

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

**Vanessa Giaretton Cappellesso**

**USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO  
PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CONCRETO**

Porto Alegre  
novembro 2016

**VANESSA GIARETTON CAPPELLESSO**

**USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO  
PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CONCRETO**

Trabalho de Diplomação 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: Denise Carpena Coitinho Dal Molin**  
**Orientadora: Angela Borges Masuero**

Porto Alegre  
novembro 2016

**VANESSA GIARETTON CAPPELLESSO**

**USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO  
PARA REDUÇÃO DA PERMEABILIDADE DO CONCRETO**

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, 10 de novembro de 2016

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

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

**BANCA EXAMINADORA**

**Profa. Ana Paula Kirchheim**  
**(UFRGS)**  
Dra. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

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

**Eng. Fábio André Vicili**  
**(UFRGS)**  
MSc. pela Universidade Federal do Rio  
Grande do Sul

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

Dedico este trabalho a meus pais, Walmor e Luci, e ao  
Roger pelo carinho, incentivo e apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço as professoras Denise e Angela, orientadoras deste trabalho, por todo apoio, ideias, conhecimento e auxílio prestado ao longo de toda essa caminhada, além da amizade criada durante esses 5 anos de curso. Saibam que o mais gratificante é tê-las como exemplo de vida, pois não há nada melhor do que ter alguém como vocês para admirar, mulheres que amam o que fazem, fortes e determinadas, e que apesar das inúmeras atividades e tarefas do dia-a-dia sempre tiveram um tempo para mim quando precisei. Muito obrigada por tudo, tenham a certeza que vocês contribuíram muito com o meu crescimento como pessoa e como profissional.

Agradeço a professora Ana Paula, relatora e banca desse trabalho, por toda ajuda prestada, não somente neste trabalho, mas ao longo de todo o curso. Fazer parte do seu convívio e poder participar em alguns dos seus projetos foi muito gratificante. Seu entusiasmo de sempre buscar mais e querer nos levar para o mundo carrego como aprendizado de vida.

Agradeço aos meus pais, Walmor e Luci, por tudo. Sem vocês eu nunca chegaria até aqui, o exemplo de valores visto em vocês ao longo de toda vida me tornaram a pessoa que sou hoje. Muito obrigada por todo auxílio, incentivo, amor e apoio, tudo que tenho e sou devo a vocês.

Agradeço ao Roger, por todo amor e companheirismo desde o início dessa caminhada, com você ao meu lado tudo se tornou mais simples e prazeroso. Obrigada pelo grande incentivo e apoio, agradeço sempre por ter você ao meu lado todos os dias.

Agradeço ao Cássio, meu irmão e amigo, sua força e desenvoltura de lidar com as dificuldades da vida me transformaram em uma pessoa mais forte e determinada. Agradeço também a Suzy, pela amizade conquistada, e as minhas afilhadas Isabhela e Anthonela.

Agradeço aos parentes e amigos pelo incentivo e expectativa depositados em mim, que me deram forças ao longo desses anos: Nona Maria, Vó Onilda, Tia Salete, Vanderlei, Luciane, Fernando, Henrique, Elizete, Elaine, Vó Lourdes, Camila, Anderson, minha afilhada Laurinha, Melina, Juliana, Tânia, Jaqueline, Marli, e também aqueles que não mencionei.

Agradeço aos professores que tive na vida, vocês foram essenciais, pois graças aos conhecimentos e exemplos é que me tornei o que sou hoje e tenho o conhecimento que sei hoje.

Agradeço aos amigos conquistados nestes anos de curso, pelo incentivo e pela amizade.

Agradeço aos amigos do Norie, que são como uma família, é muito bom fazer parte desse grupo, ao longo desses anos tive o prazer de conviver com pessoas maravilhosas. Além de serem muito divertidas sempre contribuíram com conhecimento de alguma forma ou em algum momento. Muito obrigada pela ajuda que me deram e pela amizade: Laís, Mauro, Anderson, Carina, Caroline, Priscila, Marlon, Abrahão, Fernanda, Fábio, Cristina V., Guilherme H., Franciele T., Simone V., Lucília, Dóris, Gabriela, Rafael M., entre outros, e em especial a Natália que é uma grande amiga e colaboradora.

Agradeço aos laboratoristas e amigos, Seu Gilmar e o pequeno Airton, a ajuda de vocês foi essencial, obrigada pelo auxílio nos trabalhos e pelos momentos de descontração.

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.

Agradeço a empresa Queiroz Galvão pela doação dos materiais utilizados nesse trabalho.

O dinheiro faz homens ricos, o conhecimento faz homens  
sábios e a humildade faz grandes homens.

*Mahatma Gandhi*

## RESUMO

O uso de diferentes tecnologias e materiais tem contribuído para o aumento da durabilidade frente aos agentes agressivos que prejudicam as estruturas de concreto por meio da redução da permeabilidade. Existem muitas formas de contribuir com o aumento da durabilidade das estruturas, no entanto, nesse trabalho será dado enfoque para utilização de produtos impermeabilizantes por cristalização comparados ao uso de sílica ativa. Variaram-se apenas as adições (impermeabilizante por cristalização e sílica ativa) e o tratamento superficial (impermeabilizante por cristalização) de duas formas: lixado e não lixado. O impermeabilizante por cristalização tem na sua composição compostos ativos com objetivo de formar cristais nos vazios ou espaços gerados por fissuras, realizando um processo de autorreparo ou preenchimento. Foram realizados ensaios a fim de verificar a penetrabilidade de fluídos nos concretos, dentre eles estão: absorção total (NBR 9778), penetração de água sob pressão (30kPa), penetração de cloretos (ASTM C 1202) e carbonatação pelo método da pulverização de fenolftaleína. Também foi observada a capacidade do impermeabilizante por cristalização de fechar fissuras no concreto. O acompanhamento do autorreparo das fissuras foi monitorado com auxílio de um aparelho de ultrassom que mede velocidade de propagação de onda ultrassônica. Em paralelo, fizeram-se análises microscópicas das fissuras e acompanhamento com câmera termográfica. Foi realizado ainda o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739). Os resultados mostram que a adição de sílica ativa é mais eficiente que o impermeabilizante por cristalização analisado, pois contribuiu com o aumento da resistência à compressão, reduziu a absorção, a penetração de água sob pressão e a penetração de cloretos, além de ser, aparentemente, eficiente no autorreparo das fissuras. No entanto, o impermeabilizante por cristalização utilizado como adição contribuiu com o aumento da resistência e teve melhor desempenho dentre os ensaios realizados que o concreto referência, se equivalendo à sílica ativa quanto à carbonatação. Somente no ensaio de absorção total apresentou pior desempenho que o concreto referência, possivelmente, pela mudança causada na microestrutura do concreto. No autorreparo das fissuras os concretos com tratamentos superficiais tiveram melhores resultados que a adição de impermeabilizante por cristalização, pois, a forma de utilização fecha a superfície do concreto.

Palavras-chave: Concreto. Impermeabilizante por cristalização. Permeabilidade. Durabilidade.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa.....	22
Figura 2 – Distribuição das origens das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado .....	26
Figura 3 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas .....	27
Figura 4 – Ação do ambiente em uma estrutura de concreto armado .....	29
Figura 5 – Causas físicas de deterioração do concreto.....	30
Figura 6 – Causas químicas de deterioração do concreto.....	31
Figura 7 – Manifestações patológicas no concreto ao longo do tempo.....	32
Figura 8 – Representação esquemática de materiais de porosidade similar.....	35
Figura 9 – Principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior dos materiais porosos.....	36
Figura 10 – Representação esquemática do fluxo da difusão devido à diferença de concentração.....	38
Figura 11 – Incidência relativa dos tipos de umidade segundo o mecanismo de manifestação.....	42
Figura 12 – Edificações comerciais e serviços: sistemas de reparo mais empregados.....	42
Figura 13 – Representação esquemática dos diferentes tipos de proteção de superfície do concreto.....	47
Figura 14 – Representação esquemática da matriz experimental realizada.....	51
Figura 15 – Fôrma com armadura posicionada e espaçadores .....	52
Figura 16 – Dispositivo de quatro pontos e demarcação dos terços médios.....	52
Figura 17 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo .....	55
Figura 18 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo DMC=12,5 mm .....	56
Figura 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo DMC=25 mm .....	57
Figura 20 – Execução do ensaio de abatimento pelo tronco de cone e aspecto visual do concreto fresco .....	62
Figura 21 – Fôrmas utilizadas para a moldagem dos concretos .....	63
Figura 22 – Tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização .....	64
Figura 23 – Desenvolvimento do ensaio de penetração de água sob pressão .....	66
Figura 24 – Aspecto visual dos corpos de prova com aplicação de parafina sólida no topo e base .....	67
Figura 25 – Fatias de carbonatação .....	68
Figura 26 – Processo de preparação das amostras para o ensaio de penetração de cloretos .....	69
Figura 27 – Etapas da execução do ensaio de penetração de cloretos .....	70

Figura 28 – Ilustração da montagem do ensaio de penetração de cloretos .....	71
Figura 29 – Corpo de prova com aspersão de nitrato de prata após ensaio de penetração de cloretos .....	72
Figura 30 – Utilização de termografia com fonte de calor direcionada .....	73
Figura 31 – Utilização de termografia para visualização de fissuras .....	73
Figura 32 – Indicação do posicionamento dos transdutores .....	74
Figura 33 – Representação esquemática do programa experimental .....	75
Figura 34 – Resistência à compressão simples aos 28 dias dos quatro tipos de concreto ensaiados .....	77
Figura 35 – Absorção de água aos 28 dias dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	80
Figura 36 – Índice de vazios aos 28 dias dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	80
Figura 37 – Massas específicas dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	84
Figura 38 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de penetração de água sob pressão .....	85
Figura 39 – Penetração de água sob pressão dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	86
Figura 40 – Profundidade de carbonatação dos cinco tipos de concreto ensaiados ao longo do tempo .....	88
Figura 41 – Profundidade de carbonatação na idade de 176 dias .....	88
Figura 42 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de carbonatação .....	90
Figura 43 – Aspectos dos corpos de prova com tratamento superficial sem lixamento durante o ensaio de carbonatação .....	90
Figura 44 – Carga passante no ensaio de penetração de íons cloreto nos cinco tipos de concreto ensaiados .....	91
Figura 45 – Aspectos dos corpos de prova após a aspersão de nitrato de prata .....	93
Figura 46 – Área de penetração de íons cloreto por aspersão de nitrato de prata nos cinco tipos de concreto ensaiados .....	94
Figura 47 – Abertura de fissuras .....	95
Figura 48 – Utilização de termografia com fonte de calor direcionada para verificação de fissuras .....	96
Figura 49 – Verificação de fissuras por termografia infravermelha .....	97
Figura 50 – Influência do tratamento e da idade em relação a velocidade de propagação da onda .....	99
Figura 51 – Análise microscópica no concreto referência .....	102
Figura 52 – Análise microscópica no concreto com adição do impermeabilizante .....	103
Figura 53 – Análise microscópica no concreto com adição de sílica ativa .....	104

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classe de agressividade ambiental .....	25
Quadro 2 – Classificação dos tratamentos superficiais existentes .....	48
Quadro 3 – Características físico-químicas da adição de impermeabilizante por cristalização .....	59
Quadro 4 – Características físico-químicas dos aditivos .....	59
Quadro 5 – Características físico-químicas do tratamento de impermeabilizante por cristalização .....	60

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Proporcionalamento dos materiais, em massa .....	50
Tabela 2 – Consumo de cimento para cada proporcionalamento utilizado .....	51
Tabela 3 – Composição química do cimento .....	54
Tabela 4 – Caracterização física e mecânica do cimento .....	54
Tabela 5 – Porcentagem retida nas peneiras da série normal para o agregado miúdo .....	55
Tabela 6 – Porcentagem retida nas peneiras para os agregados graúdos .....	56
Tabela 7 – Caracterização física dos agregados graúdos .....	57
Tabela 8 – Composição química da sílica ativa .....	58
Tabela 9 – Penetração de íons cloreto baseado na carga passante .....	71
Tabela 10 – Resistência à compressão aos 28 dias dos quatro tipos de concreto ensaiados .....	76
Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA): resistência à compressão aos 28 dias .....	78
Tabela 12 – Teste F de Fischer para resistência à compressão .....	78
Tabela 13 – Absorção de água e índice de vazios dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	79
Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA): absorção de água .....	82
Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA): índice de vazios .....	82
Tabela 16 – Teste F de Fischer para a absorção de água .....	83
Tabela 17 – Teste F de Fischer para o índice de vazios .....	83
Tabela 18 – Massas específicas dos cinco tipos de concreto ensaiados .....	84
Tabela 19 – Média da área molhada de penetração de água sob pressão dos cinco tipos de concreto ensaiados.....	85
Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA): penetração de água sob pressão .....	87
Tabela 21 – Teste F de Fischer para penetração de água sob pressão .....	87
Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA): profundidade de carbonatação aos 176 dias .....	89
Tabela 23 – Teste F de Fischer para carbonatação .....	89
Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA): carga passante no ensaio de penetração de íons cloreto .....	92
Tabela 25 – Teste F de Fischer para penetração de íons cloreto .....	92
Tabela 26 - Análise de variância (ANOVA) – Velocidade de ondas ultrassônicas .....	100

## **LISTA DE SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANOVA – Análise de Variância

ASTM – American Society for Testing and Materials

CP IV – Cimento Portland Pozolânico

$f_{ck}$  – Resistência Característica do Concreto à Compressão

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

UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

LACER – Laboratório de Materiais Cerâmicos

## LISTA DE FÓRMULAS QUÍMICAS

$\text{Ca(OH)}_2$  – Hidróxido de cálcio

$\text{Cl}^-$  – Íon cloreto

$\text{CO}_2$  – Dióxido de carbono ou gás carbônico

C-S-H – Silicato de Cálcio Hidratado

$\text{NaCl}$  – Cloreto de sódio

$\text{NaOH}$  – Hidróxido de sódio

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	18
<b>2 DIRETRIZES DA PESQUISA</b> .....	21
2.1 QUESTÃO DE PESQUISA .....	21
2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO .....	21
<b>2.2.1 Objetivo Principal</b> .....	21
<b>2.2.2 Objetivos Específicos</b> .....	21
2.3 DELIMITAÇÕES .....	22
2.4 DELINEAMENTO .....	22
<b>3 DEGRADAÇÃO DO CONCRETO</b> .....	24
3.1 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO .....	28
3.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO .....	34
<b>3.2.1 Sucção capilar</b> .....	37
<b>3.2.2 Difusão</b> .....	38
<b>3.2.3 Penetração de água sob pressão</b> .....	39
<b>4 FORMAS DE REDUZIR A PERMEABILIDADE NO CONCRETO</b> .....	40
4.1 REDUÇÃO DA POROSIDADE CAPILAR .....	43
<b>4.1.1 Relação água/aglomerante</b> .....	44
<b>4.1.2 Adição de sílica ativa</b> .....	45
<b>4.1.3 Adição de impermeabilizante por cristalização</b> .....	46
4.2 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS .....	46
<b>4.2.1 Impermeabilizante por cristalização</b> .....	48
<b>5 PROGRAMA EXPERIMENTAL</b> .....	50
5.1 METODOLOGIA .....	50
5.2 MATERIAIS UTILIZADOS .....	53
<b>5.2.1 Cimento</b> .....	53
<b>5.2.2 Agregado miúdo</b> .....	54
<b>5.2.3 Agregado graúdo</b> .....	56
<b>5.2.4 Água</b> .....	57
<b>5.2.5 Adições</b> .....	57
5.2.5.1 Sílica ativa .....	58
5.2.5.2 Impermeabilizante por cristalização .....	58
<b>5.2.6 Aditivos</b> .....	59
<b>5.2.7 Tratamento superficial</b> .....	60

5.2.7.1 Impermeabilizante por cristalização .....	60
5.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO .....	61
<b>5.3.1 Mistura dos materiais .....</b>	<b>61</b>
<b>5.3.2 Ensaio de consistência .....</b>	<b>61</b>
<b>5.3.3 Moldagem dos corpos-de-prova .....</b>	<b>62</b>
<b>5.3.4 Cura .....</b>	<b>63</b>
<b>5.3.5 Aplicação do tratamento superficial .....</b>	<b>64</b>
5.4 ENSAIOS REALIZADOS .....	64
<b>5.4.1 Ensaio de resistência à compressão .....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.2 Ensaio de absorção total .....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.3 Ensaio de penetração de água sob pressão .....</b>	<b>65</b>
<b>5.4.4 Ensaio de carbonatação .....</b>	<b>67</b>
<b>5.4.5 Ensaio de penetração de íons cloreto .....</b>	<b>69</b>
<b>5.4.6 Formas de análise do autorreparo de fissuras .....</b>	<b>72</b>
5.4.6.1 Câmera termográfica .....	72
5.4.6.2 Onda ultrassônica .....	73
5.4.6.3 Microscopia ótica.....	74
5.5 REPRESENTAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL .....	75
<b>6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....</b>	<b>76</b>
6.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO .....	76
6.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO TOTAL .....	79
6.3 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO .....	84
6.4 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO .....	87
6.5 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO .....	91
6.6 FORMAS DE ANÁLISE DO AUTORREPARO DE FISSURAS .....	94
<b>6.6.1 Câmera termográfica .....</b>	<b>95</b>
<b>6.6.2 Onda ultrassônica .....</b>	<b>98</b>
<b>6.6.3 Microscopia ótica .....</b>	<b>101</b>
<b>7 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>106</b>
REFERÊNCIAS .....	109
APÊNDICE A .....	114
APÊNDICE B .....	116
APÊNDICE C .....	118
APÊNDICE D .....	120
APÊNDICE E .....	127



APÊNDICE F .....	130
TRABALHOS PUBLICADOS.....	135

## 1 INTRODUÇÃO

O concreto foi descoberto no fim do século XIX, e no século XX foi utilizado de maneira intensa pela sociedade, tornando-se o material mais consumido pelo homem depois da água (HELENE; ANDRADE, 2010, p.905; MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.3). Apesar do uso intenso, muitas das estruturas de concreto passaram a apresentar manifestações patológicas muito antes da vida útil esperada.

Desta forma, a durabilidade das estruturas de concreto tem ganhado enfoque nos últimos anos. A partir da segunda metade do século XX houve um aumento nos danos causados pela degradação das construções; os reparos dessas obras de concreto têm se intensificado nos dias de hoje e a preocupação com o aumento da durabilidade também (ANDRADE, 2005, p.753). Problemas relacionados com essa questão tendem a se agravar, visto que muitas edificações construídas nas décadas passadas estão completando mais de 40 anos de vida, o que gera gastos com manutenções e reparos, o que tem levado a uma maior preocupação com definições de projeto que aumentem a durabilidade das estruturas (RIBEIRO, 2014, p.38).

A avaliação da durabilidade está relacionada com o desempenho esperado do produto, alguns fatores são preponderantes para que haja boa compreensão do mesmo. Ou seja, conhecer a composição do material e o seu comportamento possibilita dominar os danos ao longo do tempo causados pela interação do produto com agentes agressivos externos (JOHN, 2000, p.113).

Há diversas formas de deterioração das estruturas, mas a grande maioria ocorre devido aos mecanismos de transporte de fluidos no concreto e entender como funcionam esses processos auxilia no prolongamento da vida útil. Entre os fluidos que podem afetar a durabilidade do concreto, a água é o principal, sendo que a taxa de deterioração é intensificada pela facilidade com a qual penetra no material (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.125). Diante disso, garantir um concreto com baixa permeabilidade contribui para o aumento da durabilidade do mesmo, aumentando assim sua vida útil.

Pode-se reduzir a permeabilidade do concreto reduzindo a porosidade do mesmo, por meio da diminuição da relação água/cimento; utilização de pozolanas, produtos hidrofugantes ou impermeabilizantes na mistura, aplicação de produtos hidrofugantes ou impermeabilizantes na

superfície do concreto; substituição de cimentos puros por cimentos compostos, cimentos pozolânicos ou cimentos com escória de alto-forno; entre outras ações.

Esse trabalho tratará do uso de impermeabilizantes como forma de diminuir a permeabilidade, sendo esta definida como a capacidade do concreto no impedimento da entrada de fluidos. Os impermeabilizantes têm como função bloquear a passagem de água ou fluídos sob a forma líquida ou vapor, dessa maneira protegendo as estruturas. Devido a isso se tem a possibilidade de uso deste material para fins de aumento da vida útil de estruturas do concreto (MUHAMMAD et al., 2015, p.80).

A impermeabilização cria uma barreira quando é aplicada como tratamento superficial, fechando os poros superficiais com o objetivo de impedir a entrada de água por qualquer mecanismo de transporte. Alguns impermeabilizantes também podem ser usados como adição na mistura, tendo por finalidade diminuir a porosidade capilar do concreto, tornando-o mais resistente a agentes agressivos.

Produtos impermeabilizantes são usados para garantir a estanqueidade e a redução da permeabilidade em estruturas como: fundações, subsolos, áreas molhadas e expostas a intempéries, lajes, piscinas, entre outros. Entre os benefícios pode-se destacar o aumento da vida útil das construções, pois retarda ou até mesmo mitiga processos de deterioração.

O uso de materiais impermeabilizantes no concreto tem se intensificado nos últimos anos, no entanto, a composição desses materiais varia bastante (MUHAMMAD et al., 2015, p.84). Conhecimentos científicos específicos sobre produtos impermeabilizantes por cristalização são escassos, mas informações sobre produtos a base de silicatos tem ganhado maior enfoque (SONG et al., 2016). Publicações referentes a outras formas de tratamento superficiais do concreto ou adições utilizadas com a mesma finalidade, estão bem difundidas, como é o caso do uso de materiais pozolânicos como aglomerante (HELENE; ANDRADE, 2010, MEHTA; MONTEIRO, 2014, GJØRV, 2015, NEVILLE, 2016; entre outros).

Diante disso, este estudo tem por finalidade fazer avaliação do desempenho do produto impermeabilizante por cristalização e compará-la com um dos métodos usualmente empregado para diminuir a porosidade capilar do concreto, que é a utilização de sílica ativa como adição na mistura.

No capítulo seguinte, capítulo 2, referente às diretrizes do trabalho, apresenta-se os tópicos que direcionam essa pesquisa. Os capítulos 3 e 4 são constituídos dos temas oriundos da pesquisa bibliográfica referente ao que será estudado no trabalho, com foco na durabilidade e fatores que a influenciam.

O programa experimental deste estudo é apresentado no capítulo 5, no qual consta a metodologia, a caracterização e a descrição dos materiais utilizados para confeccionar os concretos e, também, descreve-se a produção dos concretos ensaiados, assim como os ensaios executados. No capítulo 6 estão expostos os resultados dos experimentos, juntamente com a interpretação dos mesmos com o auxílio de análises estatísticas. Por fim, no capítulo 7, são apresentadas as conclusões obtidas na pesquisa.

## **2 DIRETRIZES DA PESQUISA**

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

### **2.1 QUESTÃO DE PESQUISA**

A questão de pesquisa a ser respondida é: o produto impermeabilizante por cristalização utilizado como adição na mistura do concreto ou como tratamento superficial auxilia na redução da permeabilidade do concreto?

### **2.2 OBJETIVOS DO TRABALHO**

Os objetivos desse trabalho estão descritos nos itens abaixo, sendo estes classificados em principal e específicos.

#### **2.2.1 Objetivo Principal**

O objetivo principal desta pesquisa é verificar o comportamento de concretos com tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização, concretos com adição de sílica ativa e de concretos com adição de impermeabilizante por cristalização para a redução da permeabilidade, especificamente, ao fechamento da porosidade capilar impedindo os mecanismos de transportes e ao autorreparo de fissuras.

#### **2.2.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos são:

- a) verificar a eficiência dos diferentes sistemas de tratamentos na resistência à compressão;
- b) verificar a eficiência dos diferentes sistemas de tratamentos na absorção e penetração de água sob pressão;
- c) verificar a eficiência dos diferentes sistemas de tratamentos na carbonatação;
- d) verificar a eficiência dos diferentes sistemas de tratamentos na penetração de cloretos;
- e) verificar a eficiência dos diferentes sistemas de tratamentos no autorreparo de fissuras.

## 2.3 DELIMITAÇÕES

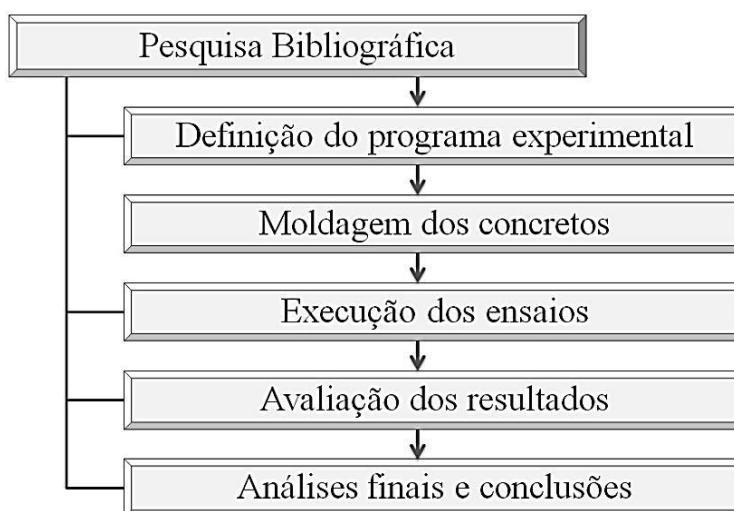
A seguir estão descritas as delimitações relativas ao trabalho proposto:

- a) os produtos impermeabilizantes por cristalização testados são de um único fornecedor;
- b) será analisado apenas um tipo de cimento: CP IV;
- c) a relação água/cimento ficará restrita a um único valor: 0,41;
- d) será utilizado, a fim de comparação com o impermeabilizante, apenas uma adição mineral: sílica ativa;
- e) o teor de sílica ativa adicionada na mistura limita-se ao valor de 10%.

## 2.4 DELINEAMENTO

O delineamento deste trabalho abrange as etapas representadas esquematicamente na figura 1:

Figura 1 – Diagrama das etapas da pesquisa



(fonte: própria da autora)

A pesquisa bibliográfica está presente em praticamente todas as etapas do trabalho, com exceção da moldagem dos concretos, pois para cada etapa é preciso adquirir conhecimento sobre o assunto a fim de obter embasamento teórico. A busca por bibliografias com registros de experiências anteriores sobre o uso de impermeabilizante por cristalização é o principal foco de pesquisa, além de outros métodos usualmente utilizados para o aumento da durabilidade do concreto, como é o caso do uso de sílica ativa como adição na mistura com o intuito de diminuir a porosidade capilar

do concreto. Além disso, é necessário obter conhecimento sobre o tema e conhecer conceitos e definições sobre os ensaios desenvolvidos e métodos de avaliação.

A definição do programa experimental tem por objetivo estipular as variáveis a serem estudadas, assim como os métodos de ensaios adequados que possibilitem avaliar de maneira a obter resultados relevantes sobre o tema estudado. A produção dos concretos deve ser elaborada cuidadosamente para evitar que no processo de moldagem apareçam variáveis não planejadas no programa experimental. Por isso, a atenção com a padronização da realização dessa etapa, assim como cuidados com o uso correto de materiais de acordo com o proposto é essencial para desenvolver de forma confiável essa fase no trabalho.

Depois da moldagem dos concretos é realizada a execução dos ensaios. Os ensaios são definidos no programa experimental com a finalidade de avaliar os concretos estudados diante dos mecanismos de transportes no concreto que possam comprometer a durabilidade das estruturas. Por meio da realização dos ensaios é adquirida a caracterização dos materiais, assim como o desempenho dos tipos de tratamentos utilizados na pesquisa.

Após a realização dos ensaios é feita a avaliação dos resultados. Esta etapa é a parte essencial do trabalho, visto que avalia a viabilidade da aplicação do produto estudado. Por meio de análises estatísticas dos dados obtidos nos ensaios pode-se conhecer a significância dos resultados e analisar comparativamente qual o tipo de tratamento empregado tem melhor desempenho para o aumento da durabilidade do concreto.

Por fim, têm-se as análises finais e conclusões; esta etapa faz o fechamento do trabalho. A mesma tem a finalidade de buscar explicações a respeito do comportamento dos concretos analisados com e sem o uso de sílica ativa quando comparados aos concretos com tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização com processo de lixamento e sem lixamento, e com o concreto com adição de impermeabilizante por cristalização na mistura. A partir da análise dos resultados, pretendeu-se responder à questão de pesquisa deste trabalho.

### 3 DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

O concreto é o material mais empregado na construção civil (HELENE; ANDRADE, 2010, p.905; MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.3). Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.3), estima-se que o consumo anual de concreto no mundo esteja entorno de 19 bilhões de toneladas. Isto se deve, em parte, à compatibilidade dos materiais constituintes, quando se trata do concreto armado, que propicia uma complementação físico-mecânica e química, explicando o sucesso do seu emprego como material da construção civil (KIRCHHEIM, 2003, p.23).

Durante muitos anos o concreto foi considerado um material que não necessitava de cuidados de manutenção devido ao excelente desempenho que era observado em obras que continham esse material na sua constituição. Diante disso, este foi utilizado de maneira intensa e sem controle de qualidade adequado, sendo empregado em ampla variedade de ambientes e, conseqüentemente, exposto a condições desfavoráveis (ANDRADE, 1997, p.5).

De acordo com Medeiros et al. (2011, p.788), para garantir uma durabilidade adequada às estruturas de concreto armado, é necessário durante a concepção do projeto e na dosagem do concreto adotar medidas preventivas, as quais resultam em mais economia, facilidade e segurança quando comparadas a medidas de proteção após o período de construção. Dessa forma, o investimento na durabilidade não se torna atraente somente no âmbito ambiental, mas também é interessante economicamente.

Diante da importância em adotar medidas preventivas adequadas que garantam a durabilidade às estruturas de concreto armado, as normativas brasileiras estabelecem, por meio da NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2014), os procedimentos em relação ao projeto de estruturas de concreto. Nesta, estão descritas medidas que devem ser adotadas de acordo com a agressividade do ambiente, e entre outros fatores descreve a questão referente às diretrizes para durabilidade das estruturas de concreto. A exigência de durabilidade, de acordo com a norma, cita que:

“As estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto conservem suas segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil.”

Diante disso, inicialmente é necessário conhecer qual é a classe de agressividade do meio ambiente no qual vai ser projetada a estrutura de concreto. Esta classificação é feita com o



auxílio do Quadro 1, o qual apresenta a classe de agressividade ambiental e o risco de deterioração da estrutura.

