de temperatura, significativas na região sul do país.

O estudo pioneiro realizado com o intuito de avaliar a relação entre a ocorrência de fissuras e a corrosão no concreto armado foi desenvolvido por Beeby (1978; 1979). Em seus trabalhos, o autor concluiu que, a curto prazo, o tamanho das fissuras influencia significativamente a velocidade da corrosão, mesmo que, num horizonte maior de tempo, o fenômeno ocorra independentemente dessa geometria. Até então, as fissuras mais preocupantes eram aquelas ocasionadas pela expansão decorrente da oxidação do aço, que agravavam ainda mais a deterioração e a perda de seção das armaduras. Portanto, os estudos tratavam de como a corrosão desencadeava fissuras e não o contrário, por esse motivo é dada fundamental importância para essas publicações.

Mais tarde, outros autores corroboraram a teoria, concluindo de maneira similar que a corrosão pode ser facilitada quando a profundidade das fissuras atinge o nível da armadura. Carpentier e Soretz¹ (1986 apud HELENE, 1997) apontam que isso acontece devido ao processo de

¹ CARPENTIER, L.; SORETZ, M. S. Contribution à l'Étude de la Corrosion des Armatures dans le Béton Armé. Annales de L'Institute Technique du Bâtiment et des Travaux Publics. n. 223-224, p. 817-41, 1986.

carbonatação, que tende a se desenvolver mais rapidamente ao longo das paredes da fissura, contribuindo para o aparecimento de células de corrosão por diferenças de pH. Philipose et al. (1992) concluíram, de forma similar, que em concretos as fissuras intensificam a penetração de cloretos, podendo também desencadear a corrosão mais rapidamente, comparativamente a concretos menos fissurados.

Mesmo que muitos trabalhos tenham consolidado essa relação entre a fissuração e a corrosão, impedir completamente a ocorrência de fissuras é inviável. Segundo Helene (1997) a fissuração só é evitada em obras de concreto protendido, devido à compressão introduzida no concreto, ou em obras especiais de contenção de líquidos agressivos. Segundo o autor, todas as demais situações em que se busca total integridade à fissuração representam um desperdício da capacidade resistente das armaduras e um aumento de custos desnecessário.

Diante disso, foram introduzidas as primeiras diretrizes de cálculo da abertura de fissuras. O propósito era permitir a sua ocorrência, mas, por outro lado, através do cálculo estrutural, limitar sua abertura a um determinado valor. Cabe ressaltar que essa é uma abordagem relativa apenas às fissuras devidas ao carregamento, e que outras estratégias (a serem discutidas nas próximas seções desse trabalho) devem ser utilizadas com o fim de evitar outros tipos de fissura.

Inicialmente, eram determinados os limites de aberturas das fissuras como função da agressividade do meio. Em resposta aos estudos iniciados por Beeby, ainda em 1989, o boletim CEB nº182 relata que tanto a carbonatação quanto a penetração de cloretos tendem a ser mais intensas nas regiões fissuradas, mas que, limitando-se as aberturas a 0,4 mm, o cobrimento da armadura e a qualidade do concreto têm maior importância do que a fissura. De forma similar, o *British Standard Code of Practice BS8810: Part 2* em emenda publicada em 1989, estipulou o limite de 0,3 mm para elementos sujeitos a ambientes agressivos e a recomendação dessa norma perdurou na revisão realizada em 2001.

Nos anos seguintes, alguns pesquisadores começaram a defender a ideia de que o tamanho da abertura das fissuras não apenas acelera a corrosão em idades iniciais, como também pode potencializar a propagação da corrosão ao longo do tempo, dependendo do cobrimento das armaduras e da qualidade do material (OTIENO et al., 2009). Sendo assim, as instituições normativas passaram a estipular simultaneamente o limite de abertura das fissuras, o cobrimento mínimo das armaduras, e, mais recentemente, o consumo mínimo de cimentos e máxima relação de água/aglomerante.

O *ACI Committee 224*, por exemplo, adota valores entre 0,4 mm (em climas secos ou protegidos), 0,1 mm em reservatórios, conforme a Tabela 1. Já o *Eurocode* especifica uma abertura máxima de 0,3 mm para concreto armado e 0,2 mm para concreto protendido.

Tabela 1: Abertura permitida para fissuras segundo a norma americana (adaptado de *ACI Committee 224*)

| Condições de exposição | Abertura da fissura | |
|---|---------------------|------|
| | (in) | (mm) |
| Clima seco ou peça protegida | 0,016 | 0,41 |
| Ambiente úmido, peças em contato com o solo | 0,012 | 0,30 |
| Agressividade química | 0,007 | 0,18 |
| Ambiente marinho, molhado ou seco | 0,006 | 0,15 |
| Estruturas para retenção de líquidos | 0,004 | 0,10 |

No âmbito nacional, a ABNT NBR 6118:2014 trata da relação entre fissuração e durabilidade, propondo limites para a abertura máxima característica da fissura, como função da classe de agressividade do ambiente. Esses valores são da ordem de 0,4 mm para concreto armado submetido a condições menos agressivas (Classes I), 0,3 mm em condições intermediárias (classes II e III) e 0,2 mm em casos mais extremos (classe IV) conforme apresentado na Tabela 2.

Para Silva Filho e Helene (2011), quando a abertura da fissura supera os limites estabelecidos nessa norma, se faz importante recorrer à avaliação da profundidade da fissura para determinar qual o cobrimento efetivo da armadura.

Tabela 2: Diretrizes sobre a abertura de fissuras e especificação do concreto, relativas à durabilidade em função da agressividade do ambiente (adaptado de NBR 6118:2014)

| | Classe de agressividade do ambiente (CAA) | Abertura máxima da fissura [mm] | Cobrimento mínimo [cm] | Classe de resistência do concreto | Relação água/cimento em massa |
|----------------------------|---|---------------------------------|------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|
| CONCRETO ARMADO | CAA I | 0,4 | 25 | ≥ C20 | ≤ 0,65 |
| | CAA II | 0,3 | 30 | ≥ C25 | ≤ 0,60 |
| | CAA III | 0,3 | 40 | ≥ C30 | ≤ 0,55 |
| | CAA IV | 0,2 | 50 | ≥ C40 | ≤ 0,45 |
| CONCRETO PROTENDIDO | CAA I | 0,2* | 30 | ≥ C25 | ≤ 0,60 |
| | CAA II | 0,2* | 35 | ≥ C30 | ≤ 0,55 |
| | CAA III | Não admite fissura | 45 | ≥ C35 | ≤ 0,50 |
| | CAA IV | Não admite fissura | 55 | ≥ C40 | ≤ 0,45 |

* Valor admitido apenas na modalidade de protensão parcial.

Nesse ponto, é interessante apontar que vários trabalhos indicavam justificativas à menor nocividade das fissuras de menor abertura. Além disso, chama a atenção que alguns autores, mesmo em décadas anteriores à consolidação do termo, já mencionavam a cicatrização autógena em sua argumentação. Joisel (1975), trata brevemente em seu livro sobre fissuração em concretos e argamassas, destacando que parte das fissuras, principalmente aquelas com dimensão menor do que 0,3 mm, é selada, com o tempo, devido à carbonatação. Mais tarde, em 1992, o relatório técnico da *Concrete Society* de 1992, que trata de fissuras não-estruturais, refere-se a esse processo como um mecanismo de “cicatrização autógena” (mesmo que na atualidade alguns autores discordem do seu posicionamento na época). Perkins (1986) também questiona, em seu livro, a possibilidade de fechamento ou propagação das fissuras ao longo do tempo e discute sobre a cicatrização da matriz, mas atribui o fenômeno à hidratação tardia dos grãos de cimento expostos à umidade, após a formação de fissura.

3.1 Mecanismos de fissuração

Como o concreto está sujeito ao desenvolvimento de fissuras ainda durante as etapas de execução, a abordagem dos diferentes tipos de fissura usualmente distingue os mecanismos no estado plástico daqueles relativos ao estado endurecido. A literatura existente sobre o assunto sugere inúmeros tipos de fissuras no concreto fresco, mas, simplificada, podem ser reduzidos a apenas três processos distintos, dos quais derivam os demais. São eles: o assentamento plástico do concreto, a movimentação das estruturas de suporte e a dessecação superficial. No concreto endurecido, a situação se repete e as causas da fissuração se reduzem a duas: variação dimensional ou sobrecarga.

Essa distinção entre fissuras do concreto fresco ou endurecido, apesar de ter um caráter bastante didático, diz respeito também ao grau de hidratação da matriz ligante. Sendo assim, dentro do contexto da autocicatrização, é uma classificação útil por dar indícios quanto ao potencial de recuperação das fissuras. Nas primeiras idades uma parcela significativa da hidratação do concreto ainda não ocorreu, sendo assim a hidratação pode ocorrer simultaneamente pelos processos intrínsecos do material, que utilizam a água de mistura, e pela entrada de umidade através da fissura. Em idades mais avançadas, dada a maturidade do compósito o primeiro mecanismo de hidratação tende a ter influência muito menor.

Outra classificação igualmente importante, mas que já conquistou seu mérito na prescrição dos tratamentos tradicionais diz respeito à predisposição da estrutura a sofrer movimentações. Por

esse critério as fissuras podem ser passivas ou ativas. As ativas ou vivas representam fissuras instáveis, ou seja, propensas a variações de abertura devido às movimentações frequentes da estrutura. Já as passivas ou mortas são fissuras estabilizadas, cujos parâmetros geométricos são constantes ao longo do tempo.

A rigor, nem todas as fissuras são ativas ou passivas durante toda a vida das estruturas. Algumas fissuras podem ser classificadas como ativas por um momento e posteriormente, tornarem-se passivas. Um exemplo disso são as fissuras de retração por secagem, que tendem a se estabilizar gradualmente com a diminuição da água disponível na matriz cimentícia. Segundo Figueiredo (1989), em casos como esse, as fissuras devem ser consideradas ativas, já que a ação corretiva se dá nessa fase. Para o autor, o adiamento da intervenção em situações similares não é recomendável, pois as fissuras, mesmo sendo pequenas, sem uma terapia eficaz podem se propagar e acarretar um problema muito mais complexo e de elevado custo.

Na sequência será apresentado cada um dos mecanismos de fissuração, com especial ênfase às fissuras provocadas nas primeiras idades do concreto.

3.1.1 Fissuração por assentamento plástico do concreto

Nas primeiras horas após o lançamento, os materiais que compõem o concreto tendem a se movimentar, devido à ação da gravidade e às diferenças de densidade. Nesse processo, as partículas sólidas, ainda relativamente soltas dentro da mistura fluida, tenderão a migrar em direção ao fundo das formas (segregação), enquanto a água e o ar incorporado irão se dirigir à superfície (exsudação). Caso as partículas tenham livre movimentação durante esse transporte, o resultado final será uma redução de volume do concreto. Por outro lado, se houver algum obstáculo (armaduras ou grãos de agregado com maiores dimensões) à mobilidade das partículas, poderá surgir uma descontinuidade no elemento. Assim, o esforço da mistura plástica em contornar tal barreira poderá vencer a fraca ligação existente entre as partículas, dando origem a uma fissura nesses locais.

As fissuras por assentamento ou retração plástica, como são denominadas usualmente na literatura, são predominantemente causadas por falhas de execução. Segundo Johnson (1973), uma compactação adequada durante a concretagem é fundamental para minimizar sua ocorrência. O autor também sugere em seu livro que em alguns casos essas fissuras podem ser fechadas, bastando atrasar o acabamento superficial e curar o concreto adequadamente, durante as primeiras idades. Dal Molin (1988), por sua vez, apresenta mais uma fissura causada por falha de execução, chamando a atenção para a falta de estanqueidade das formas e, também, para o excesso de vibração do concreto. Segundo a autora, o excesso de vibração durante uma concretagem pode ser tão prejudicial quanto à falta dela.

No que se refere à dosagem dos materiais, o assentamento plástico pode ser evitado utilizando-se materiais que diminuam a exsudação da mistura e promovam menor abatimento do concreto. Dakhil et al.² (1975 apud SUPRENANT e MALISCH, 1999) confirmam essa teoria em sua pesquisa, realizada em concretos com abatimentos de 50 cm, 75 cm e 100 cm, na qual os últimos apresentaram fissuras de maior abertura. Quanto à disposição das armaduras, os mesmos autores concluem que a dimensão das barras e o cobrimento têm fundamental importância para minimizar as fissuras por retração plástica, sendo ideais as situações com maior cobrimento e menor seção de aço.

Posteriormente aos estudos de Dakhil et al., várias estratégias no sentido de reduzir a exsudação e o abatimento de concretos já foram investigadas, entre elas destacam-se o uso de cimentos mais finos (NEVILLE, 1997; KAUFMANN et al., 2004; ACI 302.1, 2015); fibras de polipropileno

² DAKHIL, F.; CADY, P.; e CARRIER, R. "Cracking of Fresh Concrete as Related to Reinforcement," Journal of the American Concrete Institute, pp. 421-428. 1975.

(SUPRENTANT e MALISCH, 1999; CHODOUNSKY e VIECILI, 2007); adições minerais ativas, como cinza volante, metacaulim, escória de alto forno e sílica ativa (FERRARIS et al., 2001; PARK et al., 2005); as adições minerais ultra finas (NEHDI, 1998; ZHANG, JIHONG, 2000); e adições minerais inativas, também denominadas filler (COURARD et al., 2011; KAUFMANN, 2004). No caso de cimentos, especificamente, Neville (2007) justifica a diminuição da tendência à exsudação das misturas, possivelmente, porque as partículas mais finas se hidratam mais cedo e, também, devido à menor velocidade de sedimentação e à maior quantidade de partículas sólidas em contato.

No contexto real das obras, todas as variáveis tratadas acima atuam simultaneamente sobre o concreto. Tal complexidade torna inviável a realização de estudos com a finalidade de definir a geometria exata das fissuras oriundas do assentamento plástico. Em geral, o que se consegue são resultados muito específicos, sem qualquer aplicação direta no sentido de estimar numericamente os valores de abertura, profundidade e extensão das fissuras. Brettmann et al., (2015), por exemplo, realizaram estudos utilizando barras de 6,3 mm de diâmetro e cobrimento de 15 mm e concluíram que, mesmo para concretos extremamente fluidos, com abatimento de 18 cm, o valor da abertura da fissura não superava 5 mils³(equivalente à aproximadamente 0,13 mm). Sua pesquisa teve sucesso em responder que, quanto mais plástico o concreto, maiores serão as fissuras de assentamento, mas pouco diz sobre os diferentes cobrimentos ou diâmetros de armadura. Por outro lado, cada resultado permite traçar novas diretrizes sobre como atuar em cada um dos fatores, individualmente, e assim realizar o controle da fissuração.

3.1.2 Fissuração por dessecação superficial

Outro mecanismo de fissuração também relacionado ao transporte de água e à retração plástica no concreto fresco é o da dessecação superficial. Enquanto as fissuras por assentamento plástico são causadas por alguma obstrução localizada, conforme descrito no item anterior, as fissuras por dessecação tendem a ocorrer em uma extensão de área maior.

Para entender melhor esse fenômeno, deve-se considerar antes o mecanismo da própria retração plástica. As movimentações da pasta, agregados e da água certamente contribuem no processo, mas a redução de volume do concreto é essencialmente causada pela perda de água que, por sua vez, deverá criar uma rede complexa de meniscos e promover pressões capilares negativas no material (VAN DAM, 2005; NUNES e FIGUEIREDO, 2007). Diante disso, a fissuração por dessecação pode ser definida como uma manifestação patológica que se desenvolve nos locais onde essas pressões capilares atuam. Assim, tais manifestações são causadas pelo gradiente de umidade existente na massa do concreto e pelas tensões de tração decorrentes de variações diferenciais de volume.

Fissuras desse tipo ocorrem nas zonas com déficit de umidade e, usualmente, são decorrentes da permeabilidade das formas, da porosidade dos agregados, da perda de água para solo ou da evaporação da água superficial. Nesse ponto, cabe ressaltar que a evaporação é a principal causa entre as que foram citadas, sendo tão frequente, que o fenômeno é definido em inúmeras ocasiões como função da taxa de evaporação. O CEB nº 158⁴ (1985 apud VENTORINI, 1996), por exemplo, aponta que esse tipo de fissura ocorrerá quanto a taxa de evaporação da água depositada na superfície do concreto for maior do que a taxa de percolação da água para a superfície por exsudação. Sendo assim, a dessecação superficial é um mecanismo típico de elementos com grande extensão superficial e pequeno volume como, por exemplo, lajes e pavimentos de concreto, já que nesses casos a evaporação de água é maior (ILIESCU, 1986; NUNES e FIGUEIREDO, 2007).

³ O mil é a mínima unidade de comprimento no sistema inglês de medidas. Equivale a 0,0254 milímetros.

⁴ Comitê Euro-Internacional do Betão (CEB) – Manual on Cracking and deformations. Bulletin d'information Nº 158 – E; Lousanne, 249 p. 1985.

Seguindo essa definição, a evaporação é sensivelmente condicionada pelo ambiente em que se encontra o elemento concretado e a probabilidade de ocorrência de fissuras por dessecação será função, essencialmente, da temperatura do ambiente, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento (UNO, 1998; KRAL e GEBAUER, 2014). No entanto, mesmo que, por esse aspecto, taxas maiores de exsudação sejam favoráveis por compensar a perda de água da evaporação, pode haver, também, maior tendência de assentamento plástico, além de outras complicações (DIAS, 2003). Por esse motivo, atuar na diminuição da taxa de exsudação é arriscado, sem antes ponderar cuidadosamente os efeitos adversos envolvidos.

Ainda no que diz respeito aos materiais que compõem a mistura de concreto, mecanismos válidos de controle da fissuração são a redução do consumo de água e de cimento (ALMUSALLAM, 1998; DIAS, 2003; SENTHILKUMAR e NATESAN, 2005; KRAL e GEBAUER, 2014). Segundo Almusallam (1998), concretos com relação água/cimento maiores têm menor resistência à tração, além de estarem sujeitos a tensões capilares maiores. O consumo de cimento influencia a retração por secagem. Sabe-se que a retração por secagem ocorre devido à perda de umidade da pasta. Assim, quanto maior a quantidade de cimento, menor a quantidade relativa de agregados que conferem estabilidade dimensional ao compósito (DIAS, 2003).

No que diz respeito à execução das estruturas de concreto, a cura úmida do concreto é o procedimento indicado para o controle desse tipo de fissura (KRAL e GEBAUER, 2014). Esta ação tem efeito considerável em minimizar a perda de água pela evaporação e, assim, reduzir consideravelmente a ocorrência de fissuras nas primeiras horas, ainda que esse procedimento não seja efetivo em reduzir a água perdida de forma autógena nas reações de hidratação e endurecimento do concreto, que podem corresponder a 30% do total de redução do volume (ALTOUBAT e LANGE, 2001).

Quanto à geometria, são fissuras com extensão variável, desde 50 mm até 1 m de comprimento, espaçadas entre si de forma irregular (KOSMATKA, 2011; NEVILLE, 1997) e com profundidade entre 25 mm e 50 mm (MEHTA e MONTEIRO, 2014). Em geral, são fissuras mapeadas ou que acompanham a armadura, caso estejam próximas à superfície (TANESI, 1999). No estudo realizado por Senthilkumar e Natesan (2005), são estabelecidas fórmulas de correlação, a partir de dados experimentais, que permitem estimar a abertura das fissuras por dessecação superficial a partir da taxa de evaporação, relação água/cimento e teor de cimento em relação aos agregados. Nesse mesmo estudo, os resultados obtidos indicaram que a abertura das fissuras tende a zero para concretos com teores de cimento de 22-23%. Além disso, o estudo também indicou que, mesmo concretos submetidos a situações mais extremas, (alta relação água/cimento, alta taxa de evaporação do ambiente e alto consumo de cimento) tiveram aberturas não superiores à 2,5 mm.

3.1.3 Fissuração por movimentação das estruturas de suporte

A movimentação das formas pode causar tensões no concreto que irão resultar no surgimento de fissuras, devendo ser mais crítica nas primeiras horas, até que o material inicie a fase de endurecimento e comece a desenvolver resistência própria. Segundo Johnson (1973), todo movimento das fôrmas causado entra o lançamento do concreto até o início da pega pode provocar o aparecimento de fissuras.

Essa movimentação pode ser devida a falhas no sistema de escoramento, sobrecargas não previstas no dimensionamento desses moldes ou problemas relacionados à sua confecção. Segundo Dal Molin (1989), entre as causas dessas movimentações estão a remoção temporária das escoras para realização de outro serviço; a falta de travamento das escoras; o deslocamento das escoras; colocação de escoras fora de prumo; o uso de apoios inadequados, escoras

subdimensionadas ou esbeltas demais; e baixa qualidade de mão-de-obra para interpretar os projetos de escoramento.

As fissuras causadas por movimentações de formas podem ser internas ou superficiais. As internas favorecem o processo de corrosão das armaduras, uma vez que formam bolsões de água no interior da massa do concreto (JOHNSON, 1973; DAL MOLIN, 1989). Além disso, tendem a se estabilizar com o tempo ou caso seja cessada a movimentação das formas ainda no estado plástico e, por esse motivo, são classificadas como fissuras passivas (DAL MOLIN, 1989).

Outra causa bastante comum e que vem preocupando alguns autores é a aceleração dos ciclos de execução das estruturas, que implica na antecipação da desforma e no carregamento precoce do concreto (SALVADOR, 2007). Atualmente, é bastante comum em obras de edificações a execução de pavimentos sucessivos com parte das estruturas de concreto escorada ainda (Figura 1).

Segundo França⁵ (2003, apud SALVADOR, 2007), mesmo que as estruturas de concreto tenham capacidade de resistir a pequenos carregamentos nas primeiras idades, o que permite a execução de pavimentos sucessivos, sua resistência à tração ainda é bastante desprezível. Por esse motivo deverão ocorrer fissuras no material e as deformações dos elementos carregados precocemente poderão ser muito superiores. Nessas situações, segundo o autor, considerar as condições do primeiro carregamento da estrutura é mais relevante do que a própria resistência final com que o material foi projetado.



Figura 1: Edificação com múltiplos pavimentos escorados (SALVADOR, 2007)

Mesmo que poucos trabalhos tenham tratado sobre as características das fissuras devido à movimentação das formas, é coerente dizer que quanto mais intensas forem as movimentações das formas, maior deverá ser a deformação do concreto e, conseqüente, será também maior a sua fissuração. Com relação ao carregamento precoce, Salvador (2007) realizou ensaios em vigas carregadas aos 4, 7 e 28 dias e aponta que os níveis de fissuração crescem na medida em que os níveis de carga forem aumentados e quanto mais novos forem os concretos. Além disso, concretos com cimento pozolânico (CP-IV) tendem a ser mais suscetíveis à fissuração nas primeiras idades enquanto que os concretos de cimento Portland de alta resistência inicial apresentam estados de fissuração aos 4 e 7 dias menos díspares em comparação com corpos de prova carregados aos 28 dias.

3.1.4 Fissuração devida às variações térmicas ou ao teor de umidade

As fissuras por retração térmica ou hidráulica estão ligadas a fenômenos naturais e à interação da estrutura com o meio. Tanto a temperatura quanto a umidade podem provocar variações

⁵ FRANÇA, R. L. S. Principais fatores que influenciam nas deformações de estruturas de concreto. In: %º seminário de tecnologia de estruturas. São Paulo, 2003.

volumétricas do concreto. Assim, quando houver redução do volume do elemento e ele estiver impedido de se movimentar ou de se deformar, ocorrerão fissuras no material.

Entre as causas para esses tipos de fissuras estão a movimentação diferenciada, decorrente da junção de materiais com diferentes coeficientes de dilatação térmica e da exposição a diferentes condições ambientais (por exemplo, parte das estruturas pode estar desabrigada e sujeita à chuva ou próxima a alguma fonte de calor). A fadiga do material, após ciclos sucessivos de molhagem e secagem, ou oscilações de temperatura com grande amplitude e choques térmicos também são causas desse tipo de fissura (THOMAZ, 1989).

De acordo com Bernardino da Silva (1996), em revisão bibliográfica sobre o assunto, nos elementos de concreto de maior comprimento e relativamente esbeltos, como marquises, pavimentos e muros de concreto, o aparecimento desse tipo de fissura é bastante comum. A autora também aponta que, muitas vezes, condições mais extremas de variação térmica podem ser causadas por condutores de calor próximos da estrutura, como chaminés e tubulações de água quente, não isolados termicamente. No caso da umidade, as condições extremas se configuram sempre que houver maior incidência de água (THOMAZ, 1989).

Nas primeiras idades, no entanto, as variações térmica e de umidade do material estão fortemente associadas à hidratação do cimento (BALTHAR, 2004; SENISSE, 2010), sendo de menor importância as condições ambientais. As fissuras por variação de umidade ocorrem principalmente pela perda da água do concreto para o meio, conforme foi discutido no item 3.1.2. Já a deformação térmica, nesse período, ocorre de forma análoga, sendo determinada pelo gradiente de temperatura gerado pela dissipação do calor das reações de hidratação. Assim, as camadas mais externas tenderão a fissurar, na medida em que a diminuição da temperatura promove a retração dessa parte do material, que não é acompanhada pelas camadas mais internas do elemento.

3.1.5 Fissuração por sobrecarga

Sobrecargas excessivas, impactos e cargas cíclicas podem provocar solicitações não previstas que deverão resultar na fissuração do concreto. Geralmente essas fissuras não comprometem a estabilidade estrutural do sistema, no entanto estão relacionados à maior deformabilidade, tendendo a reduzir a durabilidade.

Para Figueiredo (1989), essas fissuras são passivas e deverão ser corrigidas assim que a máxima deformação da estrutura for atingida, necessitando, em alguns casos, que se reforce a estrutura antes para absorver o excesso de cargas. No entanto, o autor excetua as cargas dinâmicas em que a movimentação do carregamento configura fissuras do tipo ativas.

Como o surgimento dessas fissuras é condicionado pelo carregamento, elas poderão se manifestar em qualquer momento da vida útil do material. As fissuras em idades iniciais, nesse sentido, estão associadas frequentemente às cargas acidentais decorrentes das atividades de execução da obra, como o transporte e a estocagem de materiais sobre a estrutura, sequência executiva e operação de máquinas pesadas. Por outro lado, as fissuras de longo prazo serão devidas ao uso ou a eventos excepcionais, sendo prováveis causas a mudança na tipologia de ocupação das edificações ou acidentes.

Dal Molin (1989) e Thomaz (1989) relatam com maiores detalhes, em seus trabalhos, os diversos tipos de fissuras que podem ser provocados pelas cargas externas e suas principais características. Entre elas estão as fissuras de tração e compressão axial, flexão, cisalhamento e torção, sendo as duas últimas pouco comuns.

As fissuras devido a sobrecargas estão relacionadas, também, a falhas no cálculo estrutural. Quando o elemento é mal dimensionado, ou quando as cargas normais de atuação passam a ser

muito superiores à resistência suportada pela estrutura, as sobrecargas induzirão fissuras na estrutura. Os erros de projeto podem ser devidos à subestimação das cargas decorrente da falta de comunicação entre projetistas e o não entendimento das necessidades do projeto; à falta de detalhamento ou fornecimento de especificações erradas ou imprecisas; ou à interpretação errônea dos padrões e normas técnicas (DAL MOLIN, 1989; BERNARDINO DA SILVA, 1996).

A norma Brasileira de concreto, NBR 6118 (ABNT, 2014), tem-se mostrado bastante completa e efetiva, ao estabelecer os parâmetros de dimensionamento necessários em um projeto. A referida norma traz diretrizes no sentido de evitar o colapso das estruturas, mas também considera o controle da abertura de fissuras e limitação da deformação. Segundo Thomaz (1989), os critérios da norma são favoráveis a segurança, e se aplicados corretamente, as fissuras só deverão começar a ocorrer com tensões bastante superiores aos valores calculados.

3.1.6 Fissuração de longo prazo

Inúmeros outros mecanismos de fissuração podem ocorrer em concretos endurecidos, em idades mais avançadas. Muitos desses fenômenos de longo prazo estão associados ao desempenho do material e à sua interação com o meio, sendo a escolha dos materiais bastante determinante para reduzir a tendência de fissuração. No entanto, poderá haver situações em que, diante de alguma intervenção na edificação ou em seu entorno, possam ocorrer sobrecargas que induzirão a fissuração do material. Entre as fissuras de longo prazo destacam-se:

Fissuras de corrosão: provenientes do aumento de volume da armadura durante os processos de corrosão que formarão o óxido de ferro. Em alguns casos além da fissuração, pode haver também o lascamento do concreto devido às altas tensões de tração geradas no concreto, em função da expansão das armaduras (THOMAZ, 1989).

Fissuras devido a recalques diferenciais: estão relacionadas às deficiências da capacidade de suporte da fundação, ocasionadas por má atribuição da quantidade de armadura, resistência do concreto, ou pela insuficiência de resistência do solo para suportar as tensões que lhe são aplicadas (SOUZA; RIPPER, 1998). Outra característica dessas fissuras é a presença de esmagamentos localizados, com indícios das tensões de cisalhamento que as provocaram, havendo a nítida variação na abertura da fissura (THOMAZ, 1989). Entre suas causas principais, estão a heterogeneidade dos solos ou a interferência do bulbo de tensões de prédios vizinhos que podem aumentar a sollicitação do solo, localmente (Figura 2).

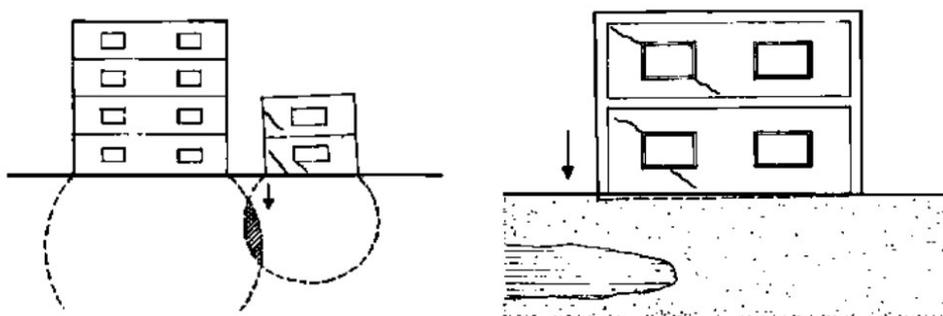


Figura 2: Recalque diferencial no edifício menor devido à interferência do seu bulbo de tensões, ocasionado pelo edifício maior (esquerda) e devido à heterogeneidade do solo (direita) (THOMAZ, 1989)

Fissuras devido à reação álcali-agregado: a reação dos álcalis presentes no cimento com algumas formas de sílica existentes em agregados, na presença de água, pode gerar um gel higroscópico expansivo e causar muitos danos ao concreto (DAL MOLIN, 1989; NEVILLE, 1997). As fissuras da reação álcali-agregado também ocorrem por tensões de tração no concreto

originadas pela expansão de algum elemento presente em seu interior, analogamente às fissuras de corrosão. No entanto, esta situação é mais crítica porque os agregados se distribuem em todo o volume do elemento, e não apenas localmente como no caso das armaduras.

Fissuras devido ao ataque químico: sulfatos solúveis presentes em alguns tipos de solos e na água do mar, como sulfatos de cálcio, magnésio e sódio, podem atacar a matriz de cimento (DAL MOLIN, 1989). Esses sulfatos reagem quimicamente com o hidróxido de cálcio e com o aluminato tricálcico hidratado do concreto, formando minerais que tenderão a promover a expansão do concreto, havendo, conseqüentemente, a fissuração do material.