Quadro 1 – Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>1), 2)</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>1)</sup>	Grande
		Industrial <sup>1), 2)</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>1), 3)</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

<sup>1)</sup> Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

<sup>2)</sup> Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

<sup>3)</sup> Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

(fonte: NBR 6118, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2014)

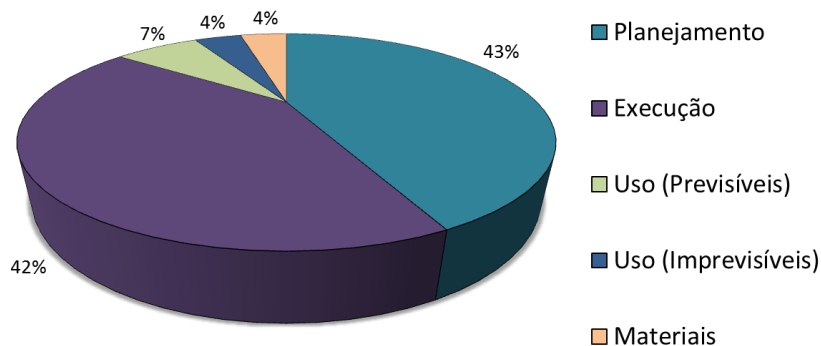
Depois de estabelecida a classe de agressividade, a norma também apresenta os requisitos mínimos de durabilidade relacionados à relação água/cimento e à resistência à compressão do concreto. Além disso, ainda é enfatizado o cobrimento mínimo necessário de acordo com a classe de agressividade, o tipo de concreto e o elemento estrutural.

Um concreto durável é aquele que mantém a sua forma, com qualidade e capacidade de uso originais quando exposto ao meio para o qual foi projetado. No entanto, nenhum material é considerado eternamente durável; o concreto, mesmo possuindo características e propriedades que suportam situações adversas de uso e aplicações, muda ao longo do tempo suas propriedades internas pelas variações que ocorrem na sua microestrutura (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.126).

A durabilidade ganha maior destaque quando é direcionada ao aspecto estrutural das construções, visto que a perda do desempenho reflete diretamente na questão da segurança e do conforto dos usuários, ou seja, aspectos críticos que mantém a proteção à vida e a proteção à propriedade estão relacionados à redução da vida útil das estruturas (ISAIA, HELENE, 1993, p 13-33).

O aumento da durabilidade está diretamente ligado à mitigação ou à eliminação de manifestações patológicas, e as causas que provocam o aparecimento dessas manifestações podem ter várias origens. A quantificação dessas origens foi realizada por meio de um estudo feito por Andrade (1997, p.72), o qual registrou em várias obras os diversos tipos de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado, e conseguiu separá-las em seis origens prováveis. Na Figura 2, pode-se ver o grau de influência que cada origem tem para contribuição da geração de manifestações patológicas.

Figura 2 – Distribuição das origens das manifestações patológicas em estruturas de concreto armado



(fonte: ANDRADE, 1997, p.72)

Pela distribuição das origens das manifestações patológicas observa-se, na Figura 2, que o planejamento/projeto aliados à execução são os fatores mais influentes na geração das manifestações. Segundo Andrade (1997, p.72), essa grande porcentagem associada ao planejamento/projeto se deve ao fato de que não havia nas obras analisadas grande preocupação com a durabilidade nessa fase, ou seja, as estruturas eram dimensionadas apenas para resistir a esforços mecânicos solicitados. Sendo que esta causa evidenciada por Andrade (1997) representa a situação da grande maioria das obras, nas quais requisitos elaborados como medidas mitigatórias de possíveis manifestações patológicas não são tomadas na fase de construção quando necessário, pois não é considerada a questão da durabilidade na fase de planejamento/projeto. Já em relação à execução, de acordo com o autor, deve-se à falta de cuidado com os procedimentos de concretagem, escolha de materiais, dosagem, mistura, transporte, lançamento, adensamento e cura. Segundo o autor, “[...] é principalmente nesta etapa do processo construtivo que se define se a estrutura construída será durável ou não”.

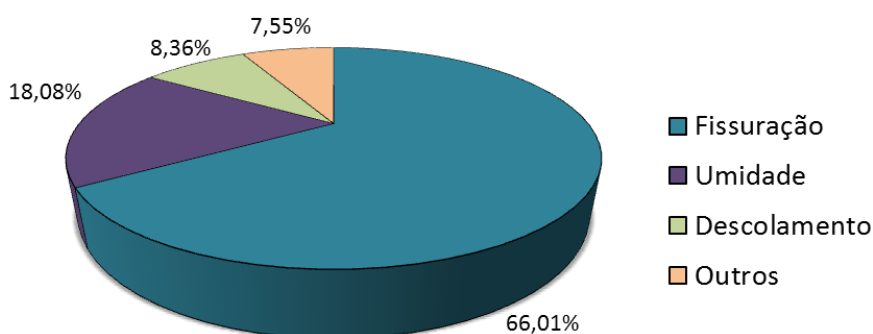
Hoje, a preocupação com a durabilidade é mais evidente, mas ainda é falha. Requisitos como controle de qualidade, bom planejamento e uso de materiais adequados a cada situação podem ser

vistos em obras que tenham maior valor social e econômico. No entanto, alguns profissionais ainda não possuem o entendimento de que o melhor é prevenir as manifestações, ao invés de esperar que elas ocorram e ter que realizar reparos futuros. Essa ação, além de contribuir para o aumento da durabilidade das estruturas, ainda se torna compensatória economicamente.

Como descrito por Silva Filho (1994, p.14), a implantação de melhoria na qualidade de planejamento, projeto e execução contribui significativamente para o aumento da durabilidade, como já visto na Figura 2. E quanto pior for a qualidade inerente às fases de planejamento, projeto e execução, maior será seu custo em uso, visto que os gastos com manutenções e reparos provavelmente superarão os gastos de medidas preventivas nas fases preliminares da obra.

Dal Molin (1988) aponta em seu estudo uma série de problemas referentes à degradação das estruturas por manifestações patológicas, sendo que a maioria se relaciona à qualidade deficiente que existe durante as diversas fases do processo das construções. Mosh (2009, p.79) em seu trabalho apresenta também dados sobre as principais manifestações patológicas nas faces externas de uma edificação. Em ambos, pode-se verificar que a fissuração é a manifestação com maior incidência, seguida por manifestações que envolvem problemas de umidade, problemas relacionados a descolamento e, por fim, têm-se outras manifestações com menor incidência como a segregação do concreto, deformações excessivas, má execução de fôrmas, entre outras. Na Figura 3, ilustra-se os dados referentes a pesquisa de Dal Molin (1998).

Figura 3 – Incidência relativa dos diferentes tipos de manifestações patológicas



(fonte: DAL MOLIN, 1988, p.127)

Entre as manifestações patológicas apresentadas por Dal Molin (1988), a grande maioria poderia ser evitada se os cuidados preliminares tivessem sido controlados. Estima-se que aproximadamente 40% dos recursos gastos na indústria da construção em países desenvolvidos

são aplicados nos reparos e manutenções de edificações existentes, e somente 60% são aplicados em novas construções (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.126). Diante disso, pequenos investimentos em projeto e execução é uma maneira eficiente de obter maior durabilidade e de forma mais controlada; visto que, não é apenas uma questão técnica e econômica, mas também uma questão ambiental e sustentável (GJØRV, 2015, p.10).

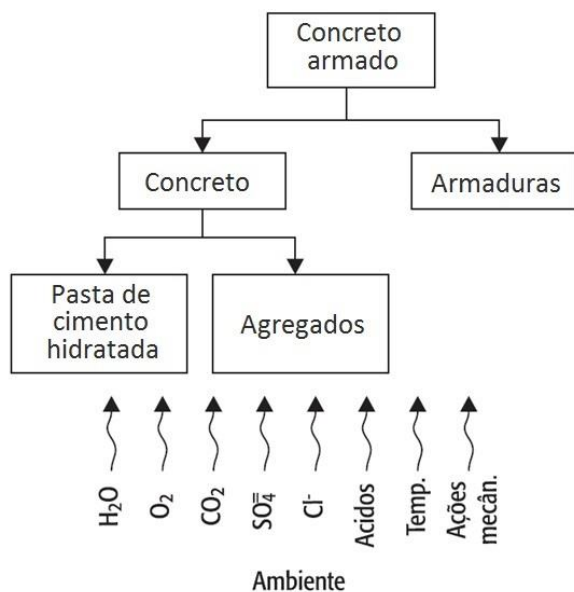
Conhecer os mecanismos de degradação a fim de preveni-los antes de sua ocorrência é essencial para desenvolver construções com boa durabilidade e com pouca ou nenhuma incidência de manifestações patológicas. Dessa forma, no item seguinte serão apresentados alguns desses mecanismos de degradação e suas origens. Assim como é necessário conhecer os mecanismos de degradação, os mecanismos de transporte de fluidos no concreto tem relevância semelhante. Visto que, as principais manifestações patológicas ocorrem pela decorrência do transporte de fluidos na massa de concreto. Este tema será abordado também nos itens posteriores.

### 3.1 MECANISMOS DE DEGRADAÇÃO DO CONCRETO

A deterioração do concreto dificilmente ocorre por uma causa única. Ao longo do tempo esta estará atrelada a vários fatores deletérios, os quais geram um efeito sinérgico. Dessa maneira, os efeitos físicos e químicos atuarão mutuamente em quase todas as situações (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.134).

Na literatura está bem difundida a importância de conhecer a agressividade do meio ambiente, sendo este o fator essencial para se prever a durabilidade das estruturas e, por isso, deve ser considerado desde a fase de projeto. O concreto sofre influência de efeitos externos que variam conforme o ambiente no qual está inserido e conforme o uso ao qual está submetido. Estes efeitos podem ser de origem física, química e mecânica (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.125). Na Figura 4, pode se ver as ações do ambiente que atuam em uma estrutura de concreto armado.

Figura 4 – Ação do ambiente em uma estrutura de concreto armado



(fonte: BERTOLINI, 2010, p.129)

Como visto na Figura 4, entre os efeitos externos pode-se citar, por exemplo, as variações de temperatura, umidade, agentes agressivos, mau uso das edificações, entre outros. Estes fatores podem alterar as propriedades internas do concreto, causa de degradações que tem como resultado a deterioração deste material. Além disso, quando o concreto já tem algumas propriedades internas enfraquecidas, como é o caso de concretos porosos, esta aliada aos efeitos externos proporciona transporte de fluidos, acarretando em uma acelerada degradação (BERTOLINI, 2010, p.31).

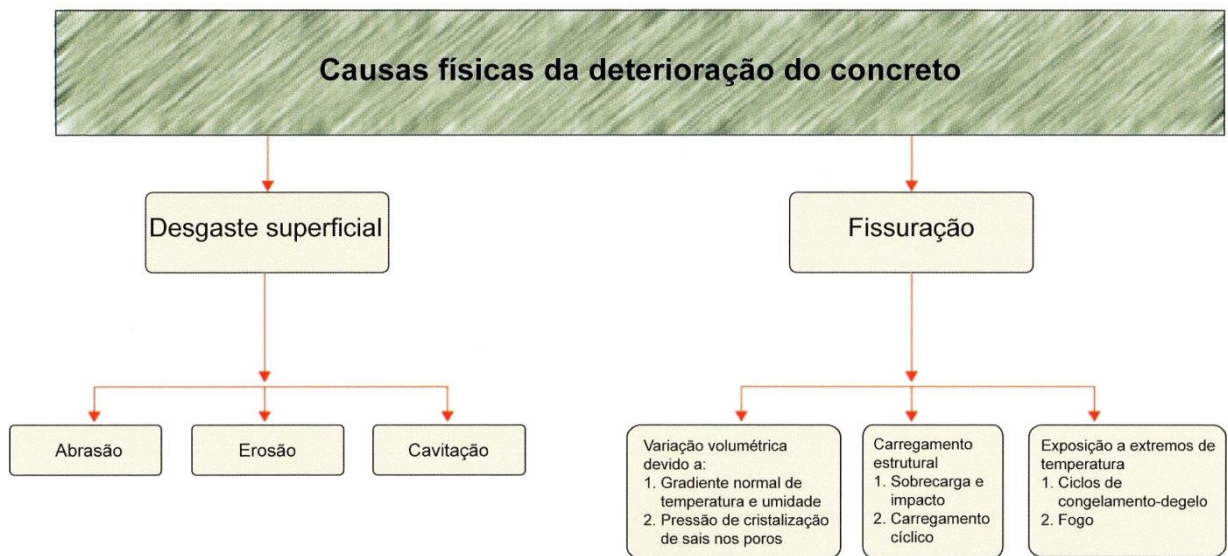
Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.125), “[...] os efeitos físicos que influenciam negativamente a durabilidade do concreto incluem desgaste da superfície, fissuração devida à cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas [...]”. Já os efeitos químicos eles citam como sendo “[...] a lixiviação da pasta de cimento por soluções ácidas e reações expansivas envolvendo ataque por sulfato, reação álcali-agregado e corrosão de armaduras”.

Entre todos os efeitos de degradação do concreto citados nota-se que a maioria tem como principal agente causador a água. Assim como a água ajuda na produção do material, a mesma tem a capacidade de destruí-lo, sendo o fator central para garantia da durabilidade. Este fluido está relacionado aos processos físico-químicos gerados pelo transporte de água o qual é associado à permeabilidade do material (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.127).

As causas físicas de deterioração do concreto podem ser divididas em duas categorias: desgaste superficial, quando o material tem perda de massa, sendo que esta pode ser devido à abrasão, à

erosão e à cavitação. E a segunda causa é devido à fissuração, a qual pode ocorrer por variações volumétricas, sobrecargas ou grandes mudanças de temperatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.134). Na Figura 5, podem-se ver, de maneira esquemática, as causas físicas de deterioração do concreto.

Figura 5 – Causas físicas de deterioração do concreto



(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.135)

As causas físicas podem contribuir com o agravamento das causas químicas, visto que o aumento da porosidade e, conseqüente, permeabilidade, decorrente do desgaste superficial ou da fissuração, ou ainda da ação conjunta de ambos, contribui para a diminuição da resistência e, portanto, redução da durabilidade. Dessa forma, as causas químicas ficam propensas a se desenvolver de maneira facilitada e geram mais riscos à degradação das estruturas.

As reações químicas, segundo Mehta e Monteiro (2014, p.161), que influenciam na deterioração do concreto podem ser divididas em três grupos: as reações de trocas entre um fluido agressivo e componentes presentes na pasta endurecida de cimento, reações envolvendo hidrólise e lixiviação e reações expansivas (Figura 6).

Figura 6 – Causas químicas de deterioração do concreto

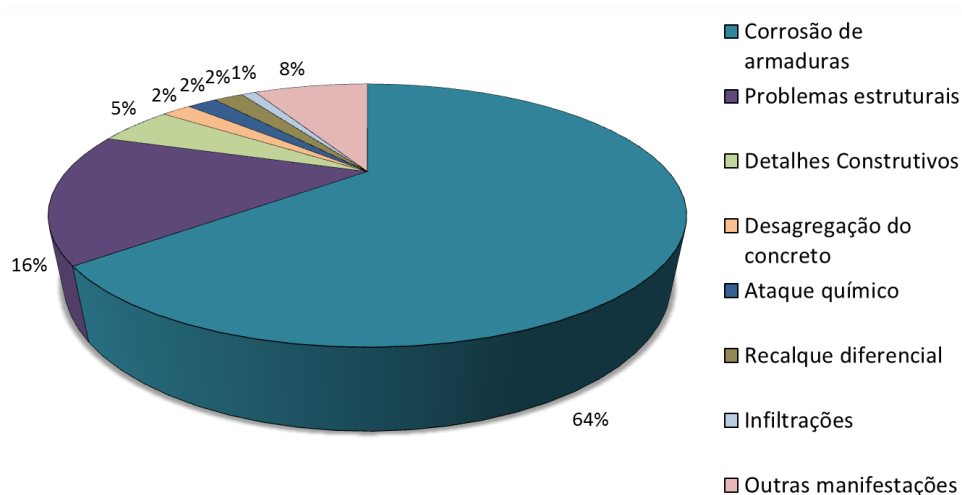


(fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.163)

As causas físicas podem se manifestar pela perda de alcalinidade, perda de massa, aumento nos processos de deterioração, perda de resistência e rigidez, fissuração, lascamento, pipocamento e deformações. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.134), durante a vida útil das estruturas é comum que as causas físicas se sobreponham, ou seja, o desgaste superficial geralmente estará ligado a possíveis efeitos de fissuração. Da mesma forma, ainda de acordo com os autores, os efeitos químicos podem desencadear efeitos físicos. A lixiviação, por exemplo, propicia um concreto poroso, assim, o concreto fica vulnerável à abrasão e à erosão.

Há vários tipos de manifestações patológicas, as quais podem derivar tanto de efeitos físicos, químicos e mecânicos, quanto da interconexão entre esses efeitos. Andrade (1997, p.84) apresentou, em seu estudo realizado no estado de Pernambuco, as principais manifestações patológicas no concreto ao longo do tempo. Sendo que a corrosão de armaduras foi a principal causa da deterioração em estruturas de concreto armado, como pode ser visto na Figura 7.

Figura 7 – Manifestações patológicas no concreto ao longo do tempo



(fonte: ANDRADE, 1997, p.84)

A corrosão de armadura têm grande incidência sobre as manifestações patológicas. Mehta e Monteiro (2014, p.205) e Bertolini (2010, p.129) também citam a corrosão de armadura como principal causa da deterioração, sendo que esta acarreta a formação de fissuras, gerando um ciclo de fissuração associado à corrosão crescente. Influências como gradiente de umidade e temperatura, ataque de agentes agressivos, lixiviação da pasta de cimento, ciclos de gelo-degelo, sobrecargas, entre outros, são fatores que aumentam a permeabilidade do concreto e contribuem para o aumento da taxa de corrosão das armaduras.

Entre as manifestações patológicas que influenciam com maior grau a degradação do concreto, podem-se destacar as que estão envolvidas com absorção/penetração de água, carbonatação, penetração de íons cloreto e fissuração. Estas dependem principalmente da resistência e da porosidade do concreto (GJØRV, 2015, p.22), e são as principais causas relacionadas à corrosão de armadura, entre outras manifestações geradas por esses fatores.

Em relação à penetração de cloretos, é necessário ter cuidados ainda no período de construção, ou seja, durante a concretagem. Pois, ambientes que contém íons cloreto na atmosfera, podem atingir a estrutura precocemente, antes que o concreto obtenha resistência e densidade suficiente (GJØRV, 2015, p.81). Construir estruturas de concreto em ambientes que contém cloreto têm sido um grande desafio, pois a penetração desse íon e a prematura corrosão das armaduras apresentam graves riscos para a durabilidade do concreto. A penetração de íons cloretos, em concretos não fissurados, segundo Gjörv (2015, p.15), pode dar origem a uma das mais graves entre as manifestações patológicas, a corrosão das armaduras, visto que os íons cloreto têm dimensões pequenas e grande facilidade de penetração, podendo despassivar as barras de aço,



comprometendo a durabilidade do concreto. A carbonatação é menos agressiva que a penetração de cloretos em concretos com baixa permeabilidade.

Concretos em ambientes com alta concentração de gás carbônico, ou dióxido de carbono, geralmente encontrados em centros urbanos pela queima de combustíveis (gasolina, óleo) e carvão, são mais propensos ao ataque por esses agentes agressivos. Novas estruturas de concreto, executadas em ambientes de severa agressividade com adequado padrão de qualidade, possuem o concreto com elevada densidade devido a cuidados tomados na elaboração e desenvolvimento da obra, assim, a carbonatação do concreto não representa nenhum problema prático (GJØRV, 2015, p.9). Tanto a penetração de cloretos quanto a carbonatação somente ocorrem devido à presença de água: pela alta umidade relativa do ar ou por ciclos de secagem e molhagem (RIBEIRO; CUNHA, 2014, p.87, p.109; NEVILLE, 2016, p.518).

A carbonatação não é uma causa da degradação do concreto, mas gera consequências como a redução do pH da pasta de cimento endurecida. A pasta de cimento costuma ter o pH entre 12,6 e 13,5, mas a carbonatação pode reduzi-lo até 8. Essa redução destrói o filme de passivação que protege a armadura, e com a presença de água e oxigênio pode iniciar o processo de corrosão (NEVILLE, 2016, p.519).

A penetração de agentes agressivos como o cloreto e o dióxido de carbono pode ser mitigada por meio da redução da permeabilidade do concreto. No entanto, o concreto fissurado terá maior facilidade de penetração de substâncias e de agentes agressivos, como cloretos, água e oxigênio, os quais oferecem maiores riscos de corrosão no concreto armado (GJØRV, 2015, p.88).

O ataque às armaduras, por exemplo, é facilitado pelas fissuras, segundo Gjörv (2015, p.89), este pode variar de acordo com a geometria das mesmas, ou seja, se a fissura é paralela ou perpendicular à armadura. Além disso, fatores como o ambiente e as condições de carga a qual a estrutura está exposta são importantes, identificando se a fissura é ativa (varia ao longo do tempo) ou passiva (estável ao longo do tempo).

As condições ambientais influenciam bastante quando se tem concretos com fissuração, visto que em ambientes de severa agressividade a taxa de deterioração por corrosão de armaduras pode ser aumentada significativamente quando há fissuras. E em reciprocidade, a taxa de deterioração pode ser diminuída em ambientes pouco agressivos, visto que as fissuras podem

ser preenchidas ou colmatadas tanto por produtos de corrosão quanto por produtos reativos presentes no concreto (GJØRV, 2015, p.90).

A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2014) cita que “o risco e a evolução da corrosão do aço na região das fissuras de flexão transversais à armadura principal dependem essencialmente da qualidade e da espessura do concreto de cobrimento da armadura. [...]”. Porém, quando a fissura se estende em dimensão até a armadura, a espessura de cobrimento não auxiliará na redução na taxa de deterioração. Mas, segundo Ribeiro e Cunha (2014, p.109) e Gjorv (2015, p.90) a qualidade do concreto influenciará, pois como já dito, por meio de processos de colmatação pode-se estancar a estrutura novamente, além do concreto com alta qualidade dificultar a formação da pilha eletroquímica ocasionada por processos de corrosão por agentes agressivos como o cloreto devido à homogeneidade do concreto endurecido.

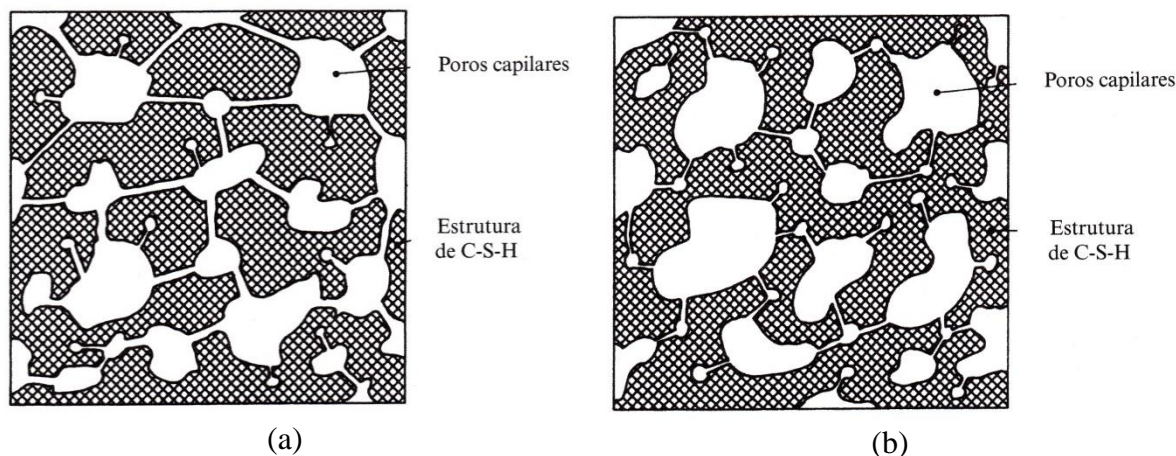
As manifestações patológicas citadas acima ocorrem em decorrência da ação dos mecanismos de transporte que podem ser: por absorção capilar, por penetração ou por difusão e, também por migração (BERTOLINI, 2010, p.36). Esses mecanismos serão detalhados no item a seguir, dessa forma, será possível o entendimento das principais causas da degradação do concreto.

### 3.2 MECANISMOS DE TRANSPORTE NO CONCRETO

O concreto é caracterizado por um sistema de poros de várias dimensões, pelos quais pode ocorrer a penetração de substâncias do ambiente. O transporte dessas substâncias pelo concreto está diretamente ligado aos fenômenos de degradação, como já foram citados no item anterior. Por ser um material poroso, seus vazios podem estar preenchidos por gases e líquidos, e os poros podem possuir várias dimensões, serem comunicantes com a superfície e interconectados entre si (BERTOLINI, 2010, p.31).

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.131), para uma relação água/cimento alta e baixo grau de hidratação, a pasta de cimento terá uma porosidade capilar alta. Ou seja, ela terá um elevado número de poros grandes e interconectados, dessa forma, a permeabilidade também será alta (Figura 8a). Com o desenvolvimento da hidratação, os poros terão os seus tamanhos reduzidos, assim como suas interconexões, diminuindo por consequência a permeabilidade (Figura 8b).

Figura 8 – Representação esquemática de materiais de porosidade similar, mas:  
(a) alta permeabilidade e (b) baixa permeabilidade



(fonte: NEVILLE; BROOKS, 2013, p.261)

A porosidade capilar relaciona entre si a resistência e a permeabilidade do concreto, visto que os fatores que influenciam na resistência também são os que influenciam na permeabilidade. Uma baixa porosidade capilar é obtida por meio de uma relação água/cimento menor que 0,40 (GJØRV, 2015, p.72), consumo adequado de cimento e adensamento e cura corretos. Além disso, cuidado com a dimensão e distribuição granulométrica dos agregados e deformações devidas a retrações térmicas ou por secagem, ou devidas a carregamentos excessivos ou prematuros, também é necessário para evitar a microfissuração na interface agregado-argamassa, sendo este um dos principais fatores para a alta permeabilidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.134).

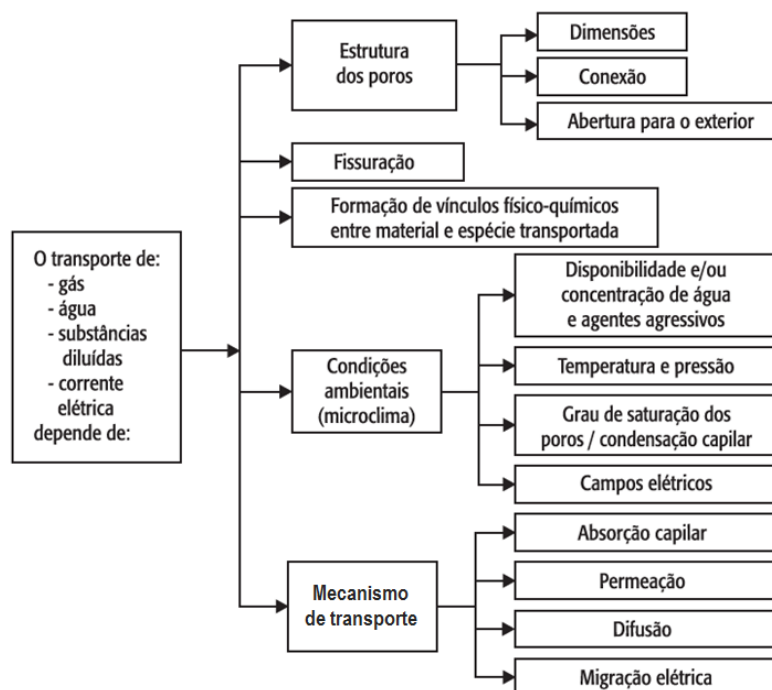
Diversos mecanismos de degradação estão associados à interação físico-química do ambiente, sendo que estas interações ocorrem após haver o movimento dos agentes agressivos no interior do material (BERTOLINI, 2010, p.31).

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.127), a baixa permeabilidade do concreto, assim como a estanqueidade da estrutura, são os fatores principais para manter a durabilidade. Conjuntamente, Ribeiro (2014, p.77) afirma também que o concreto armado apresenta grandes vantagens quando executado com controle de qualidade adequado; o bom cobrimento das armaduras aliado a um concreto com alta compactidade, composição adequada e homogênea garantem, por meio da baixa permeabilidade, a proteção contra os agentes agressivos.

Há vários fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no concreto, como pode ser visto na Figura 9, a qual apresenta os principais fatores que contribuem com a entrada de agentes agressivos no concreto. Esses agentes podem ser em forma gasosa, líquida, sais diluídos ou por

diferença de gradiente elétrico. Segundo Bertolini (2010, p.37), o transporte de massa no concreto depende essencialmente da estrutura dos poros, da existência de fissuração, da formação de vínculos físico-químicos entre o concreto e os agentes agressivos, das condições ambientais e dos mecanismos de transporte.

Figura 9 – Principais fatores envolvidos nos fenômenos de transporte no interior dos materiais porosos



(fonte: BERTOLINI, 2010, p.37)

Os mecanismos de transporte no concreto são as principais maneiras com que fluidos se inserem no material. Segundo Bertolini (2010, p.37), esses mecanismos podem ser distinguidos de quatro formas: absorção capilar, permeação, difusão e migração elétrica. No entanto, quando se trata de fluidos pode-se tratar apenas dos três primeiros mecanismos citados por Bertolini (2010), já que a migração elétrica refere-se ao processo de transporte que existe quando há um potencial elétrico o qual possibilita o deslocamento dos íons a fim de neutralizar a diferença de potencial (RIBEIRO, 2014, p.83).

De acordo com Neville (2016, p.503), são os três primeiros mecanismos citados por Bertolini (2010) as principais formas de transporte de fluidos no concreto. Como neste trabalho o intuito principal é analisar a penetração de fluidos, como a água e o ar, serão descritos com maior ênfase os mecanismos de transporte no concreto citados por Neville (2016), sendo eles:

- a) sucção capilar (ou absorção capilar);
- b) difusão;
- c) penetração de água sob pressão (permeação).

É importante destacar, ainda, que os fluidos podem penetrar o material por meio de fissuras, a qual se torna um caminho preferencial e facilitador para a inserção de agentes deletérios. Segundo Gjørv (2015, p.71), em concretos que não apresentam fissuras, a penetração de água ou agentes agressivos ocorre principalmente por absorção capilar e difusão.

Nos itens seguintes serão descritos a sucção capilar, a difusão e a penetração de água sob pressão, que conforme já mencionado, são os mecanismos de transporte com maior influência sobre a degradação do concreto.

### **3.3.1 Sucção capilar**

A sucção capilar é definida pelo transporte de líquidos devido à tensão superficial atuante nos poros capilares, podendo ser medida por meio da absorção capilar. Segundo Neville (2016, p.510), este mecanismo é influenciado pelas características do líquido, como a viscosidade, a densidade e a tensão superficial. Além disso, depende das características do sólido, como a estrutura dos poros (raio, tortuosidade e continuidade dos capilares). Varia também em relação à energia superficial e ao teor de umidade.

Segundo HO e LEWIS<sup>1</sup> (1987) apud Silva Filho (1994, p.41), “[...] a taxa de absorção de água causada pela sucção capilar é, nas estruturas expostas ao ar, um valioso indicativo da estrutura de poros do material”. Para a absorção, quanto menor for o diâmetro dos capilares, maior e mais rápido será o efeito do mecanismo.

De acordo com Helene (1999, p.47), uma baixa relação/água cimento pode contribuir com a redução da absorção, no entanto, estes concretos tendem a serem mais densos e compactos, dessa forma os diâmetros dos capilares são reduzidos e, se estes forem comunicáveis, podem aumentar a absorção capilar devido à altura da coluna.

---

<sup>1</sup> HO, D. W. S.; LEWIS, R. K. The Water Sorptivity of Concretes: The Influence of Constituents under Continuous Curing. In: *Durability of Building Materials*, v.4, n.3, 1987. P. 241-252.

Concretos saturados não terão absorção de água, dessa forma, se não houver pressões externas, aparentemente não haverá riscos de penetração de agente agressivos. Caso essa penetração ocorra, ela se justifica pelo efeito de difusão, que também só ocorrerá se houver uma diferença de concentrações considerável (RIBEIRO, 2014, p.82).

### 3.3.2 Difusão

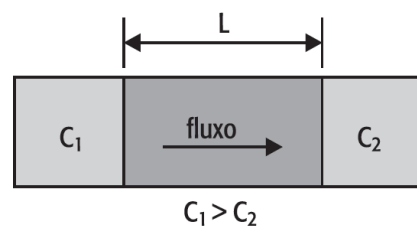
A difusão pode ser entendida pelo deslocamento do fluido devido à diferença de concentração no material, que pode variar segundo um gradiente de temperatura/umidade ou de um diferencial de potencial químico, sendo este a diferença de concentração do soluto (SILVA FILHO, 1994, p.38). Esse fenômeno ocorre tanto em meio líquido quanto em meio gasoso.

A difusão é importante quando relacionada à difusão de gases. O dióxido de carbono, por exemplo, acarreta a carbonatação da pasta de cimento; já, a difusão de oxigênio torna possível a corrosão de armadura no concreto armado (NEVILLE, 2016, p.506).

São definidos dois estágios para o fluxo por difusão, sendo o estágio estacionário obtido pelo fluxo contínuo das substâncias em difusão, e o estágio não estacionário, quando a difusão ocorre de forma gradual pela espessura do material, não sendo caracterizado um fluxo constante (BERTOLINI, 2010, p.37).

A difusividade de líquidos e gases depende, portanto, da concentração desses fluidos na superfície, e se esta concentração é maior que a concentração dos mesmos no interior do concreto. Como pode ser visto na Figura 10, o fluxo de difusão ocorre do local onde há maior concentração para o local onde há menor concentração, e é essa diferença de concentrações que acarreta o mecanismo de difusão.

Figura 10 – Representação esquemática do fluxo da difusão devido à diferença de concentração



(fonte: BERTOLINI, 2010, p.37)

Segundo Ribeiro (2014, p.83), a difusão ocorre devido à variação da temperatura, da microestrutura do concreto e das interações desses fluidos com os produtos de hidratação do cimento. E este mecanismo depende da porosidade, relação água/cimento, teor de cimento, composição química do cimento, umidade relativa e temperatura.

### 3.3.3 Penetração de água sob pressão

A penetração de água sob pressão ocorre pelo fluxo de um fluido devido a uma diferença de pressão, a qual é usualmente conhecida como permeabilidade, mas aqui será tratada como permeação. Alguns fatores influenciam na permeação, como a pressão exercida, a geometria dos vazios, a viscosidade do líquido, a espessura do material, a presença de ar nos poros e o tempo (HOFFMANN, 2001, p.35).

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.131), quando é alta a relação água/cimento e baixo grau de hidratação, a pasta de cimento terá porosidade capilar alta, com grande quantidade de poros grandes e comunicáveis entre si, dessa forma o coeficiente de permeação também será alto. Mas, com o decorrer do processo de hidratação, os poros terão seus tamanhos reduzidos e deixarão de ser comunicáveis, reduzindo, então, a permeação.

A permeação aos gases diminui com a alta umidade relativa, visto que os poros preenchidos por umidade ou água dificultam o movimento dos gases. Por isso, a carbonatação, por exemplo, ocorre principalmente quando a umidade é menor que 80%, ou quando os concretos são submetidos a ciclos de secagem e umedecimento (RILEM<sup>2</sup> apud HELENE, 1999, p.47).

Neste trabalho o termo permeabilidade não será empregado como sinônimo de penetração de água sob pressão, e sim, relacionado com a facilidade de transporte de fluídos pelo concreto (NEVILLE; BROOKS, 2013, p.256). Assim, um concreto com baixa permeabilidade é aquele que pode possuir pequena porosidade capilar e/ou pode ter sua superfície bloqueada devido ao uso de algum material específico, por exemplo.

---

<sup>2</sup> REUNION INTERNATIONALE DE LABORATORIES D'ÉSSAIS ET RESERCH SUR LE MATERIALS ET LES CONSTRUCTION (RILEM).

## 4 FORMAS DE DIMINUIR A PERMEABILIDADE NO CONCRETO

Muitos processos de deterioração, como as reações álcali-agregado, a corrosão de armaduras, a fissuração, entre outros, ainda representam graves desafios e problemas para muitas estruturas de concreto. O desenvolvimento acelerado da tecnologia dos materiais nos últimos anos minimiza o acontecimento dessas manifestações patológicas, e auxilia no controle desses processos (GJØRV, 2015, p.9). Infelizmente, na construção civil, muitos produtos são empregados sem conhecimento prévio do real desempenho quando aplicados nas estruturas. Este fato colaborou com a realidade atual, na qual grande parte das edificações apresentam problemas quanto à durabilidade.

Além do emprego de materiais que auxiliam no aumento da durabilidade do concreto, segundo GjØrv (2015, p.9) “[...] procedimentos aperfeiçoados e as especificações para combinações apropriadas de qualidade do concreto e cobrimento do concreto são muito importantes [...] e a garantia de qualidade durante a execução da estrutura de concreto também é muito importante”.

A utilização de cimentos compostos, adições pozolânicas, e o emprego de tecnologias aplicadas como tratamento superficial, como é o caso de resinas epóxis e impermeabilizantes, são formas usualmente empregadas com o intuito de diminuir a permeabilidade do concreto e aumentar a durabilidade. Hoje, a maioria dessas técnicas é bem difundida e algumas possuem muitas referências do meio técnico, como é o caso do uso de cimentos compostos, os quais podem possuir porcentagens de escória de alto-forno ou frações de material pozolânico, como sílica ativa, cinza de casca de arroz, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GJØRV, 2015; NEVILLE, 2016).

A primeira vez que foi utilizado um tipo de cimento especialmente desenvolvido para um ambiente marinho severo, que necessitava de controle na qualidade do concreto para o aumento da durabilidade da estrutura (LEA<sup>3</sup>, 1970 apud GJØRV, 2015, p.13), foi quando o Engenheiro Civil John Smeaton construiu o famoso farol do rochedo de Eddystone no canal da mancha, entre 1756-1759 (SMEATON<sup>4</sup>, 1971 apud GJØRV, 2015, p.13). Desde então, a preocupação

---

<sup>3</sup> LEA, F. M. The Chemistry of Cement and Concrete. Edward Arnold, London. 1970.

<sup>4</sup> SMEATON, J. A Narrative of the Building and a Description of the Construction of the Eddystone Lighthouse. H. HUGHES, London. 1791.



em utilizar materiais que ajudam a aumentar a durabilidade do concreto vem se intensificando até os dias de hoje.

A questão essencial referente à degradação do concreto é justificada pelas várias formas de transporte de fluidos no concreto, como já foi descrito, e a maneira de contribuir com o aumento da durabilidade é diminuir a permeabilidade do concreto. De acordo com Helene e Andrade (2010, p.931):

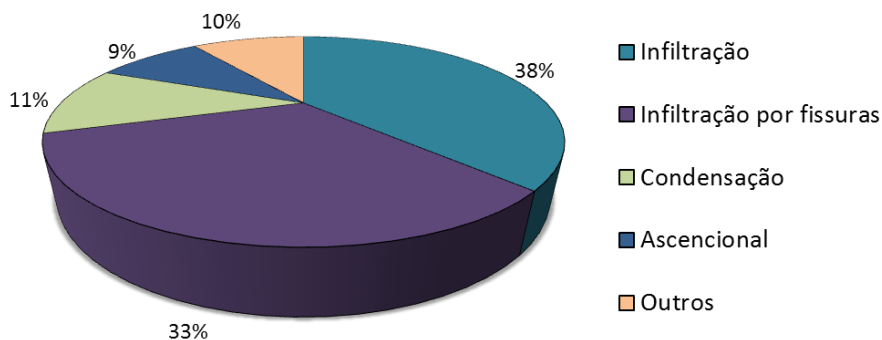
“A qualidade potencial do concreto depende da relação água/cimento e do grau de hidratação. São esses os dois principais parâmetros que regem as propriedades de absorção capilar da água, de permeabilidade por gradiente de pressão de água ou de gases, de difusividade da água ou dos gases, de migração elétrica de íons, assim como, todas as propriedades mecânicas, tais como: módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração, fluência, relaxação, abrasão e outras.”

Além da relação água/cimento e do grau de hidratação citados por Helene e Andrade (2010, p.931), pode-se adotar outras medidas preventivas para conservação das estruturas. A NBR 6118 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2014) cita medidas especiais que podem ser utilizadas quando é necessário o controle de estanqueidade devido à fissuração em condições de exposição adversas, nesse caso pode ser aplicado “[...] revestimentos hidrofugantes e pinturas impermeabilizantes sobre as superfícies do concreto, revestimentos de argamassas, de cerâmicas ou outros sobre a superfície do concreto, galvanização da armadura, proteção catódica da armadura e outros”.

Entre todas as medidas citadas como forma de reduzir a permeabilidade do concreto, destacam-se as referentes a reduzir a relação água/aglomerante e aos tratamentos empregados para diminuir a permeabilidade ou estancar fissuras. No estudo de Dal Molin (1988) é apresentado um gráfico com as porcentagens referentes às variações dos tipos de umidade em relação aos mecanismos de manifestação que ocorrem na edificação como um todo (Figura 11). Nota-se por meio desta que mais de 60% se deve a problemas relacionados à infiltração.

Diante da questão demonstrada por Dal Molin (1988), é evidente a influência que a baixa permeabilidade do concreto tem em relação aos mecanismos de degradação. Portanto, cuidados de planejamento/ projeto e execução são fundamentais para mitigar as manifestações patológicas. Segundo Helene e Andrade (2010, p.931), “A qualidade efetiva do concreto na obra deve ser assegurada por um correto procedimento de mistura, transporte, lançamento, adensamento, cura e desmoldagem [...]”. Mas, além disso, a escolha adequada dos materiais constituintes e a dosagem correta do concreto são fatores essenciais para prolongar a vida útil das estruturas.

Figura 11 – Incidência relativa dos tipos de umidade na edificação como um todo segundo o mecanismo de manifestação

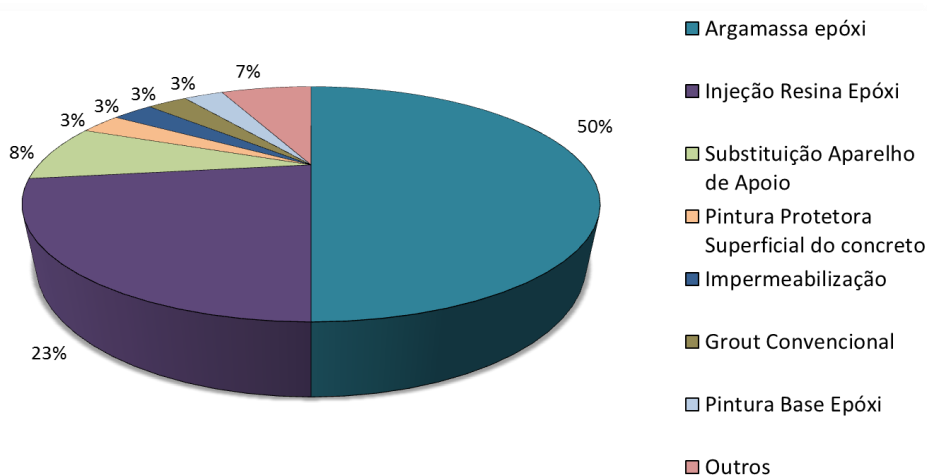


(fonte: DAL MOLIN, 1988, p.127)

Existem muitos produtos e maneiras de aplicação para reparo em estruturas de concreto. Helene (1992, p.27) apresenta em seu livro alguns dos principais materiais empregados com essa finalidade, como a utilização de argamassas, resina epóxi, groutes e concretos.

Além dos materiais apresentados por Helene (1992), Andrade (1997) relatou em seu estudo alguns dos sistemas de reparo mais empregados em forma de um gráfico, apresentando-os quantitativamente conforme o uso. Na Figura 12, é notável o maior emprego de produtos a base de epóxi, devido a grande potencialidade deste produto, já conhecida no meio acadêmico e profissional (GJØRV, 2015, p.52).

Figura 12 – Edificações comerciais e serviços: sistemas de reparo mais empregados



(fonte: ANDRADE, 1997, p.101).

Todas as medidas apresentadas por Helene (1992) e Andrade (1997) são medidas referentes a reparos, ou seja, as manifestações patológicas já incidiram sobre as estruturas e são executados os reparos para extinguir ou minimizar a degradação do concreto. No entanto, como já dito, reparar não é melhor solução, o ideal é prevenir, realizar medidas antes que as manifestações patológicas ocorram.

Outra forma citada por Andrade (1997) que é pouco utilizada em reparos, mas muito utilizada como medida preventiva, é a impermeabilização. Impermeabilizar, além das medidas já citadas como baixar a relação água/aglomerante e utilizar adições que reduzam a permeabilidade, e empregar controles de qualidade, tem sido a ação com melhores benefícios para o aumento da durabilidade (MUHAMMAD et al., 2015). Segundo a NBR 9575 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2010) entre os requisitos gerais, a impermeabilização deve ser executada para:

“[...] a) evitar a passagem de fluidos e vapores nas construções, pelas partes que requeiram estanqueidade, podendo ser integrados ou não outros sistemas construtivos, desde que observadas normas específicas de desempenho que proporcionem as mesmas condições de estanqueidade; b) proteger os elementos e componentes construtivos que estejam expostos ao intemperismo, contra a ação de agentes agressivos presentes na atmosfera [...]”

Neste trabalho, duas medidas usualmente empregadas para prevenir e/ou reparar a degradação das estruturas serão apresentadas, sendo elas: influência da relação água/aglomerante, por meio do uso de adições, como a sílica ativa e impermeabilizante por cristalização, além da aplicação de tratamentos superficiais, em específico o uso de impermeabilizante por cristalização. Ambas tem relação direta com a entrada de fluidos no concreto, tanto pela modificação das estruturas dos poros do concreto quanto pela capacidade de autorreparo de fissuras existentes. Nos itens seguintes essas medidas serão detalhadas.

#### 4.1 REDUÇÃO DA POROSIDADE CAPILAR

A porosidade capilar está diretamente ligada à permeabilidade do concreto, esta propriedade relaciona-se à estanqueidade das estruturas e se destinada à contenção de fluidos e, também, aos agentes agressivos. A porosidade é influenciada pela relação água/aglomerante, além do grau de hidratação do cimento, sendo reduzida a porosidade quanto menor a relação água/aglomerante (NEVILLE; BROOKS, 2013, p.256).

O uso de adições no concreto tem grande importância em mudanças significativas no concreto, como melhora na resistência à fissuração térmica, à expansão causada pela reação álcali-agregado, ao ataque por cloretos e sulfatos, entre outros (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.307). Devido ao grande emprego da adição de sílica ativa, esta terá ênfase nesse trabalho, visto que será utilizada no programa experimental. Também será dado enfoque, principalmente, à adição de um produto impermeabilizante por cristalização, avaliando seu desempenho como forma de diminuir a permeabilidade do concreto, e quanto à capacidade de autorreparo de fissuras, ambos estão entre os objetivos apresentados nesse estudo.

#### **4.1.1 Relação água/aglomerante**

A relação água/cimento, como já foi dito, é um dos fatores de controle mais importantes. E para obter uma resistência adequada, com base em cimentos puros, a relação água/cimento não pode passar de 0,40, acima desse valor o concreto adquire maior porosidade capilar (GJØRV, 2015, p.72). De acordo com Helene e Andrade (2010, p.925), “A dificuldade para obtenção de concretos plásticos, à medida que era reduzida a relação água/cimento, limitou, por muitos anos, a utilização de concretos de maior resistência e maior durabilidade [...]”.

A partir da década de 50 esta limitação começou a mudar, pois nesta época surgiram novas linhas de aditivos plastificantes, sendo estes mais eficientes que os anteriores, agora denominados superplastificantes. Com o auxílio desses aditivos é possível produzir concretos fluidos, mesmo com baixa relação água/aglomerante.

A relação água/aglomerante tem influência na porosidade capilar, assim como na melhoria de propriedades mecânicas da pasta e na redução da porosidade para um mesmo grau de hidratação (HELENE; ANDRADE, 2010, p.923). Embora a relação água/aglomerante seja importante, a escolha do cimento, assim como do sistema aglomerante, pode também ser muito significativa (GJØRV, 2015, p.72).

O tipo de cimento utilizado influencia na permeabilidade do concreto, no caso de cimentos Portland compostos tanto de materiais pozolânicos como de substituição de escória de alto-forno, a quantidade de C-S-H gerada é consideravelmente maior, quando comparados com cimentos puros. Consequentemente, o volume de pequenos poros de gel também será maior, e o volume de grandes poros capilares será reduzido significativamente (GJØRV, 2015, p.79).

#### 4.1.2 Adição de sílica ativa

Pelos benefícios que as adições trazem, nos últimos anos, tem havido uma tendência a usar cimentos Portland compostos ou pozolânicos, ao invés de cimentos puros (GJØRV, 2015, p.75). O efeito benéfico que as adições, como sílica ativa, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz, proporcionam na resistência do concreto em relação à penetração de agentes agressivos já é documentado por mais de cem anos (GJØRV, 1983; BERRY, MALHOTRA, 1986; MEHTA, 1998; FILHO et al., 2013; AYUB et al., 2013; GJØRV, 2015; SIL; ROY, 2015; NEVILLE, 2016; ZAYED et al., 2016, entre outros).

As pozolanas melhoram o desempenho mecânico e reduzem a porosidade das pastas, na mesma relação água/cimento (HELENE; ANDRADE, 2010, p.925-926), isso justifica o emprego desses materiais na mistura do concreto. Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.340), entre as adições pozolânicas, a sílica ativa é considerada um material altamente pozolânico, ou seja, possui uma área superficial muito elevada entre 15 e 25 m<sup>2</sup>/kg, duas ordens de grandezas mais fina que o cimento Portland comum. Devido a isso, a mistura do concreto é dificultada e necessita de mais água, ou o emprego de aditivos superplastificantes.

De acordo com Neville (2016, p.696), as propriedades melhoradas pelo uso da adição de sílica ativa não se devem apenas ao efeito pozolânico (químico) que a sílica ativa apresenta, mas também ao efeito fíler (físico) pelas partículas finas, ambos contribuem para a formação de um concreto com melhor microestrutura.

O efeito físico- químico também é relatado por Mehta e Monteiro (2014, p.342), no qual os autores descrevem como influências físicas a diminuição da exsudação, a redução do tamanho e volume de vazios, melhora na coesão devido às partículas finas, aumento no fator de empacotamento e, conseqüente aumento de resistência.

Em relação aos efeitos químicos, destaca-se a reação pozolânica, que é transformação do hidróxido de cálcio em C-S-H secundário, o qual reforça a pasta de cimento na zona de transição, estes produtos gerados preenchem os espaços capilares, aumentando, assim, a resistência e a reduzindo a permeabilidade.

Segundo Verçozza (1987, p.48), pós minerais finos, assim como pozolanas finamente moídas, como a sílica ativa, por exemplo, podem ser considerados produtos impermeabilizantes de massa.

### 4.1.3 Adição de impermeabilizante por cristalização

Assim como citado no item 4.1.2, o qual descreve sobre a adição de sílica ativa, a adição de impermeabilizante por cristalização na massa do concreto fresco direciona para o mesmo intuito de utilização, ou seja, reduzir a permeabilidade do concreto devido à adição desse produto. Algumas vantagens apresentadas em relação ao uso desse produto é que a estrutura fica protegida desde a sua construção, visto que no momento da concretagem o sistema se torna parte integrante do concreto.

Verçoza (1987, p.53) afirma que impermeabilizações executadas por meio de adições no concreto são melhores em relação a impermeabilizações com membranas quando se refere a questão de manutenção e durabilidade do sistema de impermeabilização. Visto que, a impermeabilização com adições são perenes já que esta estará incorporada ao concreto, e não será comprometida enquanto a estrutura não sofrer danos. Em contrapartida, as membranas necessitam de manutenções ao longo dos anos, pois podem apresentar problemas de envelhecimento conforme as condições as quais estarão submetidas e ao tipo de proteção que obtém.

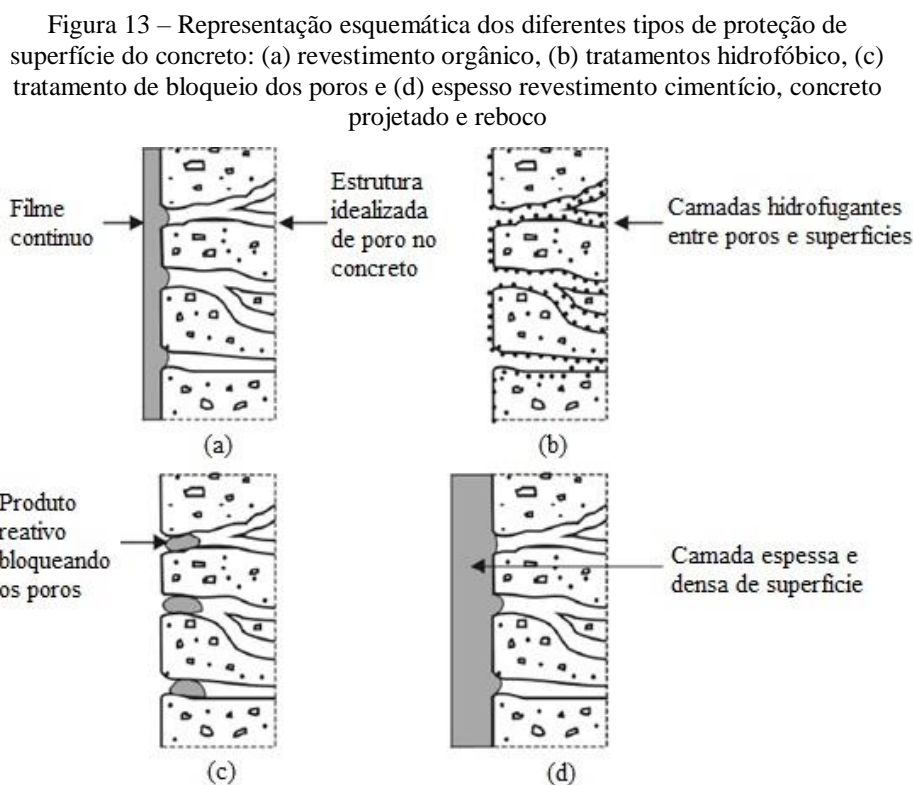
O principal benefício da adição de impermeabilizante por cristalização na mistura é devido a formação de cristais insolúveis nos poros do concreto. Alguns fabricantes relatam nas fichas técnicas dos produtos, e também Pereira (2013) citou que a maioria dos impermeabilizantes por cristalização utilizados como adição, se tratam de produtos à base cimentícia, com areia de quartzo tratada e com compostos químicos ativos não especificados. Segundo Zubelli (199-), esses compostos químicos ativos reagem com a umidade e com os subprodutos do cimento produzindo a estrutura cristalina, não solúvel, que fica integrada ao concreto.

Devido à propriedade de cristalização desse produto impermeabilizante, o mesmo tem a capacidade de bloquear os poros e os capilares, assim como preencher as microfissuras, reduzindo a permeabilidade do concreto.

## 4.2 TRATAMENTOS SUPERFICIAIS

Com a necessidade de garantir o aumento da durabilidade das estruturas, surgiram nos últimos anos vários produtos com o intuito de proteger a superfície do concreto e impedir ou mitigar a entrada de fluídos por absorção capilar e difusão (MEDEIROS et al., 2012, p.9683).

Os diferentes tipos de produtos podem ser agrupados em quatro categorias, como pode ser visto na Figura 13, (a) revestimentos orgânicos que formam um filme contínuo sobre a superfície do concreto, (b) tratamentos hidrofugantes que revestem a superfície interna dos poros do concreto, (c) tratamentos que preenchem os poros capilares e (d) revestimentos cimentícios (BERTOLINI, 2010, p.190; GJØRV, 2015, p.134).



(fonte: BERTOLINI, 2010, p.190)

Bertolini (2010, p.190) apresenta uma variedade de materiais para cada tipo de tratamento superficial esquematizado na Figura 13. No Quadro 2 estão descritos alguns materiais utilizados de acordo com a classificação da Figura 13. Como pode ser visto, há uma grande variedade de produtos que podem ser utilizados como tratamento superficial, mas a escolha deve ser específica para cada caso.

Segundo Bertolini (2010, p.189), “[...] a aplicação de um revestimento impermeável sobre a superfície do concreto pode impedir a penetração dos agentes agressivos; todavia, uma camada impermeável não permite nem mesmo a evaporação da água presente no concreto”. Visto que ainda de acordo com o autor, um tratamento superficial com bom desempenho é aquele que tem

boa compactação e baixa permeabilidade, mas também permite a evaporação da água contida no concreto.

Neste estudo serão analisados apenas os materiais cristalizantes, o qual está inserido na classificação de Bertolini (2010) como tipo de proteção tapa poros, sendo detalhado no item seguinte.

Quadro 2 – Classificação dos tratamentos superficiais existentes

<b>Classificação</b>	<b>Material</b>
Revestimentos que formam filme protetor	Acrílico Copolímero de Butadeína Borracha cloretada Resina epóxi Oleoresinosos Resina de poliéster Copolímero de polietileno Poliuretano Vinil
Tratamento Hidrofóbico	Silicones Siloxano Silano
Tapa poros	Silicatos Silicofluoreto Materiais de cristalizantes
Reboco	Argamassas de cimento simples e modificadas por polímeros

(fonte: BERTOLINI, 2010, p.190)

#### 4.2.1 Impermeabilizante por cristalização

A aplicação do impermeabilizante por cristalização é considerado um sistema rígido de impermeabilização. De acordo com Zubelli (199-, p.7), sistemas rígidos são os quais “[...] dentro do limite de variação térmica do meio ambiente, acompanham proporcionalmente o trabalho estrutural, sem sofrer infiltração nas zonas de fissuração”.

O sistema de impermeabilização por cristalização como tratamento superficial, segundo Souza e Melhado (1998, p.16), se refere ao uso de “[...] materiais à base de cimento, adicionados a resinas e aplicados na forma de pasta, que penetra nos poros da superfície, cristalizando-se e tamponando-os”.



O impermeabilizante por cristalização é considerado por Bertolini (2010, p.190) um sistema de proteção tapa poros. Neste sistema, portanto, como já explicito, há o fechamento dos poros. O autor declara que devido às substâncias à base de silicatos presentes no produto, ao penetrarem no concreto reagem com os subprodutos do mesmo, em especial com o hidróxido de cálcio, e formam os cristais que provocam o tampamento dos poros.

## 5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo apresenta-se a metodologia do trabalho, a caracterização dos materiais utilizados, a produção dos concretos e a descrição dos ensaios executados. Todos os ensaios apresentados neste trabalho foram realizados no LAMTAC/ NORIE/ UFRGS.

### 5.1 METODOLOGIA

A metodologia proposta nesse trabalho tem a finalidade de analisar o desempenho do produto impermeabilizante por cristalização utilizado como adição e como tratamento superficial, sendo este tratamento superficial sem processo de lixamento e com o processo de lixamento. Os concretos executados com o impermeabilizante foram comparados a um concreto referência, sendo este sem nenhum tipo de adição e nem submetido a qualquer tratamento superficial. Além disso, o produto impermeabilizante utilizado nos concretos também foi comparado com um concreto com adição de sílica ativa na mistura, com o intuito de comprovar a viabilidade do emprego do impermeabilizante diante de uma técnica usualmente empregada, considerada de baixo custo e de fácil utilização. O traço empregado neste estudo foi fornecido por uma empresa de serviços de concretagem para obras convencionais as quais não necessitam de altas resistências iniciais e tem como estimativa obter  $f_{ck}$  de 40 MPa. Na Tabela 1 estão descritos as proporções de cada material utilizado.

Tabela 1 – Proporcionamento dos materiais, em massa

<b>Materiais</b>	<b>Traço Referência</b>	<b>Traço Adição Impermeabilizante</b>	<b>Traço Adição Sílica Ativa</b>
Cimento	1	1	1
Agregado miúdo quatzoso	1,5	1,5	1,5
Agregado graúdo basáltico DMC 12,5 mm	1,17	1,17	1,17
Agregado graúdo basáltico DMC 25mm	1,17	1,17	1,17
Água	0,41	0,41	0,41
Aditivo polifuncional	0,0060	0,0060	0,0060
Aditivo superplastificante	0,0024	0,0024	0,0024
Adição de impermeabilizante por cristalização	-	0,0080	-
Adição de sílica ativa	-	-	0,10

(fonte: própria da autora)

As adições apresentadas juntamente ao traço (Tabela 1) não foram utilizadas simultaneamente, estas foram inseridas somente nos concretos aos quais foi analisado o emprego das mesmas de maneira individual. O consumo de cimento para cada proporcionamento estão ilustrados na Tabela 2.