3.2 Mecanismos de transporte de água e umidade no concreto

Em um concreto não fissurado, os mecanismos de transporte de massa só ocorrem devido à existência de poros comunicáveis entre si, e com o meio, proporcionando um caminho preferencial ao ingresso de fluidos no concreto. Nesse sentido, os poros podem ser fechados, quando não há comunicação entre eles, ou abertos. Somente os segundos são os responsáveis pela formação dos canais capilares que favorecem o transporte de água para o interior do concreto (SOUSA COUTINHO ⁶, 1974 apud FRIZZO, 2001).

Os principais mecanismos de transporte de água que podem ocorrer são devidos à água sob pressão, à sucção capilar ou à difusão de vapor d'água. De maneira geral, esses mecanismos são regidos no concreto por um gradiente que pode ser uma diferença de potencial hidráulico, quando decorre da água sob pressão, ou uma diferença de concentração, quando for devido à difusão (NEPOMUCENO, 2005).

3.2.1 Absorção capilar

A absorção capilar ocorre pela ação da tensão superficial da água agindo nas paredes dos poros capilares em concretos não saturados. Esse fenômeno está relacionado tanto à estrutura dos poros (diâmetro, tortuosidade e continuidade dos poros), quanto às características do líquido (densidade, viscosidade e tensão superficial), à umidade interna dos poros e à energia superficial (LARA, 2003). Nesse processo, a absorção será maior, quanto mais elevada forem as forças de sucção capilar, que são mais intensas quanto menores forem os diâmetros dos capilares, e, no que diz respeito às propriedades do líquido, quanto maior for sua tensão superficial ao interagir com as paredes dos poros e menor for sua viscosidade (CASCUDO, 1997).

Segundo Sato (1998), o mecanismo de penetração por capilaridade atua em profundidade prevalecendo nas camadas superficiais, pois mesmo havendo poros conectados às camadas mais internas, suas dimensões condicionam o valor máximo da tensão de sucção que, por sua vez, determina a profundidade de percolação da água por esse mecanismo. Poros menores apresentam maiores resistências hidráulicas do que os maiores, e por isso apresentam uma ascensão capilar maior, mesmo que a princípio poros maiores tenham maior capacidade/volume de água em seu interior (SATO, 1998; FERREIRA, 2003). No entanto, Basheer et al. (2001) contrapõem, argumentando que concretos de reduzida relação água/cimento, apesar de apresentarem capilares com diâmetros menores, estes poros são muito menos interconectados, resultando em menores alturas de sucção e também em menores volumes totais absorvidos.

Dos fatores que influenciam na microestrutura dos poros, e em sua conectividade nos concretos, podem ser apontados a cura (CAMARINI, 1999), a relação água/aglomerante (BASHEER et al., 2001), o tipo de cimento, o uso de adições pozolânicas, bem como, a finura desses materiais

⁶ SOUSA COUTINHO, A. Fabrico e propriedades do betão. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 1974.

(FRIZZO, 2001; FERREIRA, 2003; ALMEIDA, 2016), a compacidade do concreto, o uso de aditivos incorporadores de ar (COPETTI, 2013), o volume de agregados, entre outros.

Para Nepomuceno (2005), dos mecanismos de transporte de umidade para o interior do concreto, este é o que mais afeta a durabilidade, especialmente em situações de exposição às chuvas e a ciclos de molhagem e secagem. O autor complementa seu posicionamento dizendo que o mecanismo de transporte será mais grave quanto maior a quantidade de água absorvida, sua profundidade de penetração e a velocidade em que ele ocorre.

3.2.2 Difusão de vapor d'água

Outro fenômeno bastante relacionado à perda da durabilidade e, mais especificamente, à carbonatação e à corrosão de armaduras é a difusão de vapor d'água. Segundo Nepomuceno (2005), esses processos de deterioração dependem de um teor mínimo de umidade, que é facilmente suprido pela simples exposição dos poros capilares do concreto à umidade atmosférica.

A difusão, em sua definição mais abrangente, é descrita pela lei de Fick, que relaciona o fluxo de massa ao gradiente de concentração de partículas, sendo maior o fluxo quanto maior a diferença de concentração, em uma dada direção. Além disso, a proporcionalidade dessa relação matemática é expressa pela constante de difusividade, que depende essencialmente das características do concreto e do fluido que preenche os poros.

Mesmo que o fluxo de massa por difusão geralmente envolva um volume menor de água, o fenômeno deve ser visto com grande cautela, pois os materiais porosos tendem a ser mais suscetíveis à penetração de gases do que à penetração de líquidos. Loosveldt et al. (2002) apontam, em um estudo realizado em argamassas, que a permeabilidade aos gases pode ser de até duas ordens de magnitude superior à permeabilidade à água no estado líquido, em um mesmo material, e atribuem os resultados ao efeito Klinkenberg. Esse efeito, como o nome sugere, foi descrito pela primeira vez em 1941 por L. J. Klinkenberg, em sua publicação intitulada "Permeabilidade dos meios porosos à líquidos e gases" (tradução do título original, The permeability of porous media to liquids and gases) na qual ele descreve a colisão das moléculas às paredes dos poros, durante sua trajetória através dos poros. Segundo ele, quando o raio do poro se aproxima do caminho livre médio de moléculas de gás, a frequência de colisão entre moléculas de gás e paredes sólidas aumenta, gerando um fluxo adicional ao longo da superfície da parede, que é chamado de "fluxo deslizante".

Dessa maneira, poros menores do que 0,1 micrômetros, que dificilmente possibilitam a passagem de umidade por capilaridade ou permeabilidade, estão sujeitos ao processo de difusão gasosa (MENG, 1994). Em outras palavras, o controle dos materiais e as estratégias anteriormente descritas para redução da porosidade são pouco efetivas nesse contexto. Mas por outro lado, essa situação é menos preocupante do que a capilaridade. Nos poros, a difusão de vapor ocorre a um fluxo relativamente pequeno, o que caracteriza um processo mais lento, comparativamente aos outros mecanismos de transporte de umidade, enquanto que os poros muito pequenos tendem a se fechar mais rapidamente pelos processos de carbonatação e hidratação do cimento. Loosveldt et al. (2002) apontaram no mesmo trabalho com argamassas, mencionado anteriormente, que os poros de menor dimensão apresentavam tendência ao fechamento com maior velocidade devido à hidratação de partículas de cimento anidro presentes no interior dos poros.

3.2.3 Água sob pressão

Em condições de completa imersão das estruturas, usualmente observadas em obras de contenção como barragens e reservatórios, o fluxo de água para o interior do concreto é regido predominantemente pelas diferenças de pressão hidráulica. Nessa situação, a água tende a preencher quase totalmente os poros permeáveis, alcançando pontos que dificilmente estariam

expostos à umidade por capilaridade ou ao vapor de água. Segundo El-Dieb e Hooton (1995), por haver quase completo preenchimento dos poros, os ensaios que submetem o concreto a esse tipo de mecanismos são os que melhor fornecem indicativos sobre a interconectividade dos poros do material e sua estanqueidade.

A abordagem mais usual sobre esse fenômeno parte das equações de Darcy que simplificada traduz as características do material e da estrutura do poro em uma única constante, a permeabilidade. Sendo assim, esse fenômeno é regido, basicamente, pela magnitude da pressão, pela viscosidade do fluido e pela permeabilidade do material.

O conceito de permeabilidade surge da complexa interação entre o fluido e o canal poroso que causa uma transformação no sistema, geralmente associada à diminuição da pressão exercida pelo fluido (SCHEIDEGGER ⁷, 1974 apud INNOCENTINI e PANDOLFELLI, 1999). Cabe ressaltar, nesse ponto, que o termo permeabilidade, no contexto do transporte de massa, diz respeito exclusivamente ao fluxo devido às diferenças de pressões, e não deve ser confundido ou usado, de maneira generalista com a capilaridade ou difusividade, que traduzem os dois mecanismos de transporte de água e umidade.

Similarmente aos mecanismos anteriores, a entrada de água será maior, e conseqüentemente, será também maior o valor da permeabilidade, quanto maiores e mais interconectados estiverem os poros. Qin et al. (2015) atentam para o fato de que essa propriedade é estimada a partir de resultados experimentais, que dependem de como a pressão é aplicada e de como é mantida ao longo do tempo. Sendo assim, a permeabilidade medida a partir de diferentes escalas e configurações experimentais distintas é suscetível de tornar os valores inconsistentes. De uma forma geral, contudo, pode-se concluir que as mesmas estratégias utilizadas para reduzir a capilaridade do concreto, que foram discutidas anteriormente, são facilmente aplicáveis para redução de sua permeabilidade.

3.2.4 Entrada de água através das fissuras

Não existe consenso na literatura quanto aos mecanismos que regem o transporte de água através das fissuras. Partindo do pressuposto de que as fissuras são um tipo peculiar de porosidade aberta, entender as características que regem o transporte de água através dos poros capilares podem oferecer, até certo ponto, a fundamentação teórica necessária para a observação do mesmo fenômeno nas fissuras do concreto. Assim, grandes esforços obtidos até então têm sido feitos, no sentido de avaliar como as características geométricas, tais como profundidade, abertura e extensão das fissuras, podem influenciar a entrada de água no concreto.

Muitos autores defendem que o fluxo de água aumenta quanto maior for a abertura, profundidade ou extensão das fissuras. Segundo Aldea et al. (1999) e Park et al. (2012), o aumento do transporte de água para o concreto pode ser bastante significativo para aberturas de fissuras com valores superiores a 0,2 mm. Gérard e Marchand (2000) identificam que o coeficiente de difusão em concretos fissurados pode aumentar entre 2 e 10 vezes em relação ao concreto não fissurado. Pease et al. (2009), traçam uma correlação entre o comprimento das fissuras e a extensão de superfície em que a taxa de entrada de água é aumentada.

Mais especificamente voltados a entender os processos de transporte de umidade através das fissuras em situação de não saturação, Gardner et al. (2012) conseguiram comprovar experimentalmente que os modelos matemáticos de Yong-Laplace e Lucas-Washburn, usados para descrever transporte por capilaridade, são válidos com algumas limitações. Kanematsu et al. (2009) e Tsuchiya (2014), por outro lado, constataram em seus experimentos uma entrada

⁷ SCHEIDEGGER, A. E. The physics of flow through porous media. University of Toronto Press, 3rd edition, 353 p. 1974.

rápida da água pelas fissuras nos primeiros minutos, e por isso atentam que os modelos usuais de difusão e capilaridade em concretos normais só são aplicáveis após decorrido algum tempo de exposição da superfície à água. Para esses autores, algum processo diferenciado e, ainda, pouco entendido, deve ocorrer nos instantes iniciais para justificar tamanha divergência dos resultados.

Na condição submersa, os estudos experimentais de Brühwiler and Saoma (1995) demonstram que a pressão hidrostática dentro da fissura é função de sua abertura e que seus valores decaem com a sua profundidade. Reinhardt et al. (1998), por sua vez, demonstra que as fissuras com abertura de até 0,04 mm têm um comportamento similar ao de concretos não fissurados e que para aberturas superiores, o material passa a ser mais permeável à água sob pressão.

Por outro lado, mesmo podendo haver grande semelhança entre os processos que ocorrem no interior dos poros, comparados aos que ocorrem nas fissuras, algumas questões devem ser tratadas com especial cuidado. A carbonatação, por exemplo, cuja ocorrência é mais acentuada em concretos fissurados, tende a reduzir o fluxo de água para o interior do concreto, já que os produtos dessa reação, em geral, podem representar um aumento de volume das partículas de até 11,7%, colmatando assim as aberturas do concreto (ISHIDA e MAEKAWA, 2000; SONG e KWON, 2007). Da mesma forma, os fenômenos de hidratação e autocicatrização terão efeito sobre a entrada de água, e nesse contexto as análises podem se tornar mais complexas.

Outra complicação é apontada no trabalho de Kanematsu et al. (2009). O autor também concluiu em sua pesquisa que percolação nas fissuras ocorre imediatamente após sua exposição à água. No entanto, sua grande preocupação se deu ao constatar, por meio de análises de radiografia de nêutrons, que o movimento de água é bastante rápido quando a fissura intercepta alguma das armaduras, podendo ter uma propagação significativamente extensa ao longo da interface entre o reforço de aço e o concreto. Segundo ele, isso significaria dizer que, em poucos minutos numa situação de chuva, as armaduras podem estar sujeitas ao contato direto com água, dependendo da profundidade da fissura. Cessado o suprimento de água na superfície, a umidade no entorno das armaduras tenderia a migrar para a matriz do concreto, onde as tensões capilares são mais acentuadas.

4 Autocicatrização

Mesmo tendo sido constatado pela primeira vez há bastante tempo, os estudos sobre a autocicatrização voltados à prevenção dos danos e aumento da durabilidade do concreto são relativamente recentes. Reinhardt et al. (2013), em revisão bibliográfica bastante completa sobre o tema, listam uma série de publicações do século passado que já documentavam indícios do fenômeno. Muitos desses trabalhos inclusive tratavam de forma ampla e satisfatória dos fatores que influenciam a autocicatrização, tais como condições ambientais, exposição à umidade (ao observar que o fenômeno ocorria geralmente em estruturas submetidas a ciclos de molhagem e secagem, ou de total imersão, como pilares de pontes e barragens), tipo de cimento, idade do concreto e o tamanho das fissuras. Reinhardt e seus colegas também apontam que a verificação formal mais antiga sobre a autocicatrização é de 1836 e foi realizada pela *French Academy of Science* ao analisar estruturas de reservatórios de água e tubulações. No entanto, o marco inicial mais aceito na literatura, e que mudou a postura acerca do tema, foi a pesquisa desenvolvida pela Dr. Carolyn M. Dry, em 1994.

Os estudos conduzidos por Dry (1994) propuseram o uso de polímeros encapsulados para obter o concreto autocicatrizante, indicando o primeiro estudo sistemático sobre o tema. Além disso, o trabalho desenvolvido por ela propôs não apenas a descrição dos fenômenos envolvidos e suas possíveis causas, mas também o uso intencional dessas propriedades com a finalidade de obter um material mais durável.

Outro marco importante foi a criação, em 2005, do Comitê Técnico 221-SHC para tratar dos “fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia”, a partir do qual vêm sendo desenvolvidas diferentes abordagens para a produção de concretos com capacidade de reparar suas próprias fissuras. Nos anos seguintes, uma série de outros comitês com o intuito de subsidiar pesquisas sobre o tema foi criada e também tiveram enorme contribuição em despertar o interesse de pesquisas a esse tópico (BERNARDINO DA SILVA, 2016).

O crescente interesse em desenvolver materiais considerados inteligentes não se restringe ao concreto, mas ocorre em todas as áreas de engenharia de materiais. Nos últimos 5 anos, o desenvolvimento de materiais com capacidade de cura está se tornando mais popular em uma ampla gama de materiais e aplicações (VAN DER ZWAAG 2007; GOSH, 2009). Simultaneamente aos avanços já obtidos no desenvolvimento de concretos autocicatrizantes, percebe-se também um rápido aumento de interesse no desenvolvimento de polímeros, compósitos, e até mesmo metais capazes de se recuperarem após algum processo de corrosão. A Figura 3 mostra o rápido crescimento do interesse sobre o tema, em especial após os anos 2000. Takagi (2013), sumariza essa trajetória de popularização do tema, partindo dos estudos de Dry e percorrendo os anos subsequentes. O autor também relaciona em seu trabalho, de forma bastante completa, os principais centros de pesquisa e os pesquisadores de maior destaque na área e que têm contribuído significativamente para a disseminação do assunto.

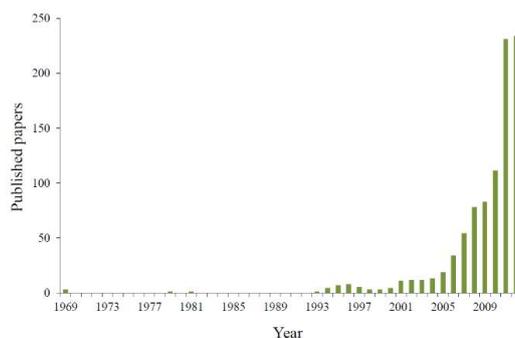


Figura 3: Evolução da quantidade de artigos publicados em materiais de cicatrização (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013)

Segundo De Rooij et al. (2013), parte dessa popularização é justificada pela mudança rápida de paradigmas existentes na engenharia. Segundo os autores, o desenvolvimento de materiais com a capacidade de se auto regenerar contrapõe conceitos bastante consolidados. Até então, a resolução dos problemas de falha se fundamentava na busca por materiais mais resistentes, o que significa dizer que grandes esforços foram realizados no sentido de fortalecer as ligações entre os átomos e de criar microestruturas cada vez mais competentes. Por outro lado, mesmo que os avanços tenham resultado em materiais com alto desempenho mecânico, o problema da fissuração parecia ainda estar presente nesses materiais. Isso levou à percepção de que, invariavelmente, todos os materiais estão sujeitos à falha em algum momento de sua vida útil, requerendo ações de monitoramento, manutenção ou reparo. Sendo assim, a quebra de paradigma se deu ao pensar que a ocorrência de falhas nos materiais não é algo ruim quando associado ao disparo de mecanismos capazes de recuperar os danos. Sendo assim, a autocicatrização pode ser entendida como uma taxa de degradação negativa e o desempenho final do material passa a depender de dois processos: o quanto o material se degrada (que já era considerado na abordagem clássica do desenvolvimento de materiais) e o quanto se regenera, ao longo do tempo.

Segundo Wu et al. (2012), o desenvolvimento de materiais com a capacidade de se auto regenerarem, como inspiração nos materiais encontrados na natureza como, por exemplo, a pele danificada de uma árvore e os animais que podem se curar de forma autônoma. Essas abordagens bioinspiradas não imitam rigorosamente o verdadeiro processo biológico devido à sua complexidade, o que se faz na realidade é uma combinação dos fundamentos tradicionais da engenharia com os mecanismos de autocura biológica (ZHELUDKEVICH, 2009).

Entre os inúmeros ganhos que essa nova abordagem proporciona, está a redução de custos e a melhoria da sustentabilidade no contexto da construção civil. Isso pode ser entendido facilmente por meio dos gráficos apresentados por Van Burgel (2007), que representam o desempenho de duas estruturas tradicionais através das curvas A e B (Figura 4). Segundo ele, a primeira descreve uma degradação gradual até o momento do primeiro reparo, a partir do qual iniciam reparos sucessivos em intervalos de tempo cada vez menores. No segundo cenário, o período livre de manutenção será mais longo e o primeiro grande trabalho de reparo pode muitas vezes ser adiado por muitos anos. Para ele, gastar mais dinheiro inicialmente para garantir uma maior qualidade, muitas vezes, compensa.

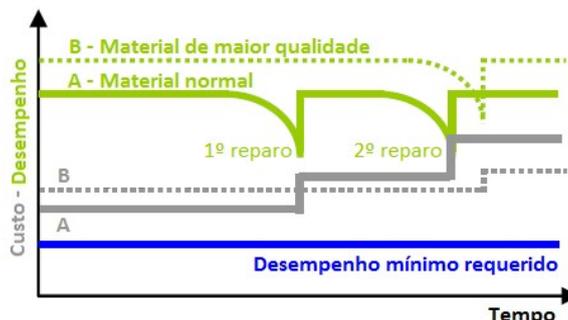


Figura 4: Gráfico de custo e desempenho em função do tempo para infra-estrutura de alta qualidade (curvas B) normal (curvas A). (adaptado de VAN BREUGEL, 2007)

A autocicatrização, segundo ele, possibilitaria alcançar um caso extremo em que nenhum custo de manutenção e reparo deve ser considerado, porque o material é capaz de se reparar (Figura 5).



Figura 5: Desempenho e custo em função do tempo para estruturas construídas com material autocicatrizante. (adaptado de VAN BREUGEL, 2007)

4.1 Tipos de autocicatrização

A classificação dos mecanismos de autocicatrização em materiais cimentícios nem sempre é uma tarefa fácil diante de todas as terminologias existentes na literatura. Assim, devido à grande quantidade de trabalhos abordando o tema e à falta de padronização, os comitês técnicos criados no JCI e RILEM buscaram sistematizar esses conceitos (BERNARDINO DA SILVA, 2016).

Um critério bastante simples de grande utilidade proposto por esses comitês trata de uma separação em apenas dois grupos: a cicatrização autógena e a cicatrização autônoma. O primeiro é tido como um mecanismo natural, em que a capacidade de autocura é dada por processos que ocorrem no próprio concreto (EDVARSEN, 1999; TER HEIDE, 2005). Por outro lado, existem materiais que são desenvolvidos especialmente para ter essa competência (SCHLANGEN e JOSEPH, 2008) e, nesses casos, deverão ser classificados como autônomos. A diferença fundamental entre os dois processos, segundo as definições do Comitê Técnico do RILEM, é que a cicatrização autógena dispõe apenas de materiais presentes no próprio sistema, ao passo que na cicatrização autônoma são incorporados novos processos e materiais complementares (DE ROOIJ et al., 2013). Para Takagi (2013) embora as perspectivas futuras mais interessantes sejam as pesquisas que sugiram foco na abordagem pela cicatrização autônoma, a abordagem que está mais perto da aplicação prática ainda é a autocicatrização autógena.

As pesquisas que tratam da cicatrização autógena se fundamentam em conhecimentos já bastante difundidos. Nesses trabalhos, geralmente, são apresentadas reavaliações de modelos e programas experimentais acerca de variáveis já relativamente dominadas no campo da engenharia dos materiais cimentícios e objetivo principal proposto é o de melhor entender os fenômenos da cicatrização em si. Ou seja, sua finalidade é traçar um melhor entendimento de processos como a hidratação residual do cimento ou a carbonatação, e de como tais processos promovem o preenchimento das fissuras em ambientes com a presença de umidade.

Já os trabalhos que tratam da cicatrização autônoma tendem a ser mais interdisciplinares, estendendo-se, muitas vezes, ao campo dos materiais poliméricos, da mecânica dos fluidos e até mesmo da biologia. Nesse sentido, os esforços se dão no sentido de prever um projeto especial ou o uso de materiais complementares no concreto, como por exemplo, adições minerais, aditivos expansivos, polímeros superabsorventes, cianobactérias, filamentos ociosos de fibra de vidro e entre outros. Em geral o caráter inovador é muito maior nessas pesquisas, pois cada estratégia e mecanismo proposto é relativamente único. Por outro lado, elas tendem a se deparar com dificuldades maiores, tanto no sentido de viabilizar os novos produtos sob o ponto de vista econômico, quanto o de validá-los perante a comunidade científica, já que normalmente o conhecimento que se tem a respeito é limitado ou quase inexistente em algumas situações.

Algumas vezes, no entanto, as definições dadas acima podem se tornar ambíguas ou insuficientes para identificar o tipo de autocicatrização. Exemplo disso é o uso de adições minerais, como a cinza volante e a escória de alto-forno, que pode ser complementar ou não, afinal, boa parte dos cimentos fabricados atualmente possuem elevados teores desses materiais em sua composição. Sendo assim, convém classificar o uso de algumas adições minerais e aditivos como cicatrizantes autógenos, já que são amplamente empregados com a finalidade de melhorar o desempenho e a durabilidade dos concretos em vários outros aspectos, não se limitando à sua capacidade de auto regeneração. Além disso, fenômenos como a reação pozolânica são mais adequadamente enquadrados no próprio contexto dos concretos.

Outra classificação importante, aplicável apenas à cicatrização autônoma, diz respeito à maneira como o processo é iniciado. Por esse critério, a cicatrização pode ser ativa, quando requer alguma intervenção ou ação para que ocorra a cicatrização, ou passiva, que ocorre a partir de estímulos naturais, sem a necessidade de intervenção humana. Um exemplo de cicatrização ativa é o uso de partículas induzidas por temperatura, que precisam de um estímulo térmico para que sejam transportadas e depositadas no local da fissura (SCHLANGEN et al., 2010). Como mecanismo passivo, por sua vez, podem ser apontados o uso de cápsulas ou sistemas vasculares contendo agentes cicatrizantes, nos quais basta sua ruptura para liberação do agente e que irá promover o fechamento da fissura (BOH e ŠUMIGA, 2008; WU et al., 2012; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Na cicatrização autógena essa classificação não se aplica porque os fenômenos sempre serão do tipo passivo. A cicatrização autógena, em geral, depende da entrada de água e gases para que ocorra (EDVARSEN, 1999; TER HEIDE, 2005), e isso, conforme tratado no final do capítulo anterior, ocorre naturalmente pelos processos de transporte de massa, tais como a difusão, capilaridade e permeabilidade. Similarmente a essa situação em que há uma dependência da entrada de água e gases para o interior do concreto, na cicatrização autônoma é o uso de bactérias, uma vez que só são ativadas mediante o suprimento inicial com água e oxigênio (SCHLANGEN et al., 2010; WU et al., 2012; VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

4.2 Mecanismo da cicatrização autógena

Comparativamente aos outros materiais, o concreto se distingue por conter reservas de cimento não hidratados que podem ser usadas com o propósito de autorreparação (LI e YANG, 2007; LV e CHEN, 2014). Quando em contato com a água, que é transportada através da fissura, essas partículas reagem de forma natural e, assim, os produtos de hidratação preenchem os espaços vazios por onde a umidade ingressou. Outro mecanismo diferenciado, observado quase exclusivamente em concretos, é a formação de cristais de CaCO_3 (EDVARSEN, 1999), que tende a diminuir gradativamente a infiltração de água através das fissuras ou, em alguns casos, selá-las completamente.

No que diz respeito à terminologia, alguns autores preferem o termo “colmatação autógena” ao se referirem a esses dois cenários, reservando o termo autocicatrização apenas para os casos em que a dissolução e a deposição de hidratos é induzida por catalisadores ativos. A diferença, segundo Takagi (2013), é que o efeito autocicatrizante deve ser observado mesmo em um sistema isolado de CO_2 , além de ser um mecanismo significativo somente após a microfissuração intensa. Outros autores, no entanto, como Ter Heide (2005) enquadram tanto a hidratação residual quanto a carbonatação entre os mecanismos de cicatrização natural ou autógena, tendo em vista que os concretos quase sempre estarão sujeitos à umidade e à difusão de CO_2 .

Para não entrar muito no mérito dessa discussão, e em vista da grande aceitação do trabalho de Ter Heide, esse trabalho adotará as terminologias segundo a perspectiva dessa autora. Ou seja, o termo colmatação autógena remete aos processos que ocorrem nos poros capilares do concreto, enquanto que a cicatrização autógena se desenvolve no interior das fissuras. Além da

hidratação residual e da carbonatação, Ter Heide (2005) aponta, também, dois outros mecanismos, conforme a Figura 6:

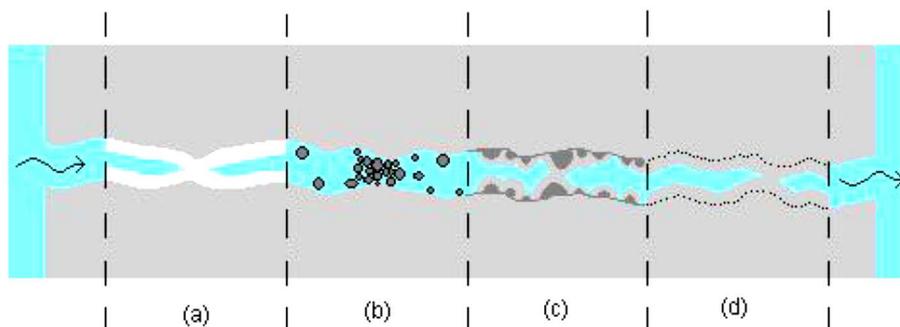
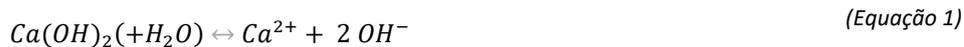


Figura 6: Mecanismos de autocicatrização autóloga no concreto (TER HEIDE, 2005): (a) formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio; (b) deposição de impurezas transportadas pela água ou de partículas desprendidas das paredes da fissura; (c) hidratação tardia de grãos anidros de cimento; (d) expansão da matriz de cimento

A pesquisadora explica que no processo (a) ocorre a dissolução do hidróxido de cálcio (Equação 3), proveniente das reações de hidratação do cimento, que é transportado pela água até o interior da fissura, precipitando-se nas paredes da mesma. Em continuidade ao processo, o carbonato de cálcio irá se formar quando os íons dissolvidos de cálcio puderem se associar aos íons carbonato (Equação 2), que por sua vez são provenientes do gás carbônico e da umidade (Equação 3).



Em (b), ocorre a obstrução das fissuras devido ao acúmulo de partículas sólidas que são transportadas pela água que flui através dela. Geralmente, essas partículas são oriundas do meio externo próximo de onde as fissuras se manifestam na superfície do concreto ou, ainda, das paredes da própria fissura. Em (c), ocorre a reação das partículas de cimento anidro que não foram consumidas pela água de mistura do concreto. Nesse processo, a exposição à umidade do meio externo, desencadeada pela abertura da fissura, possibilita a formação de novos cristais hidratados, preenchendo esses locais. E, finalmente, em (d), observado apenas em estruturas submetidas à exposição contínua à umidade, o tamponamento é devido à expansão da matriz de cimento, que devido à saturação tende a apresentar um aumento do volume (TER HEIDE, 2005).

Segundo Talaiekhazan et al. (2014), dois ou mais dos processos descritos podem ocorrer de forma simultânea, o que dá abertura a muitas discussões acerca de qual dos mecanismos prevalece. Segundo Edvardsen (1999), os mecanismos (b) e (d) são quase desprezíveis diante da carbonatação (a). Para Neville (1997), a cicatrização autóloga tem como principal causa a hidratação continuada e a hidratação residual⁸. No entanto, pesquisas realizadas posteriormente indicam que essa predominância tende a ocorrer em concreto jovens, quando uma parcela significativa das reações de hidratação ainda não ocorreu. Sendo assim, em idades

⁸ A hidratação residual remete aos processos descritos por Ter Heide (2005) no item c) da Figura 6 que depende da exposição à água e/ou umidade. Por outro lado, a hidratação continuada remete a um processo que pode prosseguir em condições latentes, e que consome apenas a água de mistura do concreto. Em concretos jovens, dada a maturidade do concreto, os dois processos tendem a ocorrer simultaneamente.

mais avançadas a formação de carbonato de cálcio é a causa mais provável de autocicatrização (NEVILLE⁹, 2002 apud WU et al., 2012; LV e CHEN, 2013).

Dos mecanismos de cicatrização autógena, a hidratação residual (c) vem se destacando entre as pesquisas mais recentes sobre o assunto. Isso porque além de restaurar a estanqueidade, é capaz de promover, também, a recuperação das propriedades mecânicas do concreto. Para Li et al. (2013), os processos e reações são exatamente os mesmos que ocorrem na hidratação normal do cimento, onde o silicato tricálcico (alita) e o silicato dicálcico (belita) reagem com a água, formando o C-S-H (silicato de cálcio hidratado) e CH (hidróxido de cálcio), responsáveis pela resistência mecânica. A diferença, segundo os pesquisadores, é que essas reações ocorrem apenas nas partículas que não foram consumidas inicialmente que, assim, devem ser entendidas como um encapsulado natural de minerais reativos, dispersos no concreto de modo mais ou menos uniforme. Assim, o gatilho das reações é a fissuração do concreto, por promover a exposição desse material encapsulado à umidade da atmosfera (LI et al., 2013).

Nesse sentido, para potencializar a autocicatrização é interessante dispor de estratégias que possibilitem reduzir as taxas de consumo das partículas de cimento nas idades iniciais. Algumas formas de conseguir isso são a utilização de uma baixa relação água/aglomerante, de cimentos com menor área específica (i.e., grãos maiores de cimento) e o uso de aluminossilicatos, como cinzas volantes, escórias de alto forno, sílica ativa ou argilas calcinadas (LI et al., 2013).