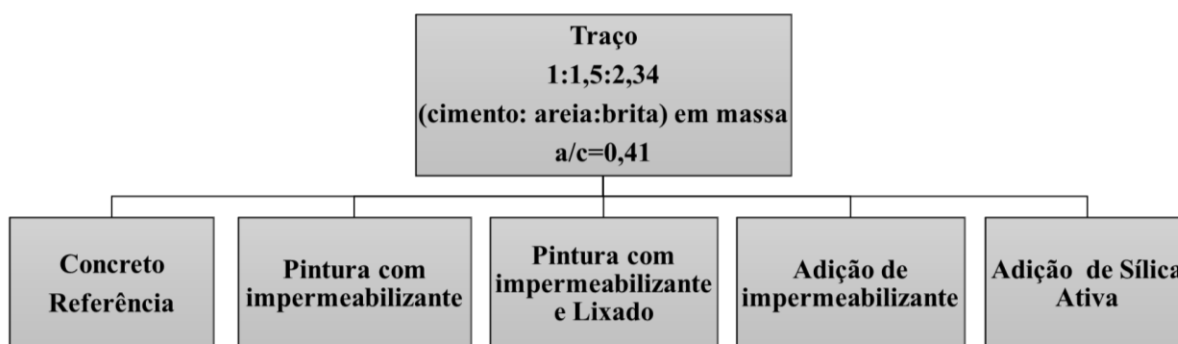
Tabela 2 – Consumo de cimento para cada proporcionamento utilizado

	<b>Traço Referência</b>	<b>Traço Adição Impermeabilizante</b>	<b>Traço Adição Sílica Ativa</b>
Consumo de cimento (kg/m <sup>3</sup> )	459,52	458,95	450,12

(fonte: própria da autora)

Manteve-se o mesmo traço para todos os tipos de concretos ensaiados corrigindo a água para manter sempre a mesma relação água/aglomerante. Diferenciaram-se apenas quatro maneiras de tratamentos empregados, sendo estes comparados entre si e também comparados com o concreto referência, o qual não possui adições e nem tratamento superficial. Os outros quatro concretos com variações referem-se: ao concreto com tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização aplicado como pintura, ao concreto com tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização aplicado como pintura sendo posteriormente lixado, ao concreto com adição de impermeabilizante por cristalização e ao concreto com adição de sílica ativa. Na Figura 14 está representado o fluxograma do programa experimental realizado nesse trabalho.

Figura 14 – Representação esquemática da matriz experimental realizada



(fonte: própria da autora)

Todos os concretos foram moldados sem armadura, exceto os corpos de prova utilizados para análise das fissuras. Na moldagem desses corpos de prova introduziu-se no fundo da fôrma uma armadura (tela metálica) com cobrimento de 15 mm a fim de garantir a estabilidade da abertura das fissuras sem ruptura total da seção do concreto, quando este fosse submetido ao carregamento (Figura 15).

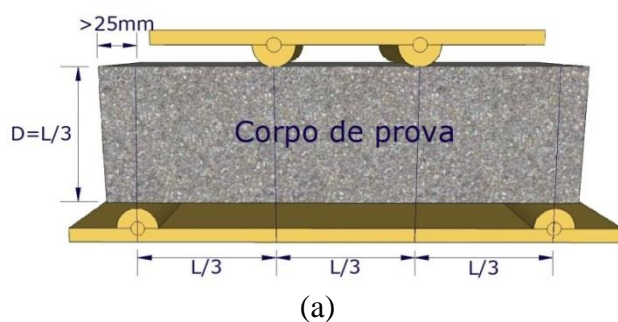
Figura 15 – Fôrma com armadura posicionada e espaçadores



(fonte: própria da autora)

A abertura das fissuras foi realizada com o aparato preconizado na NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2010). O aparato consiste de um dispositivo de flexão que assegura aplicação da força perpendicularmente às faces superior e inferior do corpo de prova, sem excentricidades, sendo este aplicado em quatro pontos. O dispositivo mantém o paralelismo entre os planos verticais que passam pelos eixos dos elementos de apoio e de aplicação de força, assim como as distâncias relativas entre eles. As medidas de aplicação da carga foram mantidas para todos os corpos de prova, nos quais foram marcados os terços médios, de acordo com o preconizado na norma. A representação esquemática e a foto do dispositivo utilizado, assim como a demarcação dos terços médios, estão ilustradas na Figura 16.

Figura 16 – Dispositivo de quatro pontos e demarcação dos terços médios  
(a) representação esquemática; (b) registro do ensaio de abertura de fissuras



(a)



(b)

(fonte: própria da autora)

A aplicação de carga não seguiu exatamente o procedimento especificado na NBR 12142 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2010), visto que o objetivo era gerar a abertura de fissura e não romper o corpo de prova por resistência à tração na flexão. Diante disso, foi aplicado um carregamento com taxa de  $0,45 \mp 0,15$  MPa/s, sendo este contínuo e sem choques. O carregamento é cessado quando há uma queda de força a qual indica a abertura da fissura. É importante salientar que os corpos de prova foram posicionados no aparato de quatro pontos com a tela metálica localizada na parte inferior, visto que a abertura de flexão ocorre na parte inferior do corpo de prova. Os fornecedores dos produtos testados nesse trabalho, dos impermeabilizantes por cristalização, afirmam que haverá fechamento da fissura somente para fissuras menores que 0,4 mm, portanto, tomou-se o cuidado de não avaliar corpos de prova com fissuras maiores do que este valor.

## 5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item serão apresentados os materiais utilizados para realização deste trabalho, assim como suas características físicas e/ou químicas.

### 5.2.1 Cimento

O cimento utilizado foi o cimento Portland pozolânico (CP IV- 32), classe 32. Segundo a NBR 5736 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 1991), o teor de material pozolânico é estabelecido entre 15 e 50%, com permissão de no máximo 5% de fíler calcário e o restante constituído de clínquer e sulfato de cálcio. Entre os tipos de cimentos disponíveis no sul do Brasil o CP IV é o mais adequado para prolongar a vida útil das estruturas em ambientes marinhos, motivo pelo qual foi escolhido para este trabalho.

A massa específica do cimento utilizado foi determinada em laboratório conforme a NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2001) e resultou em um valor de  $2,59 \text{ g/cm}^3$ . As características químicas, físicas e mecânicas do cimento foram fornecidas pelo fabricante e são apresentadas nas Tabelas 3 e 4. Apresentam-se também nas tabelas os limites normativos segundo a NBR 5736 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 1991), observando-se que todos os valores obtidos cumprem as exigências de norma.

Tabela 3 – Composição química do cimento

<b>Características avaliadas (%)</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites normativos</b>
Óxido de Magnésio (MgO)	4,70	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre (SO <sub>3</sub> )	1,80	≤ 4,0
Perda ao fogo (PF)	2,60	≤ 4,5
Resíduo Insolúvel	40,70	-

(fonte: adaptado do fabricante)

Tabela 4 – Caracterização física e mecânica do cimento

<b>Características avaliadas</b>	<b>Resultados</b>	<b>Limites normativos</b>
Finura #200	0,40	≤ 8,0
Finura #325	2,00	-
Início de pega (h:min)	5:55	≥ 1
Fim de pega (h:min)	8:15	≤ 12
Área específica (cm <sup>2</sup> /g)	4900	-
Resistência à compressão	01 dia (MPa)	≥ 10,0
	07 dias (MPa)	≥ 20,0
	28 dias (MPa)	≥ 32,0

(fonte: adaptado do fabricante)

### 5.2.2 Agregado miúdo

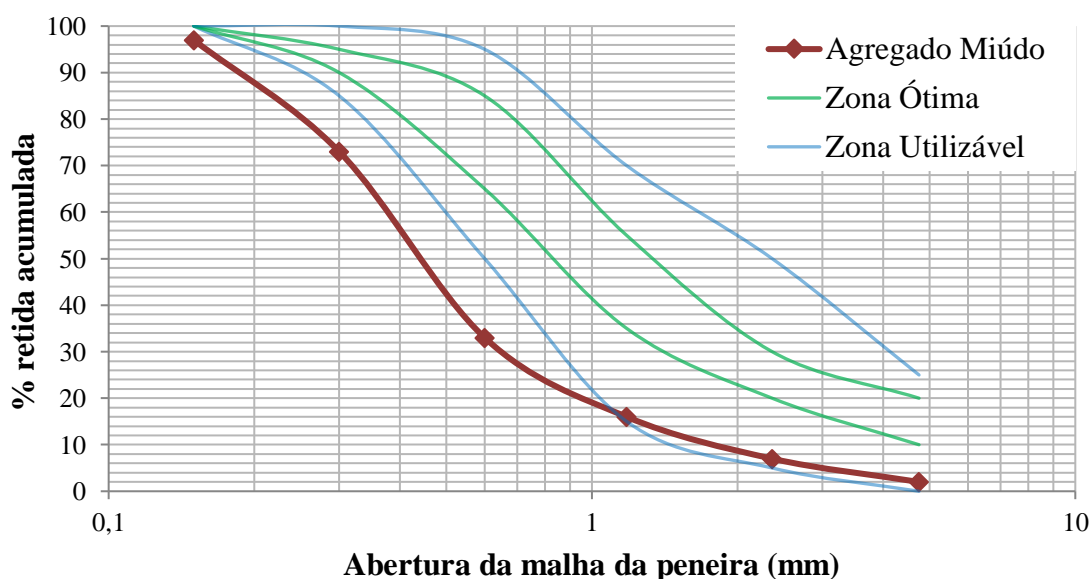
O agregado miúdo utilizado foi uma areia quartzosa, disponível comercialmente. A distribuição granulométrica segundo a NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2003), e as características físicas como a massa específica, NBR NM 52 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009), o módulo de finura e a dimensão máxima, NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009), estão apresentadas na Tabela 5. Na Figura 17 apresenta-se a distribuição granulométrica do agregado miúdo em conjunto com os limites das zonas utilizável e ótima, segundo a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Tabela 5 – Porcentagem retida nas peneiras da série normal para o agregado miúdo

Abertura das peneiras (mm)	AMOSTRA		NBR 7211 (2009)			
	Média Retida (%)	Média Retida Acumulada (%)	Retida Acumulada (%) - em massa			
			Limites inferiores		Limites Superiores	
			Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
4,75	2	2	0	10	20	25
2,36	5	7	5	20	30	50
1,18	9	16	15	35	55	70
0,6	17	33	50	65	85	95
0,3	40	73	85	90	95	100
0,15	24	97	100	100	100	100
Fundo	3	100	-	-	-	-
<b>Módulo de Finura</b>			2,28			
<b>Dimensão Máxima (mm)</b>			4,75			
<b>Massa Específica (g/cm<sup>3</sup>)</b>			2,58			

(fonte: própria da autora)

Figura 17 – Distribuição granulométrica do agregado miúdo



(fonte: própria da autora)

A partir da Figura 17 nota-se que o agregado miúdo utilizado se encontra fora dos limites de utilização segundo a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009). No entanto, o agregado foi utilizado dessa forma devido ao mesmo ser empregado em obras da região e representar a realidade local.

### 5.2.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado é de origem basáltica e foi utilizado em duas granulometrias diferentes. Na Tabela 6 pode ser vista a porcentagem retida em cada peneira para os agregados graúdos, conforme NBR NM 248 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2003) e na Figura 18 e 19 apresentam-se a distribuição granulométrica de ambos.

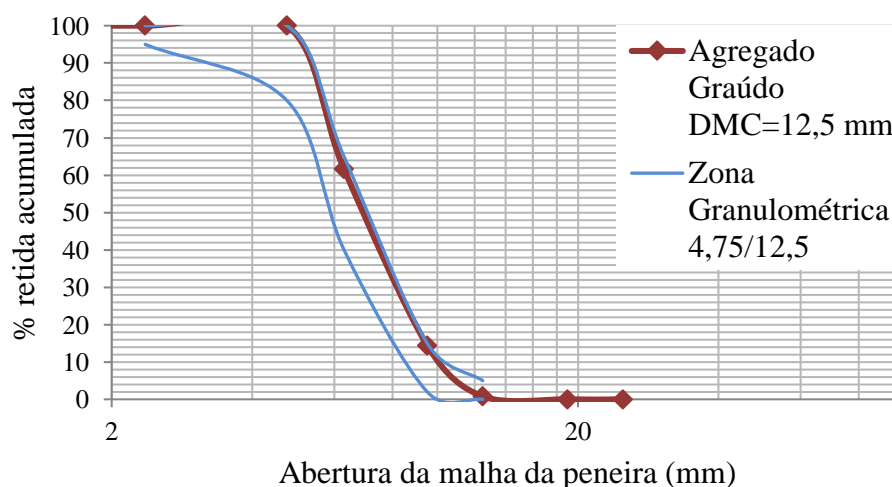
A caracterização física do agregado graúdo está apresentada na Tabela 7, no qual a dimensão máxima característica foi determinada segundo a NBR 7211 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009), e as massas específicas e a absorção de água de acordo com a NBR NM 53 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2009).

Tabela 6 – Porcentagem retida nas peneiras para os agregados graúdos

Peneira (mm)	Porcentagem retida (%) Brita 12,5 mm		Porcentagem retida (%) Brita 25 mm	
	Individual	Acumulada	Individual	Acumulada
25	0	0	0	0
19	0	0	21	21
12,5	1	1	76	97
9,5	14	15	3	100
6,3	47	62	0	100
Fundo	38	100	0	100

(fonte: própria da autora)

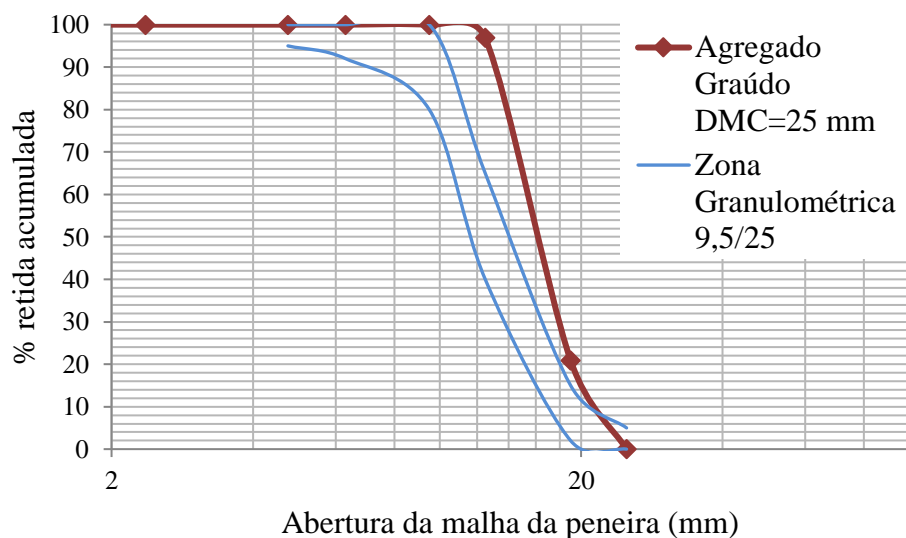
Figura 18 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo DMC=12,5 mm



(fonte: própria da autora)

Figura 19 – Distribuição granulométrica do agregado graúdo DMC=25 mm





(fonte: própria da autora)

Tabela 7 – Caracterização física dos agregados graúdos

Caracterização	Brita 12,5 mm	Brita 25 mm
Dimensão máxima característica (mm)	12,5	25
Módulo de Finura	6,15	7,21
Massa específica do agregado seco (g/cm <sup>3</sup> )	2,95	2,91
Massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm <sup>3</sup> )	2,88	2,87
Massa específica aparente (g/cm <sup>3</sup> )	2,83	2,85
Absorção de água (%)	1,43	0,66

(fonte: própria da autora)

## 5.2.4 Água

A água utilizada nesse estudo para a moldagem dos corpos de prova é proveniente da rede pública de abastecimento da cidade de Porto Alegre.

## 5.2.5 Adições

Utilizou-se neste trabalho dois tipos de adições. A sílica ativa foi escolhida para servir como comparação, visto que esta é usualmente empregada nos concretos com a finalidade de diminuir a permeabilidade dos mesmos, entre outras propriedades. Já o impermeabilizante por cristalização é o material escolhido para ser analisado nesse trabalho.

### 5.2.5.1 Sílica ativa

A massa específica da sílica ativa utilizada foi determinada em laboratório conforme a NBR NM 23 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2001a) e resultou em um valor de 2,20 g/cm<sup>3</sup>. A caracterização química deste material foi realizada por meio do ensaio de fluorescência de raios X no laboratório Lacer/UFRGS, cujo resultado está apresentado na Tabela 8.

Neste trabalho, optou-se por usar a proporção de 10% de sílica ativa baseado nas pesquisas que comprovaram que esta é a proporção ideal a qual contribui com a diminuição da permeabilidade, e não prejudica outras propriedades como a redução da alcalinidade do concreto (GJØRV, 2015, p.84).

Tabela 8 – Composição química da sílica ativa

<b>Características</b>	<b>Resultados (%)</b>
SiO <sub>2</sub>	92,36
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,20
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,14
CO <sub>2</sub>	5,06
MgO	0,24
SO <sub>3</sub>	0,15
K <sub>2</sub> O	0,86
MnO	0,03
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,11
CaO	0,77
Na <sub>2</sub> O	0,06

(fonte: própria da autora)

#### 5.2.5.2 Impermeabilizante por cristalização

O impermeabilizante por cristalização utilizado como adição neste trabalho é fornecido em embalagens de 25kg, e é composto por cimento Portland (40% a 70%), areia de quartzo (5% a 10%) e compostos químicos ativos (10% a 30%), conforme descrição do fabricante. Os compostos químicos reagem na presença de umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento, os quais resultam em uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto. As propriedades físico-químicas estão apresentadas no Quadro 3, conforme ficha técnica do produto.

Quadro 3 – Características físico-químicas da adição de impermeabilizante por cristalização

<b>Características</b>	
Aparência	Pó cinza
Odor	Inodoro
Estado físico	Sólido (pó)
pH em solução	10 – 13
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	2,920
Dosagem (%) sobre o massa do cimento	0,8 – 1,0

(fonte: adaptado do fabricante, 2016)

A proporção sobre a massa do cimento utilizada da adição do impermeabilizante neste trabalho é de 0,8%. A escolha pelo menor valor recomendado tem a finalidade de analisar o produto na situação mais crítica. O uso deste material tem como objetivo selar permanentemente o concreto contra a penetração de água e quaisquer outros líquidos, além de contribuir com a proteção contra agentes agressivos da atmosfera devido a sua baixa permeabilidade. Esse produto é usado em estruturas como reservatórios, estações de tratamento de água e efluentes, túneis, fundações, entre outras obras que necessitem de concretos impermeáveis.

### 5.2.6 Aditivos

Os aditivos utilizados na mistura foram designados de acordo com o traço utilizado, traço este fornecido por uma empresa de serviços de concretagem para obras convencionais que não precisam de resistência elevada nas primeiras idades. São utilizados dois aditivos, sendo um aditivo plastificante polifuncional redutor de água e outro aditivo superplastificante. As características foram obtidas do fabricante e são apresentadas no quadro 4.

Quadro 4 – Características físico-químicas dos aditivos

<b>Características</b>	<b>Aditivos</b>	
	<b>Polifuncional</b>	<b>Superplastificante</b>
Base química	Lignosulfonato	Policarboxilato
Aspecto	Líquido	Líquido
Cor	Castanho escuro	Castanho Claro
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,160 ± 0,02	1,095 ± 0,02
Sólidos (%)	28,0 ± 2	40,0 ± 2
Dosagem (%) sobre a massa do cimento	0,6 – 1,0	0,3 – 1,2

(fonte: adaptado de GCP (Grace Construction Products), 2016)

Ambos os aditivos trazem benefícios ao concreto fresco, pois reduzem a água de amassamento, mantendo a consistência, aumentando a fluidez e facilitando o adensamento e o lançamento. Já para o concreto endurecido, por necessitar de menos água na mistura, proporciona maior resistência mecânica, reduz a permeabilidade, retrações e fissuras de origem plástica, aumentando assim a durabilidade.

## 5.2.7 Tratamento superficial

Neste trabalho é empregado apenas um tipo de tratamento superficial, sendo este o impermeabilizante por cristalização. O produto é aplicado como pintura, e alguns corpos de prova passam por um processo de lixamento desta pintura. O intuito de testar o desempenho do produto com o processo de lixamento é devido à afirmação do fabricante em relação ao tratamento superficial lixado apresentar o mesmo resultado esperado do produto não lixado.

### 5.2.7.1 Impermeabilizante por cristalização

O produto impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial é fornecido em embalagens de 25kg, e é composto por cimento Portland (10% a 50%), areia de quartzo (10% a 40%) e compostos químicos ativos (30% a 60%). Nota-se que a composição do produto utilizado como tratamento é a mesma do utilizado como adição, mas com proporções diferentes dos materiais. As características físico-químicas, de acordo com o fabricante, estão contidas no Quadro 5.

Quadro 5 – Características físico-químicas do tratamento de impermeabilizante por cristalização

<b>Características</b>	
Aparência	Pó cinza
Odor	Característico de cimento
Estado físico	Sólido (pó)
pH em solução	10 – 13
Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	1,450

(fonte: adaptado do fabricante, 2016)

Este é aplicado no concreto endurecido, o mesmo precisa somente ser misturado com água na proporção 5:2,5 (impermeabilizante por cristalização: água) e ser aplicado na superfície de concreto com um pré umedecimento. A condição ideal da superfície do corpo de prova é

saturada superfície seca, que foi o método utilizado neste trabalho, sendo esta proporção usada para aplicação manual. Segundo as instruções de uso, o produto é aplicado em duas demãos, sendo a segunda aplicada quando a primeira demão ainda estiver úmida. Antes da aplicação, a superfície deve ser limpa, isenta de pó e sujeiras. Após a mistura ser executada, o produto deve ser consumido em até 20 minutos. Depois de aplicado o tratamento superficial, as áreas tratadas devem ser mantidas úmidas por um período de 5 dias e protegidas de sol e vento.

O intuito é preencher os poros e fissuras, prevenir a entrada de água, até mesmo sob pressão, e garantir a passagem de vapor d'água, resultado esse esperado de produtos designados a tratamentos superficiais no concreto (BERTOLINI, 2010, p.189). O produto é indicado para estruturas que necessitem de maior durabilidade e estejam sujeitas a agentes agressivos, como: reservatórios de água, barragens, estações de tratamento de água e efluentes, estacionamentos, fundações, túneis, entre outros. Além disso, ele pode ser aplicado tanto na face positiva quanto negativa do concreto.

### 5.3 PRODUÇÃO DO CONCRETO

A produção dos concretos compreendeu as misturas dos materiais, o ensaio de consistência, a moldagem, a cura e a aplicação do tratamento superficial.

#### 5.3.1 Mistura dos materiais

A operação de mistura dos materiais foi realizada com auxílio de uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com argamassa de cimento de areia proveniente dos materiais utilizados neste trabalho. A ordem de colocação dos materiais foi mantida constante em todas as misturas, seguindo o procedimento: brita, um terço da água, cimento, um terço da água, adição (nos concretos que continham adição na composição), aditivo polifuncional, areia, o terço restante de água, aditivo superplastificante (suficiente para ajustes finais do traço).

#### 5.3.2 Ensaio de consistência

Após a mistura dos materiais, buscou-se a consistência especificada de  $200 \pm 30$  mm, através da realização do ensaio de abatimento pelo tronco de cone, segundo a NBR NM 67 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 1998), parâmetro este mantido fixo

para todos os concretos. Na Figura 20, pode-se ver a execução do ensaio e o aspecto visual do concreto fresco.

Figura 20 – Execução do ensaio de abatimento pelo tronco de cone e aspecto visual do concreto fresco



(fonte: própria da autora)

### 5.3.3 Moldagem dos corpos de prova

A moldagem dos corpos de prova foi executada segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2007) a qual determina os procedimentos para moldagem e cura dos corpos de prova. O processo de adensamento ocorreu com auxílio da mesa vibratória, executado em duas camadas, com vibração de dez segundos para cada camada, a fim de manter a uniformidade na moldagem dos corpos de prova.

Foram utilizadas quatro variedades de fôrmas devido às exigências de cada ensaio realizado. Para os ensaios de resistência à compressão, absorção total e penetração de água sob pressão foram utilizadas fôrmas cilíndricas com dimensões de 100 mm de diâmetro por 200 mm de altura. Para o ensaio de penetração de cloretos a fôrma também era cilíndrica, mas com dimensões de diâmetro de 95 mm e altura de 190 mm, a alteração na geometria da fôrma se deve ao fato dos aparatos disponíveis para a realização deste ensaio possuírem abertura máxima de 95 mm de diâmetro.

Para o ensaio de carbonatação foram utilizadas fôrmas prismáticas de dimensões de 350 mm de comprimento por 100 mm de largura e 100mm de altura. E por fim, os ensaios relacionados à análise do autorreparo das fissuras tiveram os corpos de prova moldados em fôrmas prismáticas com dimensões de 320 mm de comprimento por 90 mm de largura e 90 mm de altura. A Figura 21 ilustra os quatro tipos de fôrmas utilizadas na moldagem dos corpos de prova.

Figura 21 – Fôrmas utilizadas para a moldagem dos concretos (a) fôrmas prismáticas (35x10x10cm), formas cilíndricas (diâmetro 10cm e 20cm) e formas cilíndricas (diâmetro 9,5cm e 10cm); (b) fôrmas prismáticas (32x9x9cm)



(a)



(b)

(fonte: própria da autora)

### 5.3.4 Cura

Os corpos de prova ficaram acondicionados em temperatura ambiente nas primeiras 24 horas cobertos com sacos plásticos. Posteriormente, foram desmoldados e armazenados em câmara úmida sob temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e umidade maior que 95%, onde permaneceram até as datas dos ensaios, segundo a NBR 5738 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2007).

A cura dos corpos de prova para os ensaios de resistência à compressão, absorção total e penetração de água sob pressão foi úmida até os 28 dias e após os ensaios foram realizados. Já para o ensaio de carbonatação os corpos de prova ficaram em cura úmida até os 30 dias, depois permaneceram por 5 dias em câmara climatizada com umidade relativa de  $70 \pm 2\%$  e temperatura de  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ , e suas massas monitoradas até a constância de massa (diferença de 0,1g entre duas leituras consecutivas de 24 horas), e em seguida foram acondicionados na câmara de carbonatação. No ensaio de penetração de cloretos, os corpos de prova ficaram em uma cura úmida até os 28 dias, depois mais 3 dias em câmara climatizada, e em seguida foi realizado o ensaio.

Já para a análise do autorreparo das fissuras, os corpos de prova ficaram 15 dias em cura úmida, depois foram acondicionados na câmara climatizada até os 28 dias, data esta estipulada para abertura das fissuras. Em seguida, ficaram por mais 5 dias em cura úmida para que houvesse a cura do produto impermeabilizante aplicado logo após a abertura das fissuras, e por fim, foram encaminhados à câmara climatizada, local este no qual permaneceram ao longo de toda a análise.

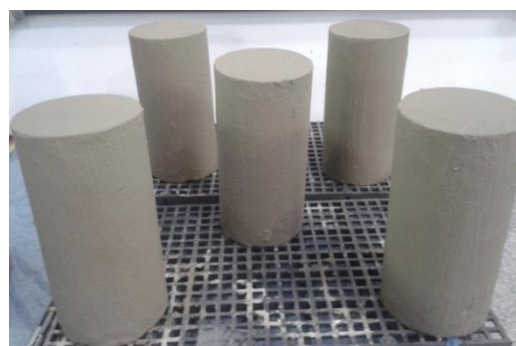
### 5.3.5 Aplicação do tratamento superficial

A aplicação do tratamento superficial foi realizada da mesma forma para todos os corpos de prova que recebiam o tratamento: executada manualmente com auxílio de um pincel. Em duas demãos, sendo a segunda efetuada quando a primeira ainda estava fresca, de acordo com as especificações do fabricante. A Figura 22 ilustra a aplicação do produto e o aspecto visual com o tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização.

Figura 22 – Tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização (a) aplicação do produto; (b) aspecto visual dos corpos de prova com tratamento superficial de impermeabilizante por cristalização



(a)



(b)

(fonte: própria da autora)

Após a aplicação do produto, os corpos de prova curaram em câmara úmida por 5 dias, conforme orientação do fabricante. Além dos corpos de prova que recebiam o tratamento, os demais também permaneceram na câmara úmida durante os 5 dias de cura a fim de manter as mesmas condições para todos os concretos ensaiados. Depois de realizada a cura do produto impermeabilizante, os corpos de prova destinados a passar pelo processo de lixamento foram lixados manualmente com auxílio de uma lixa de gramatura 80.

## 5.4 ENSAIOS REALIZADOS

Nos itens seguintes estarão descritos de forma detalhada os ensaios realizados nesse estudo com a finalidade de verificar o desempenho do produto impermeabilizante por cristalização diante do fator de permeabilidade do concreto e também em relação à capacidade de autorreparo de fissuras. Em paralelo, realizou-se também o ensaio para verificar a resistência à compressão com o intuito de analisar a capacidade mecânica dos concretos ensaiados.



### **5.4.1 Ensaio de resistência à compressão**

A resistência do concreto normalmente é considerada a propriedade de maior significância do material, sendo que está relacionada com a durabilidade e pode estar associada com a permeabilidade também (NEVILLE; BROOKS, 2013, p.95). De modo a determinar a capacidade de suportar esforços, foi realizado o ensaio de resistência à compressão simples aos 28 dias, preconizado pela NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2007).

Para esse ensaio foram moldados quatorze corpos de prova com o traço sem adições, desses, sete foram destinados ao concreto de referência, e os restantes receberam tratamento superficial do impermeabilizante por cristalização. Esse foi o único ensaio que não comparou o concreto com tratamento superficial lixado, visto que, considera-se que o processo de lixamento não deva interferir na resistência à compressão. Além desses, foram moldados mais quatorze corpos de prova, sendo sete com adição de impermeabilizante por cristalização e os demais com adição de sílica ativa.

### **5.4.2 Ensaio de absorção total**

O ensaio de absorção total foi realizado conforme recomendações da NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2005) aos 28 dias, sendo que a partir de sua realização foi possível determinar a absorção, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real.