O uso dos aluminossilicatos ou pozolanas, segundo LI et al. (2013), é extremamente interessante, pois pode promover a autocicatrização em estruturas submetidas a danos repetidos ou provocados a longo prazo. Para eles, como a taxa da reação pozolânica depende do pH e da síntese de hidróxido de cálcio, esta reação é substancialmente mais lenta do que as reações de hidratação, e por esse motivo é capaz de promover a cicatrização, mesmo após o consumo das partículas de cimento anidro.

Um ponto importante bastante criticado por Hearn (1998), ao discorrer sobre os trabalhos que se propuseram a entender a cicatrização natural, é que esse fenômeno não deve ser confundido com a hidratação continuada do cimento, principalmente quando as análises realizadas se dão nas primeiras idades do concreto. Para o autor, a cicatrização, seja por hidratação residual ou pela carbonatação, é condicionada pelo fluxo de água através das fissuras, enquanto a hidratação continuada é intrínseca do concreto e consome apenas a umidade do próprio material, ali presente desde o momento da mistura dos materiais.

Outro aspecto também relevante, defendido por Hearn (1998), é que deve haver uma distinção clara entre a aparente diminuição da permeabilidade e o efeito autocicatrizante, especialmente nos trabalhos que se limitam a investigar o fenômeno com base apenas em medições de penetração da água. Mais tarde, tendo a mesma percepção acerca dos trabalhos sobre o tema, Edvardsen (1999) complementa dizendo que o fenômeno da autocicatrização não é o resultado de um ensaio, em particular, mas resulta da interação entre a microestrutura e o fluido que a permeia.

Recentemente, em estudos voltados a entender a migração de água através das fissuras, utilizando a análise de ressonância magnética, Huang et al. (2016) constataram que após algumas horas, o teor da água não ligada quimicamente decresceu nas áreas adjacentes às fissuras, indicando que parte da água que ingressou através das fissuras foi consumida em reações de hidratação dos grãos anidros de cimento. Com isso, os pesquisadores concluíram que a hidratação adicional faz com que a matriz de cimento adjacente às superfícies de fissuras se torne muito mais densa. Ou seja, o fenômeno da cicatrização não se limita à fissura em si, mas se estende a todos os poros comunicados a ela, mesmo aqueles que anteriormente não tinham ligação com o meio externo (Figura 7). Esse resultado fornece uma nova visão sobre

⁹ NEVILLE, A. Autogenous healing: A concrete miracle? In: Concrete international 24.11: 76-81. 2002.

autocicatrização de materiais cimentícios, já que essa densificação da pasta de cimento pode contribuir para a redução do ingresso de agentes agressivos, prolongando a vida útil das estruturas de concreto.

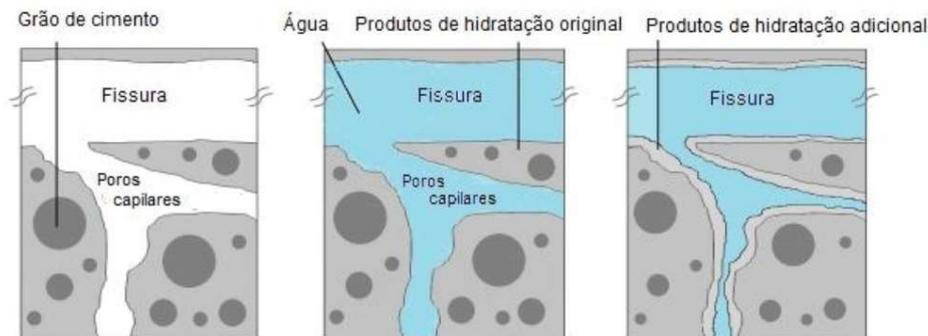


Figura 7: Densificação da matriz cimentícia causada pela hidratação adicional nas áreas adjacentes à fissura (HUANG et al., 2016)

4.3 Fatores que influenciam a cicatrização autógena

Muitos fatores influenciam a capacidade do concreto de restabelecer sua resistência e estanqueidade, entre eles destacam-se: a composição do concreto, a relação água/aglomerante, o tipo de cimento, a gravidade dos danos, a idade do concreto quando ocorreu a fissuração, as condições de umidade, o período e o tipo de cura e a largura e tortuosidade da fissura. Mesmo que alguns desses fatores mereçam maior estudo e que ainda não exista um entendimento completo acerca dos mecanismos de cicatrização, algumas pesquisas já convergem para algumas conclusões acerca de cada um deles:

4.3.1 Influência da relação água/aglomerante e do consumo de cimento

A relação água/aglomerante está relacionada a muitas propriedades do concreto, tais como porosidade, resistência e até mesmo a maneira como as fissuras tenderão a se manifestar ao longo do tempo. Diante disso, estabelecer qual a influência desse fator por si só sobre a capacidade de cicatrização não é uma tarefa fácil.

Na literatura, no entanto, a maioria dos autores indica que o principal efeito da relação água/aglomerante ocorre sobre disponibilidade de grãos de cimento anidro. Para Shim et al. (2015), em concretos com relação $a/c=0,40$, cerca de 30% do cimento permanece anidro na pasta. Gruyaert et al. (2010), de forma similar, relataram que em concretos com relação a/c de 0,50, moldados com cimento Portland comum, o grau de hidratação é de apenas 74% após 28 meses e que a hidratação também não ocorre totalmente em misturas desse cimento com escórias de alto forno (ver Tabela 3).

Tabela 3: Grau de hidratação (%), determinado por análise de imagem BSE, gerado por sinais de elétrons retroespalhados. (adaptado de Gruyaert et al., 2010).

| s/c | Idades iniciais (2 dias) | | Longo prazo (28 meses) | | |
|------------|--------------------------|------|------------------------|------|------|
| | 0 | 0.85 | 0 | 0.50 | 0.85 |
| α | 54 | 7 | 74 | 83 | 47 |
| α_p | 54 | 29 | 74 | 94 | 91 |
| α_s | - | 4 | - | 72 | 39 |

s/c é o teor de escória de alto forno na composição do cimento, α é o grau de hidratação dessa composição, sendo α_p e α_s os graus de hidratação do cimento Portland comum e da escória de alto forno, respectivamente.

Teoricamente, a hidratação completa pode ser obtida se a relação a/c for maior do que 0,42, quando 1 g de cimento se combina com cerca de 0,23 g de água e absorve fisicamente 0,19 g de água. No entanto, a hidratação total geralmente não é possível devido à distribuição não uniforme da água e ao espaço limitado para o desenvolvimento de produtos de hidratação (JENSEN E HANSEN, 2001; GRUYAERT, 2011).

Outra justificativa pertinente para o uso de menores relações a/c foi dada por Na et al. (2012) a partir de seus estudos com adições de cinza volante em amostras de argamassa. Segundo os autores, uma proporção menor de água na mistura resulta em concretos menos fissurados e menos porosos, que poderão ser mais facilmente selados com os produtos da hidratação residual.

A disponibilidade de grãos anidros também pode ser condicionada pelo consumo de cimento e, nesse sentido, quanto maior a quantidade de aglomerantes hidráulicos na mistura do concreto, maiores as chances de ocorrer cicatrização autógena. Ao comparar trabalhos realizados com diferentes adições minerais, Qian et al. (2009) perceberam que os compósitos cimentícios desenvolvidos com escórias de alto forno ou pó de calcário mostravam maior tendência à cicatrização do que os que possuíam cinza volante. Com isso, os pesquisadores concluíram que o fenômeno depende fortemente da disponibilidade de cimento não hidratado e de outros materiais complementares para continuidade da hidratação.

Outra explicação pertinente é que a autocicatrização das fissuras localizadas na interface entre a pasta de cimento e a superfície do agregado, muito mais frequente se o consumo de cimento é baixo, levarão mais tempo para autocura do que aquelas que percorrem zonas preenchidas apenas com a pasta (AHN E KISHI, 2010). Isso ocorre pelo simples fato de que, na segunda situação, ambas as superfícies contribuirão no processo de formação dos cristais.

4.3.2 Influência da cura e das condições do ambiente

As condições do ambiente em que os concretos fissurados são expostos exercem grande importância na capacidade de autocicatrização. Tendo em vista que a cicatrização é iniciada apenas com a entrada de água pelas fissuras, as condições de exposição à umidade, seja pela umidade relativa do ar, pela exposição às águas das chuvas, tipicamente observadas em estruturas desabrigadas, ou pela total saturação nas estruturas submersas em água, têm grande influência sobre a resposta do material em se auto reparar.

Ter Heide e Schlangen (2007) avaliaram a cura em ambientes com umidades relativas variando entre 60% e 95% e, também, concretos submersos em água, concluindo que somente os últimos apresentavam total recuperação de sua capacidade resistente. Além disso, os pesquisadores apontaram que as amostras armazenadas ao ar apresentaram quase nenhum aumento de resistência, mesmo aquelas que permaneceram expostas aos níveis mais elevados de umidade (UR de 95%).

Ao comparar situações de cura distintas, entre as quais a cura submersa, ao ar com ou sem a presença de gás CO₂ e ciclos de molhagem e secagem, tanto os trabalhos de Qian et al. (2010) quanto os de Sisomphon (2013) apontam que a recuperação da rigidez à flexão, nos concretos submetidos a ciclos de molhagem e secagem, é muito maior em comparação com as outras situações. Para Qian et al. (2010), isso se justifica pelo fato de essa condição de cura promover a interação de água, CO₂ e material cimentício não hidratado.

O molhamento e a secagem cíclica são tomados, por muitos autores, como um método de teste acelerado para simular condições ambientais ao ar livre, tendo, por isso, um caráter bastante realista, já que muitos concretos ficam desabrigados e sujeitos às ações de vento e chuva (QIAN et al., 2010; YU E YANG, 2010). Além disso, a magnitude da recuperação da rigidez à tração, ductilidade e resistência pode ser tão intensa sob essas condições, que chega a apresentar resultados bastante satisfatórios após somente três ciclos consecutivos (LI E YANG, 2007; YU E

YANG, 2010). Para Yang et al. (2009) são necessários de quatro a cinco ciclos para obter o benefício total da autocura.

4.3.3 Influência do tipo de cimento

As propriedades dos concretos se desenvolvem de formas diferentes, ao longo do tempo, dependendo do tipo de cimento e da existência de adições minerais e aditivos. No Brasil, os cimentos normatizados se caracterizam por conter grandes quantidades de adições minerais complementares em sua composição, o que pode ter grande impacto sobre o potencial de cicatrização dos concretos produzidos com esses aglomerantes.

Apesar de já haver inúmeros trabalhos discutindo o desempenho de cada um dos tipos de cimento sob os mais diferentes aspectos, a literatura nacional ainda carece de trabalhos no que diz respeito à cicatrização. Assim, tanto o tipo de cimento quanto inúmeras outras variáveis que influenciam esse fenômeno ainda não foram testadas e apropriadas para o contexto nacional. No entanto, partindo-se dos resultados obtidos internacionalmente, em pesquisas desenvolvidas com materiais equivalentes, é possível discorrer sobre alguns comportamentos esperados para os cimentos locais.

No que diz respeito à presença de adições minerais, por exemplo, o trabalho desenvolvido por Ter Heide e Schlangen (2007), no qual compararam a autocicatrização de concretos produzidos com o cimento Portland de endurecimento rápido e de concretos com cimento Portland contendo adição de escória de alto forno, fornece indicativos confiáveis acerca da capacidade de auto reparo dos cimentos tipo CPV e CPIII. Segundo os pesquisadores, os concretos produzidos com o cimento de endurecimento rápido, quando fissurados nas primeiras idades, apresentam autocicatrização após duas semanas e ganho mais notável de resistência, provavelmente por conta de que as reações ocorrem mais rapidamente e por haver ainda uma quantidade bastante grande de grãos anidros de cimento. Isso, no entanto, poderia ser questionado, caso a cicatrização ocorresse em idades mais avançadas.

A médio e longo prazo, existe uma tendência de que a cicatrização seja mais efetiva em concretos que contenham adições. Segundo Qiu (2015) e Huang et al. (2014), que testaram diferentes teores de escória de alto-forno adicionadas a um cimento de referência, o aumento do teor de escória de alto-forno resulta em maior desempenho mecânico dos concretos após a cicatrização. Isso, segundo Qiu (2015), ocorre devido à hidratação contínua da escória na presença de hidróxido de cálcio - as reações pozolânicas. Huang et al. (2014), sua vez, atentam que a autocura só deve ser mais eficiente que a pasta de cimento Portland, se a escória for ativada corretamente na mistura.

De maneira similar, Li e Yang (2007) e Qian et al. (2009) também apontam a melhoria da cicatrização com o uso de cinzas volantes e escória de alto forno, mas atribuem o fato principalmente à cinética das reações de hidratação, que tendem a ser mais lentas com o uso das adições minerais.

Olivier et al. (2015), ao testarem cimentos canadenses e franceses (CEM I e GU, respectivamente) equivalentes ao CPI e composições desses cimentos com escória de alto forno, encontraram que os níveis de cicatrização são superiores quando há adição mineral ao cimento. Entretanto, a mesma pesquisa dirigida por eles não mostrou aumento significativo em cimentos industrializados contendo a mesma adição mineral. O CEM III francês, equivalente ao CP III, também foi testado pelos pesquisadores e os resultados foram muito similares ao CEM I. Isso indica que, teoricamente, o uso das adições possa contribuir para o aumento do potencial de cicatrização, seja pelas reações secundárias pozolânicas ou pela maior disponibilidade de grãos anidros decorrentes da diminuição da velocidade das reações, é válida uma verificação dos

cimentos industrializados contendo esses materiais. Ou seja, a composição dos cimentos industrializados tem sua composição variável e a procedência das adições geralmente é desconhecida, não sendo uma comparação justa comparar seus resultados a um referencial teórico obtido a partir de condições controladas produzidas em laboratório.

Ahn e Kishi (2010) apontam que adições minerais e aditivos podem proporcionar maior estabilidade química ao concreto após a cicatrização. Segundo os autores, o uso de alguns desses produtos pode complementar os produtos da hidratação tornando-os menos sensíveis à condição de pH e à solubilidade em água, evitando assim que as fissuras reabram com o tempo.

Além disso, quanto mais grossos forem os grãos de cimento, menor será a sua área específica ou superfície em contato com a água, resultando na desaceleração das reações de hidratação. Durante a hidratação, as camadas de hidratos se formam ao redor dos grãos de clínquer e, com o aumento da sua espessura, dificultam que a água penetre através dessas camadas para se combinar ao cimento anidro e formar novos hidratos. Segundo Shim et al. (2015), a quantidade de cimento anidro disponível na matriz tende a ser menor em cimentos mais grossos.

4.3.4 Influência da idade do concreto

As reações de hidratação do cimento podem ocorrer por longos períodos de tempo, podendo ser observadas mesmo após vários anos. No entanto, a reação, que frequentemente é descrita sob os princípios da dissolução e precipitação, tende a ser mais intensa e rápida durante as primeiras idades do concreto. Sendo assim, é possível inferir que a idade do concreto no momento da fissuração tem relação com sua capacidade de cicatrização. Além disso, essa propriedade deverá ser mais sensível ao fator idade, quanto mais novas forem as fissuras.

O aumento da idade do concreto pode significar um grau de hidratação maior, e por consequência disso, o potencial de recuperação de resistência deverá ser menor. No entanto, observa-se que a hidratação se estabiliza, a longo prazo, e nessas idades pouco importa o momento em que as fissuras ocorrem, já que a disponibilidade de grão anidro não decresce tão rapidamente. Schlangen e Joseph (2009), por exemplo, fissuraram concretos 20; 27,5; 48 e 72 horas após o momento da moldagem e puderam observar claramente que existe um decréscimo da recuperação da resistência de concretos pré-fissurados em idades maiores.

Zhong e Yao (2008) chegaram a conclusões similares, relatando que, para o mesmo grau de dano, as amostras fissuradas mais cedo têm as propriedades mecânicas e ultra-sônicas melhor recuperadas. No entanto, eles relatam que para concretos fissurados aos 60 dias, a recuperação é quase nula. Qian et al. (2010) indicam até uma diminuição da rigidez quando a fissuração ocorre em idades mais avançadas, justificado pelo esgotamento gradual do material anidro para hidratação.

4.3.5 Influência do tamanho e tortuosidade das fissuras

No que diz respeito ao tamanho das fissuras, foi comprovado por ter Heide et al. (2005) que quanto maior a aproximação entre as faces da fissura, maiores as chances de ocorrência da autocicatrização autógena. Em sua investigação sobre o efeito da aproximação das faces da fissura por carregamento na eficiência de cicatrização autógena, os autores concluíram que os concretos submetidos a forças de compressão apresentavam melhores resultados. Van Tittelboom e De Belie (2013), mencionam inúmeros trabalhos que tratam da relação entre o valor da abertura das fissuras e a capacidade de cicatrização natural dos concretos. Nos trabalhos apontados por eles, a abertura máxima da fissura para que o fenômeno ainda se manifeste de forma expressiva difere substancialmente entre os autores, variando de 0,01 mm até o valor de 0,3 mm.

Segundo Yang et al. (2011), que avaliou a cicatrização de concretos após vários ciclos consecutivos de molhagem e secagem, as fissuras menores tendem a ser mais completamente

preenchidas com CSH, enquanto que as fissuras maiores são parcialmente preenchidas com esse material e partículas de calcita após a mesma condição de exposição, resultando em uma cicatrização incompleta. Ou seja, fissuras maiores requerem maior quantidade de material cicatrizante para serem seladas, o que nem sempre estará disponível, já que as partículas de cimento anidro na matriz cimentícia são limitadas.

Além disso, quanto maior a abertura das fissuras, maior será a diluição das partículas, favorecendo a formação de cristais maiores e menos resistentes. Quanto maior a disponibilidade de água, menor tende a ser o pH no interior das fissuras, o que favorece a formação de hidróxido de cálcio, em detrimento do C-S-H.

Reinhardt et al. (2013) propõem outra justificativa. Segundo os autores, nas microfissuras a cicatrização é muito mais rápida porque os efeitos da expansão da matriz de cimento decorrentes da umidade tendem a ser mais expressivos e, assim, a ação simultânea da hidratação tende a selá-las permanentemente. Em fissuras maiores, a intensidade da expansão por umidade será a mesma, mas devido ao distanciamento entre as faces, o efeito desse mecanismo terá pouca contribuição para que, em conjunto com a hidratação dos grãos anidros de cimento, ocorra uma selagem permanente.

Quanto à morfologia, alguns trabalhos indicam que a e tortuosidade das fissuras revela uma maior tendência de cicatrização da matriz cimentícia. Djerbi et al. (2008) e Pincadet et al. (2009), ao avaliarem a permeabilidade de concretos fissurados com diferentes níveis de resistência, concluíram que o maior conteúdo de partículas não hidratadas em concretos com menor relação água/cimento não equilibra o efeito de uma tortuosidade mais baixa das fissuras nos concretos de alto desempenho. Bernardino da Silva (2016), em sua revisão bibliográfica sobre o tema, discorre que a rugosidade da fissura proporciona um aumento do contato superficial entre a água e a matriz cimentícia, acelerando, dessa forma, a cinética da autocicatrização.

Diante da falta de confiabilidade do concreto no controle da abertura de fissuras que, conseqüentemente, limita as possibilidades de cura autônoma, Li et al. (2013) propuseram o uso das fibras de modo a restringir a abertura da fissura. Segundo os autores, o concreto reforçado com fibras pode suprimir o comportamento de fratura frágil em favor da formação de fissuras menores e mais distribuídas. Outro ponto favorável apontado por eles é a maior precipitação dos produtos de cicatrização ao redor da fibra, por razões relacionadas à dinâmica de fluidos e pelo aumento do pH dado pela diminuição do tamanho da fissura.

4.4 Cicatrização autônoma

Apesar de existirem muitos estudos acerca da cicatrização autógena, alguns autores questionam que essas propriedades intrínsecas dos materiais cimentícios são por si só bastante limitadas. Ou seja, a cicatrização autógena permanecerá restrita a pequenas fissuras tendo uma confiabilidade relativamente pequena, uma vez que sempre depende das possíveis reações de hidratação, no momento da formação da fissura (VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013).

Nesse contexto, as perspectivas futuras mais interessantes para os concretos autocicatrizantes se fundamentam nos conceitos da cicatrização autônoma, em que o material é desenvolvido com o propósito do auto reparo. Mesmo que essas abordagens estejam sendo estudadas há menos tempo do que a cicatrização autógena, demonstram pouca aplicação prática ou, ainda, não tenham viabilidade econômica para que sejam postas no mercado, as diferentes técnicas de cicatrização autônoma já estudadas demonstram resultados bastante animadores quanto à capacidade de cicatrização. Além disso, muitos desses mecanismos ocorrem de modo complementar, já que a cicatrização autógena também deverá ocorrer em muitas situações.

No Brasil, os únicos trabalhos que tratam da cicatrização são os de Takagi (2013), que avaliou o uso de catalisadores cristalinos e, mais recentemente, o de Moreira (2017), que estudou o

potencial de cicatrização a partir de ensaios mecânicos em concretos contendo aditivos redutores de permeabilidade por cristalização. Apesar de ser um tema ainda pouco discutido nacionalmente, certamente estará ganhando espaço durante os próximos anos, tendo em vista o seu grande potencial em promover estruturas mais sustentáveis e duráveis.

Entre os métodos de cicatrização autônoma já amplamente discutidos, destacam-se:

Catalisador cristalino como agente cicatrizante: São materiais cimentícios sintéticos que atuam como impermeabilizante hidrofílico, consumindo o Ca(OH)_2 para formar produtos cristalinos que desconectam poros e preenchem fissuras no concreto. São classificados como cicatrizantes porque as reações ocorrem apenas quando houver umidade suficiente, que em geral é proporcionada pelo transporte de água através das fissuras. A formação cristalina dos produtos varia entre cristais de etringita, hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e C-S-H, sendo os dois últimos responsáveis pela recuperação das propriedades mecânicas. Entre os trabalhos realizados com esses materiais, destacam-se os de Takagi (2013) e Moreira (2017). O primeiro traz uma revisão bibliográfica bastante completa sobre o tema para o contexto nacional.

O principal benefício da adição de impermeabilizante por cristalização na mistura é devido a formação de cristais insolúveis nos poros do concreto e que ficam integrados ao mesmo. Devido à propriedade de cristalização, além da capacidade de bloquear os poros e os capilares, pode ocorrer também o preenchimento de microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto. Segundo Li et al. (2004) um incremento da resistência à compressão pode ser obtido com o uso desses produtos devido fatores como o efeito fíler que pode contribuir para o fechamento dos vazios e também e a ação ativadora da hidratação do cimento, que promove melhoria da microestrutura da pasta de cimento.

Cicatrização microbiológica: Esse tipo de autocicatrização utiliza bactérias extremófilas capazes de resistirem a ambientes alcalinos por longos períodos de tempo. Quando adicionadas ao concreto, essas bactérias permanecem dormentes até que ocorra a primeira fissura do material que deverá expô-las à água e ao oxigênio. Após ativadas, elas começam a produzir esporos de carbonato de cálcio que irão com o tempo selar a fissura. Na literatura já existem inúmeros trabalhos sobre o uso desses microrganismos e, entre as preocupações mais frequentemente apontadas está a escolha de quais espécies devem ser utilizadas. Isso porque, cada espécie possui características próprias de sobrevivência que poderão condicionar aspectos importantes da autocicatrização, tais como o tempo máximo até que ocorra a primeira fissura e a intensidade do mecanismo. Entre os trabalhos desenvolvidos nessa área podem ser citados os de Jonkers et al. (2010), Wiktor e Jonkers (2011) e Wang et al. (2014).

Cicatrização com polímeros superabsorventes (PSA): Esse tipo de cicatrização utiliza polímeros capazes de reter grande quantidade de líquido em sua estrutura, formando um hidrogel macio e insolúvel. Ao entrarem em contato com a umidade externa proveniente do transporte através da fissura, esses polímeros aumentam de volume, podendo preencher toda a extensão da fissura, sem, no entanto, exercerem tensões de tração durante esse processo. Entre os estudos realizados com esses materiais, destacam-se os de Lee et al. (2010) e Snoeck et al. (2012), que avaliaram a penetração de água em concretos e argamassas contendo esses polímeros.

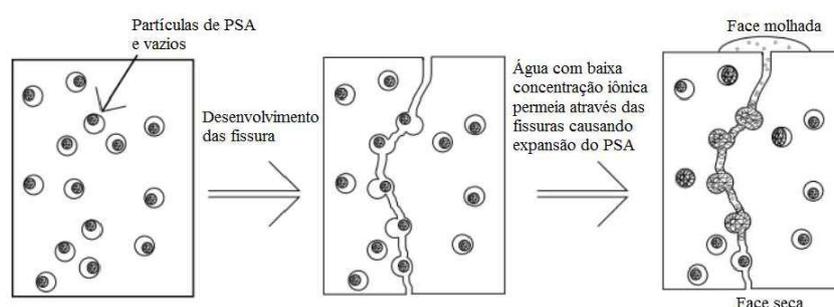


Figura 8: Mecanismo de autocicatrização com uso de polímeros superabsorventes (adaptado de LEE et al., 2010)

Cicatrização com cápsulas e sistemas vasculares: Nesse sistema de autocicatrização são adicionadas cápsulas junto à mistura do concreto, que contém algum agente químico ligante. Assim, no momento em que essas cápsulas são rompidas devido à ocorrência de uma fissura, ocorre liberação e reação das substâncias encapsuladas, promovendo assim o reparo na região danificada. Os sistemas vasculares são bastante similares, diferindo apenas pelo formato alongado das cápsulas que, nesse caso, poderão ser fibras de vidro ocas ou outro material também contendo agentes cicatrizantes em seu interior. Esse mecanismo pode ser visto na Figura 9.

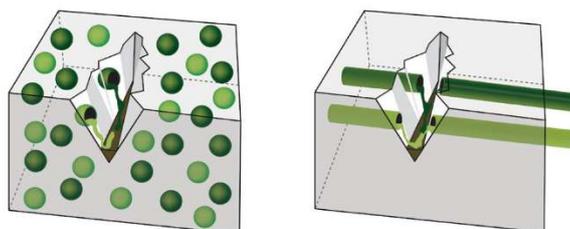


Figura 9: Cicatrização autônoma com uso de cápsulas (à esquerda) e sistemas vasculares (à direita) contendo agentes químicos cicatrizantes (adaptado de VAN TITTELBOOM e DE BELIE, 2013)

Cicatrização com materiais induzidos por estímulos físicos: Outra maneira de promover a autocicatrização é por meio da incorporação de particulados ou aditivos sensíveis a estímulos físicos como o calor, campos eletromagnéticos, entre outros. Hayes et al. (2007) e Luo et al. (2009), por exemplo, utilizaram resinas poliméricas termoplásticas dispersas na mistura do concreto, capazes de, após o aquecimento, derreter e de se expandir, preenchendo as fissuras e, até mesmo, recuperando as propriedades mecânicas do compósito.

5 Programa experimental

Com a finalidade de alcançar os objetivos propostos, o programa experimental elaborado levou em consideração a determinação das propriedades mecânicas, a partir do ensaio de resistência à compressão axial, NBR 5739 (ABNT, 2007), e a avaliação da durabilidade dos concretos, por meio do ensaio de penetração de íons cloreto (ASTM C 1202:2012). Por meio dos resultados obtidos, buscou-se avaliar o desempenho de concretos produzidos com aditivo impermeabilizante por cristalização, de modo a caracterizar seu potencial de cicatrização de fissuras provocadas nas primeiras idades. Para tanto, as análises se fundamentaram na capacidade de recuperação das propriedades mecânicas e de durabilidade dos concretos fissurados em relação às amostras irmãs não fissurados.

Neste capítulo serão abordados os materiais utilizados nos experimentos, o proporcionamento dos materiais e a produção dos diferentes traços de concreto, os processos de cura e preparação das amostras e os ensaios realizados.

5.1 Metodologia

A metodologia utilizada nesse trabalho tem a finalidade de analisar o desempenho do aditivo impermeabilizante por cristalização frente ao fenômeno da autocicatrização comparativamente aos processos autógenos que ocorrem em concretos convencionais com diferentes relações água/aglomerante. Sabe-se que a autocicatrização é um fenômeno que também ocorre em concretos convencionais, por esse motivo, os concretos executados com o cristalizante foram comparados com um concreto referência, sendo este sem o uso do aditivo. Além disso, foram feitos três traços distintos para os concretos do grupo contendo aditivo impermeabilizante e três traços para os concretos convencionais, definindo-se três relações água/aglomerante distintas: 0,43, 0,50 e 0,66, totalizando seis traços distintos executados.

Os traços unitários utilizados e o consumo de materiais de cada um dos concretos estão apresentados nas Tabela 4 e Tabela 5, respectivamente. Em todos os traços, o teor de argamassa seca em relação ao concreto seco (valor α proposto pelo método de dosagem experimental IPT/USP, HELENE e TERZIAN, 1994) foi fixado em 53%.

Tabela 4: Traço unitário dos concretos produzidos expressos em kg/kg de cimento.¹⁰

| Traço unitário: | | | | | | |
|-----------------|------|------|------|------|------|------|
| TRAÇO: | N-1 | N-2 | N-3 | P-1 | P-2 | P-3 |
| Cimento: | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |
| Areia: | 1,49 | 2,12 | 2,74 | 1,51 | 2,14 | 2,77 |
| Brita: | 2,21 | 2,76 | 3,32 | 2,23 | 2,79 | 3,35 |
| Água: | 0,43 | 0,50 | 0,66 | 0,43 | 0,50 | 0,66 |
| Aditivo: | | | | 0,01 | 0,01 | 0,01 |

Tabela 5: Consumo unitário dos materiais em cada traço expressos em kg/m³ de concreto

| Consumo unitário: | | | | | | |
|-------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| TRAÇO: | N-1 | N-2 | N-3 | P-1 | P-2 | P-3 |
| Cimento: | 474,3 | 384,6 | 314,1 | 471,3 | 382,0 | 312,0 |
| Areia: | 708,7 | 814,4 | 861,1 | 711,3 | 817,1 | 863,7 |
| Brita: | 1049,1 | 1063,2 | 1042,2 | 1052,9 | 1066,7 | 1045,4 |
| Água: | 204,7 | 192,3 | 207,1 | 203,5 | 191,0 | 205,8 |
| Aditivo: | | | | 4,7 | 3,8 | 3,1 |

Para melhor avaliar a evolução do desempenho dos concretos ao longo do tempo, os ensaios propostos foram realizados aos 28 dias e 56 dias após a data da moldagem. Além disso, para

¹⁰ A numeração dos traços é dada conforme a relação água aglomerante (1-baixa, 2-média, 3-alta) e pelo uso do aditivo (N - sem aditivo, P - com aditivo).

que os concretos fossem submetidos à carga de 85% do valor de ruptura aos 7 dias, o ensaio de resistência à compressão uniaxial também foi realizado nessa data (Ver item 5.3.4).

O esquema representativo apresentado na Figura 10 traz um resumo do programa experimental. Nele são mostrados os seis tipos de concretos analisados com as quantidades de corpos de prova (CP's) utilizados em cada um dos ensaios executados, bem como a descrição normativa utilizada e a idade dos concretos na data de realização dos ensaios.