Para este ensaio foram moldados doze corpos de prova do concreto sem adições, sendo quatro destinados ao concreto referência, e oito os quais receberam tratamento superficial do impermeabilizante por cristalização, dentre esse oito, quatro passaram pelo processo de lixamento. Além desses, moldaram-se mais oito corpos de prova, quatro com adição de impermeabilizante por cristalização e os outros quatro com adição de sílica ativa.

### **5.4.3 Ensaio de penetração de água sob pressão**

A NBR 10787 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2011) recomenda um ensaio para determinação da penetração de água sob pressão, no entanto, este ensaio exige equipamentos específicos para sua realização, e pela falta destes no laboratório LAMTAC/

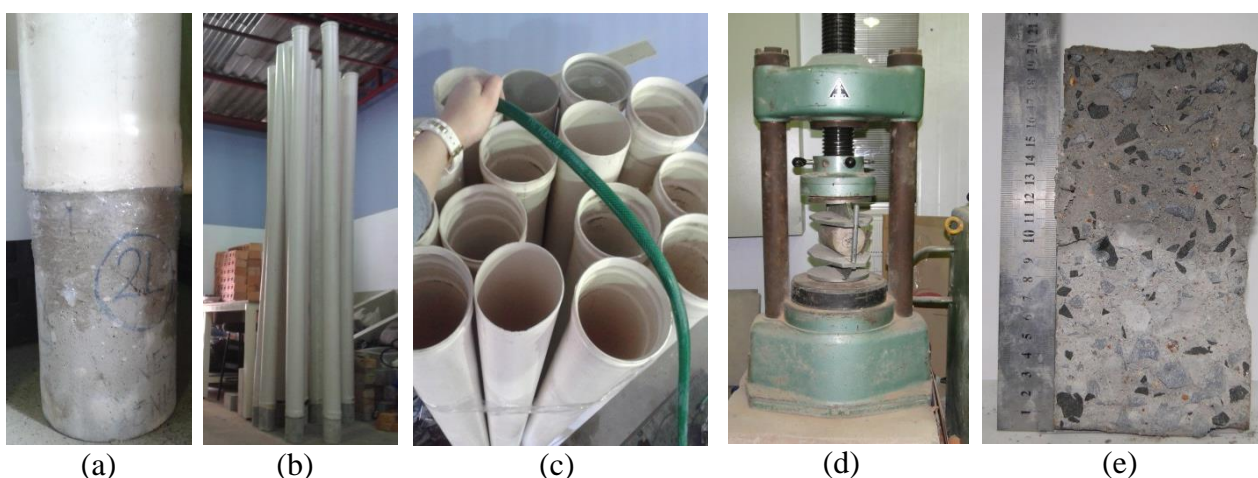
NORIE/ UFRGS foi desenvolvido uma adaptação para avaliar a penetração de água sob pressão de acordo com a infraestrutura disponível.

Foram ensaiados quatro corpos de prova de cada tipo de concreto, sendo estes aderidos individualmente a um tubo de PVC com 0,1 metros de diâmetro e 3 metros de comprimento, para isso os tubos tiveram uma das extremidades aquecida para que os corpos de prova pudessem ser inseridos no seu interior e em seguida foi passado selante na interface (concreto e tubo de PVC) para a vedação (Figura 23a e 23b).

Em seguida, os tubos de PVC foram preenchidos com água (Figura 23c) até o nível pré-estabelecido, desta forma foi exercida sobre a face superior dos corpos de prova uma pressão concentrada de 30KPa. Essa pressão foi mantida constante durante o período de uma semana, sendo que todos os dias eram verificados os níveis da água e caso necessário, reposta a água até o nível demarcado, mantendo desta maneira a altura da coluna de água e a pressão constantes.

Depois de uma semana, os tubos foram esvaziados e os corpos de prova rompidos por tração diametral (Figura 23d) e, em seguida foi realizado o registro fotográfico de todas as amostras. As fotos foram obtidas com a mesma distância, para posteriormente serem quantificadas as áreas molhadas e secas (Figura 23e). A quantificação foi realizada através da utilização do *software* AutoCAD.

Figura 23 – Desenvolvimento do ensaio de penetração de água sob pressão (a) detalhe da união do corpo de prova com o tubo de PVC para colocação de água; (b) vista geral dos corpos de prova para ensaio; (c) preenchimento da coluna d'água; (d) corpos de prova rompidos por tração diametral; (e) vista da face interna de um corpo de prova após realização do ensaio



(fonte: própria da autora)

#### 5.4.4 Ensaio de carbonatação

O ensaio de carbonatação foi realizado pelo processo acelerado e foram analisados dois corpos de prova para cada tipo de concreto. Os corpos de prova foram acondicionados em câmara de carbonatação acelerada, com capacidade de 600 litros, a qual é vedada e estanque do meio externo. Antes de serem colocados na câmara de carbonatação, todos foram identificados e receberam nas extremidades de topo e base a aplicação de parafina sólida (Figura 24), com o objetivo de impermeabilizá-los para que a carbonatação ocorresse somente nas paredes laterais, sendo que este processo era refeito após cada ruptura de verificação da profundidade de carbonatação.

Figura 24 – Aspecto visual dos corpos de prova com aplicação de parafina sólida no topo e base



(fonte: própria da autora)

A alimentação de  $\text{CO}_2$  é contínua e foi realizada por meio de um fluxo de gás proveniente de um cilindro de  $\text{CO}_2$ , este regulado por válvulas e por um manômetro de coluna. O fluxo de gás é de 10 L/min, com concentração de 5% de  $\text{CO}_2$ , sendo a taxa de renovação de 60 minutos.

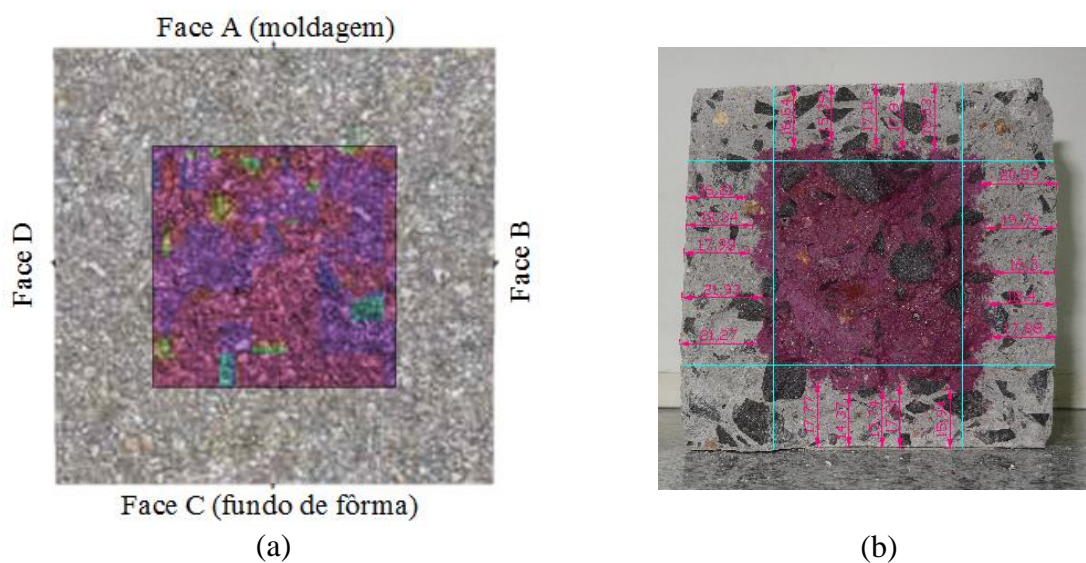
As idades avaliadas são de 78, 100, 120, 142, 162 e 176 dias. Foram determinadas essas idades em virtude dos concretos serem executados com cimento pozolânico, com relação água/aglomerante baixa, e assim, com menor possibilidade de carbonatação a baixas idades. O número de idades foi limitado pela dimensão do corpo de prova.

Antes da câmara ser aberta para retirada dos corpos de prova, a alimentação de  $\text{CO}_2$  era interrompida. A cada medição, depois de aberta a câmara, as amostras eram identificadas e dessas, foram retiradas fatias de cerca de 35 mm, com o auxílio de uma prensa.

Sobre as fatias recém fraturadas, era aspergida solução de fenolftaleína a 1% dissolvida em álcool etílico. A fenolftaleína se apresenta incolor em pH menor que 8,3, rosa entre pH 8,3 e 10,0, conhecida como zona de viragem, e para pH superior a 10,0 a coloração é carmim (CORRÊA, 20--?). Ao término, o restante do corpo de prova era colocado novamente na câmara, após a aplicação da parafina, e reiniciava-se a alimentação.

As fatias foram fotografadas sempre a mesma distância da face A voltada para cima, como ilustra a Figura 25a, e a determinação da profundidade de carbonatação foi realizada com a medição através da utilização do software AutoCAD. Em cada uma das faces media-se cinco leituras, totalizando vinte leituras de profundidade para cada fatia (Figura 25b), sendo que os cantos eram desconsiderados.

Figura 25 – Fatias de carbonatação (a) identificação das faces dos corpos de prova;  
(b) aspecto do corpo de prova na realização das medidas



(fonte: própria da autora)

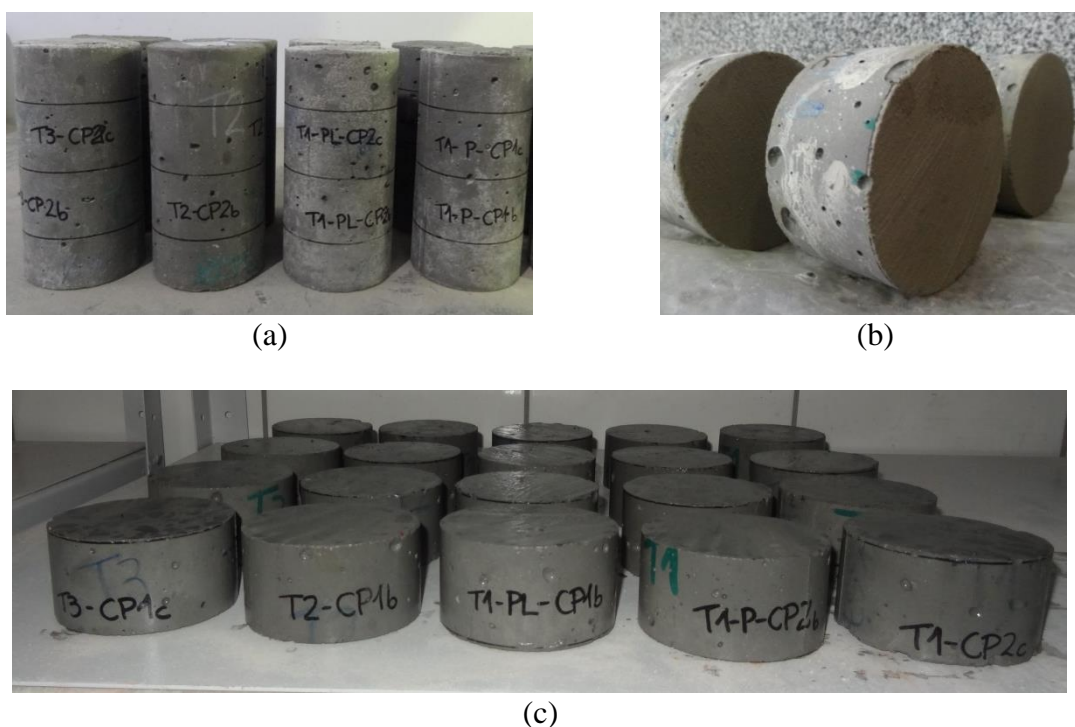
Como indicado por Kulakowaski (2002), a qual também fez uso de imagens para análise da profundidade de carbonatação, mas utilizando outro *software*, alguns cuidados devem ser tomados ao realizar os registros, entre eles: procurar a maior planicidade possível da face de ruptura, a fim de evitar distorções nas imagens; minimizar as sombras, mantendo a iluminação uniforme em todos os registros, e garantir o esquadro do corpo de prova em relação à imagem, assim como em relação à escala de referência.

### 5.4.5 Ensaio de penetração de íons cloreto

A determinação do ingresso de íons cloretos nos concretos ensaiados foi realizada de acordo com o método de ensaio acelerado da ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), o *Test Method for Electrical Indication of Concrete's ability to Resist Chloride Ion Penetration*. O ensaio consiste em colocar um corpo de prova de  $51 \pm 3$  mm de espessura entre duas células acrílicas. Na primeira célula coloca-se uma solução de cloreto de sódio (NaCl), com concentração de 3% (em massa), e na outra célula, uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), com concentração de 0,3N.

Foram moldados dez corpos de prova cilíndricos (diâmetro de 95 mm e altura de 190 mm), sendo dois para cada tipo de concreto ensaiado. Inicialmente, foram demarcadas as fatias internas dos corpos de prova a serem utilizadas. Assim, de cada corpo de prova, foram utilizadas duas fatias, resultando então, em quatro fatias para cada tipo de concreto (Figura 26a), e totalizando vinte fatias para o ensaio (Figura 26c). As fatias que receberam o tratamento superficial tiveram o produto aplicado apenas nas faces onde há contato com as soluções utilizadas no ensaio (Figura 26b).

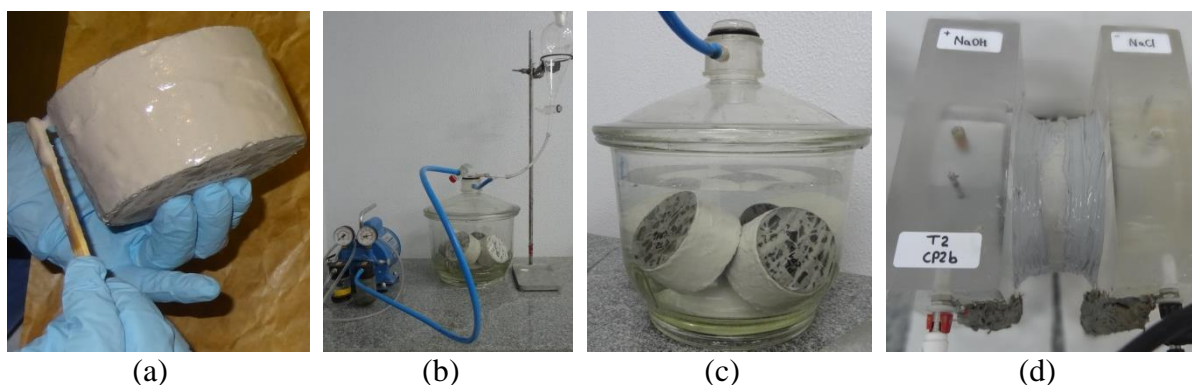
Figura 26 – Processo de preparação das amostras para o ensaio de penetração de cloretos (a) identificação do local a ser cortado; (b) fatias com aplicação do tratamento superficial; (c) fatias após processo de corte



(fonte: própria da autora)

Para a realização do ensaio houve a preparação dos corpos de prova: as faces laterais de cada fatia foram impermeabilizadas com resina epóxi (Figura 27a) e após a secagem, os corpos de prova foram colocados em dessecador. Conforme preconiza a ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) foi feita a aplicação de vácuo por um período de 3 horas, e em seguida, foi inserida água deionizada e deaerada no dessecador com auxílio do balão volumétrico até completa imersão das amostras (Figura 27b). Depois disso, foi aplicado vácuo por um período de 1 hora. As amostras permaneceram imersas a vácuo por um período de  $18 \pm 2$  horas (Figura 27c). Após esse tempo, as fatias foram secas superficialmente para serem acopladas às meias células de acrílico por meio de um material selante à base de poliuretano (Figura 27d).

Figura 27 – Etapas da execução do ensaio de penetração de cloretos (a) aplicação de resina epóxi; (b) sistema dessecador, bomba à vácuo e balão volumétrico; (c) corpos de prova imersos em água deaerada e deionizada; (d) célula com corpo de prova acoplado com selante à base de poliuretano

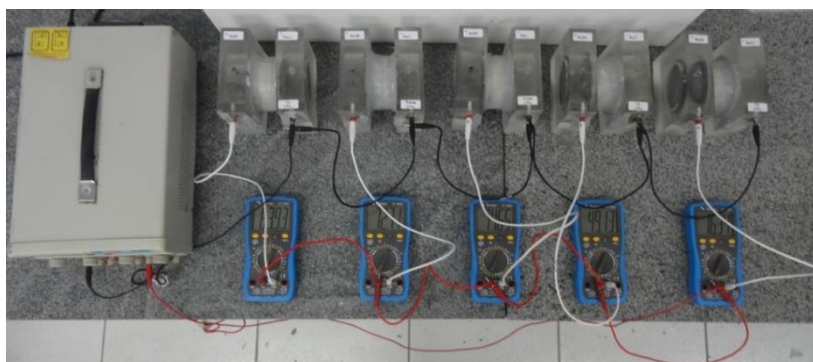


(fonte: própria da autora)

Nesta pesquisa cinco células foram ensaiadas por dia, sendo uma para cada tipo de concreto, com diferentes tratamentos. Essas foram dispostas em série de maneira a serem submetidas à mesma tensão (Figura 28). Foram realizadas quatro repetições, durante quatro dias subsequentes.

O ensaio consiste na aplicação de uma voltagem de  $60 \pm 0,1V$ , e mede-se a corrente passante em intervalos de 30 minutos durante 6 horas. Essas leituras registradas são associadas à resistência do concreto em relação à penetração de íons cloretos.

Figura 28 – Ilustração da montagem do ensaio de penetração de cloretos



(fonte: própria da autora)

A ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012) estabelece uma classificação dos concretos quanto à resistência à penetração de cloretos, de acordo com a intensidade da corrente, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 – Penetração de íons cloreto baseado na carga passante

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

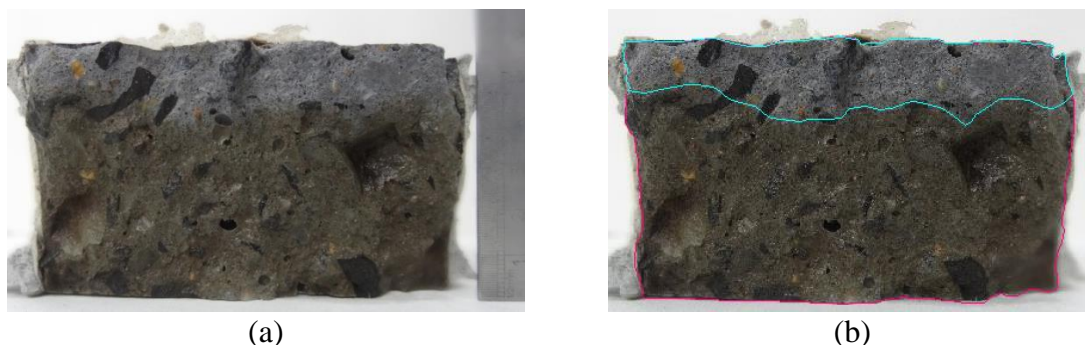
(fonte: ASTM C 1202/05 , 2012)

O cálculo da carga total passante pelos corpos de prova é realizado por meio da fórmula 1.

$$Q = 900(I_0 + 2*I_{30} + 2*I_{60} + 2*I_{90} + \dots + 2*I_{330} + I_{360}) \quad (\text{fórmula 1})$$

No final do ensaio as amostras foram rompidas ao meio para aspersão de solução de nitrato de prata (0,10N em água deionizada), para verificar a profundidade de penetração dos íons cloretos (Figura 29a). Para quantificação das áreas de penetração de cloretos foi utilizado o *software* AutoCAD, no qual se mediu as áreas com penetração do íon (Figura 29b).

Figura 29 – Corpo de prova com aspersão de nitrato de prata após ensaio de penetração de cloretos (a) aspecto visual; (b) aspecto de medidas realizadas



(fonte: própria da autora)

### 5.4.6 Formas de análise do autorreparo de fissuras

Para a análise da capacidade do autorreparo das fissuras foram utilizados três métodos diferentes: a visualização por termografia com auxílio da câmera termográfica, o ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas e o acompanhamento das fissuras por microscopia ótica.

#### 5.4.6.1 Câmera termográfica

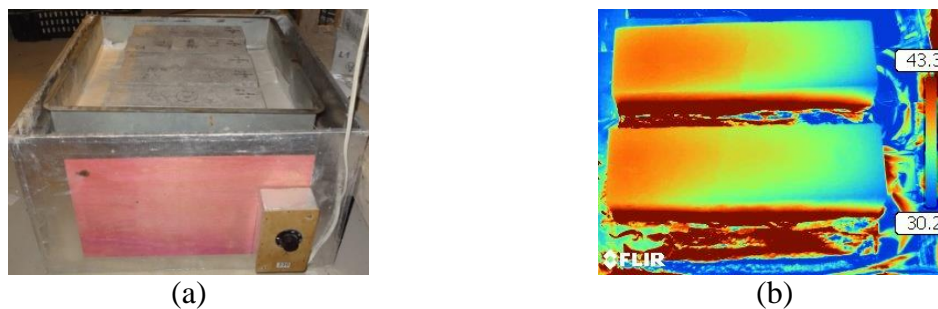
O equipamento utilizado no ensaio foi uma câmera termográfica, FLIR T400. Para sua utilização é necessário inserir os parâmetros como a emissividade do objeto analisado, a temperatura ambiente e a distância até o objeto. A câmera termográfica utiliza esses parâmetros pré-fixados e capta os raios infravermelhos, apresentando a temperatura superficial do objeto. Essas temperaturas são apresentadas por diferenciação de cores. As fissuras, por serem um caminho vazio dentro da massa do concreto, uma região não condutora, tem menor propagação de calor, portanto, pode-se notar essa falha pela diferenciação de cor na termografia (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.483).

Neste estudo, foi analisado um corpo de prova para cada tipo de concreto. Inicialmente, para tentar ver o local fissurado e analisar ao longo do tempo o possível autorreparo das fissuras, fizeram-se algumas tentativas para visualizar a diferença de temperatura do local fissurado e do local íntegro nos corpos de prova. A ideia inicial consistiu em colocar os corpos de prova sobre uma fonte de calor (Figura 30a) com as fissuras voltadas para a parte externa. Assim, esperava-se que com o progressivo aquecimento do corpo de prova o local fissurado apresentasse diferença de cores por ser uma região com menor condutividade. No entanto, a visualização da



fissura não foi possível, como pode ser verificado na Figura 30b. Dessa forma, optou-se por adotar outro método.

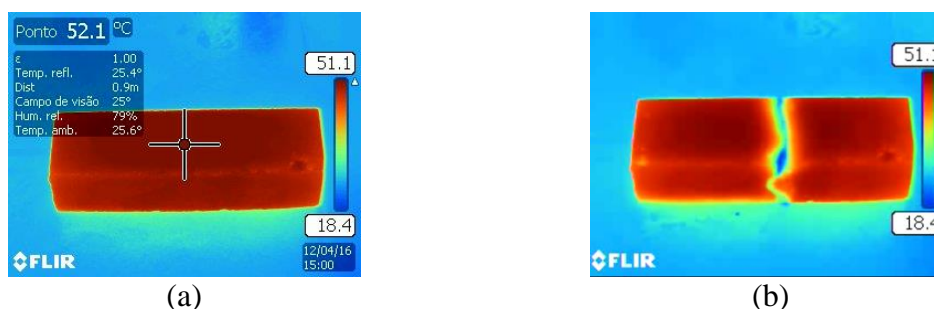
Figura 30 – Utilização de termografia com fonte de calor direcionada (a) aparato utilizado para emissão da fonte de calor; (b) aspecto visual por termografia dos corpos de prova fissurados



(fonte: própria da autora)

Para se conseguir empregar essa diferença de temperaturas e visualizar o local fissurado, os corpos de prova foram colocados em estufa a 60°C (Figura 31a), e ainda nesta temperatura foi inserido água a 10°C no local fissurado com auxílio de seringas para que por diferença de temperatura pudesse ver o local fissurado com auxílio da câmera termográfica (Figura 31b).

Figura 31 – Utilização de termografia para visualização de fissuras (a) corpo de prova após estufa de 60°C; (b) aspecto visual por termografia dos corpos de prova fissurados



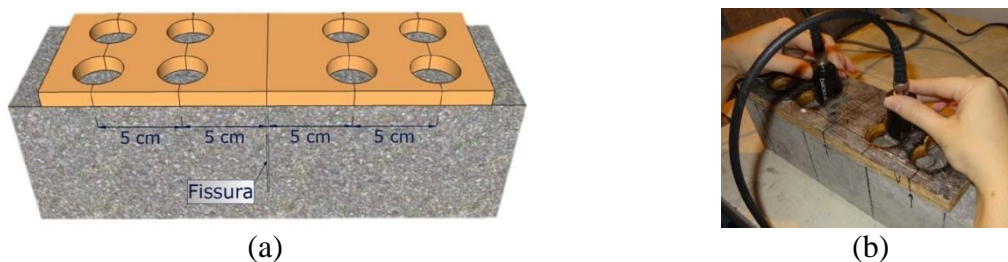
(fonte: própria da autora)

#### 5.4.6.2 Onda ultrassônica

O ensaio não destrutivo de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas foi realizado de acordo com o recomendado pela NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2013). O equipamento utilizado possui transdutores de 28 mm de diâmetro e frequência de 150 kHz. Para que se pudesse analisar a influência das fissuras utilizou-se transmissão indireta, na qual os transdutores foram posicionados na lateral inferior do corpo de prova. O local da fissura foi demarcado e este era o ponto central de referência para realizar as

leituras, conforme ilustra a Figura 32. O processo consistia em aplicar o gel nos transdutores, colocados sobre a superfície do corpo de prova nas posições indicadas, sendo inicialmente feita a medida em um dos pontos internos e, posteriormente, a leitura na mesma linha nos pontos externos. Depois se repetia o processo para a linha seguinte de pontos de medição.

Figura 32 – Indicação do posicionamento dos transdutores (a) representação esquemática; (b) execução de leituras de ondas ultrassônicas nas marcações pré-estabelecidas



(fonte: própria da autora)

Depois de ter sido realizada a fissuração aos 28 dias, os corpos de prova foram submetidos a leituras quinzenais de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, para que ao longo do tempo se registrasse o possível autorreparo das fissuras. Foram analisados seis corpos de prova para cada tipo de concreto, e em cada ponto repetia-se três vezes as leituras, conforme NBR 8802 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2013).

Segundo Mehta e Monteiro (2014, p.443), as fissuras causam redução nas velocidades de onda; os autores também salientam que a presença de armadura não é indicada quando se mede a velocidade de onda no concreto, pois ela aumenta a velocidade de onda e pode desviar dos resultados esperados. No entanto, neste trabalho foi inserida a armadura para que o concreto não rompesse ao ser submetido à carga para abertura das fissuras.

O aumento da idade dos concretos também é um fator que influencia neste ensaio, pois com a contínua hidratação do cimento, há redução da porosidade e possível colmatagem dos poros, aumentando, assim, a velocidade de propagação de onda no concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2014, p.442).

#### 5.4.6.3 Microscopia ótica

A microscopia foi realizada com o intuito de analisar o autorreparo das fissuras visualmente ao longo do tempo. Foram analisados pontos específicos da fissura em três corpos de prova, sendo eles: concreto referência, concreto com adição do impermeabilizante por cristalização e o

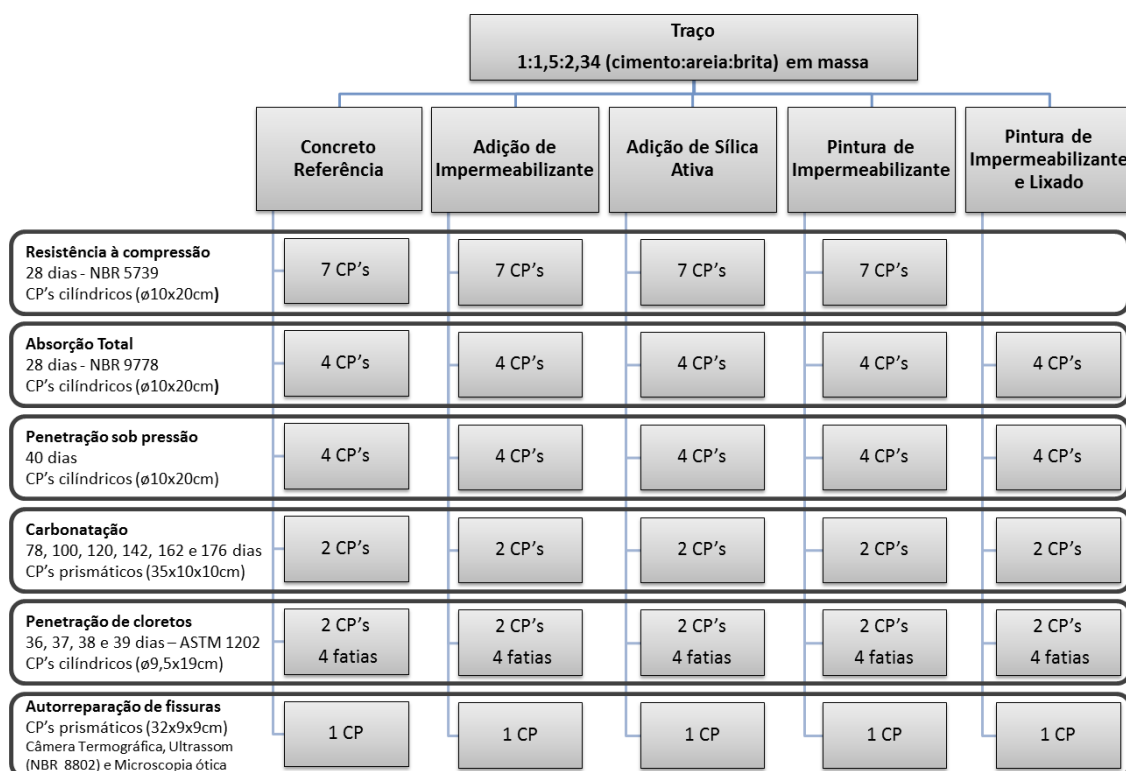
concreto com adição de sílica ativa. Nos concretos com tratamento superficial não foram realizadas imagens microscópicas, visto que o produto aplicado sobre a superfície impede qualquer tipo de análise visual da fissura.

Utilizou-se o microscópio ótico Zeiss Stemi 508, com ampliação entre 2x e 250x. Segundo Bertolini (2010, p.267), a análise por microscopia permite analisar com maior quantidade de detalhes informações, que muitas vezes podem ser determinantes para compreender os resultados das pesquisas.

## 5.5 REPRESENTAÇÃO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL

Com a finalidade de facilitar o entendimento do programa experimental desenvolvido foi elaborado um esquema representativo (Figura 33). Neste consta os cinco tipos de concretos analisados com as quantidades de corpos de prova (CP's) produzidos, assim como os ensaios executados, a descrição normativa (quando empregada), os dias do concreto na realização dos ensaios e a geometria correspondente aos corpos de prova.

Figura 33 – Representação esquemática do programa experimental



(fonte: própria da autora)

## 6 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para o programa experimental deste trabalho, descritos no capítulo 5, assim como suas análises. Com os dados obtidos nos ensaios foi possível realizar análises estatísticas na grande maioria dos ensaios com o auxílio do software Statistica 7.0, por meio da Análise de Variância (ANOVA). E, através do teste F (distribuição de Fischer) pode-se verificar se as variáveis possuíam ou não efeitos significativos sobre os resultados obtidos, com intervalo de confiança de 95%.

### 6.1 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão, conforme NBR 5739 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2007), são apresentados na Tabela 10. As resistências médias foram adquiridas por meio da ruptura de sete corpos de prova para cada concreto ensaiado, os quais foram o concreto referência sem adições e sem tratamentos, o concreto referência com aplicação de pintura com o impermeabilizante por cristalização, o concreto com adição de impermeabilizante por cristalização e, por fim o concreto com adição de sílica ativa. Os corpos de prova foram rompidos na idade 28 dias.

Tabela 10 – Resistência à compressão aos 28 dias dos quatro tipos de concreto ensaiados

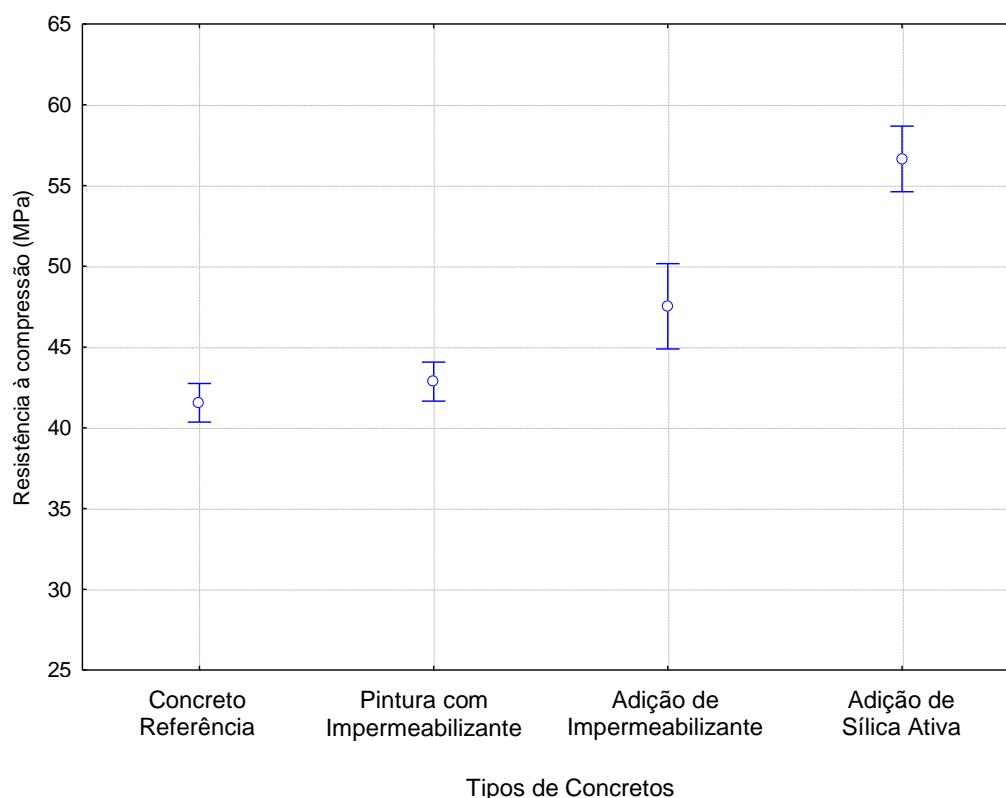
<b>Tipos de Concretos</b>	<b>Resistência média (MPa)</b>	<b>DP (MPa)</b>	<b>CV (%)</b>
Concreto Referência	41,32	1,43	3,45
Pintura com Impermeabilizante	42,86	1,31	3,04
Adição de Impermeabilizante	47,52	2,85	6,01
Adição de Sílica Ativa	56,65	2,20	3,88

DP : Desvio padrão; CV: Coeficiente de variação.

(fonte: própria da autora)

Por meio dos dados apresentados na Tabela 9 elaborou-se o gráfico apresentado na Figura 34, o qual apresenta as médias de resistências com os desvios padrões encontrados.

Figura 34 – Resistência à compressão simples aos 28 dias dos quatro tipos de concreto ensaiados



(fonte: própria da autora)

A partir da Figura 34 observa-se que a utilização do impermeabilizante por cristalização como tratamento superficial aplicado como pintura praticamente não altera a resistência à compressão quando comparado ao concreto referência. Este comportamento era esperado uma vez que a influência do produto impermeabilizante, neste caso, é apenas superficial. Já quando o impermeabilizante por cristalização quando utilizado como adição ao concreto este aumentou a resistência em 13%. Tal comportamento pode estar associado à colmatagem dos poros do concreto pelo produto impermeabilizante. Em contrapartida, a adição de sílica ativa mostrou-se a mais eficiente, pois proporcionou um acréscimo de 27% à resistência à compressão quando comparado ao concreto referência.

Para a análise da significância das variáveis controláveis, os tratamentos, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 11, para o ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.

Tabela 11 – Análise de variância (ANOVA): resistência à compressão aos 28 dias

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	1010,521	3	336,840	82,205	0,000000	Sim
Erro	102,439	25	4,098			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p:nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Nota-se, a partir da Tabela 11, que a influência dos tratamentos utilizados foi considerada significativa estatisticamente, deste modo, a utilização dos tratamentos e adições faz diferença nos resultados relacionados com a resistência à compressão. Em seguida, realizou-se o Teste F de Fischer para ver a significância entre os tipos de concretos, sendo estes comparados ao concreto referência, como pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Teste F de Fischer para resistência à compressão

	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	NS	S	S

NS: não significativo; S: significativo.

(fonte: própria da autora)

Com base na Tabela 12, pode-se dizer que a resistência à compressão dos concretos com a utilização do impermeabilizante por cristalização aplicado como pintura não difere significativamente se comparada com a do concreto referência, entretanto, as resistências com a utilização do mesmo como adição na mistura e com a adição de sílica ativa são estatisticamente diferentes.

Uma possível explicação para o incremento da resistência à compressão com a adição do impermeabilizante no concreto pode estar relacionada com um efeito filler o qual pode contribuir para o fechamento dos vazios. Mas também, pode ter funcionado como um ativador da hidratação do cimento, melhorando a microestrutura da pasta de cimento (LI et al., 2004, p.189), além das reações dos silicatos presentes no produto com o hidróxido de cálcio resultando na formação de C-S-H.

O incremento na resistência à compressão demonstrado pela sílica ativa já era esperado, uma vez que esta é considerada uma super pozolana muito usada em dosagens de concretos que

necessitam obter alta resistência e/ou baixa permeabilidade (MAZLOOM et al., 2004, BIRICIK et al., 2014; NEVILLE, 2016, p.700).

Watcharapong et al. (2010), em seu trabalho, estudaram a microestrutura de concretos compostos por adições minerais, entre elas a sílica ativa, no qual demonstram, por meio de análises microscópicas e térmicas, o aumento na resistência à compressão devido à formação de estruturas mais densas com formação de elementos fibrosos de C-S-H em concretos com essas adições. Os benefícios que a adição de sílica ativa proporciona ao aumento da resistência do concreto é bem difundido e explanado na literatura (HELENE; ANDRADE, 2010, MEHTA; MONTEIRO, 2014, GJØRV, 2015, NEVILLE, 2016; entre outros).

## 6.2 ENSAIO DE ABSORÇÃO TOTAL

Por meio do ensaio de absorção total, conforme recomendações da NBR 9778 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA NORMAS TÉCNICAS, 2005), aos 28 dias, obtiveram-se os resultados de absorção, índice de vazios, massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real. Na Tabela 13 são apresentados os resultados médios encontrados, com os desvios padrões e os coeficientes de variações, para a absorção de água e o índice de vazios dos cinco tipos de concretos analisados.

Tabela 13 – Absorção de água e índice de vazios dos cinco tipos de concreto ensaiados

Tipos de concretos	Absorção			Índice de vazios		
	Média	DP	CV	Média	DP	CV
Concreto Referência	5,960	0,236	3,962	13,303	0,471	3,540
Pintura com Impermeabilizante	5,323	0,140	2,623	12,005	0,259	2,161
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	5,363	0,396	7,385	12,042	0,728	6,044
Adição de Impermeabilizante	6,141	0,428	6,969	14,037	0,893	6,365
Adição de Sílica Ativa	4,992	0,292	5,849	11,291	0,612	5,422

DP : Desvio padrão (%); CV: Coeficiente de variação (%).

(fonte: própria da autora)

Com os dados apresentados na Tabela 13 para a absorção de água elaborou-se o gráfico ilustrado na Figura 35, a partir das médias obtidas para os cinco concretos ensaiados com seus devidos desvios padrões obtidos. O gráfico referente ao índice de vazios com os dados da Tabela 13 está ilustrado na Figura 36, esse parâmetro varia diretamente proporcional à absorção de água e, portanto, os gráficos tem o praticamente o mesmo aspecto visual.

Figura 35 – Absorção de água aos 28 dias dos cinco tipos de concreto ensaiados

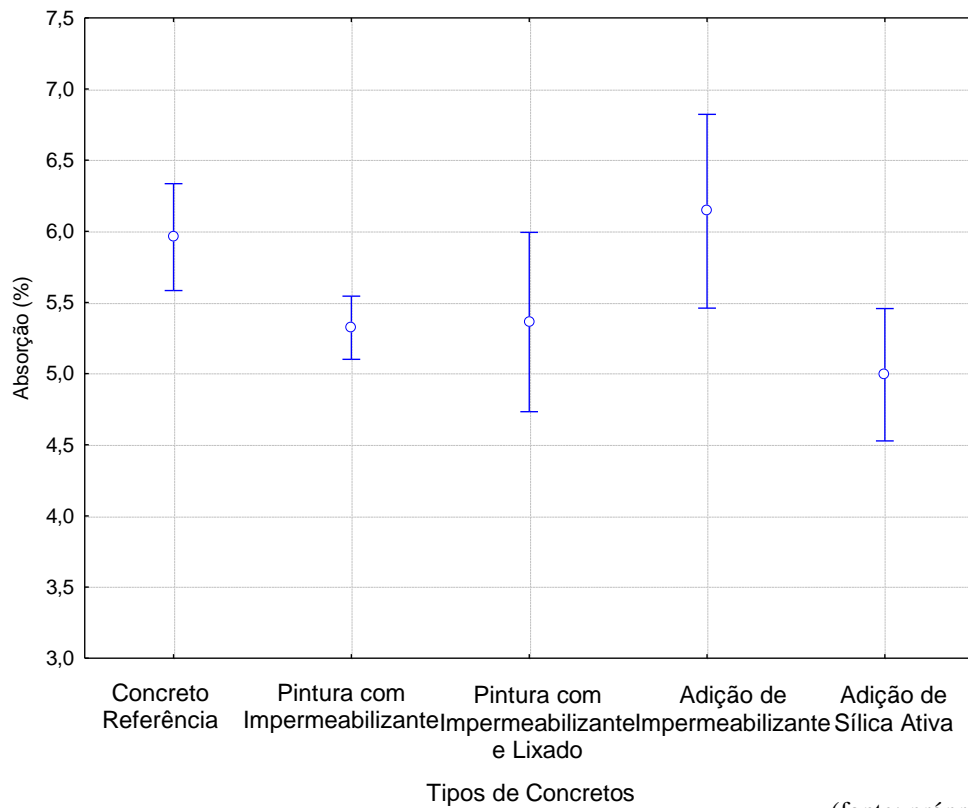
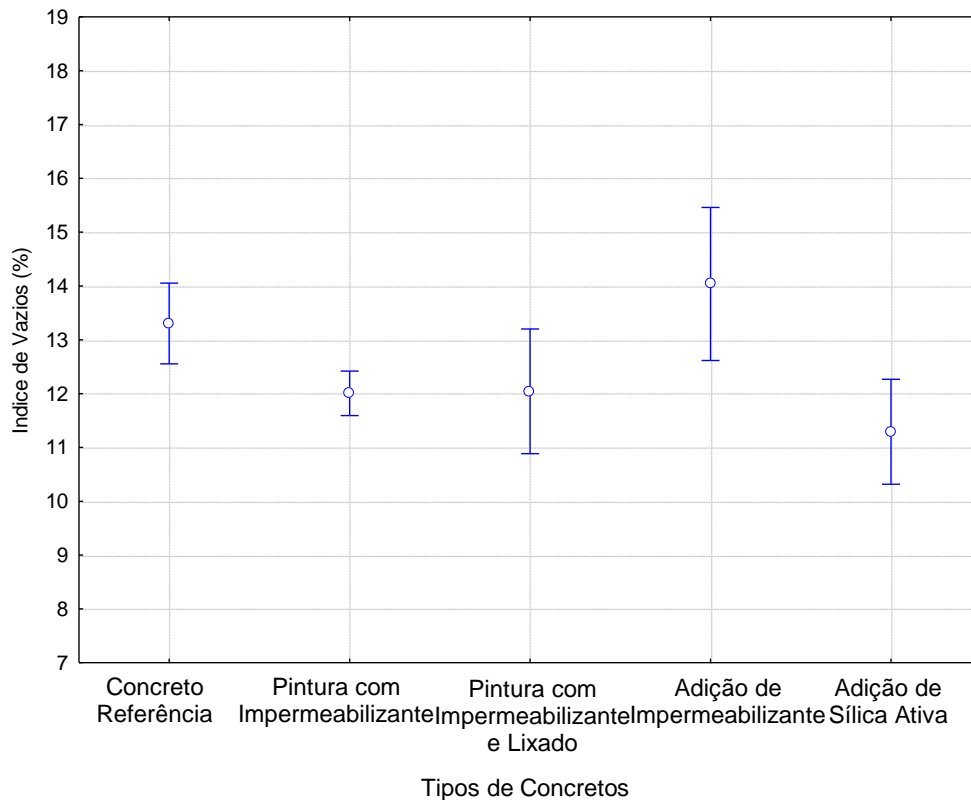


Figura 36 – Índice de vazios aos 28 dias dos cinco tipos de concreto ensaiados





Observa-se, por meio da Figura 35 e 36, que a utilização de impermeabilizante por cristalização como pintura reduz a absorção de água tanto para as amostras que sofreram o processo de lixamento quanto para as que não foram submetidas a este processo, visto que também reduzem os índices de vazios. A redução era esperada já que o tratamento superficial com o impermeabilizante tem o intuito de estancar a superfície do concreto e impedir a entrada de água, função esta destinada aos produtos impermeabilizantes por cristalização considerados como um sistema de proteção tapa poros (BERTOLINI, 2010, p.190). Esse processo de fechamento dos poros é explicado por Bertolini (2010, p.190) uma vez que devido às substâncias à base de silicatos presentes no produto, ao penetrarem no concreto reagem com os subprodutos do mesmo, em especial com o hidróxido de cálcio, e formam os cristais que provocam o tampamento dos poros.

A adição do impermeabilizante por cristalização na mistura do concreto aumentou a absorção de água (Figura 35 e 36) se comparado com o concreto referência, este fato pode estar associado a uma variação na dimensão dos poros capilares do concreto devido a utilização do produto, como já dito a absorção está diretamente ligada ao índice de vazios, portanto, se houve maior absorção há também aumento no índice de vazios. No entanto, isso não era esperado já que no ensaio de resistência à compressão a adição do impermeabilizante contribuiu para um aumento significativo. O desempenho deste produto não foi adequado com o que se esperava, pois ao elevar o índice de vazios o concreto com adição do impermeabilizante por cristalização pode ter contribuído para o aumento da higroscopicidade do material. A higroscopicidade se trata da capacidade de absorver água de forma a estabelecer um equilíbrio com o meio sendo esta relacionada com a porosidade (RAMOS, 2010, p.41).

Assim, pode-se justificar o aumento na absorção e no índice de vazios no concreto com adição de impermeabilizante por uma possível higroscopicidade gerada pelo uso desse produto, podendo ser resultado do aumento da porosidade ou da quantidade de pequenos poros bem distribuídos, ou ainda, por o produto talvez ser higroscópico e contribuir para esse aumento da absorção. Song et al. (2016, p.282) relatam a diminuição no tamanho dos poros do concreto com o uso de adição a base de silicato de sódio para desenvolver a impermeabilização do concreto. O fato de a resistência à compressão ser superior ao concreto referência pode ser justificada por Neville (2016, p.298), segundo o autor, “[...] para uma determinada porosidade, poros menores resultam em uma pasta de cimento de maior resistência.”

Observa-se que a utilização do impermeabilizante por cristalização como tratamento superficial se mostrou mais eficiente quando comparado com os concretos que receberam o impermeabilizante como adição. O sistema de impermeabilização por cristalização como tratamento superficial é uma forma de proteção superficial e tem pouca dependência com a distribuição dos vazios do concreto, devido a isso era esperado que tivesse melhor desempenho que o concreto referência (ZHANG et al., 2008, p.273).

Já a adição de sílica ativa (Figura 34 e 35) se mostrou mais eficiente que os outros métodos, visto que apresentou a maior redução na absorção de água e, conseqüente, diminuição no índice de vazios. Resultado este esperado, pois essa pozolana foi escolhida para ser utilizada neste trabalho justamente por sua alta capacidade de modificar a microestrutura do concreto, melhorando a capacidade de impedimento da penetrabilidade de fluidos (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.342).

A fim de analisar a significância das variáveis controláveis, os tratamentos e as adições utilizadas, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 14, para o ensaio de absorção de água e na Tabela 15 para o índice de vazios. Nota-se que os tratamentos e as adições influenciaram de forma significativa as variáveis avaliadas.

Tabela 14 – Análise de variância (ANOVA): absorção de água

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	3,659	4	0,915	9,139	0,000602	Sim
Erro	1,502	15	0,100			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Tabela 15 – Análise de variância (ANOVA): índice de vazios

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	19,666	4	4,917	12,343	0,000122	Sim
Erro	5,975	15	0,398	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Em seguida, realizou-se o teste F de Fisher, para analisar a significância entres tipos de concreto, sendo estes comparados ao concreto referência. Na Tabela 16 descreve-se o teste F

de Fischer para a absorção de água, neste é possível verificar que apenas as amostras que utilizaram o impermeabilizante por cristalização como pintura e sofreram o lixamento não difere significativamente do concreto referência. Já o concreto com a aplicação de impermeabilizante por cristalização como pintura e os concretos com adições são estatisticamente diferentes quanto à absorção em relação ao concreto referência.

Tabela 16 – Teste F de Fischer para a absorção de água

	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	S	NS	S	S

NS: não significativo; S: significativo.

(fonte: própria da autora)

Na Tabela 17 é apresentado o teste F de Fischer para o índice de vazios. Por meio deste percebe-se que somente o concreto com adição de impermeabilizante por cristalização não difere significativamente em relação ao índice de vazios do concreto referência. Os concretos com tratamento superficial de pintura com o impermeabilizante por cristalização e o concreto com adição de sílica ativa apresentaram-se estatisticamente diferentes diante do concreto referência.

Tabela 17 – Teste F de Fischer para o índice de vazios

	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	S	S	NS	S

NS: não significativo; S: significativo.

(fonte: própria da autora)

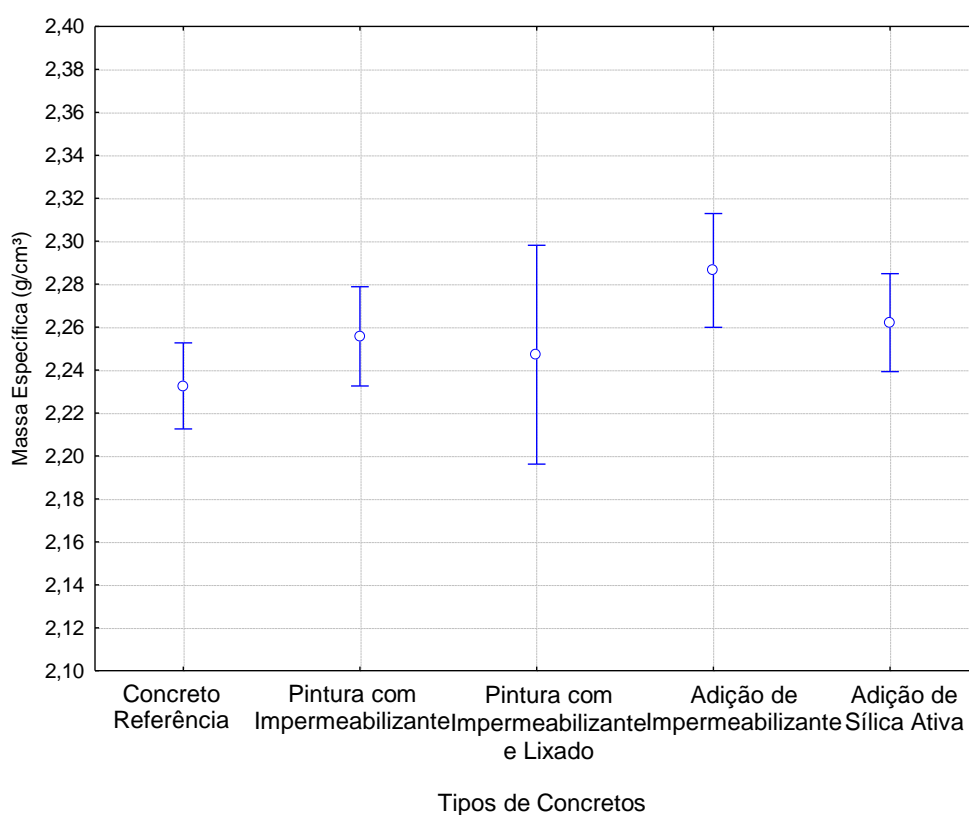
Com ensaio de absorção total também é possível calcular as massas específicas, sendo a massa específica da amostra seca, massa específica da amostra saturada e massa específica real. No entanto, analisando a Tabela 18 e a Figura 37 se percebe que essas não tiveram pouca diferença.

Tabela 18 – Massas específicas dos cinco tipos de concreto ensaiados

Tipos de Concretos	Médias Massas específicas (g/cm <sup>3</sup> )		
	Amostra seca	Amostra saturada	Real
Concreto Referência	2,233	2,366	2,575
Pintura com Impermeabilizante	2,256	2,376	2,563
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	2,247	2,368	2,555
Adição de Impermeabilizante	2,286	2,427	2,660
Adição de Sílica Ativa	2,262	2,375	2,550

(fonte: própria da autora)

Figura 37 – Massas específicas dos cinco tipos de concreto ensaiados

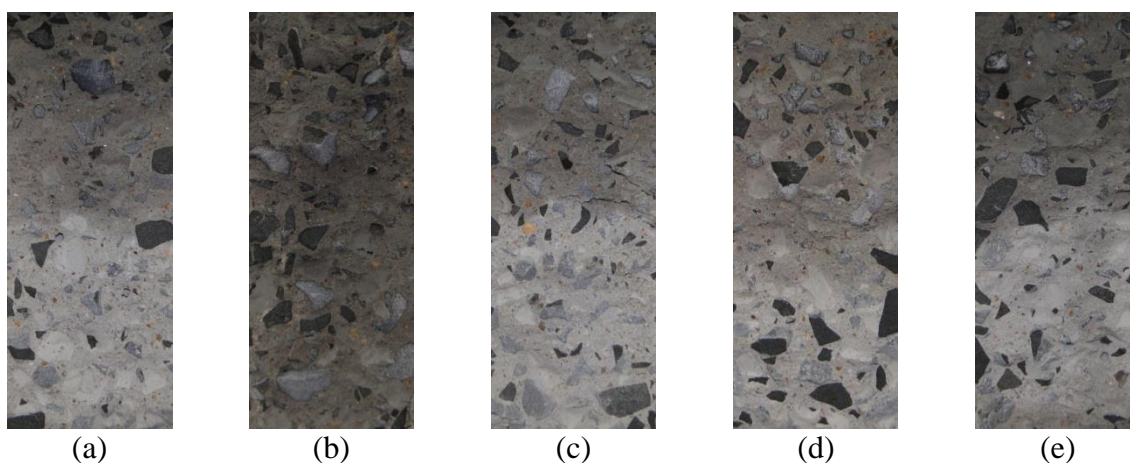


(fonte: própria da autora)

### 6.3 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÁGUA SOB PRESSÃO

Por meio da realização deste ensaio é possível analisar a permeabilidade dos concretos por meio da penetração de água sob pressão. Após os corpos de prova ficarem por uma semana sob pressão de água concentrada na parte superior, os mesmos foram rompidos ao meio para que fosse executada a análise a partir da área molhada de cada um. Na Figura 38 pode-se ver o aspecto dos corpos de prova após a ruptura.

Figura 38 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de penetração de água sob pressão  
 (a) concreto referência; (b) concreto com pintura de impermeabilizante; (c) concreto com pintura de impermeabilizante e lixado; (d) concreto com adição de impermeabilizante;  
 (e) concreto com adição de sílica ativa



(fonte: própria da autora)

Com as imagens retiradas de cada corpo de prova foi possível medir a área molhada com o auxílio do software AutoCAD e na Tabela 19 constam as médias das áreas molhadas dos quatro corpos de prova ensaiados para cada tipo de concreto estudado, e na Figura 39 ilustra os resultados obtidos graficamente.

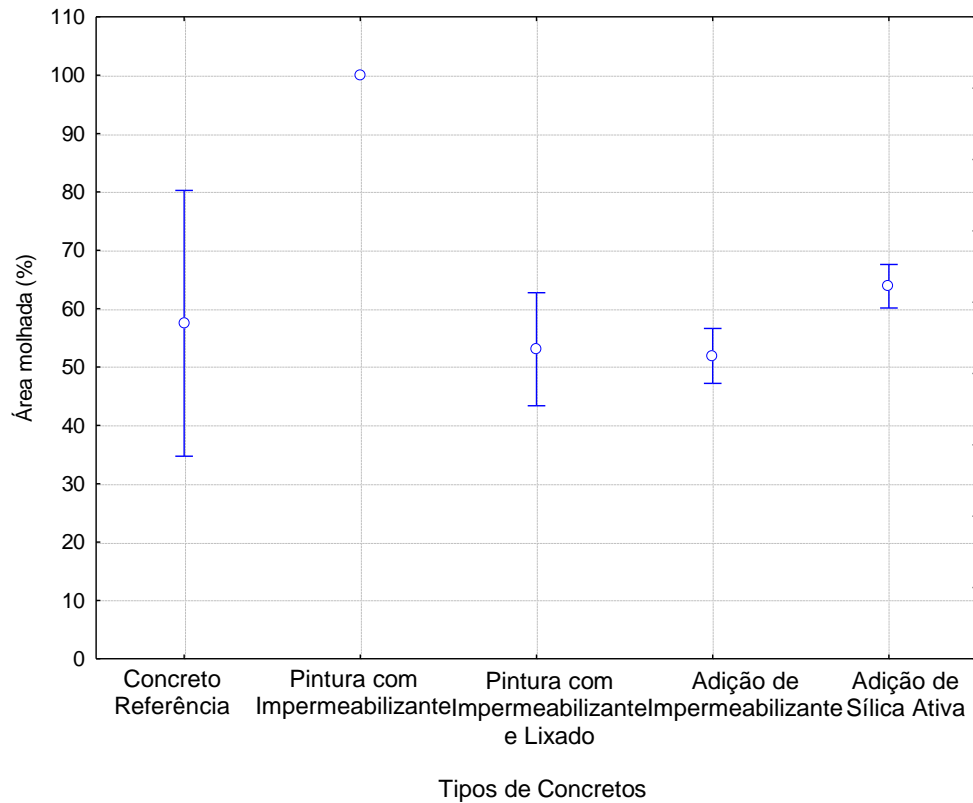
Tabela 19 – Média da área molhada de penetração de água sob pressão dos cinco tipos de concreto ensaiados

Tipos de Concretos	Penetração de água sob pressão		
	Média Área Molhada (%)	DP	CV
Concreto Referência	57,496	9,166	15,941
Pintura com Impermeabilizante	100,000	0,000	0,000
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	53,045	3,899	7,350
Adição de Impermeabilizante	63,844	1,502	2,352
Adição de Sílica Ativa	51,904	2,960	5,703

DP: Desvio padrão (%); CV: Coeficiente de variação (%).

(fonte: própria da autora)

Figura 39 – Penetração de água sob pressão dos cinco tipos de concreto ensaiados



(fonte: própria da autora)

Ao se analisar os dados da Tabela 19, percebe-se que o concreto no qual recebeu o tratamento superficial do impermeabilizante por cristalização como pintura permitiu a entrada de água com maior facilidade que os demais visto que todo o corpo de prova ficou molhado. Isso não era o esperado, visto que a função do impermeabilizante por cristalização é impedir a penetração de água (BERTOLINI, 2010, p.189). No entanto, o concreto que recebeu o tratamento superficial do impermeabilizante como pintura e após passou pelo processo de lixamento manual, apresentou maior dificuldade quanto à penetração de água. Logo, o lixamento foi benéfico, pois apresentou melhor desempenho que o sem o processo de lixamento, fato este não esperado.

Quando analisada a utilização do impermeabilizante por cristalização como adição, o mesmo também restringiu a entrada de água por penetração sob pressão, assim como a adição de sílica ativa, no entanto, essa se mostrou mais eficiente. Visto que, ao analisar-se somente a utilização do impermeabilizante por cristalização entre suas variações de utilizações, observa-se que a aplicação por meio de pintura é mais eficiente que a adição, desde que a pintura receba o processo de lixamento.

A fim de analisar a significância das variáveis controláveis, os tratamentos e as adições utilizadas, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 20, na qual observa-se que a variação dos tratamentos influenciaram a penetração de água sob pressão significativamente.

Tabela 20 – Análise de variância (ANOVA): penetração de água sob pressão

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	0,496	4	0,124	59,478	0,000000	Sim
Erro	0,0229	11	0,002	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p:nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Realizou-se a análise através do teste F de Fisher, para ver a significância entre os resultados obtidos para os diferentes tratamentos dos concretos, sendo estes comparados aos do concreto referência, como pode ser visto na Tabela 21.