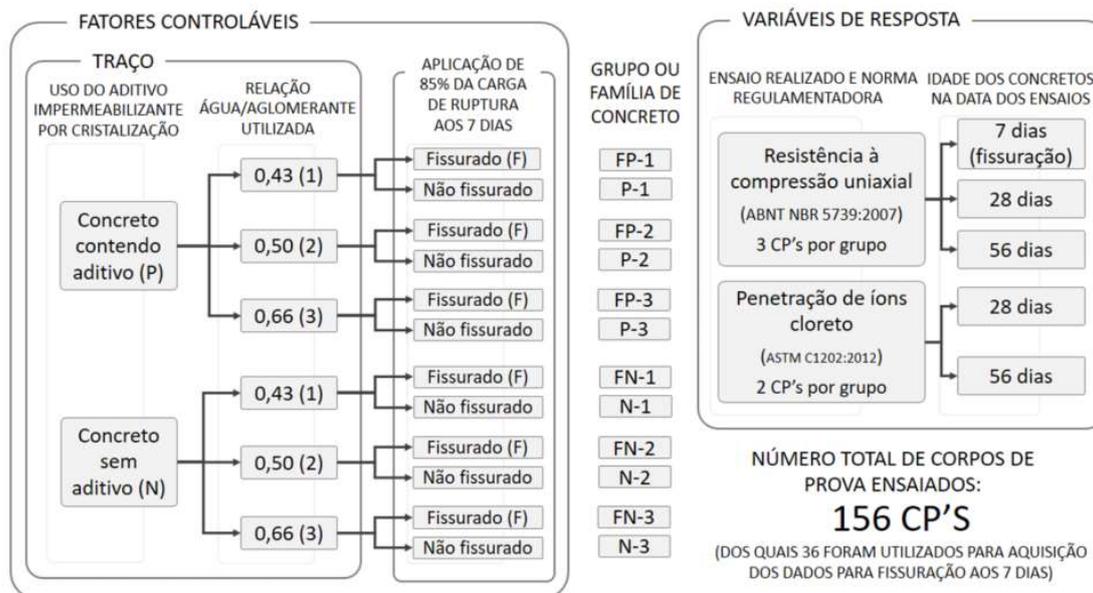


Figura 10: Representação esquemática do programa experimental

Diante do volume de ensaios a serem realizados, a produção dos concretos foi realizada em dois dias, tomando-se o cuidado em aleatorizar os traços produzidos para minimizar possíveis vieses na pesquisa decorrentes das condições impostas em cada um dos dias de concretagem (temperatura, umidade, pressão atmosférica e entre outras). No primeiro dia, os concretos de traço N-2, P-3 e N-3 foram executados, restando para o segundo dia, agendado uma semana após a primeira concretagem, os traços P-1, N-1 e P-2.

5.2 Materiais utilizados

5.2.1 Cimento

Para a produção dos concretos foi utilizado um cimento Portland Pozolânico com classe de resistência de 32 MPa (CP IV-32), fornecido por uma empresa da região metropolitana de Porto Alegre. A escolha desse cimento se justifica por sua grande disponibilidade na região sul, e frequente utilização.

A caracterização do material se limitou à determinação de sua massa específica conforme preconiza a NBR NM 23:2001, e o valor obtido foi de 2,78 g/cm³.

5.2.2 Agregado miúdo

Como agregado miúdo, foi utilizada uma areia média de origem quartzosa. Antes de ser utilizado, o agregado foi seco em estufa à 100°C e resfriado a temperatura ambiente por pelo menos 24 horas antes de sua utilização na produção dos concretos.

A caracterização do material, realizada em laboratório, compreendeu a determinação da distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima, segundo a NBR NM 248

(ABNT, 2003); da massa específica, pela NBR NM 52 (ABNT, 2009); e da absorção de água, pela NBR NM 30 (ABNT, 2001). Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 6. Na Figura 11 está apresentada a distribuição granulométrica do agregado miúdo em forma gráfica, bem como dos limites das zonas utilizável e ótima prescritas na norma de especificação de agregados para utilização em concreto, a NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 6: Caracterização física do agregado miúdo

| Abertura das peneiras (mm) | AMOSTRA (NBR 248:2003) | | NBR 7211 (2005) | | | |
|----------------------------|--|-----------------------------------|---------------------------------|------------|--------------------|-----------------|
| | Percentual médio retido entre peneiras | Percentual médio retido acumulado | Retida Acumulada (%) - em massa | | | |
| | | | Limites Inferiores | | Limites Superiores | |
| | | | Zona utilizável | Zona ótima | Zona ótima | Zona utilizável |
| 4,75 | 0,0% | 0,0% | 0% | 0% | 5% | 10% |
| 2,36 | 1,7% | 1,7% | 0% | 10% | 20% | 25% |
| 1,18 | 4,2% | 5,9% | 5% | 20% | 30% | 50% |
| 0,60 | 8,6% | 14,5% | 15% | 35% | 55% | 70% |
| 0,3 | 59,4% | 73,9% | 50% | 65% | 85% | 95% |
| 0,15 | 24,3% | 98,2% | 85% | 90% | 95% | 100% |
| < 0,15 | 1,8% | 100,0% | 100% | 100% | 100% | 100% |
| Módulo de Finura: | 1,94 | | NBR NM 248:2003 | | | |
| Dimensão Máxima: | 2,4 mm | | NBR NM 248:2003 | | | |
| Massa específica: | 2,64 g/cm³ | | NBR NM 52:2009 | | | |
| Absorção de água: | 1,70 % | | NBR NM 30:2001 | | | |

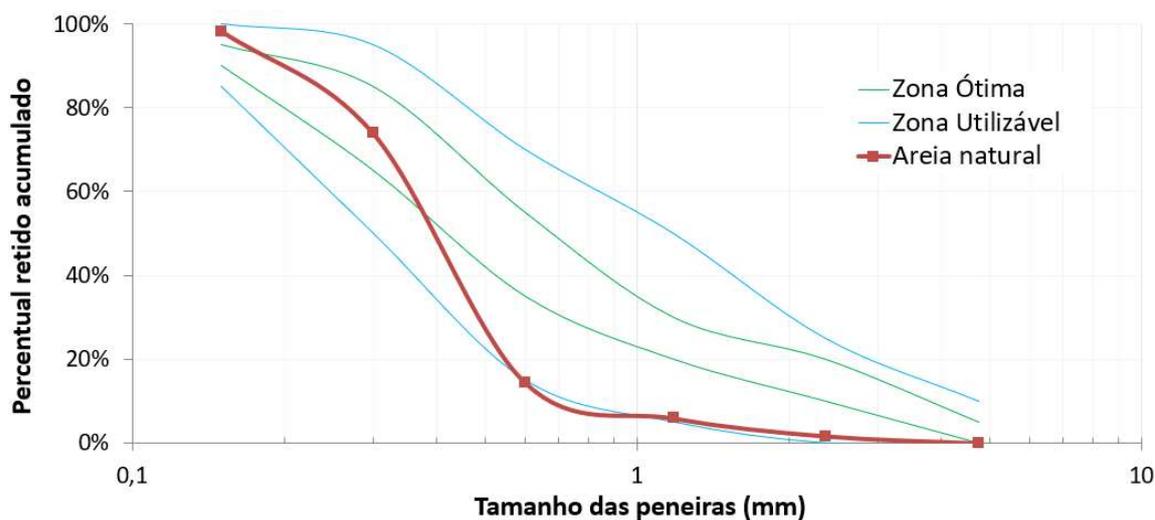


Figura 11: Distribuição granulométrica do agregado miúdo

A partir da Figura 11 nota-se que a curva granulométrica do agregado miúdo utilizado se encontra fora dos limites da zona ótima, mas dentro dos limites utilizáveis segundo a NBR 7211 (ABNT, 2009). Isso justifica a utilização de um único tipo de agregado miúdo, sem a necessidade de recorrer à misturas e composições granulométricas para adequação da curva.

5.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem basáltica. O material foi previamente lavado, passando por quatro ciclos de enxague em uma betoneira de tombo. Com esse procedimento, foram eliminadas sujeiras e poeiras depositadas sobre os grãos que pudessem

vir a influenciar no desempenho dos concretos. Após a lavagem os grãos foram secos ao ar em ambiente coberto e ventilado.

Os resultados da caracterização física do agregado graúdo estão apresentados na Tabela 7. A distribuição granulométrica, módulo de finura e dimensão máxima foram determinadas a partir dos procedimentos descritos na NBR NM 248 (ABNT, 2003). A massa específica e a absorção de água, por sua vez, foram obtidas de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2009).

Tabela 7: Caracterização física dos agregados graúdos

| Abertura das peneiras (mm) | AMOSTRA (NBR 248:2003) | | NBR 7211 (2005) | | | |
|---|--|-----------------------------------|---------------------------------|----------|---------|----------|
| | Percentual médio retido entre peneiras | Percentual médio retido acumulado | Retida Acumulada (%) - em massa | | | |
| | | | Zona Granulométrica - d/D | | | |
| | | | 4,75/12,5 | 9,5/25 | 19/31,5 | 25/50 |
| 25 | 0,0% | 0,0% | | | | |
| 19 | 2,1% | 2,1% | - | 2 - 15 | 65 - 95 | 95 - 100 |
| 12,50 | 82,8% | 84,9% | | | | |
| 9,5 | 14,4% | 99,4% | 2 - 15 | 80 - 100 | | - |
| 6,3 | 0,6% | 100,0% | | | | |
| 4,75 | 0,0% | 100,0% | 80 - 100 | 95 - 100 | | - |
| Fundo | 0,0% | 100,0% | - | - | - | - |
| Módulo de Finura: | | 7,02 | NBR NM 248:2003 | | | |
| Dimensão Máxima: | | 19 mm | NBR NM 248:2003 | | | |
| Massa específica do agregado seco: | | 2,95 g/cm³ | NBR NM 53:2009 | | | |
| Massa específica do agregado Saturado superfície seca: | | 2,89 g/cm³ | NBR NM 53:2009 | | | |
| Massa específica aparente do agregado seco: | | 2,86 g/cm³ | NBR NM 53:2009 | | | |
| Absorção de água: | | 1,11 % | NBR NM 53:2001 | | | |

Diante dos dados apresentados e de uma comparação com os padrões estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), foi possível classificar o agregado graúdo na faixa que compreende aos tamanhos de grão mínimo de 9,5 mm e máximo de 25 mm. Comercialmente, o termo “brita 1” é utilizado para designar os agregados cuja distribuição granulométrica esteja contida nesse intervalo.

Da mesma forma que os agregados miúdos, por demonstrar adequação aos padrões previstos pela NBR 7211 (ABNT, 2009), não houve necessidade de recorrer à misturas e composições para adequação da curva granulométrica.

5.2.4 Água

A água utilizada nesse estudo para a moldagem dos corpos de prova foi disponibilizada pela rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre (DMAE).

5.2.5 Aditivo cristalizante

Neste trabalho, foi utilizado um aditivo impermeabilizante por cristalização adicionado à mistura ao concreto no momento de sua produção conforme orientação do fabricante.

Esse material, conforme consta na ficha técnica do produto, é composto por cimento Portland (40% a 70%), areia de quartzo (5% a 10%) e compostos químicos ativos (10% a 30%). Seu

princípio de funcionamento se dá ao promover reações químicas na presença de umidade que, juntamente com os produtos da hidratação do cimento, resultam em uma estrutura cristalina insolúvel capaz de preencher os poros capilares do concreto.

O uso deste material tem como objetivo reduzir a permeabilidade do concreto selando os poros capilares existentes, evitando, assim, a entrada de água e agentes agressivos. Esse produto é indicado para uso em reservatórios, contenções de solo e estruturas subterrâneas sujeitas a ações do freático (por exemplo, paredes diafragma e lajes de subpressão), estações de tratamento de água e efluentes, túneis, entre outras situações que solicitem concretos impermeáveis.

Além disso, também consta na ficha técnica do produto, a sua capacidade em selar fissuras de infiltração de água, com aberturas de até 0,4 mm, de modo a promover a autocicatrização da estrutura. Da mesma forma que ocorre o preenchimento dos poros capilares na presença de umidade, as reações capazes de selar a fissura também dependem da entrada de água pela abertura. Por outro lado, quando não há água dentro da fissura, os cristais permanecem inativos, e assim que ela aparece eles voltam a crescer.

De acordo com o fabricante, a proporção do impermeabilizante sobre a massa do cimento a ser utilizada varia entre 0,8% e 1,0%. Nesse trabalho, todos os concretos contendo esse aditivo foram proporcionados com 1,0% em relação a massa de cimento, de modo a potencializar os efeitos do produto.

Demais propriedades físico-químicas do aditivo usado estão apresentadas no Quadro 3, conforme ficha técnica do produto:

Tabela 8: Caracterização físico-químicas do aditivo impermeabilizante por cristalização¹¹

| | |
|---|------------------------------|
| Aparência: | Pó cinza |
| Odor: | Inodoro |
| Estado físico: | Sólido (pó) |
| pH em solução | 10 à 13 |
| Massa específica: | 2,92 g/cm³ |
| Dosagem (%) sobre massa de cimento | 0,8% à 1,0% |

5.3 Produção do concreto

A produção dos concretos compreendeu as etapas de misturas dos materiais e produção dos concretos, o ensaio de consistência, a moldagem dos corpos de prova e cura das amostras.

5.3.1 Mistura dos materiais

Os concretos foram produzidos em betoneira de tombo com capacidade para 360 litros de material.

Anteriormente a sua utilização, o equipamento era previamente imprimado com uma argamassa de cimento e areia na proporção de 1:3. Esse procedimento se fez necessário para que a argamassa do concreto não fosse perdida durante a sua produção, já que os finos da mistura tendem a ficar aglutinados junto às paredes da betoneira e das pás. Diante disso, a imprimação faz com que essas regiões do equipamento já estejam envolvidas pelo material antes da execução do concreto, preservando a proporção do traço preestabelecido.

Como, em cada um dos dias de moldagem, foram executados 3 traços distintos, a imprimação era realizada antes da primeira betonada. As misturas subsequentes, tinham a betoneira já

¹¹ Características fornecidas pelo fabricante

imprimada pelo uso do equipamento na execução do concreto anterior, dispensando o uso da argamassa na proporção 1:3.

A ordem de colocação dos materiais foi mantida constante em todas as misturas: brita; parte da água, sendo essa quantidade suficiente para umedecer o agregado graúdo; cimento; mais uma parte de água, para promover a solubilização do cimento; aditivo impermeabilizante, nos casos que continham esse material; areia; e por fim o restante de água.

Após a mistura, efetuou-se o ensaio do abatimento de tronco de cone, conforme padrões estabelecidos pela NBR NM 67 (ABNT, 1998), buscando-se o valor de 130 ± 30 mm. No entanto, como a quantidade de água das misturas era mantida fixa, o valor do abatimento apresentado para uma das misturas propostas ficou fora do intervalo esperado. A repetição de traço contendo relação água/aglomerante intermediária (traço P-2, contendo a/a = 0,50 e 1,0% de aditivo cristalizante), foi realizada em um dia com baixa umidade e temperatura acima da média observada nos demais dias de concretagem.



Figura 12: Execução do ensaio de abatimento de tronco de cone e aspecto visual do concreto no estado fresco

Além disso, para controle da produção de concreto, foram realizadas três determinações de massa específica do concreto no estado fresco em cada uma das misturas. A média dos resultados foi, então, comparada com o valor teórico, calculado a partir das propriedades físicas determinadas previamente (massa específica dos agregados, do cimento e do aditivo impermeabilizante). Dessa comparação, foi possível estimar o teor de ar incorporado em cada uma das misturas, que eventualmente pode exercer influência sobre os resultados finais, quanto apresentam valores muito divergentes entre si.

A massa específica do concreto fresco foi determinada, pesando-se as formas de concreto dos corpos de prova cilíndricos vazias (utilizada como referência ou tara da medição), e cheias, tomando-se o cuidado para eliminar possíveis excessos decorrentes do transbordamento das formas durante a concretagem. Após a pesagem, o valor da massa específica foi calculado fazendo-se a diferença entre os pesos anotados dividido pelo volume do corpo de prova. Por se tratarem de corpos de prova cilíndricos normatizados, cujas dimensões padrão são de 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, o volume considerado no cálculo foi de $1570,75 \text{ cm}^3$. A fórmula utilizada no cálculo da massa específica é mostrada a seguir:

$$m_{esp\ i} = \frac{m_{concreto+forma} - m_0}{V_{forma}} \quad (\text{Equação 4})$$

$$m_{esp\ média} = \frac{m_{esp\ 1} + m_{esp\ 2} + m_{esp\ 3}}{3} \quad (\text{Equação 5})$$

Sendo:

$m_{esp\ média}$ a massa específica do concreto determinada experimentalmente a partir de três medições em corpos de prova distintos;

$m_{esp\ 1}$ a massa específica do concreto determinada experimentalmente de cada corpo de prova;

$m_{concreto+forma}$ a massa da forma contendo amostra de concreto fresco;

m_0 a massa da forma determinada antes da concretagem;

e V_{forma} o volume de concreto utilizado para preencher cada forma, cujo valor é de 1570,5 cm³.

A massa específica teórica e o teor de ar incorporado foram calculados com base nas fórmulas propostas pela norma NBR 9833 (ABNT, 2008):

$$m_{esp\ teórica} = C_c + C_f + C_g + C_a + C_{aditivo} = C_c (1 + m + a/a + 0,01^*) \quad (\text{Equação 6})$$

$$C_c = \frac{1000}{\frac{1}{\rho_{cimento}} + \frac{f}{\rho_{areia}} + \frac{g}{\rho_{brita}} + \frac{a/a}{\rho_{água}} + \frac{aditivo}{\rho_{aditivo}}} \quad (\text{Equação 7})$$

$$A = 1 - \frac{m_{esp\ média}}{m_{esp\ teórica}} \quad (\text{Equação 8})$$

Sendo:

$m_{esp\ teórica}$ a massa específica teórica do concreto, determinada a partir da massa específica, proporção relativa em massa (traço) e consumo dos materiais;

C_c o consumo de cimento por m³ de concreto. Nesse caso, sub índices “f”, “g”, “a” e “aditivo”, significam os consumos areia, brita, água e aditivos, respectivamente, por m³ de concreto;

m representa o consumo unitário de agregados graúdos (representados pela letra “g”) e miúdos (representados pela letra “f”), a/a a relação água aglomerante, e 0,01 o consumo unitário de aditivo. *Observa-se que o valor 0,01 só deverá ser considerado nos traços P-1, P-2 e P-3.

ρ representa a massa específica de cada um dos materiais que compõem o concreto;

E por fim A representa o teor de ar incorporado à mistura.

Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 9:

Tabela 9: Determinação das propriedades no estado fresco dos concretos produzidos^{12 13}

| TRAÇO: | N-1 | N-2 | N-3 | P-1 | P-2 | P-3 |
|---|--------|--------|--------|--------|-------|--------|
| Relação água/aglomerante: | 0,43 | 0,50 | 0,66 | 0,43 | 0,50 | 0,66 |
| Aditivo cristalizante: | | | | 1,0% | 1,0% | 1,0% |
| Abatimento de tronco de cone (slump test): | 100 mm | 100 mm | 150 mm | 100 mm | 65 mm | 150 mm |
| Massa específica do concreto fresco | | | | | | |
| Determinação experimental (g/cm ³): | 2,394 | 2,428 | 2,415 | 2,403 | 2,408 | 2,414 |
| Cálculo teórico (g/cm ³): | 2,437 | 2,454 | 2,425 | 2,440 | 2,457 | 2,427 |
| Ar incorporado: | 1,77% | 1,09% | 0,40% | 1,49% | 2,01% | 0,55% |

5.3.2 Moldagem dos corpos de prova

Para a moldagem dos corpos de prova foram utilizadas formas cilíndricas de $\phi 100 \times 200$ mm de acordo com a NBR 5738 (ABNT, 2015) para produção das amostras a serem testadas quanto à resistência à compressão e formas também cilíndricas de $\phi 95 \times 190$ mm, de acordo com a ASTM C1202 (ASTM, 2012) para as amostras a serem testadas quanto à resistência à penetração de íons cloreto. A Figura 13 ilustra as diferentes fôrmas utilizadas.

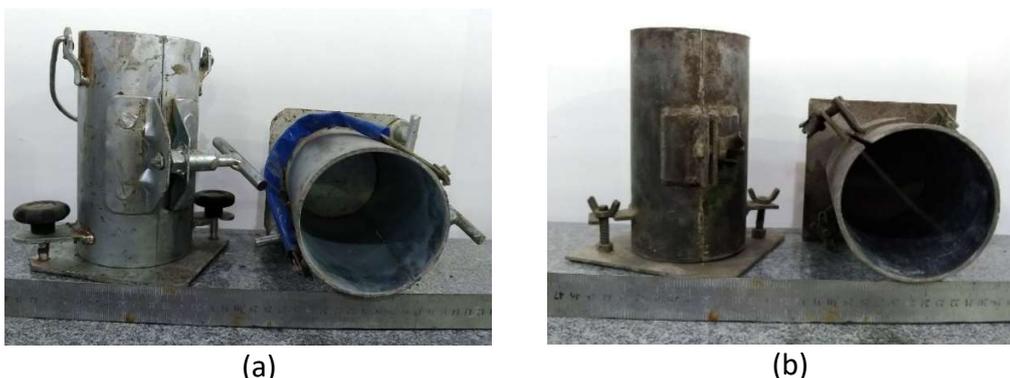


Figura 13: Formas metálicas de $\phi 100 \times 200$ mm (a) e $\phi 95 \times 190$ mm (b) utilizadas para produção das amostras de concreto

Antes da concretagem, uma fina camada de desmoldante foi aplicada sobre as superfícies metálicas de todas as formas, de modo a facilitar a retirada das amostras das formas após o seu endurecimento.

Visando manter a uniformidade na moldagem dos corpos de prova, o adensamento do concreto no interior das formas foi feito utilizando-se uma mesa vibratória (Figura 14). Tanto os corpos de prova com diâmetro de 100 mm quanto os de 95 mm foram executados em duas camadas, cada uma com um tempo de vibração de 10 segundos.

¹² A numeração dos traços é dada conforme a relação água/aglomerante (1-baixa, 2-média, 3-alta) e pelo uso do aditivo (N - sem aditivo, P - com aditivo).

¹³ Percentual de aditivo utilizado se aplica sobre a massa do cimento.



Figura 14: Mesa vibratória utilizada para o adensamento do concreto fresco no interior dos moldes

Após a moldagem e vibração das amostras de concreto fresco, foi realizado o rasamento com uso de uma colher de pedreiro, de modo a eliminar eventuais excessos de material e regularizar superfície superior dos corpos de prova.

Por fim, os moldes já preenchidos e adensados foram colocados sobre um piso de concreto horizontal, livre de vibrações e de qualquer outra ação que possa perturbar o concreto durante a pega e endurecimento inicial (Figura 15). As mostras também foram cobertas com lona plástica para evitar a perda de água para o ambiente nessa fase.



Figura 15: Cura inicial dos concretos sobre superfície plana rígida

5.3.3 Cura

Durante as primeiras 24 horas após a concretagem, os corpos de prova ficaram acondicionados à temperatura ambiente ainda dentro dos moldes metálicos e cobertos por uma lona plástica. Após esse tempo, os concretos foram desmoldados, identificados com giz de cera na superfície lateral dos cilindros e alocados em câmara úmida com umidade relativa maior do que 95% e temperatura controlada (variando na faixa de $23 \pm 2^\circ\text{C}$) até a idade de 7 dias, quando iniciou-se a etapa de fissuração de um grupo de concretos.

Após a etapa de fissuração, os concretos fissurados e não fissurados foram simultaneamente colocados em um tanque de cura submersa contendo uma solução de água supersaturada de cal. Nessa etapa, a cura submersa promove a percolação de água através das fissuras necessária para o desencadear a autocicatrização.

Os concretos permaneceram em cura submersa até a data de realização dos ensaios (28 dias e 56 dias) para o ensaio de resistência a compressão. Para o ensaio de penetração de íons cloreto,

as amostras também permaneceram em cura submersa, mas devido às etapas de preparação das amostras, eram retiradas do tanque uma semana antes em relação aos ensaios de compressão.



Figura 16: Tanques de cura por submersão contendo água saturada de cal

5.3.4 Fissuração

Após 7 dias da moldagem, um grupo de amostras foi submetido a uma carga de 85% da carga de ruptura de modo a promover a microfissuração do concreto.

Trabalhos anteriores indicam que, mesmo que a microfissuração ocorra em concretos submetidos a cargas inferiores aos valores adotados, os efeitos sobre as propriedades do concreto são menos significativos, o que dificulta na obtenção de uma boa avaliação do fenômeno da autocicatrização.

Şahmaran et al. (2008), submeteram amostras de concretos à uma carga de 70% e 90% do valor obtido na ruptura aos 28 dias e observaram que em ambas as idades, a redução da resistência após a fissuração foi mais expressiva no segundo grupo. Para os concretos submetidos à 70% da tensão de ruptura a redução média da resistência dos concretos foi de 6% e, enquanto que para o carregamento de 90% da carga última a redução foi de 19%. Os pesquisadores também realizaram ensaios de permeabilidade, a partir dos quais constataram uma sensibilidade ainda maior dos resultados em relação aos níveis de carga aplicados.

Similarmente, Moreira (2017) aplicou 40% da carga de ruptura também aos 28 dias com o intuito de avaliar o percentual de recuperação das propriedades mecânicas do concreto aos 28, 63 e 91 dias após a fissuração. No entanto, os resultados obtidos levaram a conclusão de que a variação dos valores de resistência à compressão entre os concretos fissurados e não fissurados não era estatisticamente significativa. Sendo assim, a autora recomenda, em suas considerações finais, a aplicação de carregamentos acima de 70% da carga de ruptura para que haja um maior grau de fissuração e melhor avaliação do ganho de resistência mecânica devido ao fenômeno da autocicatrização.

No que diz respeito a idade do carregamento escolhida, ao contrário de muitos trabalhos já realizados, que usualmente submetem os corpos de prova a fissuração por carga aos 28 dias, optou-se por idades menos avançadas. Isso se justifica pelo aumento da velocidade de execução das obras e sua influência direta sobre os ciclos de concretagem e desforma das estruturas de concreto, tema cuidadosamente abordado por Salvador (2007). Ou seja, as fissuras devidas a carregamentos precoces, seja pela retirada dos escoramentos ou pela imposição de cargas aos concretos ainda jovens dadas pela execução de pavimentos sucessivos em um curto intervalo

de tempo, constituem um cenário bastante recorrente e por isso optou pela fissuração aos 7 dias.

Por outro lado, a escolha de idades iniciais implica em outro problema, que é a diferenciação entre a autocicatrização e a hidratação continuada. Como os níveis de hidratação nas primeiras idades são relativamente baixos, e ainda mais baixos quando são utilizados cimentos com adições minerais (tais como CP-III e CP-IV), parte das propriedades do concreto deverá ser recuperada naturalmente pela hidratação residual ao longo do tempo após a fissuração.

Sendo assim, para diferenciar a influência da hidratação continuada da autocicatrização sobre os resultados, um grupo de amostras não foi submetida à carga de fissuração aos 7 dias. Essa decisão não elimina eventuais interações que possam ocorrer entre os dois fenômenos, uma vez que ocorrerão simultaneamente no caso de fissuras provocadas em idades iniciais. No entanto, os concretos não carregados não devem apresentar o mecanismo da autocicatrização, já que esse está condicionado a existência de fissuras e percolação de água através delas.

5.4 Ensaios realizados

As propriedades dos concretos avaliadas foram determinadas por meio do ensaio de resistência à compressão axial e penetração de íons cloreto. A seguir estão descritos ambos os ensaios realizados nesse estudo uma breve abordagem sobre como cada um dos ensaios pode gerar resultados pertinentes nessa avaliação do desempenho do produto impermeabilizante por cristalização e também da capacidade de autocicatrização dos concretos.

5.4.1 Resistência à compressão uniaxial

A resistência a compressão uniaxial das amostras foi determinada em uma máquina universal de ensaios com capacidade de carga de 2000 kg (Figura 17). Para tanto, foram seguidas as recomendações da norma brasileira NBR 5739 (ABNT, 2007), que determina, entre outras coisas a taxa de carregamento dos espécimes, que deve ser fixada no valor de 0,45 MPa/s e as dimensões do corpo de prova.



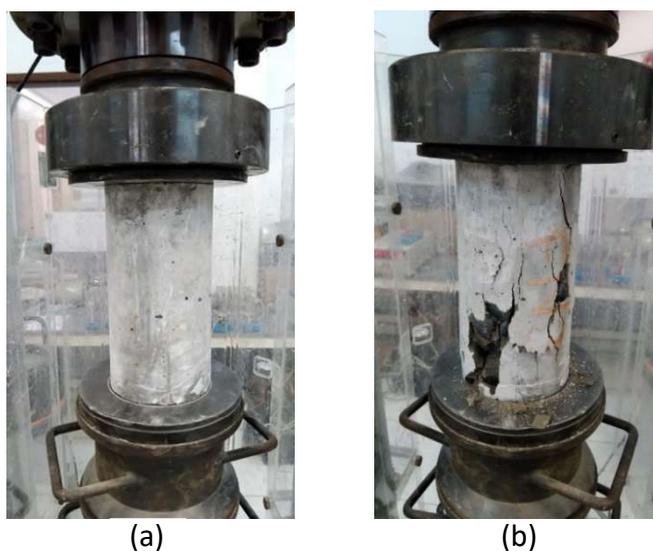
Figura 17: Prensa hidráulica utilizada para realização do ensaio de compressão uniaxial

Para cada um dos concretos executados, foram ensaiadas 3 amostras, levando-se em consideração sua similaridade quanto a definição do traço, idade de realização dos ensaios e fissuração. Previamente aos ensaios, os corpos de prova foram retificados no laboratório para regularização da superfície das bases, garantindo uma aplicação uniforme de carga sobre o corpo de prova. Além disso, no que diz respeito à cura, as amostras eram retiradas do tanque de submersão no mesmo dia do ensaio secas ao ar pouco antes de sua realização.



Figura 18: Base do corpo de prova antes (esquerda) e depois (direita) de retificados

A resistência a compressão do concreto é considerada a propriedade mais relevante do material, uma vez que muitas outras propriedades físico-mecânicas podem ser deduzidas a partir dela e até mesmo aquelas relativas à durabilidade, por estarem também associadas com a porosidade e permeabilidade (METHA e MONTEIRO, 2014). Além disso, esta é a propriedade usualmente especificada para controle tecnológico, tendo em vista a facilidade de execução do ensaio.



Figuras 19: Posicionamento da amostra no equipamento de ensaios (a) e aspecto após ruptura (b)

5.4.2 Penetração de íons cloretos

O ensaio de penetração de íons cloretos nos concretos foi realizada de acordo com o método de ensaio proposto pela norma americana ASTM C 1202: Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration (ASTM, 2012). O ensaio consiste na determinação da condutividade elétrica como indicativo da resistência ao ingresso de íons cloreto em amostras de concreto.

A determinação da condutividade elétrica é feita a partir do monitoramento da quantidade de corrente elétrica que passa através de um corpo de prova com aproximadamente 50 mm de espessura e diâmetro de 95 mm por um período de 6 horas. Para tanto, o corpo de prova é colocado entre duas células de material acrílico, sendo uma delas preenchida com uma solução

de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 3% (em massa), e a outra por uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N. Feito isso, essas extremidades são submetidas à uma diferença de potencial de 60V, que irão proporcionar a migração dos íons presentes nas soluções através do concreto, que por sua vez resultam em um valor de corrente elétrica crescente com o tempo.

Para cada um dos concretos executados, foram ensaiadas duas amostras cortadas de corpos de prova diferentes. Inicialmente, os corpos de prova, de dimensão $\phi 95 \times 190$ mm foram serrados de modo a reduzir sua altura/espessura para 51 ± 3 mm. De cada corpo de prova cilíndrico originalmente moldado foram retiradas duas fatias de sua parte central. Dessas, apenas uma delas era ensaiada, sendo irmã reservada para eventuais falhas no ensaio que pudessem vir a ocorrer. Após serrados os corpos de prova eram lavados, de modo a remover deposições de materiais finos originados no processo de corte e então secos ao ar.



Figuras 20: Identificação e demarcação das fatias internas a serem cortadas (a); amostras após o corte em fatias de 51 ± 3 mm de espessura para realização do ensaio de penetração de íons cloreto (b)

Devido ao seu longo processo de preparação, as amostras eram retiradas da cura por imersão uma semana antes da realização dos ensaios, deferindo dos tempos estabelecidos para o ensaio de resistência à compressão uniaxial. Após serradas, lavadas e secas, as amostras eram impermeabilizadas nas laterais com resina epóxi, de modo que apenas as bases de cada uma delas ficasse exposta.



Figura 21: Exemplo de amostras de concreto após impermeabilização da superfície lateral com resina epoxídica

Após a secagem da resina as amostras foram colocadas em dessecador contendo água deionizada¹⁴ e deaerada¹⁵ e então submetidas à uma pressão negativa superior a 50 mm de Hg com o auxílio de uma bomba de vácuo. Nesse ambiente, as amostras permaneceram por 18 ± 2 h antes de serem retiradas e acopladas às células de acrílico (Figura 22).

¹⁴ A água deionizada, também conhecida como água desmineralizada, passa por um tratamento que neutraliza sua carga elétrica através num processo de remoção dos íons presentes na água, eliminando-se minerais, metais e outros contaminantes.

¹⁵ A água deaerada, por sua vez, tem seus gases dissolvidos removidos, normalmente por um processo de submetê-la a ambiente de vácuo.



Figura 22: Corpos de prova imersos em água deionizada e deaerada

Para serem acopladas às células de acrílico, as fatias foram secas superficialmente e então aderidas com um material selante à base de poliuretano. Cada uma das células de medição era composta por dois blocos de acrílico contendo uma cavidade para colocação das soluções do ensaio e um fio de cobre para o direcionamento da tensão aplicada até o fluido; quatro anéis de cobre e duas telas metálicas circulares (Figura 23).



Figura 23: Conjunto utilizado na montagem da célula de ensaio: blocos de acrílico com cavidade para colocação das soluções de NaCl e NaOH, anéis de cobre e telas metálicas

Para a montagem das células, os blocos de ensaio eram testados quanto à sua condutividade antes da fixação das amostras de concreto junto a eles. Além disso, as telas metálicas eram posicionadas entre dois dos anéis devendo o conjunto ter contato direto com o fio de cobre de cada um dos blocos.

As soluções do ensaio eram preparadas com água deionizada e deaerada em Beckeres de vidro. Além disso, para promover homogeneidade às soluções, a diluição das partículas sólidas de NaCl e NaOH em água era feita com o auxílio de um agitador magnético (Figura 24).



Figura 24: agitador magnético utilizado para homogeneização das soluções de NaOH e NaCl

Com as células devidamente montadas, a solução de NaOH 0,3N era colocada junto ao ânodo e a solução de NaCl a 3,0% junto ao seu cátodo, conforme ilustra a Figura 25.

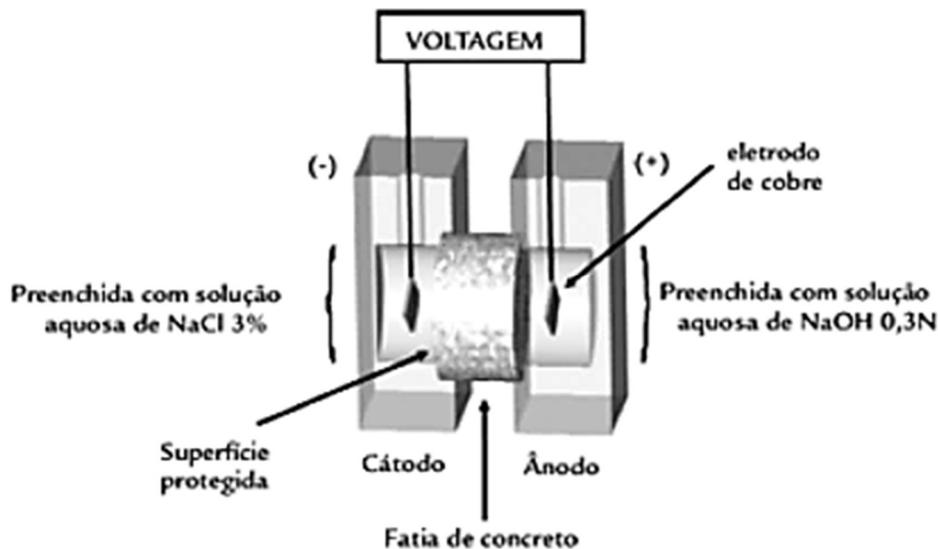


Figura 25: Disposição experimental da célula de migração de cloretos (FARIAS DE MEDEIRO et al., 2013)

Nesta pesquisa seis células foram ensaiadas por dia, sendo realizada apenas uma repetição do ensaio para cada um dos concretos avaliados no dia subsequente. Essas foram dispostas em paralelo de maneira a serem submetidas à mesma tensão. No mesmo circuito, um multímetro foi colocado em série à cada uma das células, permitindo a realização das medições de corrente. A configuração final do circuito pode ser verificada na Figura 26.

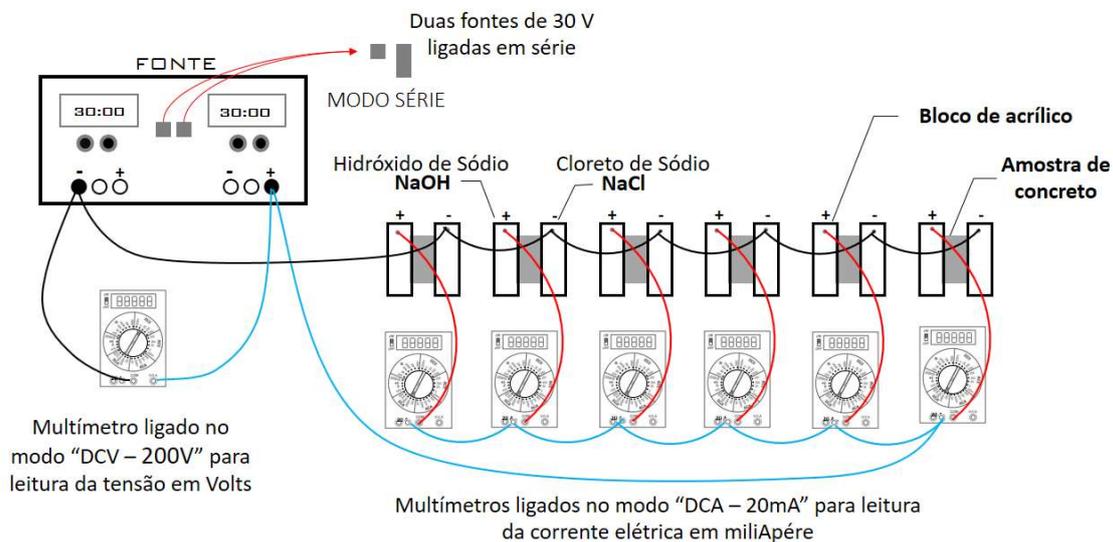


Figura 26: Representação esquemática da montagem do circuito para realização do ensaio de penetração de íons cloreto

Após o início da aplicação da tensão sobre o circuito, cujo valor era de $60 \pm 0,1V$, as medições de corrente passante em cada uma das células foram feitas a cada 30 minutos, por um período de 6 horas.



Figura 27: Medições de corrente elétrica em cada uma das células dada pelos multímetros em miliAmpère (mA)

Diante dos dados obtidos no ensaio, o cálculo da carga total passante pelos corpos de prova pode ser obtido seguindo duas metodologias distintas: pelo método de integração numérica dos trapézios, que leva em consideração todos os pontos medidos e é realizado por meio da (Equação 9); ou por meio de um ajuste de curva linear entre os pontos experimentais obtidos, seguida por sua integração no intervalo compreendido pelo ensaio. Nesse segundo caso, considerando-se a integração de uma função linear de corrente (dado em Ampère) em função do tempo (em segundos), cujo resultado deverá ser expresso em Coulombs.

$$Q = 900 (I_0 + 2I_{30} + 2I_{60} + 2I_{90} + \dots + 2I_{300} + 2I_{330} + I_{360}) \quad (\text{Equação 9})$$

Sendo:

Q a carga total passante, expressa em Coulombs;

I_t a corrente medida dada em Ampère, considerando-se o intervalo de tempo “t” em minutos decorrido a partir do início do ensaio.

Nesse trabalho, foi utilizada a segunda metodologia apresentada para obtenção dos resultados, tendo em vista seu caráter mais robusto às variações dos valores individuais de leitura. Ou seja, por essa abordagem os valores que possam ter sido erroneamente coletados ou sujeitos à alguma variação abrupta no instante da leitura afetam de uma forma menos significativa o resultado final.

Com relação a interpretação dos resultados obtidos após o cálculo da carga total passante, a ASTM C 1202 (ASTM, 2012) estabelece uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de cloretos conforme a Tabela 9.

Tabela 10: Penetração de íons cloreto baseado na carga passante (ASTM, 2012)

| Carga passante (Coulombs) | Penetração de íons cloreto |
|---------------------------|----------------------------|
| > 4000 | Alta |
| 2000 – 4000 | Moderada |
| 1000 – 2000 | Baixa |
| 100 - 1000 | Muito baixa |
| < 100 | Desprezível |

6 Apresentação e discussão dos resultados

Neste capítulo estão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para o programa experimental deste trabalho e análises dos dados. A resposta obtida nos ensaios foi avaliada estatisticamente com o auxílio do software Statística 7.0, por meio da Análise de Variância fatorial (ANOVA). E, através do teste F (distribuição de Fischer) pode-se verificar se as variáveis de controle possuíam ou não efeitos significativos sobre os resultados obtidos, bem como a significância das interações entre elas com intervalo de confiança de 95%. Os fatores analisados foram: a relação água/aglomerante (três níveis, sendo eles 0,43, 0,50 e 0,66); o uso do aditivo impermeabilizante por cristalização (com ou sem aditivo); a fissuração com 85% da carga última aos 7 dias de idade (fissurado e não fissurado) e idade do concreto na data de realização dos ensaios (28 dias e 56 dias).

6.1 Resistência à compressão uniaxial

6.1.1 Resultados aos 7 dias (data de fissuração)

Para a realização da etapa de fissuração dos corpos de prova aos 7 dias, três amostras de cada um dos grupos foram ensaiadas. Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 11. A Figura 28 apresenta também o ajuste das curvas de Abrams, que relacionam a resistência à compressão dos concretos a sua relação água/aglomerante.

Tabela 11: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 7 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação ¹⁶

| Familia ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Aditivo | Resistência à compressão 7 dias | | |
|------------------------------|--------------------------|---------|---------------------------------|---------------|-------------------|
| | | | média (MPa) | Desvio padrão | Coef. de variação |
| N-1 | 0,43 | não | 23,5 | 0,17 | 0,7% |
| N-2 | 0,50 | não | 17,5 | 0,90 | 5,1% |
| N-3 | 0,66 | não | 11,7 | 0,53 | 4,6% |
| P-1 | 0,43 | sim | 21,7 | 0,84 | 3,9% |
| P-2 | 0,50 | sim | 18,9 | 0,78 | 4,1% |
| P-3 | 0,66 | sim | 12,3 | 0,64 | 5,2% |

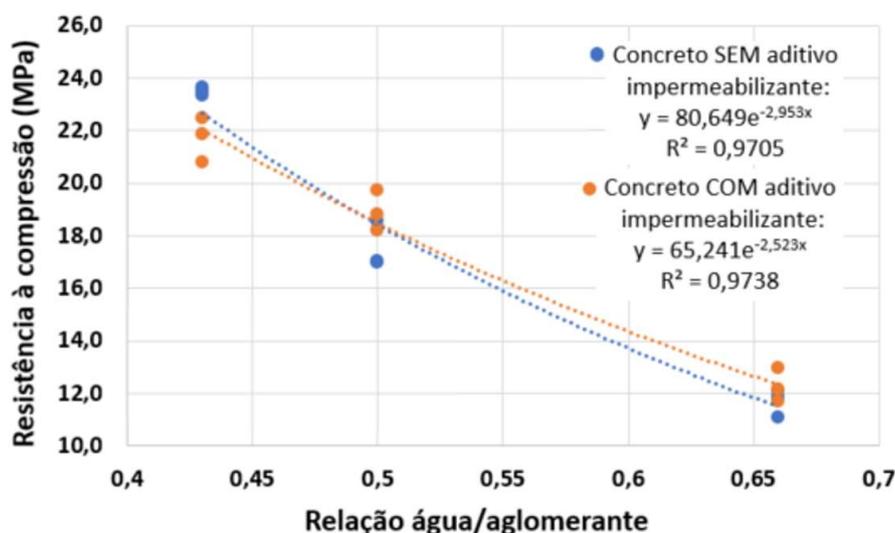


Figura 28: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água aglomerante para concretos ensaiados aos 7 dias de idade

¹⁶ A numeração dos traços é dada conforme a relação água/aglomerante (1-baixa, 2-média, 3-alta) e pelo uso do aditivo (N - sem aditivo, P - com aditivo).

Como esperado, a resistência a compressão das amostras é inversamente proporcional à relação água/aglomerante tanto para os concretos contendo aditivo impermeabilizante, quanto para os que não continham o produto na mistura. Esses resultados comprovam as leis de comportamento propostas por Abrams (1918) de que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento.

Além disso, nota-se que apesar de as curvas apresentarem comportamentos parecidos, o uso do aditivo tem influência sobre a dosagem do concreto. Enquanto que para relações água/aglomerante baixas, os concretos contendo aditivo apresentam resistência ligeiramente menor do que os concretos convencionais, o comportamento se inverte quando há um aumento da quantidade de água na mistura. Os motivos que ocasionam essa influência devem ser melhor estudados para validação dessa constatação experimental.

6.1.2 Resultados aos 28 dias e 56 dias

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias são apresentados na Tabela 12, e os valores estão expressos em megaPascal (MPa). As resistências médias foram adquiridas por meio da ruptura de três corpos de prova para cada uma das famílias ou grupos de concreto ensaiados.

Tabela 12: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 28 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação

| | Família ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Fissuração | Resistência à compressão 28 dias | | |
|-------------|------------------------------|--------------------------|------------|----------------------------------|---------------|-------------------|
| | | | | Média (MPa) | Desvio padrão | Coef. de variação |
| SEM aditivo | N-1 | 0,43 | não | 35,98 | 0,88 | 2,5% |
| | FN-1 | | sim | 35,80 | 0,87 | 2,4% |
| | N-2 | 0,50 | não | 24,33 | 0,60 | 2,5% |
| | FN-2 | | sim | 26,67 | 3,69 | 13,8% |
| | N-3 | 0,66 | não | 18,21 | 0,40 | 2,2% |
| | FN-3 | | sim | 18,85 | 0,42 | 2,2% |
| COM aditivo | P-1 | 0,43 | não | 33,06 | 1,03 | 3,1% |
| | FP-1 | | sim | 36,22 | 2,02 | 5,6% |
| | P-2 | 0,50 | não | 26,30 | 1,04 | 4,0% |
| | FP-2 | | sim | 25,96 | 3,11 | 12,0% |
| | P-3 | 0,66 | não | 18,04 | 0,78 | 4,3% |
| | FP-3 | | sim | 16,93 | 1,24 | 7,3% |

As médias das resistências de acordo com o traço, uso ou não do aditivo e fissuração das amostras ou não, estão mostradas na Figura 29.

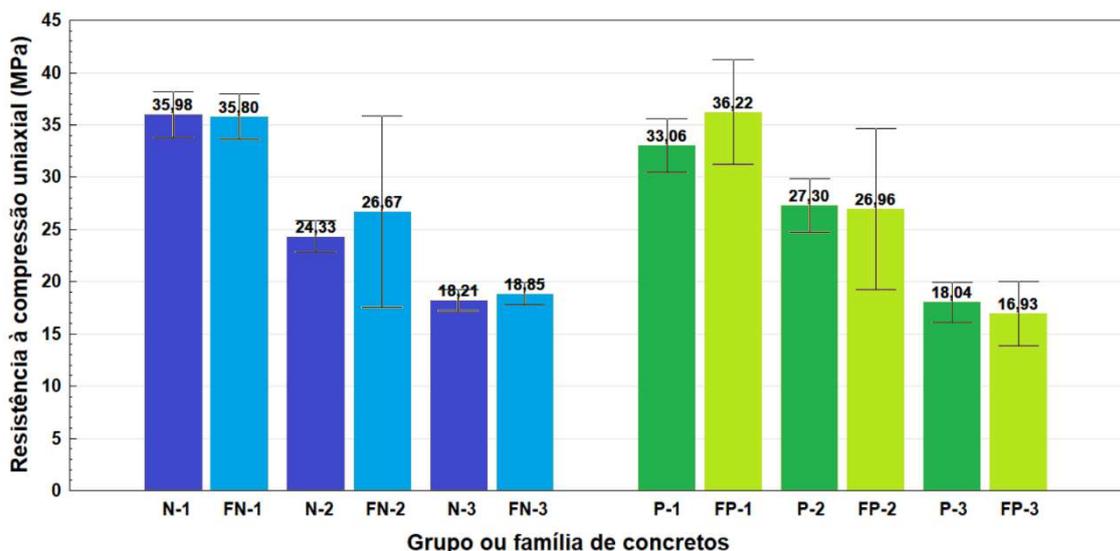


Figura 29: Resistência a compressão média dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 28 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam a variabilidade interna do grupo considerando-se uma distribuição normal com nível de significância de 5%¹⁷

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 56 dias são apresentados na Tabela 13 e na Figura 30.

Tabela 13: Relação dos resultados obtidos nos ensaios de resistência à compressão axial aos 56 dias: valores médios calculados, desvio padrão e coeficiente de variação

| | Família ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Fissuração | Resistência à compressão 56 dias | | |
|-------------|------------------------------|--------------------------|------------|----------------------------------|---------------|-------------------|
| | | | | Média (MPa) | Desvio padrão | Coef. de variação |
| SEM aditivo | N-1 | 0,43 | não | 37,91 | 1,46 | 3,8% |
| | FN-1 | | sim | 42,23 | 1,85 | 4,4% |
| | N-2 | 0,50 | não | 30,91 | 0,81 | 2,6% |
| | FN-2 | | sim | 30,60 | 0,36 | 1,2% |
| | N-3 | 0,66 | não | 22,03 | 0,74 | 3,4% |
| | FN-3 | | sim | 22,10 | 0,84 | 3,8% |
| COM aditivo | P-1 | 0,43 | não | 32,64 | 2,00 | 6,1% |
| | FP-1 | | sim | 41,90 | 0,29 | 0,7% |
| | P-2 | 0,50 | não | 31,32 | 0,09 | 0,3% |
| | FP-2 | | sim | 31,86 | 0,44 | 1,4% |
| | P-3 | 0,66 | não | 22,64 | 2,19 | 9,7% |
| | FP-3 | | sim | 22,42 | 0,76 | 3,4% |

¹⁷ A numeração dos traços é dada conforme a relação água/aglomerante (1-baixa, 2-média, 3-alta) e pelo uso do aditivo (N - sem aditivo, P - com aditivo) e fissuração (F – Fissurado). Por exemplo, o traço FN-1 representa um concreto com relação água/aglomerante baixa, sem aditivo e fissurado, e o traço P – 2 um concreto com relação água/aglomerante intermediária, com aditivo e não fissurado.

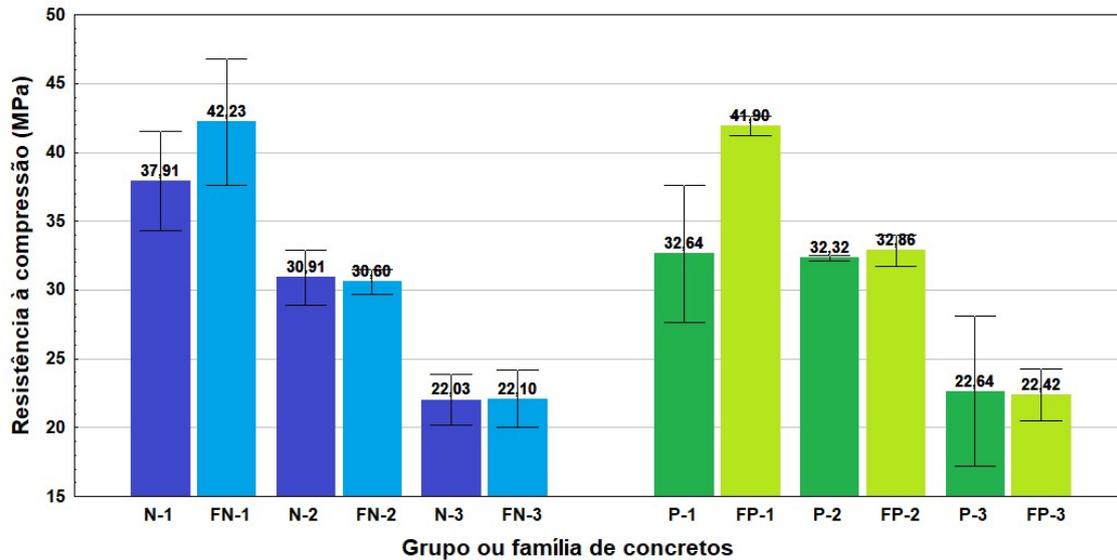


Figura 30: Resistência a compressão média dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 56 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam a variabilidade interna do grupo considerando-se uma distribuição normal com nível de significância de 5%

A fim de melhor entender a origem das variações relativas à cada um dos fatores analisados e suas interações, foi feita a análise estatística de variância (ANOVA). A Tabela 14 apresenta um resumo da análise, apresentando os graus de liberdade, médias quadradas calculadas, valor F Fisher para avaliação relativa da variação causada pelos fatores e suas interações com base na variação intrínseca ou experimental e valor $-p$. Como critério de análise, adotou-se a probabilidade de 5% como limite de significância, sendo assim, fatores cujo valor-p calculado excedem o valor fixado foram considerados não significativos.

Tabela 14: ANOVA – Resistência à compressão uniaxial
(S: valor significativo, NS: valor não significativo se p for menor do que 5%)

| Fonte da variação | Graus de liberdade | Média quadrada | F | Valor - p | Significância |
|---|--------------------|----------------|---------|-----------|---------------|
| Fatores analisados individualmente: | | | | | |
| Relação água/aglomerante (Fator A) | 2 | 1698 | 796,438 | 0,000000 | S |
| Aditivo impermeabilizante (Fator B) | 1 | 1 | 0,325 | 0,571467 | NS |
| Fissuração 85% da carga última aos 7 dias (fator C) | 1 | 41 | 19,334 | 0,000061 | S |
| Idade do concreto (Fator D) | 1 | 341 | 159,868 | 0,000000 | S |
| Interações entre dois fatores: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B | 2 | 21 | 9,961 | 0,000241 | S |
| Interação: Fatores A x C | 2 | 32 | 14,949 | 0,000009 | S |
| Interação: Fatores A x D | 2 | 6 | 2,690 | 0,078127 | NS |
| Interação: Fatores B x C | 1 | 2 | 1,142 | 0,290600 | NS |
| Interação: Fatores B x D | 1 | 0 | 0,007 | 0,932179 | NS |
| Interação: Fatores C x D | 1 | 11 | 4,933 | 0,031095 | S |
| Interações entre três fatores: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B x C | 2 | 13 | 6,123 | 0,004281 | S |
| Interação: Fatores A x B x D | 2 | 4 | 1,655 | 0,201753 | NS |
| Interação: Fatores A x C x D | 2 | 16 | 7,726 | 0,001233 | S |
| Interação: Fatores B x C x D | 1 | 5 | 2,533 | 0,118044 | NS |
| Interações entre os quatro fatores analisados: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B x C x D | 2 | 0 | 0,234 | 0,792414 | NS |
| Erro | 48 | 2 | | | |

Dessa análise foi possível concluir que, dos fatores analisados, a influência observada individualmente foi significativa para a relação água/aglomerante, fissuração e idade dos concretos. O uso do aditivo, não teve efeitos significativos quando visto individualmente.

Por outro lado, quando a análise passa pelas interações entre os fatores, o uso do aditivo acaba se tornando significativo em boa parte das combinações de fatores, tendo influência conjunta com a relação água/aglomerante e a fissuração dos concretos. Além disso, outras interações expressivas foram a interação entre a relação água/aglomerante e a fissuração, e a interação entre a fissuração e a idade dos concretos.

Os itens seguintes irão discorrer sobre possíveis justificativas aos resultados obtidos nessa análise.

6.1.3 Influência da relação água/aglomerante e idade sobre a resistência à compressão

Tanto a relação água/aglomerante quanto a idade dos concretos são variáveis significativas no modelo estatístico aplicado aos resultados de resistência à compressão.

Na Figura 31 e Figura 32 é possível observar que a resistência à compressão diminui à medida que aumenta a relação água/aglomerante para todos os traços estudados, conforme esperado. Isso comprova as leis de comportamento do concreto, de que a resistência à compressão é inversamente proporcional à relação água/cimento. No entanto, o fato de haver interações significativas desse fator com o uso ou não do aditivo e também com a fissuração do concreto aos 7 dias, a tendência de comportamento pode apresentar pequenas diferenças no ajuste das curvas quando esses são analisados em conjunto.

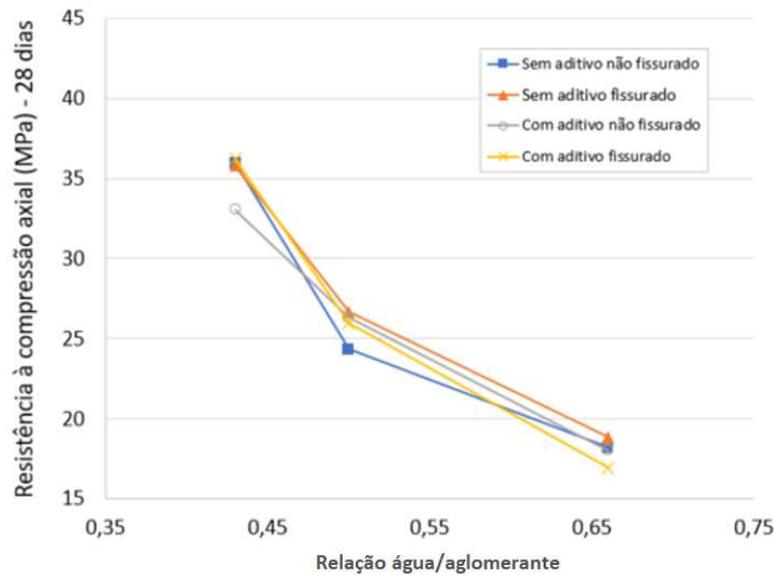


Figura 31: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 28 dias

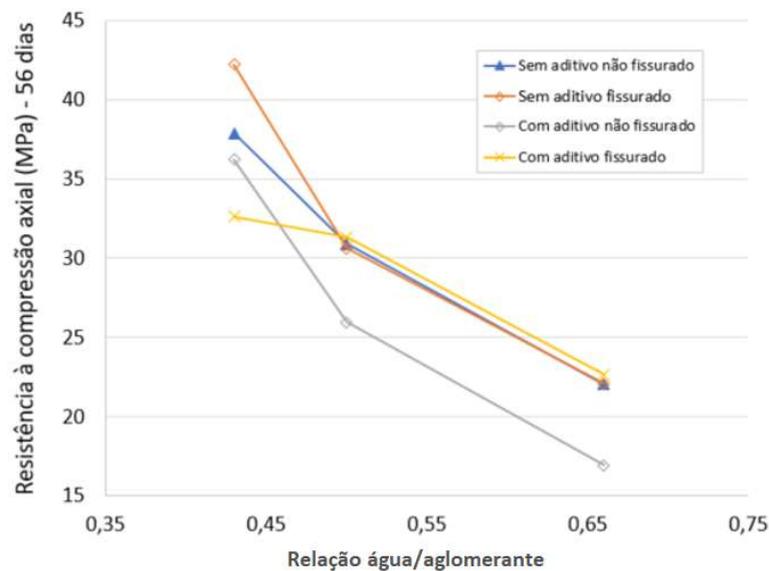


Figura 32: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 56 dias

Segundo Metha e Monteiro (2014), esse comportamento é facilmente justificado pelo enfraquecimento progressivo causado à matriz cimentícia pelo aumento da porosidade decorrente do aumento relativo da água na mistura. Os autores também apontam que concretos com baixo consumo de água tendem a promover uma melhoria da resistência da zona de transição e que os cristais formados pelos produtos de hidratação tendem a apresentar tamanhos menores, logo, deverão apresentar uma área superficial correspondente maior que intensificam as forças de contato responsáveis pelas propriedades mecânicas do concreto.

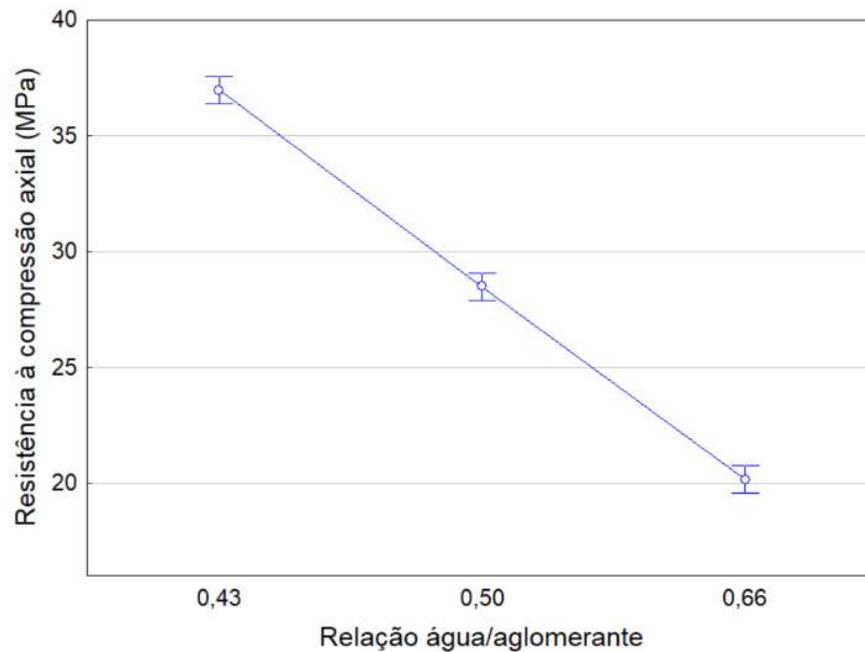


Figura 33 : Efeito da relação água/aglomerante sobre a resistência a compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Com relação à idade dos concretos na data de realização dos ensaios, observa-se um progressivo aumento dos valores de resistência à compressão. A Figura 34 e Figura 35 ilustra esse comportamento em todos os traços avaliados, independentemente da fissuração ou não do concreto aos 7 dias.