Tabela 21 – Teste F de Fischer para penetração de água sob pressão

	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	S	NS	NS	NS

NS: não significativo; S: significativo.

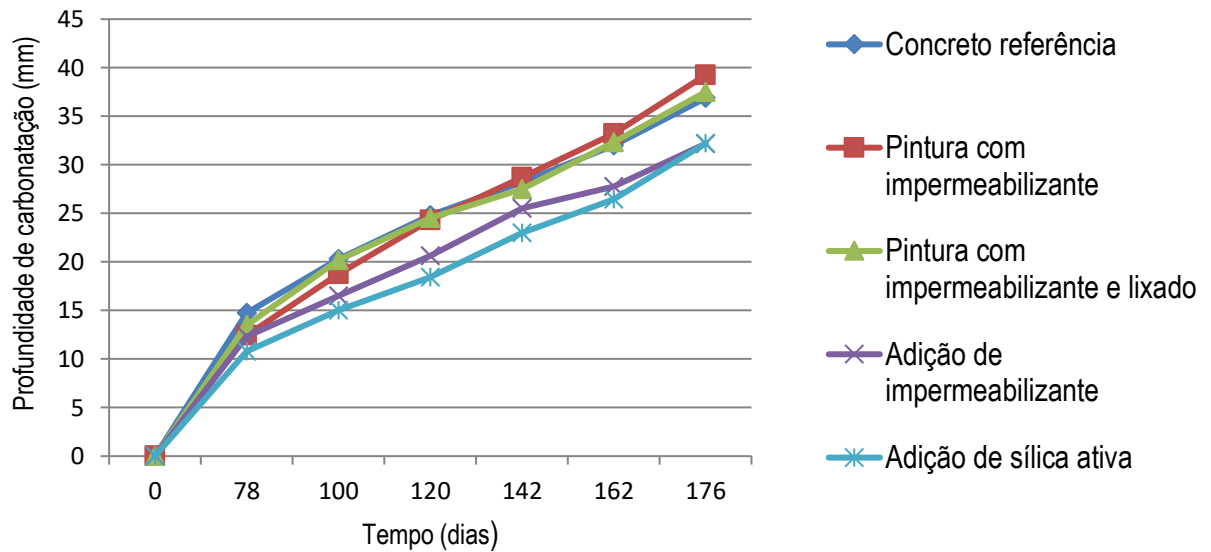
(fonte: própria da autora)

Pelo Teste de Fisher verificou-se que todos os tratamentos resultaram em comportamento estatisticamente iguais, com exceção do concreto com impermeabilizante por cristalização com o tratamento superficial, pois foi o único que teve sua área completamente molhada.

## 6.4 ENSAIO DE CARBONATAÇÃO

Neste trabalho, deseja-se medir a profundidade de carbonatação alcançada ao longo do ensaio, dessa forma, conhecer qual dos cinco tipos de concretos ensaiados apresenta o melhor desempenho referente à baixa permeabilidade ao gás carbônico. A Figura 40 mostra a profundidade de carbonatação em milímetros ao longo do tempo, nas idades de 78, 100, 120, 142, 162 e 176 dias.

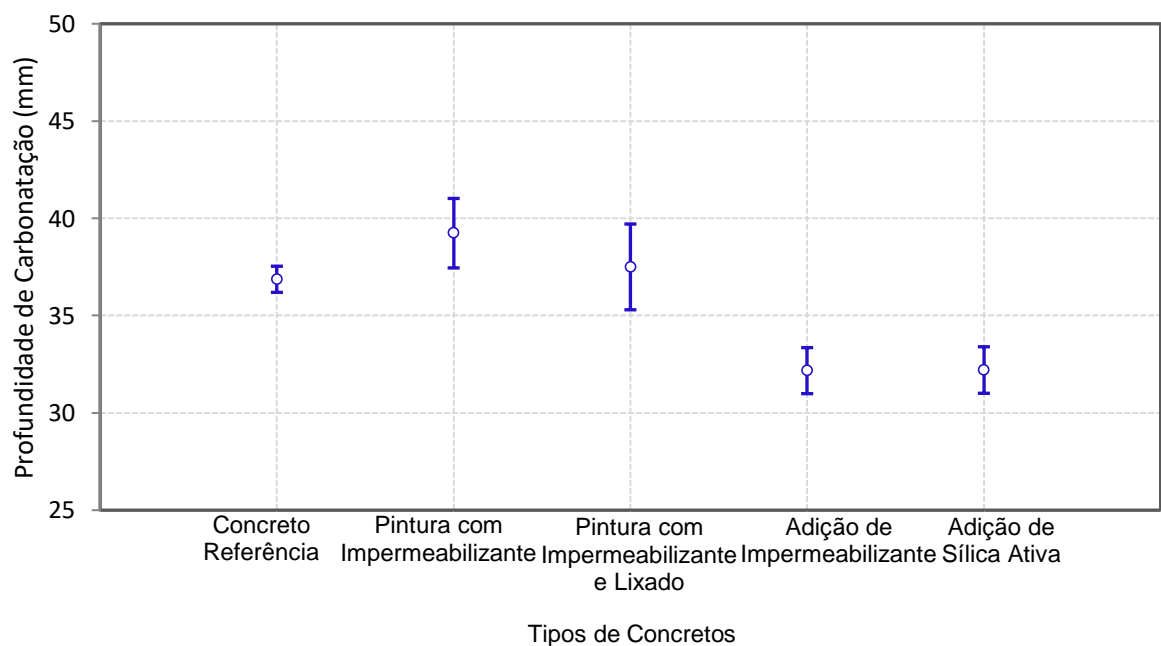
Figura 40 – Profundidade de carbonatação dos cinco tipos de concreto ensaiados ao longo do tempo



(fonte: própria da autora)

Observa-se que os concretos que receberam pintura com impermeabilizante apresentaram maior profundidade de carbonatação, e os concretos tanto com a adição de impermeabilizante quanto com sílica ativa foram os que apresentaram menor profundidade de carbonatação. Para melhor visualização a Figura 41 mostra a média da profundidade de carbonatação na idade de 176 dias, assim como, os devidos desvios padrões.

Figura 41 – Profundidade de carbonatação na idade de 176 dias



(fonte: própria da autora)



Para a análise da significância das variáveis controláveis, os tratamentos e as adições, realizou-se Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Na Tabela 22 apresenta-se a análise da profundidade de carbonatação para a idade de 176 dias, última idade na qual foi executada a leitura, por meio desta nota-se que estatisticamente foi significativa a variação dos tipos de tratamentos e adições.

Tabela 22 – Análise de variância (ANOVA): profundidade de carbonatação aos 176 dias

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	83,52	4	20,88	9,215	0,015786	Sim
Erro	11,33	5	2,27	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p:nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Ao elaborar-se o teste F de Fisher (Tabela 23), é possível observar que não há diferença significativa nos resultados obtidos quando aplicado o tratamento de pintura com o impermeabilizante com ou sem lixamento se comparados ao concreto referência. Mas, ao se analisar os concretos com as duas adições, essas diferenças foram consideradas significativas quando comparadas ao concreto referência. No entanto, se compararmos os resultados das duas adições isoladamente, não há diferença significativa entre elas.

Tabela 23 – Teste F de Fischer para carbonatação

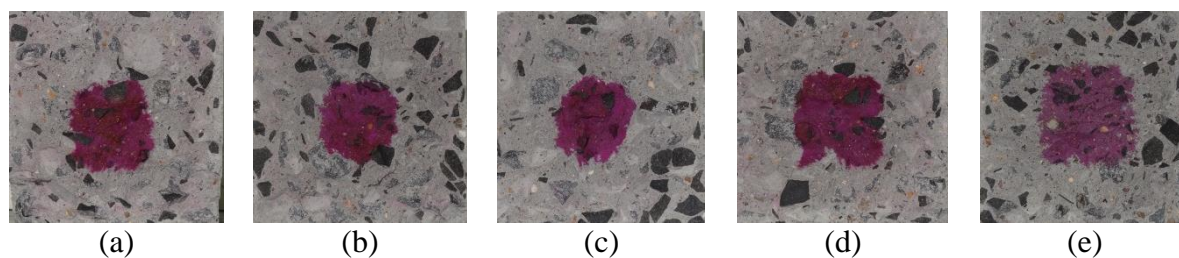
	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	NS	NS	S	S

NS: não significativo; S: significativo.

(fonte: própria da autora)

Entre as adições utilizadas observou-se, durante a aspersão de fenolftaleína, que o concreto com sílica ativa reduziu o pH, visto que a cor carmim devida à aspersão do produto químico para pH superior 10,0 tinha menor intensidade, apresentando-se rosa, ou seja, com pH entre 8,3 e 10,0 (Figura 42). Esse fato é explicado na literatura (MEHTA; MONTEIRO, 2014; GJØRV, 2015; NEVILLE, 2016) e ocorre devido ao consumo do hidróxido de cálcio na reação pozolânica.

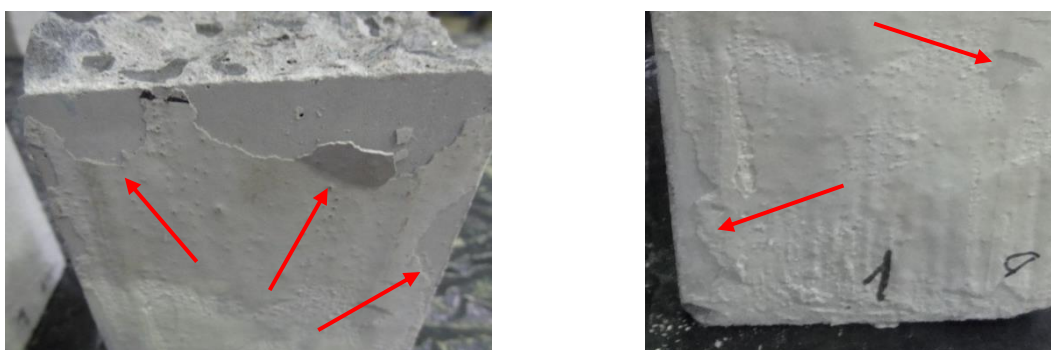
Figura 42 – Aspectos dos corpos de prova após o ensaio de carbonatação (a) concreto referência; (b) concreto com pintura de impermeabilizante; (c) concreto com pintura de impermeabilizante e lixado; (d) concreto com adição de impermeabilizante; (e) concreto com adição de sílica ativa



(fonte: própria da autora)

Os concretos com tratamento superficial do produto impermeabilizante não tiveram bons resultados, sendo semelhantes ao concreto referência, ou seja, o uso do impermeabilizante por cristalização não contribuiu para a redução da permeabilidade. Um fator observado ao longo do ensaio, que pode ter influenciado no mau desempenho do produto impermeabilizante por cristalização aplicado como tratamento superficial, o qual não sofreu o processo de lixamento, foram as alterações de aspecto, como deslocamento e ressecamento (Figura 43). Pode-se justificar este fato devido aos corpos de prova serem confeccionados com concretos densos, o suficiente para terem umidade confinada dentro dos poros. Por possuírem uma camada de tratamento superficial aplicado como pintura, a água confinada internamente evaporou lentamente durante a realização do ensaio, pela menor umidade relativa no interior na câmara de carbonatação. E pode ter ocasionado bolhas, semelhante ao que ocorre em pinturas convencionais quando submetidas à pressão negativa por problemas de umidade do substrato. No entanto, por se tratar de um sistema rígido de proteção houve o deslocamento do material aplicado, diferente de tratamentos superficiais flexíveis.

Figura 43 – Aspectos dos corpos de prova com tratamento superficial sem lixamento durante o ensaio de carbonatação: detalhe do ressecamento e deslocamento do produto impermeabilizante por cristalização



(fonte: própria da autora)

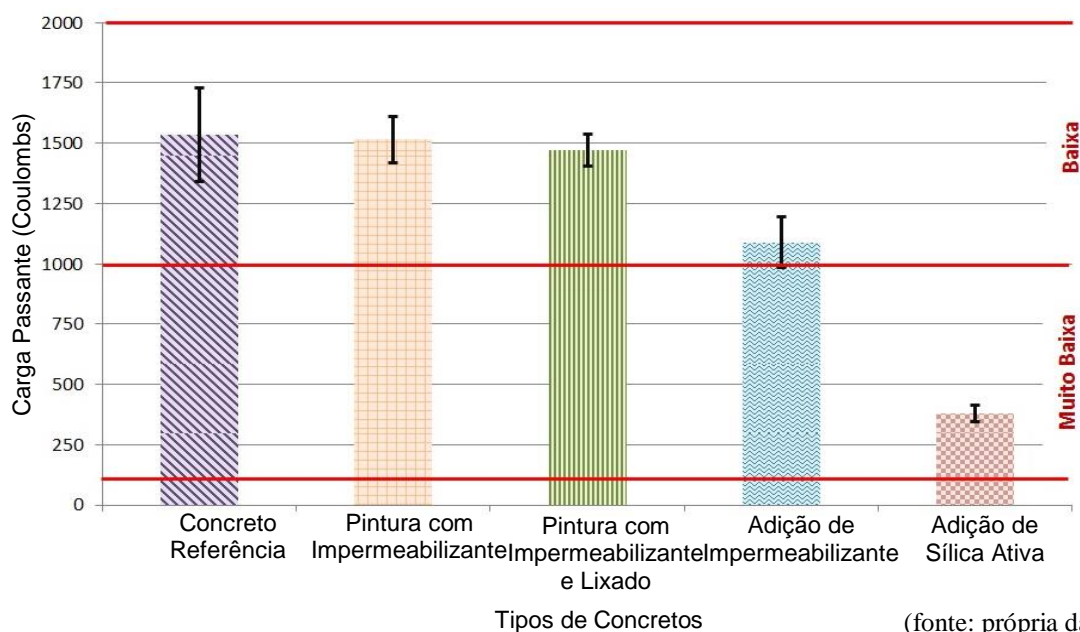
O concreto com tratamento superficial do produto impermeabilizante por cristalização que sofreu o processo de lixamento não apresentou este inconveniente de alteração no aspecto do produto. Mas, também não teve bom desempenho já que se assemelhou ao concreto referência.

## 6.5 ENSAIO DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Outra maneira de medir a permeabilidade dos concretos ensaiados foi através do ensaio de penetração de cloretos. Como já mencionado no capítulo 5, o íon cloreto é um dos íons com menores dimensões e, portanto, tem grande importância para auxiliar na verificação da qualidade dos concretos quanto à capacidade de impedir a entrada de agentes agressivos. Os resultados foram obtidos a partir dos dados de corrente registrados ao longo do ensaio, calculados conforme a Fórmula 1, segundo ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012).

Na Figura 44 ilustra-se a carga passante dos cinco tipos de concretos ensaiados. Nota-se que o concreto referência, assim como os concretos com tratamento superficial e com adição de impermeabilizante por cristalização estão dentro da faixa de penetração de íons cloretos que varia de 1000 a 2000 Coulombs, considerada de penetração baixa, segundo a Tabela 9. Já o concreto com adição de sílica ativa ficou na faixa de 100 a 1000 Coulombs, considerada muito baixa a taxa de penetração de cloretos, segundo Tabela 9.

Figura 44 – Carga passante no ensaio de penetração de íons cloreto nos cinco tipos de concreto ensaiados



A sílica ativa teve redução de 75% da carga passante em relação ao concreto referência, apresentando melhor desempenho entre os concretos ensaiados. Neville (2016, p.702) descreve este benefício gerado pela utilização de sílica ativa na mistura do concreto devido ao acréscimo de resistência frente ao ingresso de íons cloreto, consequência da permeabilidade reduzida. Os concretos com aplicação de impermeabilizante por cristalização como pintura apresentaram pouca diferença em relação ao concreto referência, o simplesmente pintado teve redução de 1% na permeabilidade aos íons cloretos, e o pintado e lixado teve redução de 4%. Já o concreto com adição de impermeabilizante por cristalização na mistura teve redução de 29% na permeabilidade em relação ao concreto referência, e o desvio padrão mostra a possibilidade de estar dentro da faixa de penetração de íons cloretos considerada muito baixa.

Para a análise da significância das variáveis controláveis, os tratamentos e as adições, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Na Tabela 24 apresenta-se a análise do ensaio de penetração de cloretos.

Tabela 24 – Análise de variância (ANOVA): carga passante no ensaio de penetração de íons cloreto

<b>Efeito</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância</b>
Tipos de Concretos	3886165	4	971541	76,932	0,000000	Sim
Erro	189429	15	12629			-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p:nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

A Tabela 25 mostra que os tratamentos e as adições utilizados foram considerados diferentes estatisticamente para a penetração de cloretos, deste modo, a variação nos tipos de concretos ensaiados faz diferença nos resultados correlacionados com a carga passante adquirida no ensaio de penetração de íons cloreto. Em seguida, realizou-se o Teste F de Fischer para ver a significância entre os tipos de concretos estudados, sendo estes comparados ao concreto referência.

Tabela 25 – Teste F de Fischer para penetração de íons cloreto

	<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	<b>Adição de Impermeabilizante</b>	<b>Adição de Sílica Ativa</b>
Concreto Referência	NS	NS	S	S

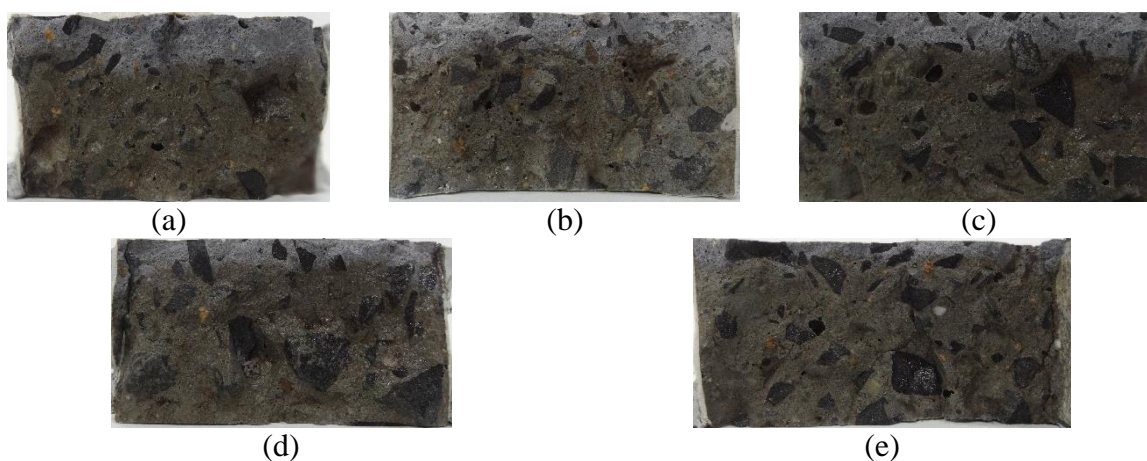
NS: não significativo; S: significativo.

(fonte: própria da autora)

A partir da realização do teste F de Fisher é possível verificar que apenas as amostras que utilizaram o impermeabilizante por cristalização como pintura com ou sem o processo de lixamento foram consideradas estatisticamente iguais no ensaio de penetração de cloretos. Já, os concretos com adições, tanto de impermeabilizante quanto da sílica ativa, diferem significativamente se comparados ao concreto referência.

Como forma de complementar o ensaio acelerado da ASTM C 1202 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2012), foram medidas as profundidades de penetração de cloretos com aspersão de nitrato de prata (Figura 45).

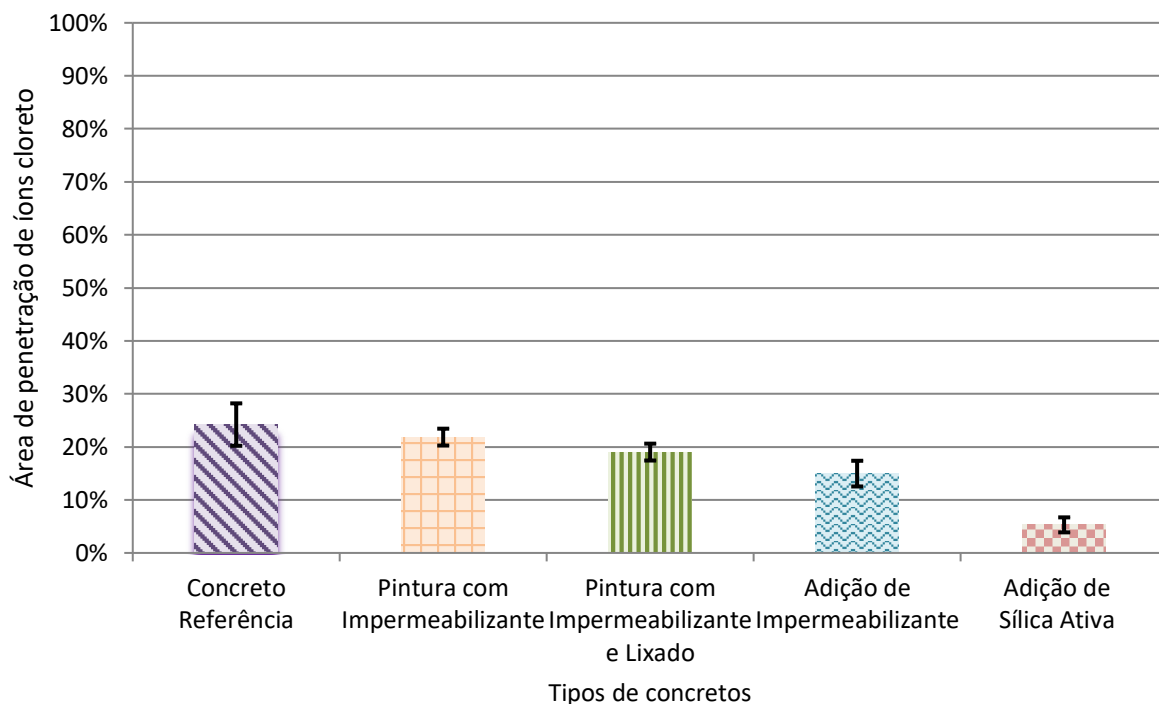
Figura 45 – Aspectos dos corpos de prova após a aspersão de nitrato de prata  
(a) concreto referência; (b) concreto com pintura de impermeabilizante; (c) concreto com pintura de impermeabilizante e lixado; (d) concreto com adição de impermeabilizante;  
(e) concreto com adição de sílica ativa



(fonte: própria da autora)

A Figura 46 ilustra os resultados obtidos por meio deste método.

Figura 46 – Área de penetração de íons cloreto por aspersão de nitrato de prata nos cinco tipos de concreto ensaiados



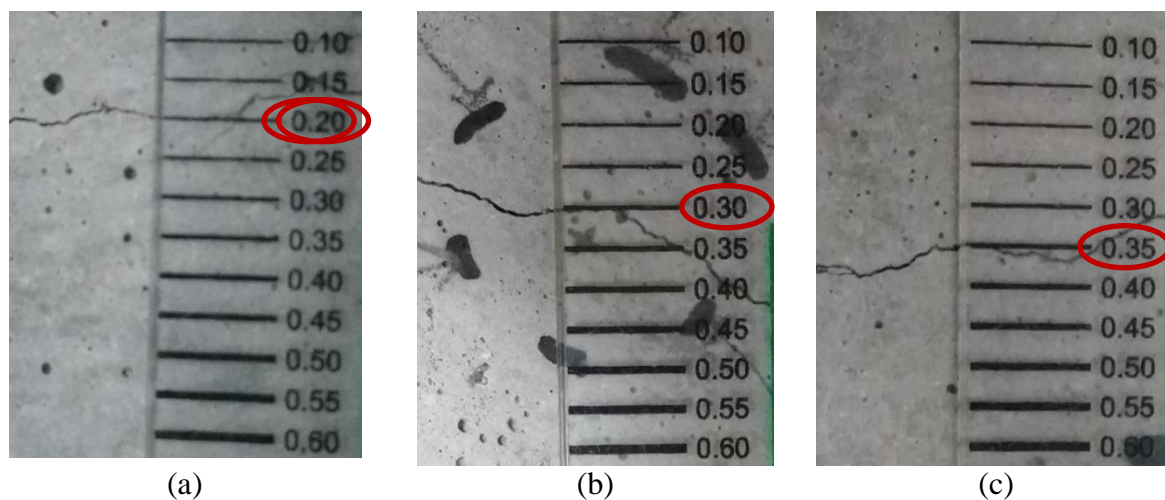
(fonte: própria da autora)

Ao se comparar a Figura 44 com a Figura 46, percebe-se o mesmo desempenho para os cinco tipos de concretos ensaiados, como era esperado, visto que a profundidade de penetração de íons cloreto está diretamente relacionada com carga total passante medida pelo ensaio.

## 6.6 FORMAS DE ANÁLISE DO AUTORREPARO DE FISSURAS

A análise do autorreparo das fissuras foi elaborada para testar o produto quanto a essa ação que era indicada como vantagem da utilização do produto impermeabilizante por cristalização. As fissuras foram avaliadas quanto a sua abertura com auxílio de um fissurômetro, assim, somente eram utilizados os corpos de prova com fissuras de abertura inferior a 0,4 mm, conforme a recomendação do fornecedor dos impermeabilizantes por cristalização. Na Figura 47 está ilustrado o acompanhamento feito das fissuras para verificação deste limite de abertura.

Figura 47 – Abertura de fissuras (a) 0,20 mm; (b) 0,30 mm; (c) 0,35 mm



(fonte: própria da autora)

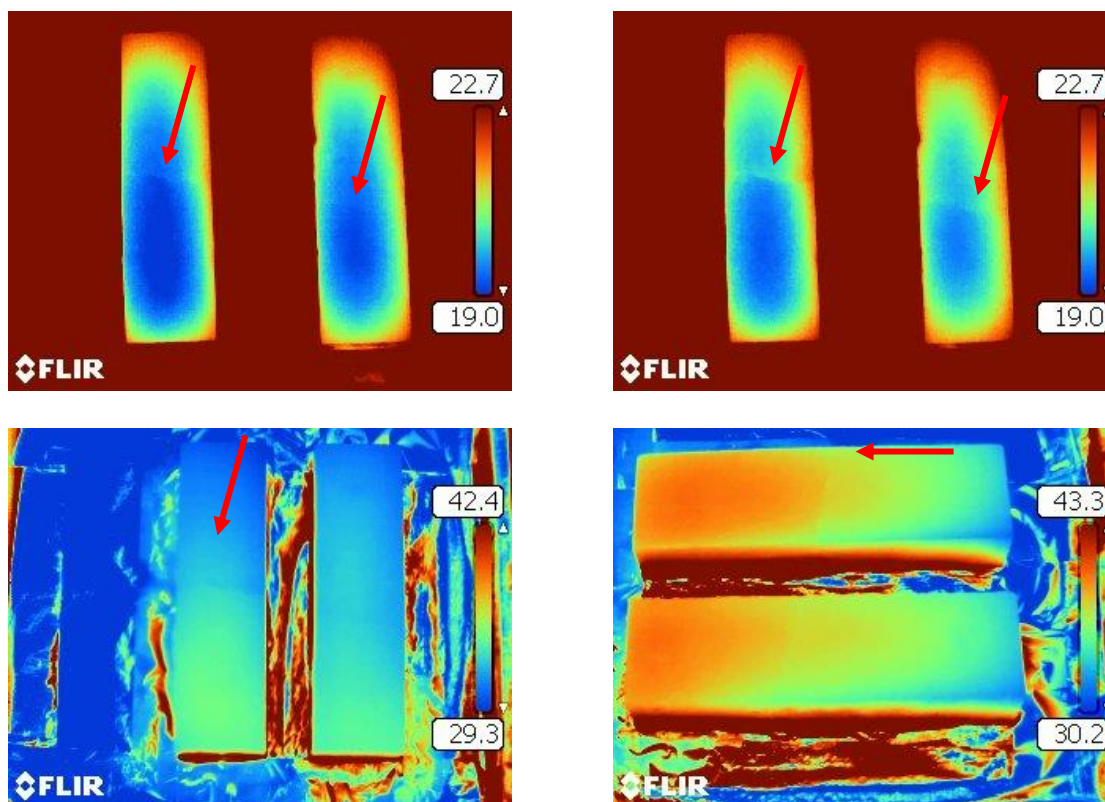
Foram empregados quatro métodos diferentes com o intuito de observar, ao longo do tempo, o fechamento das fissuras. Entre os métodos utilizados se encontra alguns tradicionais para o acompanhamento e detecção dessas falhas como o ensaio por onda ultrassônica, a observação por termografia infravermelha, e por fim, um ensaio menos utilizado devido ao difícil manuseio fora de laboratório, que é a análise por microscopia ótica. Os resultados obtidos com o uso desses métodos, e as dificuldades encontradas em algum deles para alcançar os objetivos propostos serão descritos nos itens seguintes.

### 6.6.1 Câmera termográfica

A câmera termográfica é um equipamento que vem sendo utilizado com maior frequência como auxílio para verificação de falhas e manifestações patológicas nas edificações. Diante disso, o intuito de utilizar esse equipamento para acompanhar o fechamento das fissuras foi um dos métodos empregados nesse trabalho.

Inicialmente, como descrito no capítulo 5, experimentou-se acompanhar o aquecimento gradual dos corpos de prova fissurados para tentar verificar, por diferença de temperatura, o local fissurado devido à diferença de condutividade térmica de locais com falhas (MEHTA; MONTEIRO, 2014, p.483). No entanto, por aquecimento gradual era possível ver que havia uma falha, como pode ser visto na Figura 48, mas não foi possível medir nem quantificar a fissura existente.