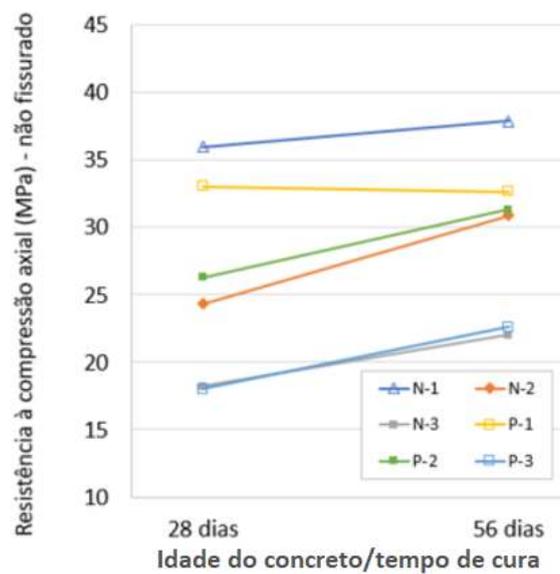


Figura 34: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras não fissuradas

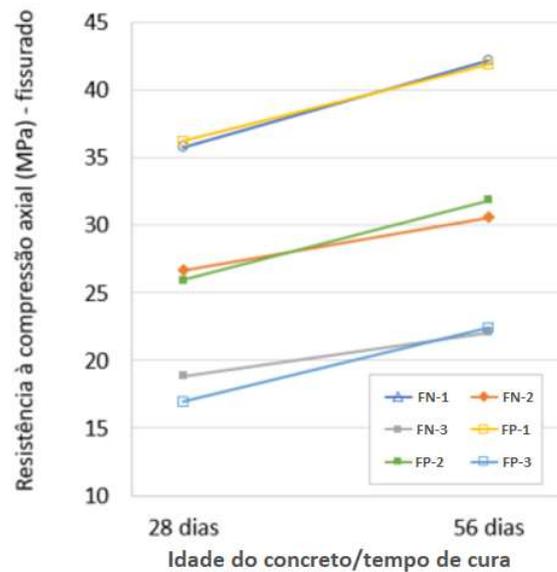


Figura 35: Resistência à compressão em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras fissuradas aos 7 dias (direita)

De modo geral, o aumento médio proporcionado aos concretos devido ao tempo de cura entre os 28 para os 56 dias foi de 16,5%. Esse valor é relativamente alto comparativamente à concretos produzidos com outros tipos de cimento. Isso ocorre porque a taxa de hidratação do cimento está relacionada a existência de adições. Em geral, cimentos contendo escórias de alto-forno ou pozolana (como é o caso do cimento utilizado na pesquisa) apresentam uma hidratação mais lenta até os 28 dias, mas posteriormente podem apresentar um ganho de resistência maior assim que tiverem atingido o mesmo grau de hidratação dos cimentos rápidos (METHA E MONTEIRO, 2014).

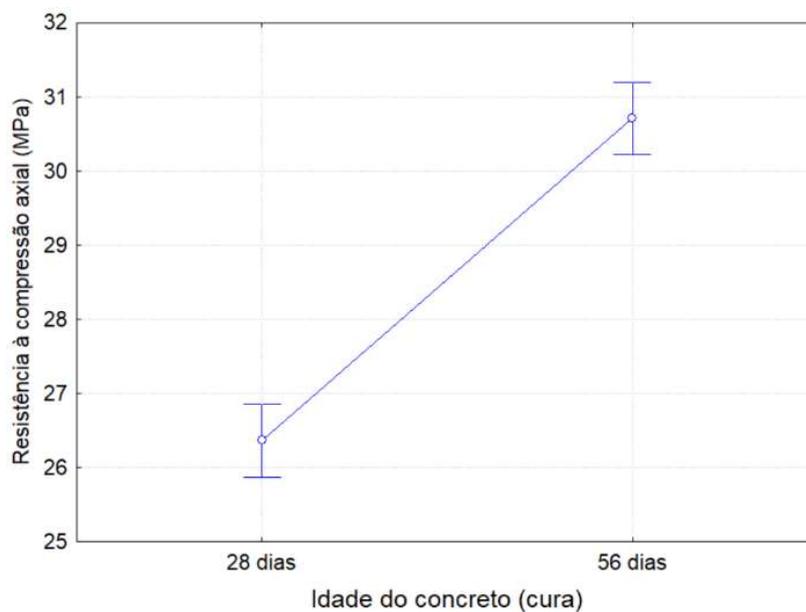


Figura 36: Efeito da idade dos concretos/cura sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

6.1.4 Influência da fissuração sobre a resistência à compressão

O modelo estatístico também apresenta influência significativa da fissuração sobre os resultados de resistência à compressão, quando avaliada individualmente (Figura 37). No entanto, por se tratar do fator mais diretamente relacionado a ocorrência do fenômeno de autocicatrização, o entendimento das interações desse fator com os demais pode fornecer dados mais completos acerca de como a relação água/aglomerante, idade do concreto e uso do aditivo impermeabilizante afetam o potencial de cicatrização do material.

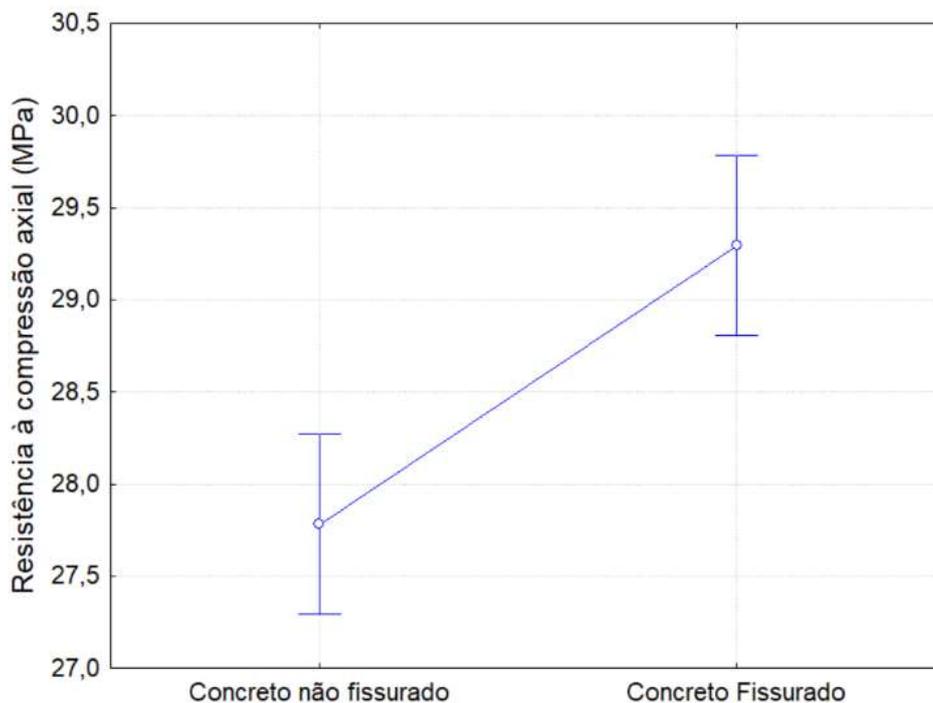


Figura 37: Efeito isolado da fissuração sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Tanto aos 28 dias quanto aos 56 dias, o aumento da resistência a compressão pôde ser observado nos traços com relações água/aglomerante 0,43, que são os que apresentam maior disponibilidade de partículas anidras para ocorrência da autocicatrização. Para relações água/aglomerante de 0,50 e 0,66, o aumento ou diminuição da resistência à compressão não foram tão significativos.

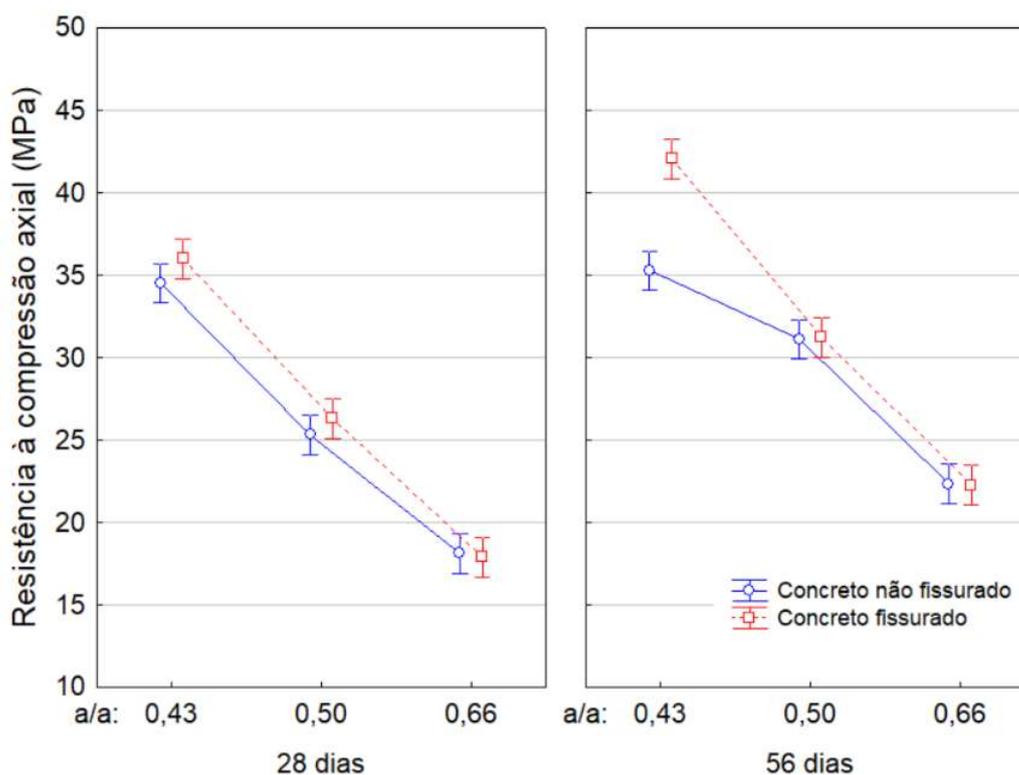


Figura 38: Efeito da interação entre a fissuração, relação água/aglomerante e idade dos concretos sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Essa constatação experimental remete às discussões apresentadas no final do item 4.2, indicando que pode ter ocorrido uma densificação da matriz cimentícia. Ou seja, o fenômeno da cicatrização se estende além da fissura, de modo que a cristalização dos grãos anidros no interior da fissura e dos poros comunicados promove a densificação da pasta de cimento (Huang et al., 2016) o que pode ser uma justificativa válida para o aumento da resistência observado. Para demais relações água/aglomerante, o aumento ou diminuição da resistência à compressão não foram tão significativos.

Vieira (2008) também verificou o aumento da resistência à compressão em concretos decorrente da microfissuração imposta por carregamento aos concretos estudados com o mesmo tipo de cimento. Em sua pesquisa, a autora conseguiu pontuar de forma clara o aumento da resistência em concretos com relações água/cimento de 0,35 e 0,50, que ela atribui à possibilidade de entrada de água nos interstícios do concreto possibilitado pela abertura das microfissuras, favorecendo a hidratação dos compostos ainda não hidratados. Para relações água/cimento maiores os níveis de resistência à compressão permaneceram praticamente no mesmo patamar, que pode ser justificado pelo progressivo enfraquecimento da matriz devido ao aumento da porosidade.

Bernardino da Silva (2016), que avaliou a retração por secagem em concretos irmãos dos de Vieira (2008), complementa a justificativa ao aumento da resistência à compressão. Segundo a autora, isso pode ser atribuído também à compactação da matriz cimentícia e a quebra dos compostos menos resistentes que compõem a sua microestrutura. Nesse processo, ocorre o preenchimento dos vazios de maior dimensão além da exposição dos grãos anidros de cimento.

Outro aspecto interessante observado é o aumento da variabilidade dos resultados obtidos nos ensaios realizados aos 28 dias causado pelo processo de fissuração, com posterior inversão do comportamento aos 56 dias. Em quase todas as idades e traços avaliados, a dispersão dos

resultados encontrados nos concretos fissurados testados aos 28 dias foi maior em relação aos resultados obtidos pelo grupo irmão não fissurado. Aos 56 dias, não foi possível observar de forma clara essa diferença de dispersão, havendo maior similaridade dos padrões de variabilidade entre as amostras fissuradas e não fissuradas.

Essa influência sobre a variabilidade dos resultados pode ser justificada pela impossibilidade de controlar o processo de microfissuração dos concretos, que tende a ser diferente de uma amostra para outra apesar de a carga de fissuração ser a mesma. Ou seja, uma série de fatores agregam variabilidade à resistência do concreto e conseqüentemente à sua tendência de fissuração, seja pela distribuição dos agregados e dos poros no interior do corpo de prova, por irregularidades decorrentes da retificação das bases e eventuais excentricidades que possam surgir durante a aplicação da carga, variações geométricas e entre outros fatores intrínsecos ao ensaio realizado e às amostras avaliadas. Dessa forma, quando aplicada à uma mesma carga de fissuração, cada corpo de prova tende a responder de maneira diferente, ocasionando fissuras com configurações distintas.

Como aos 28 dias, os concretos ainda são relativamente jovens em relação ao processo de carregamento realizado, observou-se um aumento da variabilidade nos resultados de resistência à compressão (Figura 29). No entanto, dado o avanço das idade e conseqüente evolução dos processos de autocicatrização e hidratação continuada, as microfissuras tendem a ser fechadas, e com isso é observada uma diminuição da variabilidade aos 56 dias.

6.1.5 Influência do uso do aditivo sobre a resistência à compressão e potencial de recuperação das propriedades mecânicas por autocicatrização

Como indicativo de desempenho do produto avaliado quanto à resistência à compressão, a análise dos dados por meio da ANOVA evidenciam que não houve efeito significativo do aditivo impermeabilizante por cristalização isoladamente. No entanto, quando são avaliados juntamente com a relação água/aglomerante, os efeitos são significativos. Ou seja, a interação entre os fatores A (relação água/aglomerante) x B (aditivo impermeabilizante) e mesmo a interação de três fatores A x B x C (fissuração ou não do concreto) são estatisticamente comprovadas.

Além da influência que a quantidade relativa de água da mistura exerce, conforme discutido no item anterior, percebe-se, com a Figura 29, Figura 30 e Figura 39 que o aumento é mais expressivo nos concretos contendo aditivo.

O traço contendo $a/a=0,43$ apresentou um aumento de 11,4% nos concretos convencionais aos 56 dias, enquanto que para os concretos contendo aditivo impermeabilizante o aumento foi de 28,4%. Além disso, o mesmo traço, já aos 28 dias apresentou aumento da resistência de 9,6% para os traços contendo o aditivo, enquanto o concreto convencional apresentou diferença desprezível entre o concreto fissurado e não fissurado.

Cabe ressaltar ainda, que mesmo que a análise estatística dos resultados obtidos não tenha mostrado diferença significativa para os traços contendo aditivo para relações água/aglomerante maiores, as Figura 32, Figura 34 e Figura 35 demonstram uma tendência de melhoria nos concretos contendo o produto. Cappellesso (2016) avaliou a resistência à compressão de concretos contendo o mesmo produto e identificou melhorias nos resultados aos 28 dias, tendo-se os valores de relação água/aglomerante de 0,41.

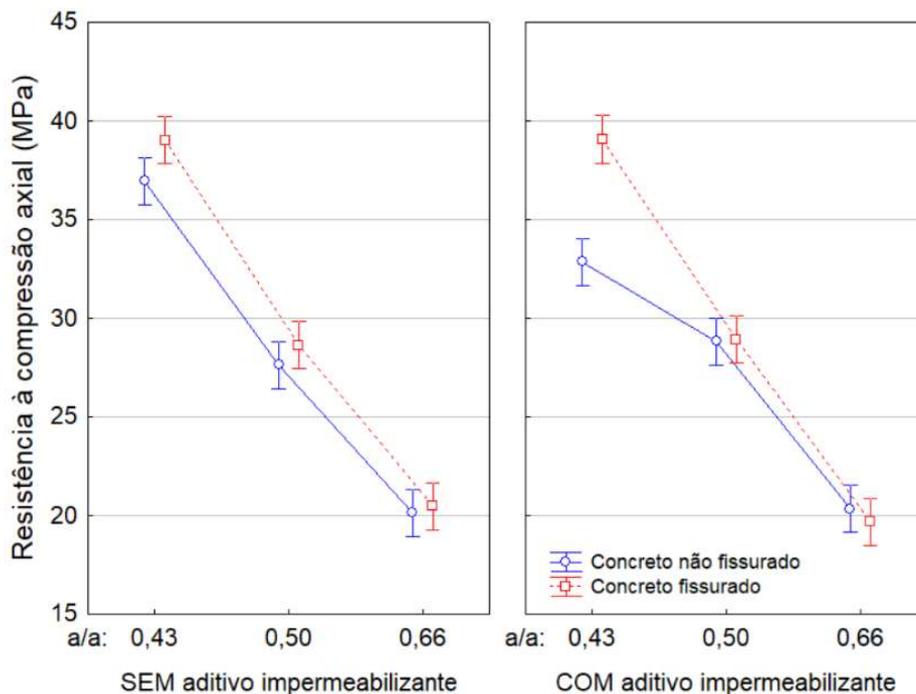


Figura 39: Efeito da interação entre a fissuração, relação água aglomerante e do uso de aditivo impermeabilizante dos concretos sobre a resistência à compressão. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Mesmo que o ganho de resistência relativo tenha sido maior para os concretos contendo aditivo impermeabilizante, os valores absolutos de resistência dos concretos não fissurados observados foram menores. Percebe-se que o uso do aditivo altera o comportamento da resistência original do concreto. Assim como nos 7 dias, as curvas de Abrams aos 28 dias e 56 dias são modificadas pelo uso do aditivo. Nota-se que o uso do produto promove uma pequena redução da resistência à compressão para relações água/aglomerante mais baixas, e aumento dos valores para relações água/aglomerante baixas (Figura 40 e Figura 41).

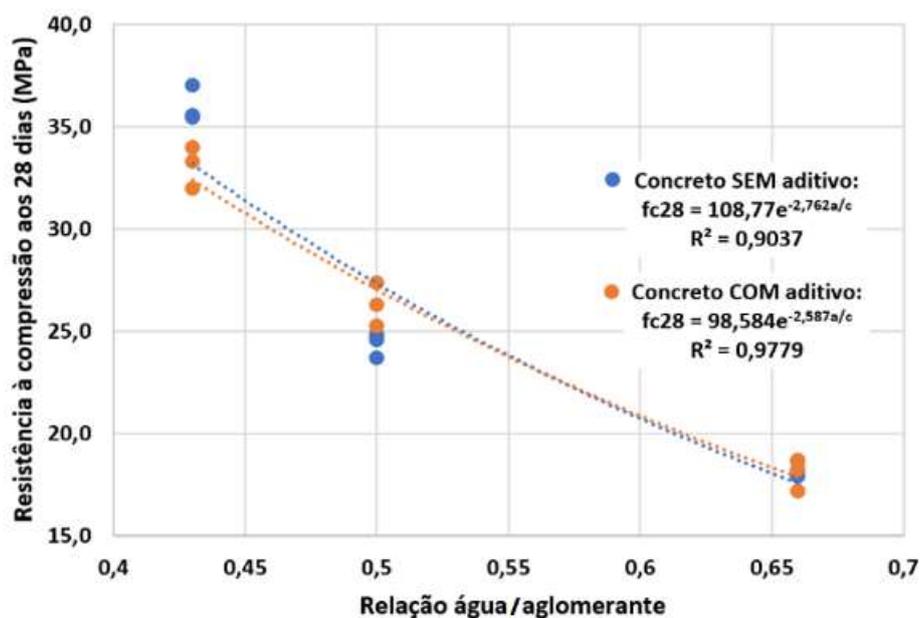


Figura 40: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água/aglomerante para concretos ensaiados aos 28 dias de idade

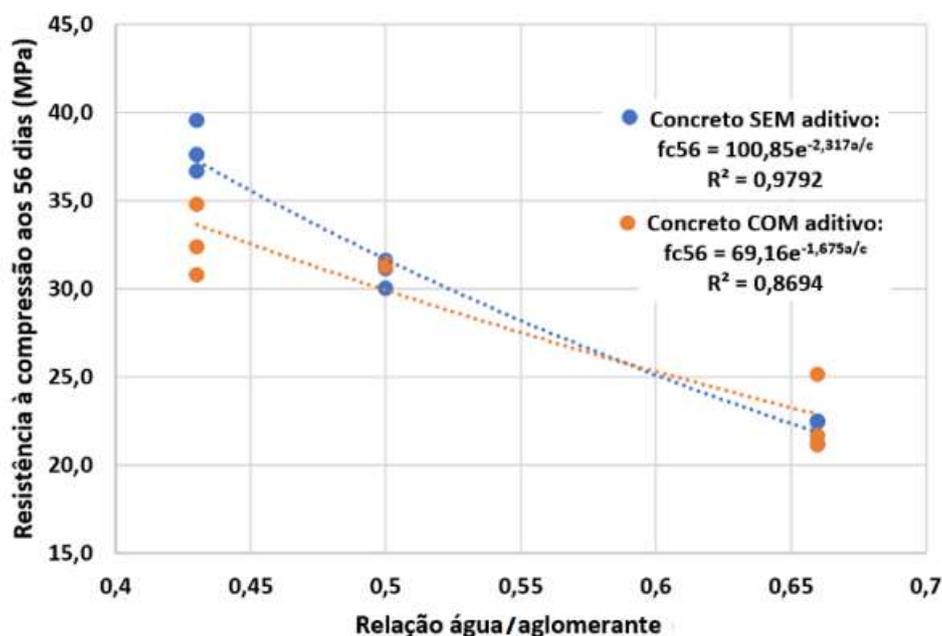


Figura 41: Ajuste das curvas de resistência à compressão versus relação água/aglomerante para concretos ensaiados aos 56 dias de idade

6.2 Penetração de íons cloreto

6.2.1 Resultados aos 28 dias e 56 dias

Os resultados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 28 dias são apresentados na Tabela 15, e os valores da carga elétrica total absorvida estão expressos em Coulomb. Os dados foram obtidos por meio da ruptura de dois corpos de prova para cada uma das famílias ou grupos de concreto ensaiados.

Tabela 15: Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de penetração de íons cloreto aos 28 dias

| | Família ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Fissuração | Carga elétrica passante no ensaio 28 dias | | |
|-------------|------------------------------|--------------------------|------------|---|---------------|-------------------|
| | | | | Média (Coulomb) | Desvio padrão | Coef. de variação |
| SEM aditivo | N-1 | 0,43 | não | 1761,31 | 77,66 | 4,4% |
| | FN-1 | | sim | 1797,29 | 71,43 | 4,0% |
| | N-2 | 0,50 | não | 1815,06 | 155,08 | 8,5% |
| | FN-2 | | sim | 1999,08 | 66,15 | 3,3% |
| | N-3 | 0,66 | não | 3131,34 | 488,28 | 15,6% |
| | FN-3 | | sim | 2545,03 | 48,48 | 1,9% |
| COM aditivo | P-1 | 0,43 | não | 1561,02 | 41,36 | 2,6% |
| | FP-1 | | sim | 1638,78 | 2,11 | 0,1% |
| | P-2 | 0,50 | não | 1741,04 | 27,14 | 1,6% |
| | FP-2 | | sim | 2021,34 | 222,17 | 11,0% |
| | P-3 | 0,66 | não | 3083,73 | 352,58 | 11,4% |
| | FP-3 | | sim | 2470,71 | 402,52 | 16,3% |

As médias das cargas elétricas totais passantes durante os ensaios de acordo com o traço, uso ou não do aditivo e fissuração ou não das amostras estão mostradas na Figura 42.

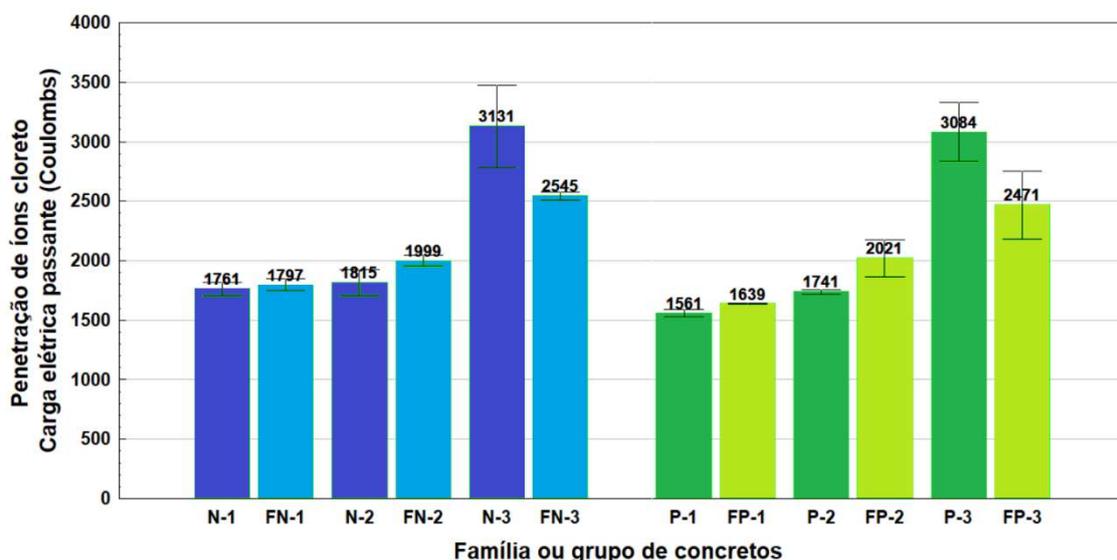


Figura 42: Carga elétrica passante média obtida no ensaio de penetração de íons cloreto dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 28 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam os resultados individuais obtidos no ensaio

Os resultados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 56 dias são apresentados na Tabela 16 e na Figura 43.

Tabela 16: Média e desvio padrão dos resultados obtidos nos ensaios de penetração de íons cloreto aos 56 dias

| | Família ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Fissuração | Carga elétrica passante no ensaio 56 dias | | |
|-------------|------------------------------|--------------------------|------------|---|---------------|-------------------|
| | | | | Média (Coulomb) | Desvio padrão | Coef. de variação |
| SEM aditivo | N-1 | 0,43 | não | 789,15 | 81,18 | 10,3% |
| | FN-1 | | sim | 810,83 | 23,26 | 2,9% |
| | N-2 | 0,50 | não | 892,41 | 123,83 | 13,9% |
| | FN-2 | | sim | 983,38 | 110,32 | 11,2% |
| | N-3 | 0,66 | não | 1129,68 | 44,65 | 4,0% |
| | FN-3 | | sim | 1154,52 | 142,75 | 12,4% |
| COM aditivo | P-1 | 0,43 | não | 714,05 | 16,80 | 2,4% |
| | FP-1 | | sim | 738,80 | 22,44 | 3,0% |
| | P-2 | 0,50 | não | 835,26 | 59,45 | 7,1% |
| | FP-2 | | sim | 866,16 | 57,10 | 6,6% |
| | P-3 | 0,66 | não | 1367,45 | 160,49 | 11,7% |
| | FP-3 | | sim | 1406,24 | 161,78 | 11,5% |

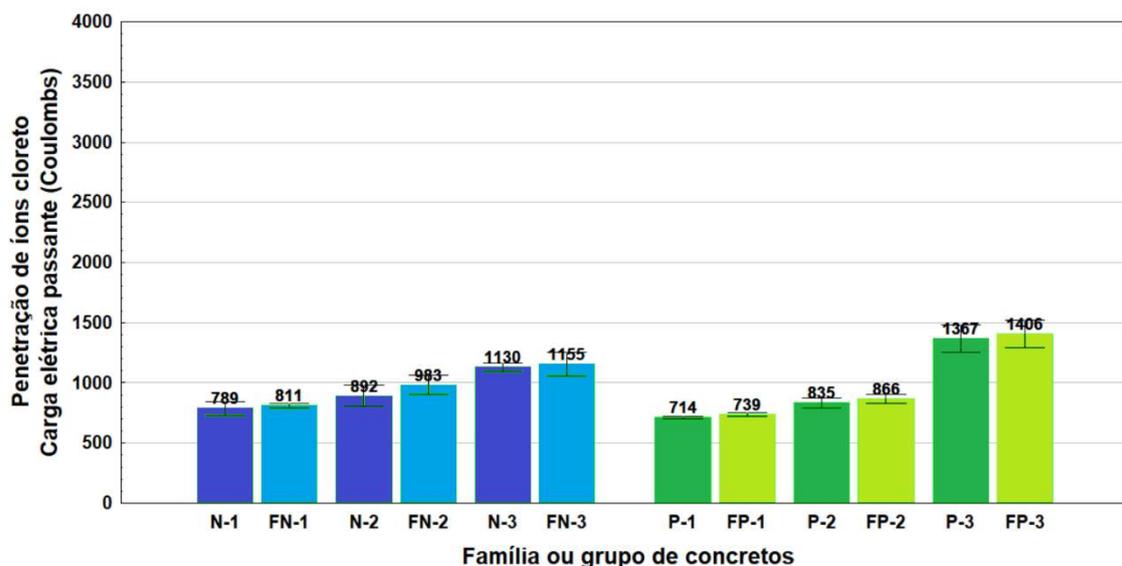


Figura 43: Carga elétrica passante média obtida no ensaio de penetração de íons cloreto dos grupos ou famílias de concreto avaliadas aos 56 dias após a moldagem. Traços superior e inferior junto as barras representam os resultados individuais obtidos no ensaio

Analogamente ao tratamento estatístico feito anteriormente para avaliação da resistência à compressão, os dados também foram tratados segundo à abordagem da análise de variância (ANOVA). A Tabela 14 apresenta um resumo da análise. Também foi estabelecido como critério de análise a probabilidade de 5% como limite de significância.

Tabela 17: ANOVA – Carga elétrica passante no ensaio de penetração de íons cloreto (S: valor significativo, NS: valor não significativo se p for menor do que 5%)

| Fonte da variação | Graus de liberdade | Média quadrada | F | Valor - p | Significância |
|---|--------------------|----------------|---------|-----------|---------------|
| Fatores analisados individualmente: | | | | | |
| Relação água/aglomerante (Fator A) | 2 | 2921990 | 95,413 | 0,000000 | S |
| Aditivo impermeabilizante (Fator B) | 1 | 11072 | 0,362 | 0,553287 | NS |
| Fissuração 85% da carga última aos 7 dias (fator C) | 1 | 12632 | 0,412 | 0,526809 | NS |
| Idade do concreto (Fator D) | 1 | 16049446 | 524,068 | 0,000000 | S |
| Interações entre dois fatores: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B | 2 | 49741 | 1,624 | 0,217992 | NS |
| Interação: Fatores A x C | 2 | 201069 | 6,566 | 0,005317 | S |
| Interação: Fatores A x D | 2 | 454109 | 14,828 | 0,000064 | S |
| Interação: Fatores B x C | 1 | 389 | 0,013 | 0,911203 | NS |
| Interação: Fatores B x D | 1 | 40888 | 1,335 | 0,259267 | NS |
| Interação: Fatores C x D | 1 | 60667 | 1,981 | 0,172107 | NS |
| Interações entre três fatores: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B x C | 2 | 241 | 0,008 | 0,992150 | NS |
| Interação: Fatores A x B x D | 2 | 33765 | 1,103 | 0,348268 | NS |
| Interação: Fatores A x C x D | 2 | 184277 | 6,017 | 0,007619 | S |
| Interação: Fatores B x C x D | 1 | 1986 | 0,065 | 0,801141 | NS |
| Interações entre os quatro fatores analisados: | | | | | |
| Interação: Fatores A x B x C x D | 2 | 2457 | 0,080 | 0,923161 | NS |
| Erro | 24 | 30625 | | | |

Dessa análise foi possível concluir que, dos fatores analisados, a influência observada individualmente foi significativa para a relação água/aglomerante e a idade dos concretos. O uso do aditivo nem a fissuração por si só tiveram efeitos significativos individualmente.

Por outro lado, quando a análise passa pelas interações entre os fatores, a fissuração acaba se tornando significativa quando avaliada em conjunto com a relação água/aglomerante e idade dos concretos.

Não há significância do uso do aditivo impermeabilizante quanto a durabilidade, nem de sua interação com outros fatores. Isso permite afirmar que o uso ou não do produto não afeta o desempenho final do concreto quanto a durabilidade, sob o ponto de vista da penetração de íons cloreto.

6.2.2 Influência da relação água/aglomerante e idade sobre a durabilidade do concreto

Conforme era esperado, a relação água/aglomerante consta como variável significativa no modelo estatístico aplicado aos resultados de penetração de íons cloretos. Nota-se, a partir dos resultados que existe uma tendência de aumento da penetração dos íons através das amostras proporcional ao aumento da quantidade relativa de água presente nas misturas. Esse comportamento foi observado em todos os concretos avaliados (Figura 44 e Figura 45).

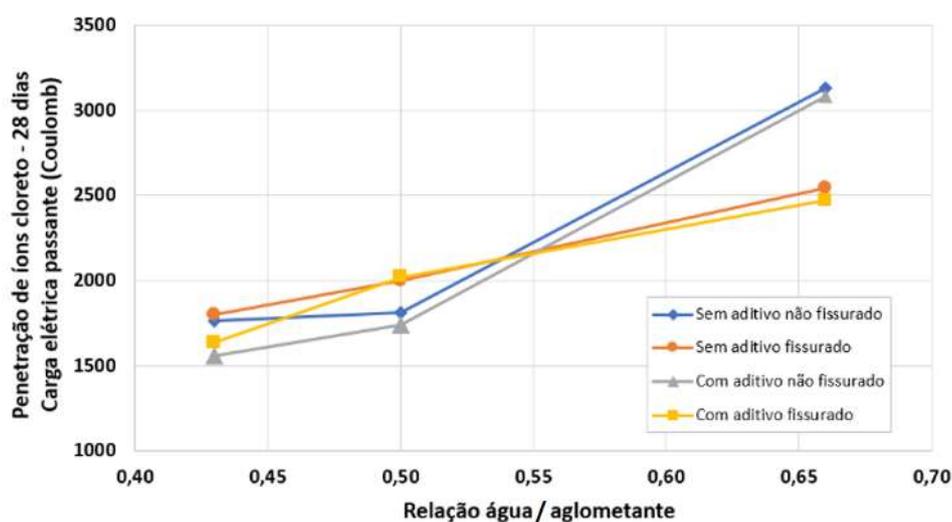


Figura 44: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 28 dias

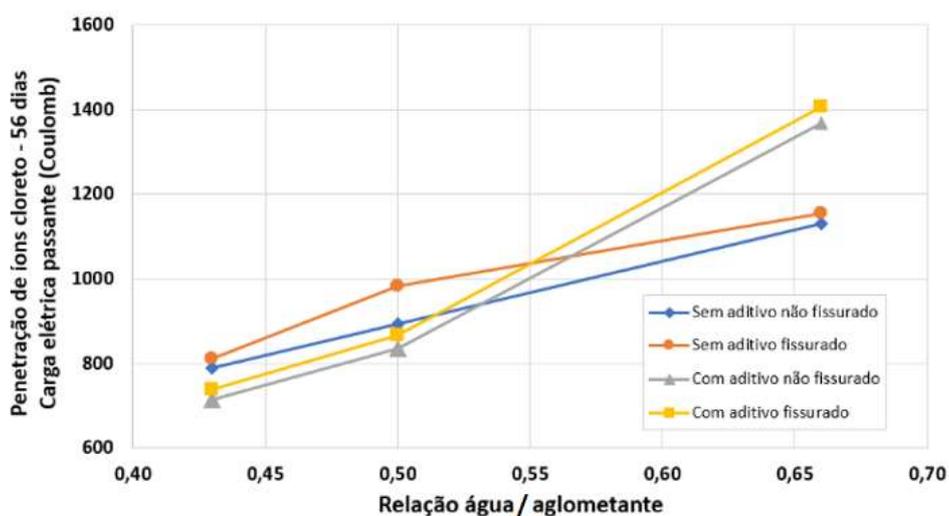


Figura 45: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da fissuração por carregamento. Resultados obtidos aos 56 dias

A redução da relação água/aglomerante promove uma redução da carga total passante devido à diminuição da porosidade do concreto, que torna a estrutura da pasta mais fechada e densa, dificultando a passagem dos íons através do material (HOFFMAN, 2001; VENQUIARUTO, 2017). Isso ocorre porque o teor da água de amassamento do concreto determina os espaços não preenchidos depois de a água ter sido consumida pelas reações de hidratação do cimento ou pela evaporação para o ambiente (MEHTA e MONTEIRO, 2014).

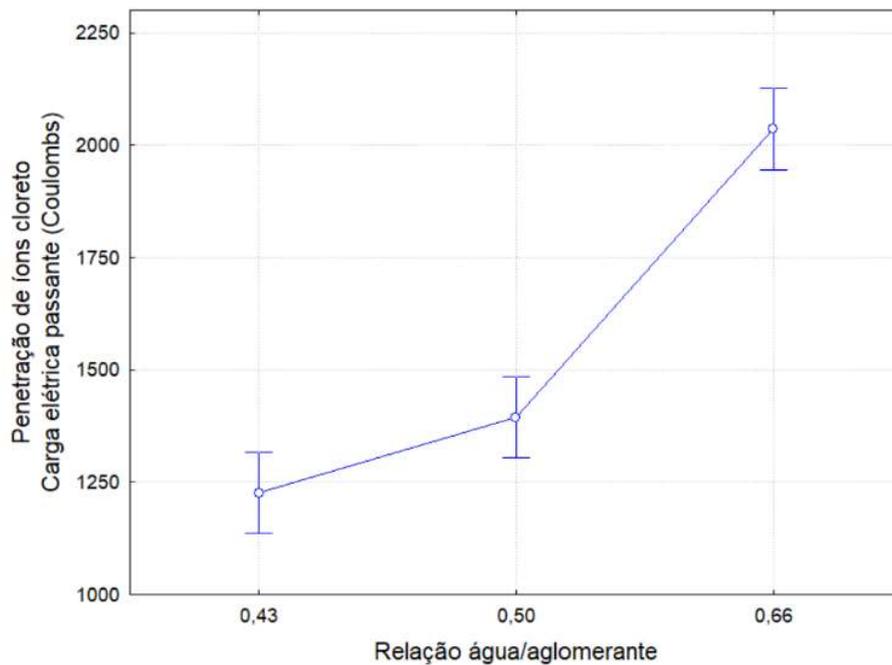


Figura 46: Efeito da relação água aglomerante sobre a penetração de íons cloreto. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Com relação à idade dos concretos na data de realização dos ensaios, observa-se uma progressiva diminuição dos valores de penetração de íons cloreto (Figura 47 e Figura 48).

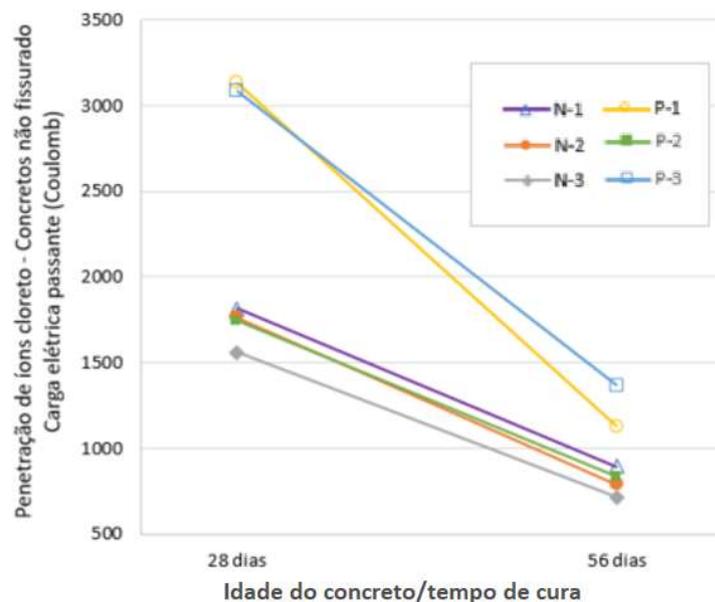


Figura 47: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras não fissuradas

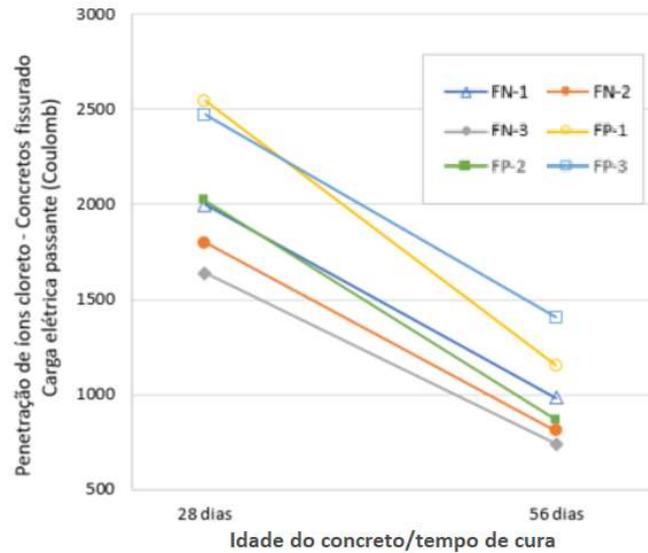


Figura 48: Penetração de íons cloreto em função dos traços avaliados e da idade do concreto (cura). Resultados obtidos para as amostras fissuradas aos 7 dias

Schneider (2005) e Venquiaruto (2017), obtiveram respostas similares em seus trabalhos. Os autores, perceberam que o tempo de cura do concreto promove a redução da porosidade da matriz, sendo mais intensa essa redução ainda nas primeiras idades e tendendo a se estabilizar com o tempo. Diante do exposto, é possível atribuir o efeito do tempo de cura dos concretos aos processos de hidratação que estão ocorrendo no material.

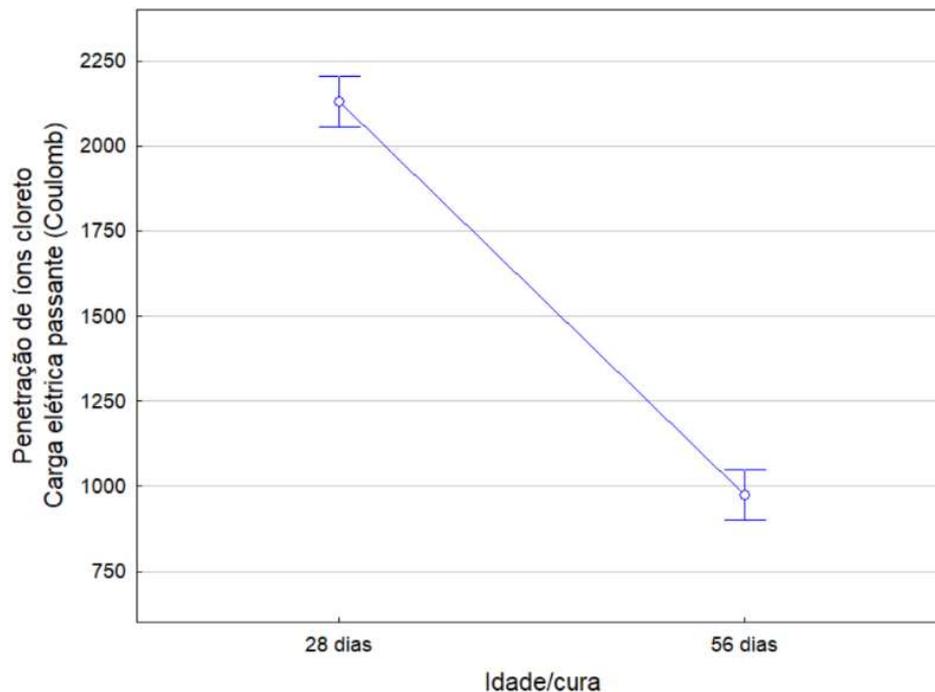


Figura 49: Efeito da idade dos concretos/cura sobre a penetração de íons cloreto. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

6.2.3 Influência da relação água/aglomerante e a idade sobre o potencial de recuperação da durabilidade por autocicatrização

Com os resultados obtidos, foi possível observar que, para quase todas as idades e relações água/aglomerante (Tabela 18), existe uma tendência de aumento da penetração de íons cloreto quando o concreto é submetido à fissuração.

Tabela 18: Variação da penetração de íons cloreto em função do processo de fissuração por carregamento aos sete dias e potencial para diferentes traços e idades avaliados.

| | Família ou grupo de concreto | Relação água/aglomerante | Idade | Não Fissurado | Fissurado | Aumento/diminuição da carga elétrica passante | |
|-------------|------------------------------|--------------------------|---------|---------------|-----------|---|-------------------|
| SEM aditivo | N-1 | 0,43 | 28 dias | 1761,3 | 1797,3 | 2,0% | |
| | | | 56 dias | 789,15 | 810,83 | 2,7% | |
| | N-2 | 0,50 | 28 dias | 1815,1 | 1999,1 | 10,1% | |
| | | | 56 dias | 892,41 | 983,38 | 10,2% | |
| | N-3 | 0,66 | 28 dias | 3131,3 | 2545,0 | -18,7% | Diminuição |
| | | | 56 dias | 1129,68 | 1154,52 | 2,2% | |
| COM aditivo | P-1 | 0,43 | 28 dias | 1561,0 | 1638,8 | 5,0% | |
| | | | 56 dias | 714,05 | 738,80 | 3,5% | |
| | P-2 | 0,50 | 28 dias | 1741,0 | 2021,3 | 16,1% | |
| | | | 56 dias | 835,26 | 866,16 | 3,7% | |
| | P-3 | 0,66 | 28 dias | 3083,7 | 2470,71 | -19,9% | Diminuição |
| | | | 56 dias | 1367,4 | 1406,24 | 2,8% | |

Segundo Venquiaruto (2017), o carregamento imposto aos concretos nas primeiras idades induzem a formação de microfissuras na matriz cimentícia, facilitando a entrada destes agentes. Mesmo que ocorra uma recuperação das microfissuras dos concretos pelo fenômeno de autocicatrização, para o ensaio de durabilidade a recuperação da matriz cimentícia não apresentou magnitude suficiente para dificultar a entrada de agentes agressivos. Segundo a autora, que também realizou análises por microscopia eletrônica de varredura por elétrons secundários, o tamanho das microfissuras remanescentes na matriz cimentícia superaram o tamanho do íon cloreto e das moléculas de água e constituíram um caminho preferencial para a entrada desses agentes nos concretos estudados.

Nesse ponto, cabe ainda ressaltar que os concretos permaneceram em cura submersa no período que sucedeu a fissuração até o momento de realização dos ensaios. Segundo Vieira (2008) quando as amostras retornam para a cura úmida ocorre uma reorganização da matriz cimentícia decorrente da hidratação de produtos secundários e quanto maior é o tempo de permanência dos concretos em cura úmida, menor é a penetração de agentes agressivos.

Por outro lado, foi constatado que aos 28 dias ocorre uma diminuição do ingresso de íons cloreto nos concretos de relação água/aglomerante de 0,66 (Figura 50). Uma justificativa possível para esse comportamento é a compactação da matriz ocasionada pelo carregamento.

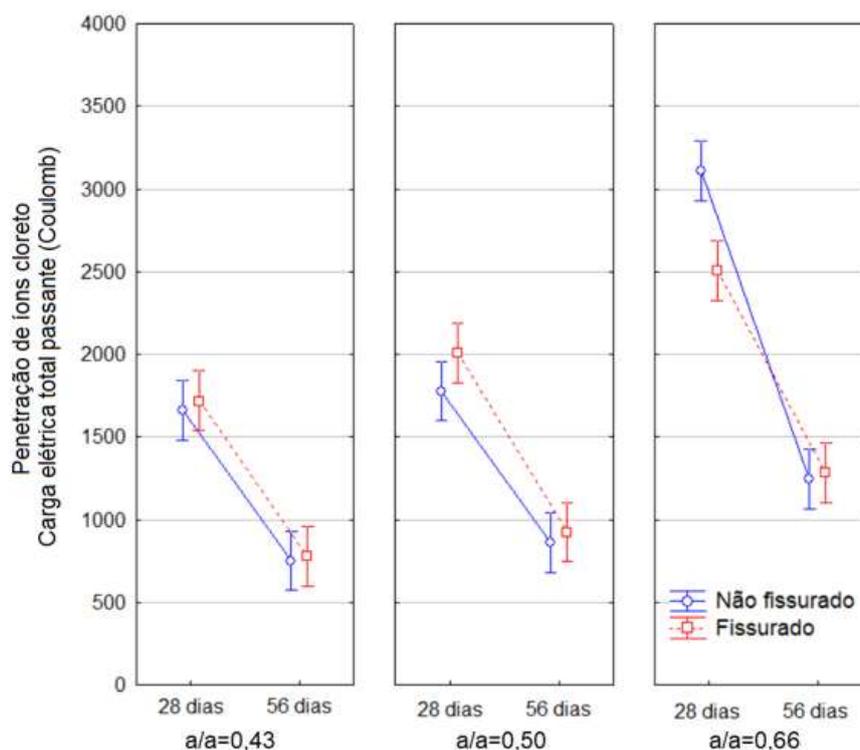


Figura 50: Efeito da idade e relação água/aglomerante sobre o potencial de recuperação do desempenho quanto à durabilidade por penetração de íons cloreto em concretos fissurados. As barras verticais denotam o erro residual/interno calculado pela ANOVA, considerando-se um grau de significância de 5%

Venquiaruto (2017), também observou menor passagem de íons cloreto nas amostras pré-carregadas de concretos produzidos com cimento CPIV nos ensaios realizados com três dias de cura, enquanto que o mesmo resultado não foi observado para o cimento CPV. Segundo a autora, a fragilidade da matriz cimentícia, que tende a ser menos resistente para os concretos produzidos com cimento pozolânico nas idades iniciais (aos 3 dias) devido menor velocidade de hidratação, torna a compactação da matriz um fenômeno mais significativo sobre os resultados. Diante disso, a melhoria dos resultados notada nos concretos com maior relação água/aglomerante aos 28 dias (menor idade avaliada nessa pesquisa), que conseqüentemente, constituem os concretos de menor resistência avaliados pode ser justificada, de forma análoga, pela baixa resistência da matriz cimentícia.

De maneira geral, para o estudo de penetração de íons cloreto, o efeito de microfissuração dos concretos é superior ao efeito de compactação da matriz cimentícia e autocicatrização. Outro aspecto notado é que, mesmo diante da ocorrência simultânea da hidratação continuada (conforme discutido no item 6.2.2) e da autocicatrização, os efeitos do primeiro fenômeno são maiores sobre os resultados de penetração de íons cloreto. O que não significa, contudo, que ao antecipar a idade de fissuração a recuperação da durabilidade seja mais expressiva. Venquiaruto (2017) também fez essa avaliação em seu trabalho e constatou que a antecipação do carregamento dos concretos prejudica a durabilidade dos concretos. Segundo a autora esse comportamento pode ser associado ao fato de que quanto mais tarde ocorrerem os carregamentos, mais bem estruturada estará a matriz cimentícia e, portanto, menor a probabilidade de os danos ocorrerem com mais intensidade.

7 Considerações finais

O presente trabalho teve como objetivo principal verificar a influência do uso de um produto impermeabilizante por cristalização como aditivo em concretos convencionais sobre o potencial de autocicatrização. Para tanto, o programa experimental desenvolvido teve como base uma avaliação comparativa das propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos fissurados em relação às amostras irmãs não fissuradas. Os resultados obtidos foram verificados estatisticamente visando analisar se o uso do produto teve efeito significativo nos dados obtidos pelos ensaios.

Cabe ressaltar que as conclusões apresentadas neste trabalho não devem ser tomadas de forma absoluta, uma vez que se limitam aos materiais e metodologias utilizados que por sua vez possuem implicação direta nos resultados obtidos. Sendo assim, a representatividade deve ser firmada por novas pesquisas que apresentem resultados que possam complementar e confirmar este estudo.

7.1 Conclusões

Após a análise dos resultados de resistência à compressão e penetração íons cloreto é possível supor que o produto impermeabilizante por cristalização utilizado como aditivo na mistura do concreto teve contribuição para o aumento do potencial de autocicatrização apenas sob o ponto de vista mecânico nas matrizes cimentícias dos concretos com relações água/aglomerante mais baixas. Para os ensaios de durabilidade o uso do aditivo não exerceu nenhuma melhoria ou piora de desempenho das amostras testadas.

No ensaio de resistência à compressão os concretos com o aditivo e relação água/aglomerante 0,43 tiveram aumento de 11,4% nos concretos convencionais aos 56 dias, enquanto que para os concretos contendo aditivo impermeabilizante o aumento foi de 28,4%, desempenho superior ao concreto convencional para a mesma relação água/aglomerante utilizada. Para demais relações água/aglomerante testadas, também foi constatado aumento da resistência à compressão nos corpos de prova fissurados, o que é um forte indicativo da ocorrência do fenômeno de autocicatrização.

Mesmo que o aumento da resistência observados nos concretos convencionais e naqueles contendo o aditivo impermeabilizante tenham sido bastante similares, não havendo diferença significativa pelo uso do produto testado para as relações água/aglomerante de 0,50 e 0,66, também foi possível notar uma tendência de aumento da resistência mecânica associada ao produto.

Em relação ao ensaio de penetração de cloretos, o produto impermeabilizante por cristalização manteve um comportamento similar ao concreto referência para todas as idades e relações água/aglomerante testadas. Para quase todos os concretos avaliados foi observada uma tendência de aumento da penetração de íons cloreto quanto o concreto é submetido à fissuração, excetuando-se os concretos avaliados com cura de 28 dias e relação água/aglomerante de 0,66, que mostrou uma diminuição do ingresso de íons cloreto. Tal melhoria pode ser atribuída à fragilidade da matriz cimentícia, decorrente da maior porosidade do material causada pela maior relação água/aglomerante, que por sua vez favorecem o processo de compactação da matriz cimentícia de forma mais acentuada.

7.2 Sugestões para trabalhos futuros

Embora tenha sido abordada a influência de vários fatores sobre a resistência à compressão e penetração de cloretos, os resultados deste trabalho para a análise do produto impermeabilizante por cristalização ao desempenho devem ser testados quanto a outras propriedades mecânicas e de durabilidade. Além disso, não foram realizados nessa pesquisa

nenhum ensaio relativo à distribuição dos poros capilares, higroscopicidade do produto utilizado no concreto nem sua influência sobre a reatividade álcali-agregado, que tem enorme importância sob o ponto de vista da durabilidade.

No escopo deste trabalho, o programa experimental se limitou ao estudo de concretos produzidos com cimento CPIV, cuja atividade pozolânica é comprovada por inúmeros trabalhos. No entanto, o efeito do aditivo impermeabilizante testado pode ser diferente para outros tipos de cimento, podendo ter um maior potencial de melhoria. Sendo assim, pode ser sugerida a realização de novos trabalhos que avaliem esse comportamento para outros tipos de cimento.

Outra delimitação do programa experimental que também deve ser melhor explorada diz respeito à cura dos concretos. Nessa pesquisa, todos os concretos foram submetidos às condições ideais de cura, permaneceram submersos em água saturada de cal durante o período entre a moldagem e realização dos ensaios. No entanto, sabe-se que o transporte de água através das fissuras tem seu mecanismo fortemente influenciado pelas condições de cura. Sendo assim, também pode ser sugerida a realização de novos trabalhos que avaliem esse comportamento para outras condições de cura, tais como ciclos de molhagem e secagem, e cura ao ar variando-se a umidade relativa e a presença ou não de CO₂ (que afetam a cicatrização autógena pelo processo de carbonatação).

8 Referências bibliográficas

ABRAMS, D. A. **Design of concrete mixtures**. Structural Materials Research Laboratory. Chicago: Lewis Institute, 1918.

AHN, T. H.; KISHI, T. **Crack self-healing behavior of cementitious composites incorporating various mineral admixtures**. In: Journal of Advanced Concrete Technology 8, no. 2, p. 171-186. 2010.

ALDEA, C. M.; SHAH, S. P.; KARR, A. **Effect of cracking on water and chloride permeability of concrete**. In: Journal of Materials in Civil Engineering 11, no. 3, p. 181-187. 1999

ALMEIDA, M. A. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade e do transporte de fluidos em concretos contendo adições minerais**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil) Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2016.

ALTOUBAT, S. A.; LANGE, D. A. **Creep, Shrinkage, and Cracking of Restrained Concrete at Early Age**. In: Materials Journal 98, no. 4, p. 323-331. 2001.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI-224R-01: Control of cracking in concrete Structures, Committee 224**. Farmington Hills: ACI, 2001.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C1202: Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration**. West Conshohocken, USA, 2012.

_____. **ACI 302.1R-15: Guide for Concrete Floor and Slab Construction, Committee 302**. Farmington Hills: ACI, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: concreto - procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, 2015.

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

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

_____. **NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

_____. **NBR NM 23: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 248: agregados - determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção da água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 52: agregado miúdo - determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53: agregado graúdo - determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 67: concreto - determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone**. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 7211: agregados para concreto - especificação**. Rio de Janeiro, 2009.

- BALTHAR, V. K. C. B. L. M. **Retração autógena e evolução de propriedades mecânicas de pastas pozolânicas**. Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade Federal de Rio de Janeiro, 2004.
- BARRIQUELO A. R.; DE MORI, L. M.; RODRIGUES, F. P. M. **Análise de manifestações patológicas nas estruturas de habitações de interesse social**. In: III Simpósio de pós-graduação em engenharia urbana. Anais. Maringá, 2012.
- BEEBY, A. W. **Concrete in the Oceans. Cracking and Corrosion**. Wexham Springs, CIRIA / CCA, 1978.
- BEEBY, A. W. **Corrosion of Reinforcement and Cracks Width**. In: International Symposium on Offshore Structures, Rio de Janeiro, 1979 p. 147-59. London: Pentech Press, 1979.
- BERNARDINO DA SILVA, L. M. S. **Desenvolvimento de um sistema especialista para o diagnóstico de fissuras em concreto armado**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1996.
- BERNARDINO DA SILVA, L. M. S. **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.
- BOH, B.; ŠUMIGA, B. **Microencapsulation technology and its applications in building construction materials** Tehnologija mikrokapsuliranja in njena uporaba v gradbenih materialih. In: RMZ—Materials and Geoenvironment 55, no. 3, p. 329-344. 2008.
- BRETTMANN, R.; DARWIN, D.; O'REILLY, M. **Developing a Test Procedure to Evaluate Settlement Cracking Performance**. University of Kansas Center for Research, Inc. 2015.
- BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BS8110-2: Structural use of concrete — Part 2: Code of practice for special circumstances**. London, 2001.
- BRUHWILER, E.; SAOUMA, V. E. **Water Fracture Interaction in Concrete--Part II: Hydrostatic Pressure in Cracks**. In: Materials Journal 92, no. 4, p. 383-390. 1995.
- CAPPELLESSO, V. G. **Uso de impermeabilizante por cristalização para redução da permeabilidade do concreto**. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2016.
- CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: Pini, 1997.
- CHODOUNSKY, M. A.; VIECILI, F. A. **Pisos industriais de concreto – aspectos teóricos e executivos**. São Paulo: Reggenza, 2007.
- COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. **Durable concrete structures: CEB Design Guide Bulletin d'Information v. 182**. 1989.
- CONCRETE SOCIETY. **Non-structural cracks in concrete**. In: Technical Report nº 22. 1992.
- COPETTI, S. K. **Concreto com ar incorporado: avaliação da durabilidade frente a agentes agressivos e absorção de água**. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2013.
- COURARD, L.; MICHEL, F.; PIERARD, J. **Influence of clay in limestone fillers for self-compacting cement based composites**. Construction and Building Materials 25, no. 3, p. 1356-1361. 2011.
- DAL MOLIN, D. C. C. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1988.

- DE ROOIJ, M.; VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC, 11. Springer Science & Business Media, 2013.
- DIAS, W. P. S. **Influence of mix and environment on plastic shrinkage cracking**. In: Magazine of Concrete Research 55, no. 4, p. 385-394. 2003.
- DJERBI, A.; STÉPHANIE B.; KHELIDJ, A.; BAROGHEL-BOUNY, V. **Influence of traversing crack on chloride diffusion into concrete**. In: Cement and Concrete Research 38, no. 6, p. 877-883. 2008.
- DRY, C. M. **Timed release of chemicals into cementitious material after the material has hardened to repair cracks, rebond fibers, and increase flexural toughening**. In: Fracture Mechanics: 25th Volume, ASTM STP 1220. 1994.
- EDVARDSEN, C. **Water permeability and autogenous healing of cracks in concrete**. In: Materials Journal 96, no. 4, p. 448-454. 1999.
- EL-DIEB, A. S.; HOOTON, R. D. **Water-permeability measurement of high performance concrete using a high-pressure triaxial cell**. In: Cement and Concrete Research 25, no. 6, p. 1199-1208. 1995.
- FARIAS DE MEDEIROS, M. H.; GOBBI, A.; GROENWOLD, J. A.; & HELENE, P. **Previsão da vida útil de concreto armado de alta resistência com adição de metacaulim e sílica ativa em ambientes marinhos**. In: Revista Escola de Minas, 66(1). 2013.
- FERRARIS, C. F.; KARTHIK, H. O.; RUSSELL, H. **The influence of mineral admixtures on the rheology of cement paste and concrete**. Cement and Concrete Research 31, no. 2, p. 245-255. 2001.
- FERRARA, L., KRELANI, V., MADDALENA, C. **A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures**. In: Construction and Building Materials, v.68, p. 535-551. 2014.
- FERREIRA, R. B. **Influência das adições minerais nas características do concreto de cobertura e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Goiás. Goiânia, 2003.
- FIGUEIREDO, E. J. P. **Terapia das construções de concreto: metodologia de avaliação de sistemas epóxi destinados a injeção de fissuras passivas das estruturas de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1989.
- FRIZZO, B. T. **Influência do teor e da finura de pozolanas na permeabilidade ao oxigênio e na absorção capilar do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2001.
- GARDNER, D.; JEFFERSON, A.; HOFFMAN, A. **Investigation of capillary flow in discrete cracks in cementitious materials**. In: Cement and Concrete Research 42, no. 7, p. 972-981. 2012.
- GÉRARD, B.; MARCHAND, J. **Influence of cracking on the diffusion properties of cement-based materials: Part I: Influence of continuous cracks on the steady-state regime**. In: Cement and Concrete research 30, no. 1, p. 37-43. Elsevier: 2000.
- GOSH, S. K. (ed.). **Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications**. In: **Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications**. p. 1-28. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- GRUYAERT, E.; ROBEYST, N.; DE BELIE, N. **Study of the hydration of Portland cement blended with blast-furnace slag by calorimetry and thermogravimetry**. In: Journal of thermal analysis and calorimetry 102, no. 3, p. 941-951. 2010.

- GRUYAERT, E. **Effect of blast-furnace slag as cement replacement on hydration, microstructure, strength and durability of concrete.** PhD dissertation, Ghent University. Ghent, 2011.
- HAYES, S. A.; ZHANG, W.; BRANTHWAITE, M.; JONES, F. R. **Self-healing of damage in fibre-reinforced polymer-matrix composites.**In:Journal of the Royal Society Interface 4, no. 13, p. 381-387. 2007.
- HALL, C. **Water sorptivity of mortars and concretes: a review.** In: Magazine of concrete research 41, no. 147, p. 51-61. 1989.
- HEARN, N. **Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference?** In: Materials and Structures 31, no. 8, p. 563-567. 1998.
- HELENE, P. R. L. **Vida útil das estruturas de concreto.** In:IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade. Anais. Porto Alegre, vol. 1, pp. 1-30. 1997.
- HELENE, P. R. L. **Manual de reabilitação de Estruturas de Concreto – Reparo, Reforço e Proteção.** São Paulo: Pini, 2003.
- HOFFMANN, A. T. **Influência da Adição de Sílica Ativa, da Relação Água/Aglomerante, Temperatura e Tempo de Cura no Coeficiente de Difusão de Cloretos em Concretos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS. Porto Alegre, 2001.
- HUANG, H.; YE, G.; PEL, L. **New insights into autogenous self-healing in cement paste based on nuclear magnetic resonance (NMR) tests.** In: Materials and Structures 49, no. 7, p. 2509-2524. 2016.
- HUANG, H.; YE, G.; DAMIDOT, D. **Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials.** In: Cement and concrete research 60, p. 68-82. 2014.
- ILIESCU, M. **Patologia e terapêutica do concreto armado.** In: Encontro nacional da construção, 8. Goiânia, volume 1, tema 3. 1986.
- INNOCENTINI, M. D. M.; PANDOLFELLI, V. C. **Considerações sobre estimativa da permeabilidade em concretos refratários através das equações de Darcy e de Forchheimer.** In: *Cerâmica* 45, no. 292-293, p. 61-67. 1999.
- ISHIDA, T.; MAEKAWA, K. **Modeling of pH profile in pore water based on mass transport and chemical equilibrium theory.** In: Doboku Gakkai Ronbunshu 2000, no. 648: p. 203-215. 2000.
- JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background.** In: Cement and concrete research 31, no. 4, p. 647-654. 2001.
- JOISEL, A. **Fisuras y grietas en morteros y hormigones: sus causas y remedios.** 4 ed. 174 p. Barcelona: ETA, 1975.
- JONKERS, H. M.; THIJSEN, A.; MUYZER, G.; COPUROGLU, O.; e SCHLANGEN, E. **Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete.** In: Ecological engineering 36, no. 2, p 230-235. 2010.
- JOHNSON, S. M. **Deterioro, conservación y reparación de estructuras.** Madrid: Blume, 1973.
- KANEMATSU, M.; MARUYAMA, I.; NOGUCHI, T.; IIKURA, H.; TSUCHIYA, N. **Quantification of water penetration into concrete through cracks by neutron radiography.**In: Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment 605, no. 1 (2009): 154-158. Elsevier: 2009.

- KAUFMANN, J.; WINNEFELD, F.; HESSELBARTH, D. **Effect of the addition of ultrafine cement and short fiber reinforcement on shrinkage, rheological and mechanical properties of Portland cement pastes.** *Cement and Concrete Composites* 26, no. 5, p. 541-549. 2004.
- KOSMATKA, S. H.; KERKHOFF, B.; PANARESE, W.C. **Design and control of concrete mixtures: the guide to applications, methods, and materials.** Portland Cement Association, 2011.
- KRAL, S.; GEBAUER, J. **Shrinkage and cracking of concrete at early ages.** In: *Advances in Concrete Slab Technology: Proceedings of the International Conference on Concrete Slabs Held at Dundee University, 3-6 April 1979*, p. 412. Elsevier, 2014.
- LARA, P. L. O. **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília. Brasília, 2003.
- LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. **Potential of superabsorbent polymer for self-sealing cracks in concrete.** In: *Advances in Applied Ceramics* 109, no. 5, p. 296-302. 2010.
- LEPECH, M. D.; LI, V. C. **Long Term Durability Performance of Engineered Cementitious Composites** (Langzeitbeständigkeit systematisch entwickelter zusammengesetzter Zement gebundener Werkstoffe). *Restoration of Buildings and Monuments*, v. 12.2, p. 119-132. 2006.
- LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J.; OU, J. **Microstructure of cement mortar with nanoparticles.** In: *Composites: Part B Engineering* 35. p.185–189. Elsevier, 2004.
- LI, V. C.; SAKULICH, A. R.; REINHARDT, H. W.; SCHLANGEN, E.; VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; DE BELIE, N.; JOSEPH, C.; GARDNER, D.R.; LARK, R.J.; MIHASHI, H.; NISHIWAKI, T. **Recovery against Mechanical Actions.** In: *Self-healing phenomena in cement-based materials: state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials*, vol. 11, p. 65-117. Springer: 2013.
- LI, V. C.; YANG, E. H. **Self-healing in concrete materials.** In: VAN DER ZWAAG, S. (ed.) *Self-healing Materials: An Alternative Approach to 20 Centuries of Materials Science*, p. 161-193. Dordrecht: Springer, 2007.
- LOOSVELDT, H.; LAFHAJ, Z.; SKOCZYLAS, F. **Experimental study of gas and liquid permeability of a mortar.** In: *Cement and Concrete Research* 32, no. 9, p. 1357-1363. 2002.
- LUO, X.; OU, R.; EBERLY, D. E.; SINGHAL, A.; VIRATYAPORN, W.; MATHER, P. T. **A thermoplastic/thermoset blend exhibiting thermal mending and reversible adhesion.** In: *ACS Applied Materials & Interfaces* 1, no. 3, p. 612-620. 2009.
- LV, Z.; CHEN, H. **Self-healing efficiency of unhydrated cement nuclei for dome-like crack mode in cementitious materials.** In: *Materials and structures* 46, no. 11, p. 1881-1892. 2013.
- MACHADO, A. P. **Reforço de estruturas de concreto armado com fibras de carbono.** São Paulo: Pini, 2002.
- MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais.** In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.
- MENG, B. **Calculation of moisture transport coefficients on the basis of relevant pore structure parameters.** In: *Materials and Structures* 27, no. 3, p. 125-134. 1994.
- MOREIRA, M. M. **Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland: contribuição aos processos de autocicatrização.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) Universidade de Brasília. Brasília, 2017.

- MUHAMMAD, N.; KEYVANFAR, A.; MAJID, M.; MIRZA, A. J. **Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches**, *Construction and Building Materials*, v. 101, p. 80–90. 2015.
- 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**. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 10, no. 7, p. 240-253. 2012.
- NEHDI, M.; MINDESS, S.; AITCIN P.C. **Rheology of high-performance concrete: effect of ultrafine particles**. In: *Cement and Concrete Research* 28, no. 5, p. 687-697. 1998.
- NEPOMUCENO, A. A. **Mecanismo de transporte de fluidos no concreto**. In: ISAIA, G. C. (Ed.). *Concreto: ensino, pesquisa e realizações*. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 793-827, 2005.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. Tradução de Salvador E. Giamusso. 2 ed. São Paulo: Pini, 1997.
- NINCE, A. A. **Levantamento de Dados Sobre a Deterioração de Estruturas na Região Centro-Oeste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade de Brasília. Brasília, 1996.
- NUNES, N.L.; FIGUEIREDO, A. D. **Retração do concreto de cimento Portland**. In: *Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP—Departamento de Engenharia de Construção Civil*, p. 1-59. São Paulo. 2007.
- OLIVIER, K.; DARQUENNES, A.; BENBOUDJEMA, F.; GAGNÉ, R.; LOUIS, G.; BETRANCOURT, D. **Cementitious materials with mineral additions: impact on the self-healing kinetics and the products formation**. In: *International Conference on Self-Healing Materials*. 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**. In: *Magazine of Concrete Research*, 2010,62, No. 6, June, p. 393–404. 2010.
- PARK, C. K.; NOH, M. H.; PARK T. H. **Rheological properties of cementitious materials containing mineral admixtures**. *Cement and concrete research* 35, no. 5 (2005) p. 842-849. 2005.
- PARK, S. S.; KWON, S. J.; JUNG, S. H.; LEE, S. W. **Modeling of water permeability in early aged concrete with cracks based on micro pore structure**. In: *Construction and building materials* 27, no. 1, p. 597-604. Elsevier: 2012.
- PEASE, B.; COUCH, J.; GEIKER, M.; STANG, H.; WEISS, J. **Assessing the portion of the crack length contributing to water sorption using X-ray absorption measurements on concrete wedge splitting specimens**. In: *Concrete Life'09: Second International RILEM Workshop on Concrete Durability and Service Life Planning*. 2009.
- PERKINS, P.H. **Repair protection and waterproofing of concrete structures**. London: Elsevier, 1986.
- PHILIPOSE, K. E.; BEAUDOIN, J.J.; FELDMAN, R.F. **Degradation of normal Portland and slag cement concrete under load due to reinforcement corrosion**. In: *CANMET/ACI International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 4. Stanbul, 1992.
- PICANDET, V.; KHELIDJ, A.; BELLEGOU, H. **Crack effects on gas and water permeability of concretes**. In: *Cement and Concrete Research* 39, no. 6, p. 537-547. 2009.
- QIAN, S.; ZHOU, J.; DE ROOIJ, M. R.; SCHLANGEN, E.; YE, G.; VAN BREUGEL, K. **Self-healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating local waste materials**. In: *Cement and Concrete Composites* 31, no. 9, p. 613-621. 2009.

QIAN, S.; ZHOU, J.; SCHLANGEN, E.; **Influence of curing condition and pre-cracking time on the self-healing behavior of engineered cementitious composites.**In:Cement and concrete composites 32, no. 9, p. 686-693. 2010.

QIN, Y.; YANG, H.; DENG, Z.; HE, J. **Water permeability of pervious concrete is dependent on the applied pressure and testing methods.** In: Advances in Materials Science and Engineering v. 2015. 2015.

QIU, J. **Effects of Slag Content on Self-Healing Behavior of Engineered Cementitious Composites.** Disponível em: <http://icshm2015.pratt.duke.edu/sites/icshm2015.pratt.duke.edu/files/u9/ICSHM%20extended%20abstract_EHYang.pdf> acesso em: 10 de junho de 2017. 2015.

REINHARDT, H. W.; SOSORO, M.; ZHU, X. F. **Cracked and repaired concrete subject to fluid penetration.** In: Materials and Structures 31, no. 2, p. 74-83. 1998.

REINHARDT, H. W.; JONKERS, H.; VAN TITTELBOOM, K.; SNOECK, D.; DE BELIE, N.; DE MUYNCK, W.; VERSTRAETE, W.; WANG, J.; MECHTCHERINE, V. **Recovery against environmental action.** In: Self-healing phenomena in cement-based materials: state-of-the-art report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials, vol. 11, p. 65-117. Springer: 2013.

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

SALVADOR, P. F. **Influência dos ciclos de execução nas deformações das estruturas de concreto armado de edifícios de andares múltiplos.**Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007.

SATO, N. M. N. **Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos.** Tese (Doutorado em Engenharia) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

SCHLANGEN, E.; JONKERS, H.; QIAN, S.; GARCIA, A. **Recent advances on self-healing of concrete.** In: Proceedings of FraMCoS, vol. 7. 2010.

SCHLANGEN, E.; JOSEPH, C. **Self-Healing Processes in Concrete.** In: GOSH S. K. (ed.) Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications. p. 141-182. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.

SCHNEIDER, J. A. **Penetração de Cloretos em concretos com Escória de Alto Forno e Ativador Químico Submetido a Diferentes Períodos de Cura.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

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

SENTHILKUMAR, S. R. R.; NATESAN, S. C. **Prediction of restrained plastic shrinkage cracking in plain cement concrete.** In: Magazine of Concrete Research 57, no. 9, p. 579-587. 2005.

SHIM, K. B.; KISHI, T.; CHOI, C. S.; AHN, T. H. **Cementitious materials for crack self-healing concrete.** In: Journal of Ceramic Processing Research 16, p. 1-13. 2015.

SILVA FILHO, L. C. P.; HELENE, P. R. L. **Análise de Estruturas de Concreto com Problemas de Resistência e Fissuração.**In:ISAIA G. C. (ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia 1. Capítulo 32 p. 1129-1174.São Paulo: IBRACON, 2011.

- SILVA, L. K. **Levantamento de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado no estado do Ceará**. Monografia (Trabalho de conclusão do curso de engenharia civil) Universidade Federal do Ceará, 2011.
- 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**. In: Construction and Building Materials 42, p. 217-224. 2013.
- SNOECK, D.; VAN TITTELBOOM, K.; STEUPERAERT, S.; DUBRUEL, P.; DE BELIE, N. **Self-healing cementitious materials by the combination of microfibres and superabsorbent polymers**. In: Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 25(1), p.13-24. 2014.
- SONG, H. W.; KWON, S. J. **Permeability characteristics of carbonated concrete considering capillary pore structure**. In: Cement and Concrete Research 37, no. 6, p. 909-915. Elsevier: 2007.
- SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. PINI, 1998.
- SUPRENANT, B.A.; MALISCH, W. R. **The fiber factor**. The Aberdeen Group Hanley-Wood, Inc., Concrete Construction. 1999.
- TALAIKHOZAN, A.; KEYVANFAR, A.; SHAFAGHAT, A.; ANDALIB, R.; MAJID, M. Z. A.; FULAZZAKY, M. A.; ZIN R. M.; LEE, C. T.; HUSSIN, M. W.; HAMZAH, N.; MARWAR, N. F.; HAIDAR, H.I. **A review of self-healing concrete research development**. In: Journal of Environmental Treatment Techniques 2, no. 1, p. 1-11. 2014.
- TAKAGI, E. M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2013.
- TANESI, J. **A influência das fibras de polipropileno no controle da fissuração por retração**. Dissertação (Mestrado) Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.
- TER HEIDE, N. **Crack healing in hydrating concrete**. Thesis (Master of Applied Science)-Delft University of Technology, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Microlab, Delft, 2005.
- TER HEIDE, N.; SCHLANGEN, E.; VAN BREUGEL, K. **Experimental study of crack healing of early age cracks**. In: Proceedings Knud Højgaard conference on Advanced Cement-Based Materials, Technical University of Denmark. 2005.
- THOMAZ, E. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. PINI: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1989.
- TER HEIDE, N.; SCHLANGEN, E. **Self-healing of early age cracks in concrete**. In: Proceedings of the first international conference on self-healing materials. Noordwijk aan Zee, The Netherlands, 2007.
- TSUCHIYA, N.; KANEMATSU, M.; NOGUCHI, T. **Quick water movement around concrete cracks under unsaturated conditions**. In: Construction and Building Materials 67, p. 95-99. Elsevier: 2014.
- UNO, P. J. **Plastic shrinkage cracking and evaporation formulas**. In: ACI Materials Journal 95 (1998): 365-375. 1998.
- VAN BREUGEL, K. **Is there a market for self-healing cement-based materials?** In: Proceedings of the first international conference on self-healing materials, p. 1-9. 2007.

- VAN DAM, T. J.; PETERSON, K. R.; SUTTER, L. L.; PANGULURI, A.; SYTSMA, J.; BUCH, N.; KOWLI, R.; DESARAJU, P. **Guidelines for early-opening-to-traffic portland cement concrete for pavement rehabilitation**. In: Transportation Research Board No. 540. 2005.
- VAN DER ZWAAG, S. (ed). **Self-healing materials: an alternative approach to 20 centuries of materials science**. Vol. 100. Springer Science & Business Media, 2007.
- VAN TITTELBOOM, K.; DE BELIE, N. **Self-healing in cementitious materials - a review**. In: Materials 6, no. 6, p. 2182-2217. 2013.
- VENQUIARUTO, S. D. **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (Self-Healing)**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2017.
- VENTORINI, L. A. **Fissuração de vigas de concreto armado**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 1996.
- VIEIRA, G. L. **Influência da microfissuração causada por carregamento precoce nas propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes tipos de cimento**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2008.
- WANG, J.; DEWANCKELE, J.; CNUUDE, V.; VAN VLIERBERGHE, S.; VERSTRAETE, W.; e DE BELIE, N. **X-ray computed tomography proof of bacterial-based self-healing in concrete**. In: Cement and Concrete Composites 53, p. 289-304. 2014.
- WIKTOR, V.; e JONKERS, H. M. **Quantification of crack-healing in novel bacteria-based self-healing concrete**. In: Cement and Concrete Composites 33, no. 7 p. 763-770. 2011.
- WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. **A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material**. In: Construction and Building Materials, v. 28, p. 571-583. 2012.
- YANG, Y.; LEPECH, M. D.; YANG, E. H.; LI, V. C. **Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet-dry cycles**. In: Cement and Concrete Research 39, no. 5, p. 382-390. 2009.
- YANG, Y.; YANG, E. H.; LI, V. C. **Autogenous healing of engineered cementitious composites at early age**. In: Cement and concrete research 41, no. 2, p. 176-183. 2011.
- YU, J. H.; YANG, E. H. **Microstructure of self-healed PVA engineered cementitious composites under wet-dry cycles**. In: Advances in Applied Ceramics 109, no. 7, p. 399-404. 2010.
- ZHANG, X.; JIHONG, H. **The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement paste**. In: Cement and concrete research 30, no. 5, p. 827-830. 2000.
- ZHELUDKEVICH, M. **Self-healing anticorrosion coatings**. In: GOSH S. K. (ed.). Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications. In: Self-healing materials: fundamentals, design strategies and applications. p. 1-28. Weinheim: Wiley-VCH, 2009.
- ZHONG, W.; YAO, W. **Influence of damage degree on self-healing of concrete**. In: Construction and building materials 22, no. 6, p. 1137-1142. 2008.

APÊNDICE A – Ensaio de resistência à compressão axial

**Dados obtidos no ensaio de resistência a compressão
Carga última de ruptura (MPa)**

| Idade do concreto | | 7 dias | 28 dias | 56 dias |
|-------------------|-------------|--------|---------|---------|
| N-1 | amostra I | 23,3 | 35,5 | 37,6 |
| | amostra II | 23,7 | 35,4 | 39,5 |
| | amostra III | 23,5 | 37,0 | 36,7 |
| N-2 | amostra I | 18,6 | 24,5 | 30,0 |
| | amostra II | 17,0 | 24,8 | 31,1 |
| | amostra III | 17,0 | 23,7 | 31,6 |
| N-3 | amostra I | 11,1 | 18,1 | 21,2 |
| | amostra II | 12,1 | 18,7 | 22,4 |
| | amostra III | 11,9 | 17,9 | 22,5 |
| Idade do concreto | | 7 dias | 28 dias | 56 dias |
| P-1 | amostra I | 22,5 | 31,9 | 32,4 |
| | amostra II | 21,9 | 34,0 | 30,8 |
| | amostra III | 20,8 | 33,3 | 34,8 |
| P-2 | amostra I | 19,7 | 25,3 | 31,3 |
| | amostra II | 18,2 | 27,4 | 31,2 |
| | amostra III | 18,8 | 26,3 | 31,4 |
| P-3 | amostra I | 11,7 | 18,7 | 21,6 |
| | amostra II | 12,9 | 18,3 | 25,2 |
| | amostra III | 12,2 | 17,2 | 21,1 |

**Dados obtidos no ensaio de resistência a compressão
Carga última de ruptura (MPa)**

| Idade do concreto | | 28 dias | 56 dias |
|-------------------|-------------|---------|---------|
| FN-1 | amostra I | 35,5 | 40,4 |
| | amostra II | 35,4 | 42,1 |
| | amostra III | 37,0 | 44,1 |
| FN-2 | amostra I | 24,5 | 30,7 |
| | amostra II | 24,8 | 30,2 |
| | amostra III | 23,7 | 30,9 |
| FN-3 | amostra I | 18,1 | 22,7 |
| | amostra II | 18,7 | 21,1 |
| | amostra III | 17,9 | 22,5 |

| Idade do concreto | | 28 dias | 56 dias |
|-------------------|-------------|---------|---------|
| FP-1 | amostra I | 31,9 | 42,2 |
| | amostra II | 34,0 | 41,6 |
| | amostra III | 33,3 | 42,0 |
| FP-2 | amostra I | 25,3 | 31,7 |
| | amostra II | 27,4 | 32,4 |
| | amostra III | 26,3 | 31,5 |
| FP-3 | amostra I | 18,7 | 23,0 |
| | amostra II | 18,3 | 22,7 |
| | amostra III | 17,2 | 21,6 |

APÊNDICE B – Ensaio de penetração de íons cloreto

Dados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 28 dias de idade
Corrente medida em mA durante o ensaio

| Tempo de ensaio (h) | Corrente medida em mA durante o ensaio | | | | | | | | | | | Carga passante (Coulomb) | | | |
|---------------------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|-------|-------|--------|
| | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 5,50 | | 6,00 | | |
| N-1 | amostra I | 61,9 | 67,9 | 70,7 | 73,6 | 76,5 | 78,9 | 80,9 | 82,8 | 84,3 | 85,8 | 86,9 | 88,1 | 88,7 | 1706,4 |
| | amostra II | 64,4 | 71,8 | 75,8 | 79,3 | 81,6 | 83,9 | 86,3 | 88,2 | 89,8 | 91,4 | 92,5 | 93,5 | 94,6 | 1816,2 |
| N-2 | amostra I | 68,4 | 73,8 | 78,6 | 82,0 | 85,4 | 88,4 | 91,0 | 93,6 | 95,8 | 97,8 | 99,5 | 101,2 | 102,9 | 1924,7 |
| | amostra II | 62,8 | 68,7 | 71,9 | 73,7 | 75,0 | 78,2 | 81,0 | 82,6 | 84,1 | 85,4 | 86,8 | 87,4 | 88,8 | 1705,4 |
| N-3 | amostra I | 115,1 | 134,7 | 142,5 | 151,1 | 158,6 | 164,9 | 169,6 | 173,6 | 176,3 | 177,7 | 177,7 | 176,1 | 174,5 | 3476,6 |
| | amostra II | 87,2 | 104,3 | 112,5 | 119,3 | 125,5 | 132,0 | 135,5 | 138,8 | 140,9 | 143,6 | 145,0 | 145,8 | 146,4 | 2786,1 |
| P-1 | amostra I | 60,3 | 65,1 | 67,7 | 69,9 | 70,9 | 73,8 | 75,3 | 76,6 | 77,6 | 78,7 | 79,6 | 80,6 | 81,0 | 1590,3 |
| | amostra II | 58,2 | 61,5 | 63,9 | 66,8 | 68,4 | 70,4 | 71,8 | 73,8 | 74,4 | 76,0 | 77,5 | 78,8 | 80,4 | 1531,8 |
| P-2 | amostra I | 64,6 | 71,4 | 75,1 | 77,5 | 79,4 | 81,2 | 83,2 | 84,2 | 86,3 | 87,5 | 88,7 | 89,6 | 90,7 | 1760,2 |
| | amostra II | 63,7 | 68,5 | 71,8 | 74,2 | 77,0 | 79,2 | 81,4 | 83,3 | 84,9 | 86,4 | 87,6 | 88,7 | 89,6 | 1721,9 |
| P-3 | amostra I | 103,8 | 123,5 | 134,7 | 143,1 | 150,8 | 156,6 | 161,5 | 165,7 | 168,5 | 170,9 | 173,5 | 175,5 | 177,9 | 3333,0 |
| | amostra II | 90,6 | 106,0 | 115,1 | 122,6 | 128,6 | 133,1 | 137,3 | 140,9 | 143,8 | 145,9 | 146,9 | 147,5 | 147,6 | 2834,4 |

Dados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 28 dias de idade
Corrente medida em mA durante o ensaio

| Tempo de ensaio (h) | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 5,50 | 6,00 | Carga passante (Coulomb) |
|---------------------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|
| - | 70,8 | 74,1 | 78,6 | 78,8 | 80,9 | 82,5 | 84,3 | 85,5 | 86,3 | 87,1 | 88,5 | 88,6 | 1746,8 |
| FN-1 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 65,3 | 74,1 | 78,6 | 78,8 | 80,9 | 82,5 | 84,3 | 85,5 | 86,3 | 87,1 | 88,5 | 88,6 | |
| amostra II | 66,7 | 77,1 | 80,2 | 82,9 | 85,3 | 87,6 | 89,3 | 91,0 | 92,4 | 93,8 | 95,0 | 96,4 | 1847,8 |
| FN-2 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 72,0 | 83,9 | 87,3 | 90,7 | 94,2 | 96,9 | 99,2 | 101,6 | 103,5 | 105,8 | 107,5 | 108,9 | 2045,9 |
| amostra II | 69,2 | 83,0 | 84,7 | 87,1 | 89,4 | 91,5 | 93,8 | 96,0 | 97,7 | 101,0 | 101,3 | 103,5 | 1952,3 |
| FN-3 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 86,6 | 104,8 | 110,1 | 115,7 | 119,7 | 124,0 | 127,3 | 129,8 | 131,9 | 133,6 | 135,2 | 136,2 | 2579,3 |
| amostra II | 80,2 | 100,4 | 106,3 | 112,2 | 117,3 | 120,6 | 123,8 | 126,6 | 129,2 | 131,7 | 133,4 | 134,7 | 2510,8 |
| | | | | | | | | | | | | | |
| Tempo de ensaio (h) | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 5,50 | 6,00 | Carga passante (Coulomb) |
| - | 69,7 | 71,4 | 73,2 | 74,9 | 76,2 | 75,8 | 77,6 | 78,5 | 79,2 | 80,9 | 82,1 | 82,5 | 1640,3 |
| FP-1 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 65,2 | 71,4 | 73,2 | 74,9 | 76,2 | 75,8 | 77,6 | 78,5 | 79,2 | 80,9 | 82,1 | 82,5 | |
| amostra II | 61,1 | 69,7 | 71,5 | 73,7 | 75,9 | 77,8 | 78,8 | 80,2 | 81,0 | 81,9 | 82,8 | 83,6 | 1637,3 |
| FP-2 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 73,4 | 88,0 | 93,2 | 96,7 | 100,3 | 103,7 | 106,0 | 109,5 | 111,6 | 113,6 | 115,2 | 116,5 | 2178,4 |
| amostra II | 66,3 | 78,0 | 81,9 | 84,5 | 86,0 | 88,5 | 90,4 | 92,1 | 93,5 | 94,6 | 95,9 | 96,9 | 1864,2 |
| FP-3 | | | | | | | | | | | | | |
| amostra I | 85,8 | 105,2 | 111,4 | 116,8 | 122,3 | 131,2 | 135,0 | 139,2 | 142,0 | 145,2 | 147,0 | 150,0 | 2755,3 |
| amostra II | 77,3 | 87,8 | 93,3 | 99,3 | 101,3 | 103,5 | 105,6 | 107,4 | 108,9 | 110,5 | 111,7 | 112,8 | 2186,1 |

**Dados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 56 dias de idade
Corrente medida em mA durante o ensaio**

| Tempo de ensaio (h) | Corrente medida em mA durante o ensaio | | | | | | | | | | | Carga passante (Coulomb) | | | |
|------------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------------------------|------|------|---------------|
| | - | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | | 5,50 | 6,00 | |
| N-1 | amostra I | 33,6 | 35,0 | 36,3 | 37,2 | 38,0 | 38,8 | 39,5 | 40,0 | 41,0 | 41,7 | 42,3 | 42,8 | 43,3 | 846,6 |
| | amostra II | 30,1 | 31,0 | 31,8 | 32,6 | 33,1 | 33,8 | 34,3 | 34,7 | 35,1 | 35,5 | 35,8 | 36,1 | 36,5 | 731,7 |
| N-2 | amostra I | 38,8 | 41,7 | 42,1 | 42,9 | 42,9 | 44,9 | 45,7 | 46,6 | 47,5 | 48,0 | 48,6 | 49,8 | 50,3 | 980,0 |
| | amostra II | 33,0 | 34,5 | 35,2 | 36,1 | 36,7 | 37,2 | 37,3 | 37,9 | 38,7 | 38,9 | 39,3 | 39,7 | 39,9 | 804,8 |
| N-3 | amostra I | 44,5 | 48,6 | 49,8 | 51,1 | 52,3 | 53,5 | 54,5 | 55,4 | 56,3 | 56,9 | 57,7 | 58,6 | 59,7 | 1161,2 |
| | amostra II | 42,3 | 45,8 | 47,2 | 48,5 | 50,3 | 51,2 | 52,1 | 52,7 | 53,2 | 53,9 | 54,3 | 54,6 | 54,8 | 1098,1 |
| Tempo de ensaio (h) | Corrente medida em mA durante o ensaio | | | | | | | | | | | Carga passante (Coulomb) | | | |
| | - | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | | 5,50 | 6,00 | |
| P-1 | amostra I | 29,0 | 29,8 | 30,6 | 31,2 | 31,7 | 32,3 | 32,8 | 33,0 | 33,7 | 34,1 | 34,5 | 34,8 | 35,1 | 702,2 |
| | amostra II | 29,9 | 31,0 | 31,9 | 32,7 | 32,9 | 33,5 | 34,0 | 34,5 | 34,8 | 35,1 | 35,3 | 35,5 | 35,8 | 725,9 |
| P-2 | amostra I | 35,2 | 37,1 | 38,6 | 39,6 | 40,5 | 40,8 | 40,9 | 41,8 | 42,3 | 42,7 | 43,1 | 42,5 | 42,9 | 877,3 |
| | amostra II | 32,8 | 35,0 | 35,9 | 36,8 | 37,1 | 37,0 | 36,1 | 36,6 | 37,2 | 37,7 | 38,0 | 38,4 | 38,8 | 793,2 |
| P-3 | amostra I | 51,1 | 57,6 | 60,3 | 61,3 | 65,0 | 67,6 | 69,6 | 72,1 | 73,5 | 75,7 | 77,8 | 79,2 | 80,5 | 1480,9 |
| | amostra II | 46,9 | 51,6 | 54,0 | 55,9 | 56,9 | 57,9 | 59,3 | 60,0 | 61,2 | 61,5 | 61,9 | 63,2 | 64,4 | 1254,0 |

Dados obtidos no ensaio de penetração de íons cloreto aos 28 dias de idade
Corrente medida em mA durante o ensaio

| Tempo de ensaio (h) | Corrente medida em mA durante o ensaio | | | | | | | | | | | Carga passante (Coulomb) | | |
|---------------------|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------------|------|--------|
| | 0,50 | 1,00 | 1,50 | 2,00 | 2,50 | 3,00 | 3,50 | 4,00 | 4,50 | 5,00 | 5,50 | | 6,00 | |
| FN-1 | 32,2 | 33,8 | 34,3 | 35,1 | 35,7 | 36,4 | 37,9 | 37,4 | 38,2 | 38,5 | 38,9 | 39,8 | 39,9 | 794,4 |
| | 33,3 | 35,1 | 36,1 | 36,7 | 37,3 | 38,2 | 38,8 | 39,3 | 39,7 | 40,1 | 40,7 | 41,1 | 41,5 | 827,3 |
| FN-2 | 40,1 | 43,8 | 45,8 | 47,4 | 48,9 | 50,0 | 50,0 | 50,5 | 51,2 | 51,9 | 52,5 | 53,0 | 53,7 | 1061,4 |
| | 35,5 | 37,6 | 39,2 | 40,6 | 41,5 | 42,0 | 42,8 | 43,3 | 43,8 | 44,2 | 44,6 | 44,8 | 45,0 | 905,4 |
| FN-3 | 46,6 | 51,0 | 53,3 | 54,8 | 56,5 | 57,8 | 59,1 | 60,2 | 61,3 | 62,3 | 63,3 | 64,1 | 65,3 | 1255,5 |
| | 40,6 | 44,0 | 45,8 | 47,5 | 48,3 | 48,4 | 49,2 | 50,1 | 50,9 | 51,5 | 52,1 | 52,6 | 53,1 | 1053,6 |
| FP-1 | 31,1 | 32,1 | 32,9 | 33,6 | 32,0 | 34,1 | 33,8 | 33,5 | 34,0 | 34,3 | 34,3 | 34,6 | 34,8 | 722,9 |
| | 30,7 | 31,9 | 32,9 | 33,1 | 34,4 | 35,0 | 35,3 | 35,8 | 36,3 | 36,7 | 37,0 | 37,4 | 37,7 | 754,7 |
| FP-2 | 33,6 | 35,4 | 36,2 | 37,1 | 38,0 | 38,6 | 38,9 | 39,2 | 39,5 | 39,8 | 40,1 | 40,3 | 40,3 | 825,8 |
| | 37,1 | 39,7 | 40,9 | 41,9 | 42,7 | 43,6 | 43,4 | 41,9 | 42,3 | 42,6 | 42,9 | 43,1 | 43,5 | 906,5 |
| FP-3 | 52,6 | 59,6 | 62,4 | 65,1 | 67,7 | 69,9 | 71,6 | 74,0 | 75,0 | 77,0 | 78,7 | 80,1 | 81,5 | 1520,6 |
| | 49,0 | 53,2 | 56,4 | 57,4 | 58,6 | 59,7 | 60,8 | 61,9 | 62,7 | 62,8 | 62,9 | 65,0 | 67,1 | 1291,8 |