Figura 48 – Utilização de termografia com fonte de calor direcionada para verificação de fissuras

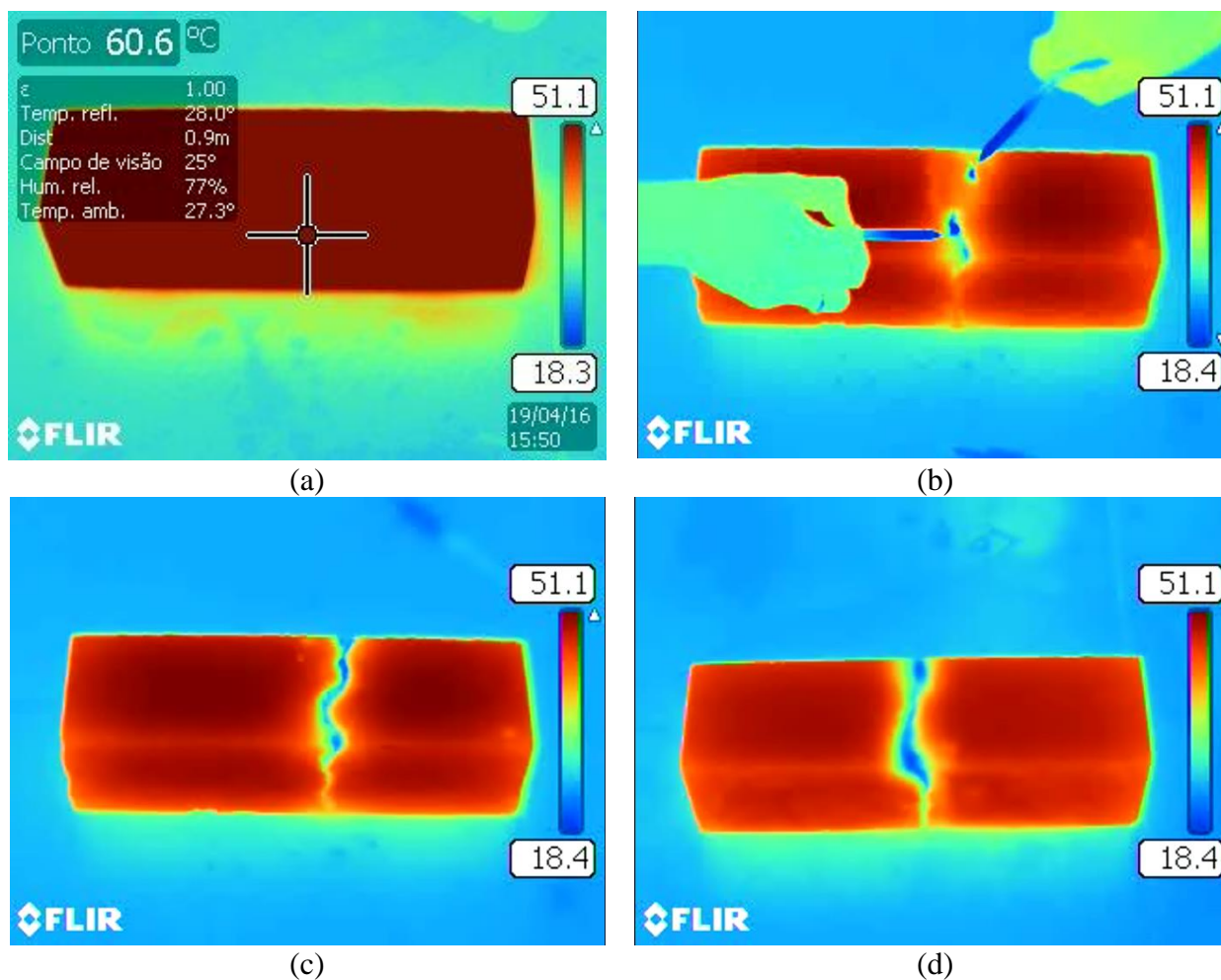


(fonte: própria da autora)

Como não foi possível verificar claramente as fissuras nos corpos de prova ensaiados, decidiu-se por aquecer as amostras na estufa a 60°C (Figura 49a) e inserir água a 10°C nas fissuras para tentar quantificar essas falhas. O método de inserção de água utilizado foi com auxílio de seringas com agulhas extrafinas para que a ponteira pudesse ser colocada ao fundo da fissura (Figura 49b), e que por diferença de temperatura a câmera termográfica registrasse essas falhas claramente para que fosse possível quantificá-las (Figura 49c e 49d).



Figura 49 – Verificação de fissuras por termografia infravermelha (a) dados inseridos na câmera termográfica e temperatura do corpo de prova; (b) inserção de água a 10°C nas fissuras com seringas; (c) e (d) visualização das fissuras após inserção de água a 10°C



(fonte: própria da autora)

No entanto, esse método se mostrou bem rudimentar, pois, a inserção de água nas fissuras era dificultada pelas irregularidades das paredes internas das mesmas, e muitas vezes a água extravasava da falha. Deste modo, apenas foi possível verificar a fissura por termografia, e não quantificá-la, visto que, o que era observado por diferença de temperatura era possível ser visto simplesmente a olho nu, ou seja, não havia diferença ao utilizar ou não o equipamento para esta finalidade. Além disso, os concretos que receberam o tratamento superficial com o produto impermeabilizante por cristalização tiveram suas fissuras estancadas com o produto, assim, não era possível fazer a inserção de água para a possível visualização com a câmera termográfica.

Portanto, notou-se a partir deste método que a câmera termográfica é um bom equipamento para a detecção de falhas, no entanto, ainda não é possível utilizá-la como método de análise

quantitativa, apenas, qualitativa. Diante disso, esse método não se mostrou eficiente para o acompanhamento do autorreparo das fissuras e, assim, não se obteve resultados.

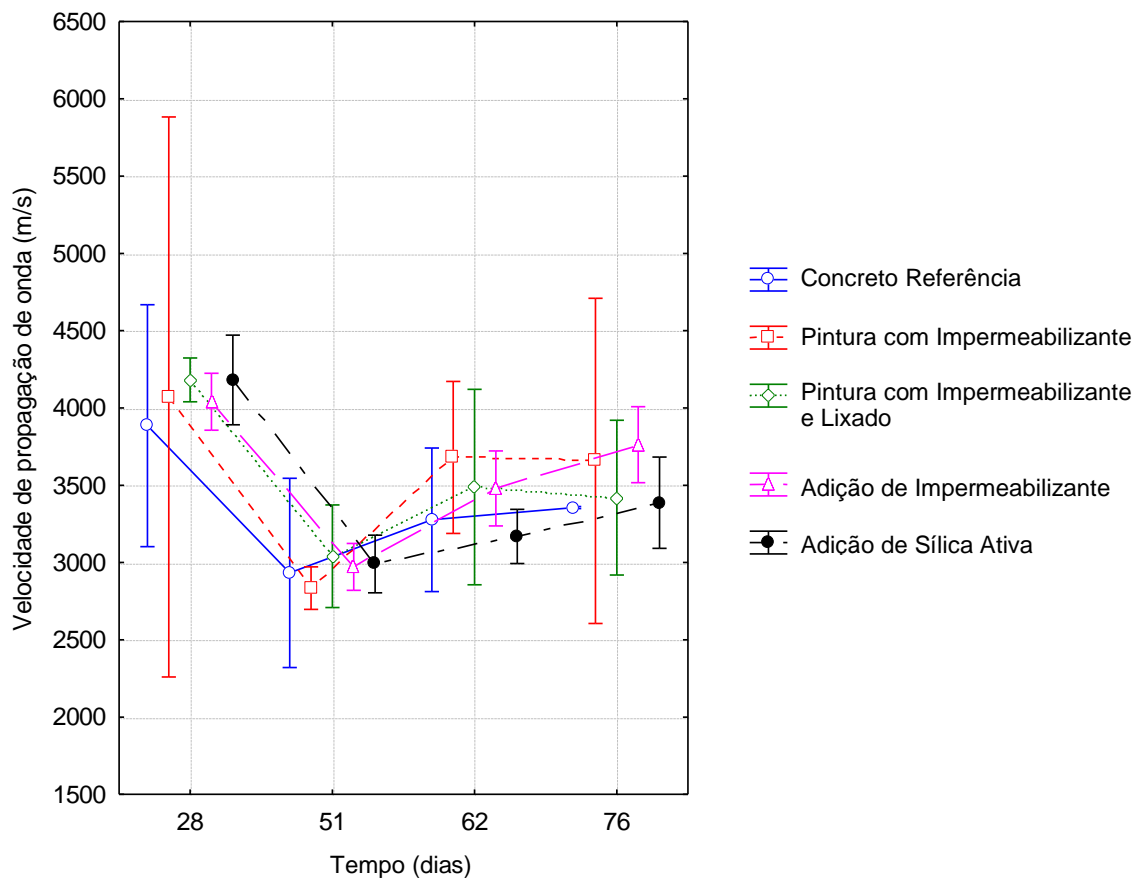
### **6.6.2 Onda ultrassônica**

A utilização do ensaio de velocidade de propagação de ondas ultrassônicas é eficiente para a verificação da existência das fissuras, entretanto o ensaio não se mostra eficiente quando se requer medir a profundidade e o autorreparo das fissuras. Acredita-se que a utilização da armadura na parte inferior dos corpos de prova, local este onde as fissuras foram abertas, dificultou as leituras das ondas ultrassônicas, visto que esta propicia um caminho preferencial para a passagem da onda. As fissuras reduzem a velocidade de onda no interior do concreto, entretanto, a presença de armadura deve ser evitada quando se mede velocidade de onda no concreto (MEHTA, MONTEIRO, 2014, p.443).

Na Figura 50, observa-se a evolução dos concretos de acordo com o tratamento realizado. Nota-se que na idade de 51 dias há uma redução da velocidade de propagação quando comparada a idade de 28 dias, resultado esperado uma vez os concretos aos 28 dias não apresentavam fissura e aos 51 dias estes encontravam-se em processo de recuperação após a abertura da fissura.

Observa-se ainda que com o passar o tempo todos os concretos apresentaram recuperação do seu estado. Avaliando a possibilidade de autorreparo do concreto, o referênci, aos 51 dias, apresentou uma velocidade de propagação da onda de aproximadamente 75% quando comparado ao mesmo concreto antes do processo de fissuração, este ainda apresentou velocidades aproximadas a 84% e 86% nas idades de 62 e 76 dias. Desta forma acredita-se que devido às reações de hidratação do cimento, este concreto tenha a capacidade de se autorreparar sem nenhum tipo de tratamento.

Figura 50 - Influência do tratamento e da idade em relação a velocidade de propagação da onda



(fonte: própria da autora)

Para o concreto que passou pelo tratamento de pintura com impermeabilizante, as velocidades foram de aproximadamente 69%, 90% e 90%, para as idades de 51, 62 e 76 dias respectivamente, quando comparado ao mesmo concreto antes da abertura da fissura. Os concretos que receberam como tratamento a pintura com impermeabilizante e lixamento, as velocidades equivaleram a 72%, 83% e 82% para as idades de 51, 62 e 76 dias respectivamente, quando comparado ao mesmo concreto antes da abertura da fissura. Para os concretos com adição de impermeabilizante em sua massa, as velocidades foram de 71%, 76% e 81% para as idades de 51, 62 e 76 dias, respectivamente, quando comparado ao mesmo concreto antes do processo de fissuração. Já os concretos com adição de sílica ativa a velocidade foi de 74%, 86% e 93% para as idades de 51, 62 e 76 dias, respectivamente, quando comparado ao mesmo concreto antes da abertura da fissura. Desta maneira todos os concretos encontram-se em processo de autorreparação, entretanto os que receberam a pintura com o impermeabilizante e o com adição de sílica ativa são os que apresentam os melhores resultados para as idades avaliadas.

Para a análise da significância das variáveis controláveis, os tratamentos, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) com fatorial cruzada a partir do software Statistica 7. Os resultados são apresentados na Tabela 26, para o ensaio de velocidade de ondas ultrassônicas.

Tabela 26 - Análise de variância (ANOVA) – Velocidade de ondas ultrassônicas

<b>Efeitos</b>	<b>SQ</b>	<b>GL</b>	<b>SQF</b>	<b>Teste F</b>	<b>p</b>	<b>Significância.</b>
Tratamento	403857	4	100964	3,60	0,012690	Sim
Idade	9287261	3	3095754	110,34	0,000000	Sim
Tratamento*Idade	739773	12	61648	2,20	0,028935	Sim
Erro	1234440	44	28055	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade (n-1); SQF: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se  $p < 5\%$  = efeito significativo.

(fonte: própria da autora)

Analisando os dados apresentados percebe-se que o concreto referência teve recuperação da fissura de 11%, esta devida à hidratação do cimento, já que este concreto não possui nenhum tipo de tratamento. Entre os concretos que receberam o tratamento superficial com o impermeabilizante por cristalização, o pintado sem lixar teve recuperação de 27%, já o com o processo de lixamento teve apenas 10% de recuperação. O bom desempenho do concreto com tratamento superficial sem lixamento se deve ao fato de o produto impermeabilizante ter se inserido ao longo da profundidade das fissuras, aumentando a capacidade de autorreparo. Já o que teve o processo de lixamento, pode-se se justificar seu desempenho semelhante ao concreto referência, diante do produto não ter inserido na profundidade da fissura. Essa diferença de penetração no produto se deve ao modo como foi aplicado, ou seja, com aplicação manual semelhante à pintura, e também devido ao fato da variação nas espessuras das fissuras.

O concreto com adição de impermeabilizante por cristalização teve recuperação de 10% semelhante ao concreto referência e ao concreto com tratamento superficial com processo de lixamento, podendo-se concluir que adição do produto na mistura teve pouca influência no auxílio do autorreparo das fissuras. Já o concreto com adição de sílica ativa teve 19% de recuperação, demonstrando bom desempenho quanto à capacidade de recuperação por processos de hidratação tardia.

O melhor resultado apresentado tanto pelo impermeabilizante aplicado como tratamento superficial não lixado e o concreto com adição de sílica ativa é indicado por Craus (2010, p.38) em seu trabalho como o esperado. No caso do produto impermeabilizante por cristalização, que

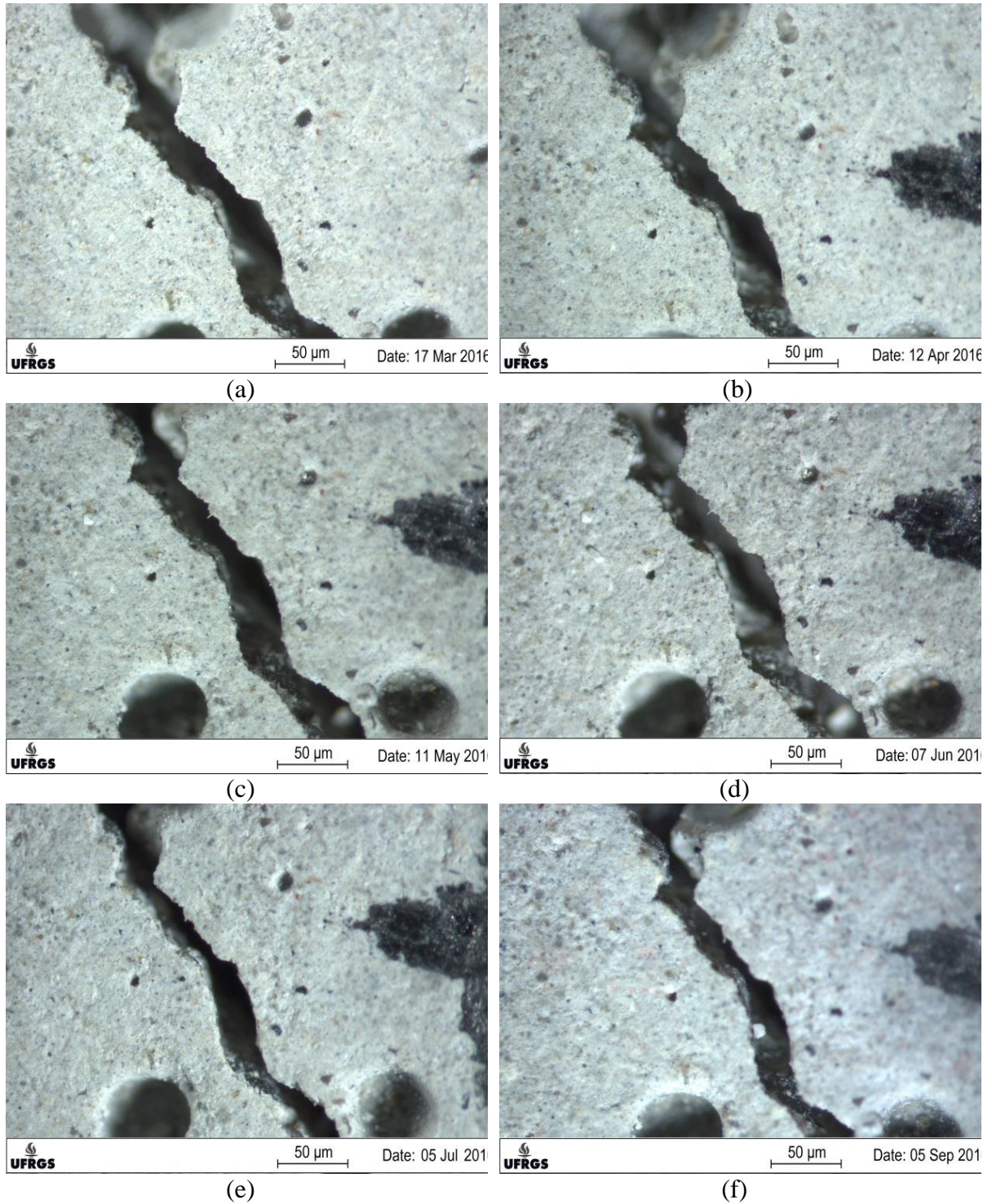
se trata de um sistema de vedação tapa poros, ao ser aplicado o produto se torna parte da massa de concreto, o que facilita a formação de novos cristais. Assim, Craus (2010, p.38) relata que “por meio de difusão, os produtos químicos reativos do produto, através da água presente nos poros, penetram no concreto. [...] O resultado é uma formação cristalina não solúvel que sela os poros e capilares do concreto”. Além disso, por se tratar de um processo catalítico, na presença de água o processo pode se reativar (CRAUSS, 2010, p.38), dessa forma, se intensifica o autorreparo das fissuras.

### **6.6.3 Microscopia ótica**

Para a análise das fissuras com o uso de microscópio ótico, tentou-se medir em pontos pré-determinados os corpos de prova no local fissurado, a fim de acompanhar, ao longo do tempo, o possível fechamento das fissuras. O microscópio ótico é uma ferramenta muito boa para a visualização com maiores detalhes de áreas a serem analisadas, pois permite a percepção de detalhes não visíveis a olho nu. Para os objetivos desejados nesse trabalho teve-se grande dificuldade em conseguir analisar os pontos pré-determinados de forma exata, visto que a cada vez que se realizava a análise não era possível visualizar com precisão o mesmo ponto, pois os ajustes das amostras são feitos manualmente, o que facilita o surgimento de erros.

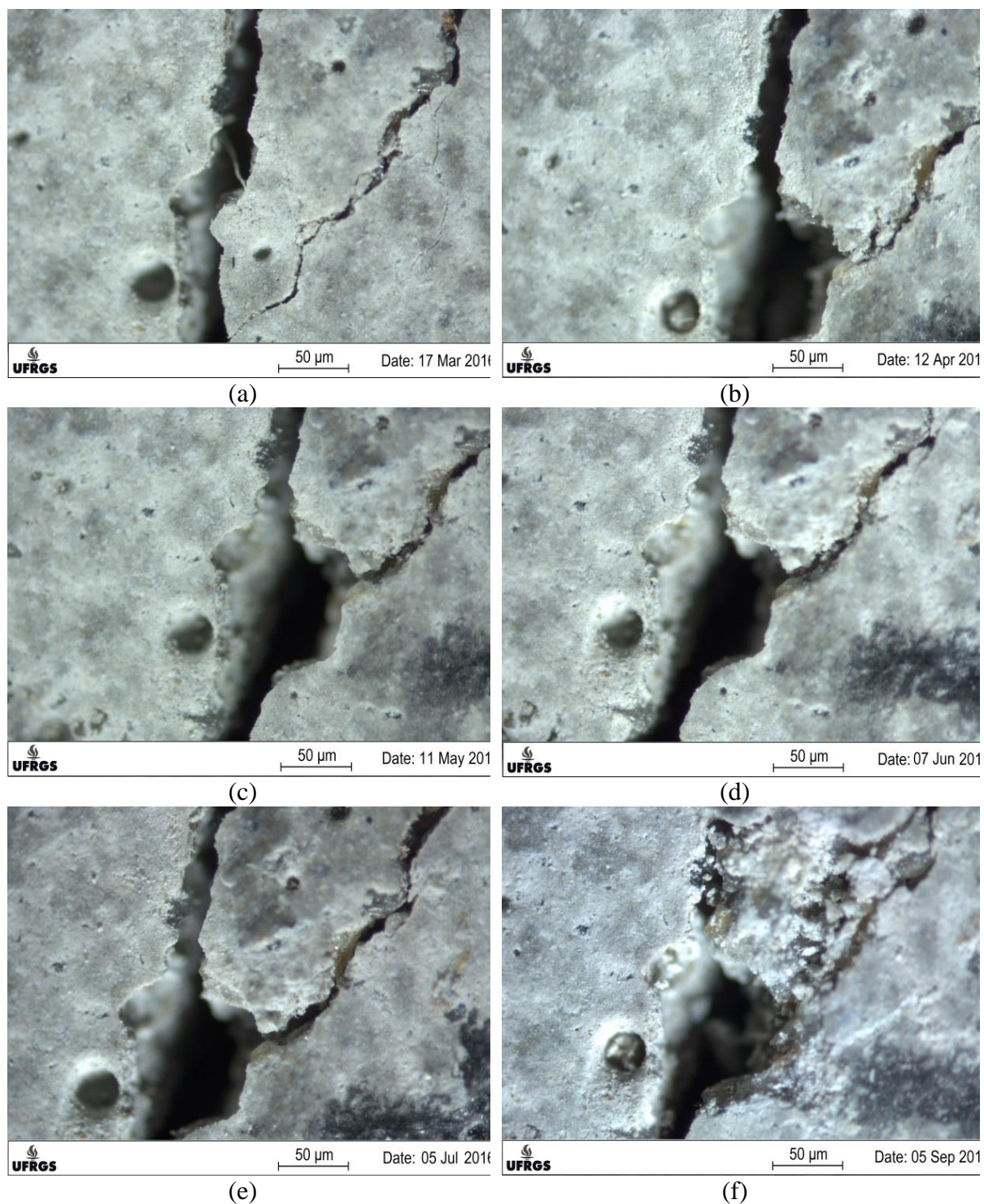
Diante disso, não foi possível obter resultados quantitativos para este método, pois em cada medida realizada o ponto de medição modificava sua localização. Então, optou-se por analisar de forma qualitativa, e não quantitativa. Nas Figuras 51, 52 e 53 pode ser vista a aparência das fissuras em seis diferentes idades no concreto de referência e nos concretos com adições. Nas primeiras cinco idades analisadas os corpos de prova foram mantidos em câmara climatizada, mas não houve visível fechamento das fissuras. Então, optou-se por manter os corpos de prova a partir dos 140 dias em câmara úmida. O intuito de colocar em câmara úmida foi para verificar se a umidade poderia contribuir com o autorreparo das fissuras.

Figura 51 – Análise microscópica no concreto referência: (a) 29 dias; (b) 55 dias; (c) 84 dias; (d) 111 dias; (e) 139 dias; (f) 201 dias



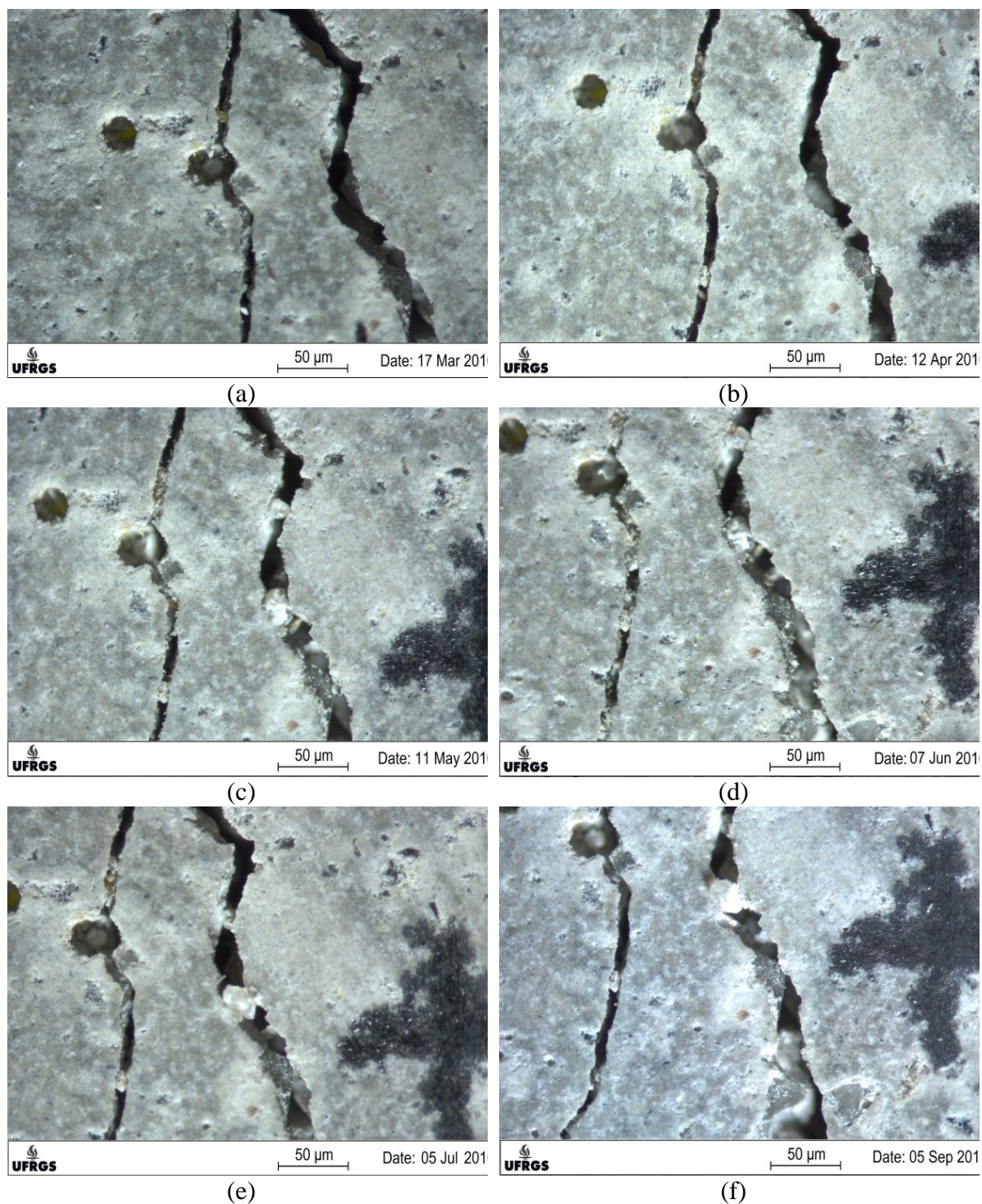
(fonte: própria da autora)

Figura 52 – Análise microscópica no concreto com adição do impermeabilizante: (a) 29 dias; (b) 55 dias; (c) 84 dias; (d) 111 dias; (e) 139 dias; (f) 201 dias



(fonte: própria da autora)

Figura 53 – Análise microscópica no concreto com adição de sílica ativa: (a) 29 dias; (b) 55 dias; (c) 84 dias; (d) 111 dias; (e) 139 dias; (f) 201 dias



(fonte: própria da autora)

A partir da análise qualitativa dos três tipos de concretos avaliados, é possível observar que em todos os concretos houve formação de um tipo de produto no interior das fissuras com cor esbranquiçada, tanto pela hidratação normal do cimento quanto pelas adições introduzidas na



mistura. O concreto com adição de sílica ativa apresenta uma quantidade de formação desse produto muito maior em relação aos demais concretos analisados. No entanto, no concreto com adição de impermeabilizante por cristalização também há formação deste resíduo, visivelmente perceptível, e aparentemente superior ao concreto referência.

Essa formação de produto esbranquiçada registrada pelo método de microscopia ótica é citada por Wu et al. (2012, p.572) como um dos possíveis mecanismos de autorreparo em materiais cimentícios, e pode estar relacionada com: a formação de carbonato de cálcio ou hidróxido de cálcio, hidratação tardia do cimento ou dos materiais aglomerantes, ou ainda a expansão da matriz cimentícia dentro da fissura com expansão do C-S-H existente.

Craus (2010, p.38), em seu trabalho, relata que os produtos impermeabilizantes por cristalização geram efeitos semelhantes à reação pozolânica, no qual a formação de novos produtos se deve às reações químicas entre a pasta de cimento e os agregados. Ainda segundo a autora, são formados então “[...] silicatos de cálcio e magnésio hidratado (agregados silicosos), ou carboaluminatos hidratados (calcário e cristais de fluoreto de cálcio)”.

Ao se observar as Figuras 50, 51 e 52, percebe-se que na última idade analisada, a qual ficou acondicionada em ambiente úmido, houve a formação de produtos dentro da fissura com maior intensidade. Alguns trabalhos científicos realizados com o intuito de analisar produtos como adição mantiveram os corpos de provas saturados ao longo dos ensaios, e dessa forma, os mesmos conseguiram visualizar o completo fechamento da fissura após 200 dias (AHN; KISHI, 2010, p.177).

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As conclusões apresentadas se limitam aos materiais e metodologias utilizados neste estudo, visto que alterações nessas condições podem provocar variações nos resultados.

O produto impermeabilizante por cristalização utilizado como adição na mistura do concreto e como tratamento superficial teve contribuição para a redução da permeabilidade do concreto em alguns ensaios realizados, em contrapartida, a sílica ativa superou as expectativas do produto testado.

No ensaio de resistência à compressão os concretos com adições tiveram os melhores resultados, sendo a sílica ativa 27% superior ao concreto referência e a adição de impermeabilizante por cristalização 13% superior ao concreto referência. O tratamento superficial não teve influência significativa no aumento da resistência à compressão.

Em relação ao ensaio de absorção total, o produto impermeabilizante por cristalização aplicado como pintura, com e sem processo de lixamento, manteve a absorção próximo ao concreto referência, não apresentando diferença significativa.

Já o produto utilizado como adição apresentou um aumento significativo na absorção, o que não era esperado, visto que esse obteve aumento também na resistência à compressão. Este fato pode estar associado à adição do impermeabilizante na mistura provocar mudança na microestrutura do concreto, suficientemente, para modificar a distribuição e o tamanho dos poros, podendo ter provocado um aumento da higroscopicidade do material.

Ao comparar-se o comportamento de concretos com adição de impermeabilizante por cristalização com concretos com e sem adição sílica ativa para a redução da permeabilidade do concreto notou-se que em todos os ensaios a sílica ativa teve melhor desempenho, exceto no ensaio de carbonatação. A adição de impermeabilizante por cristalização no ensaio de carbonatação teve profundidade de penetração do gás carbônico equivalente ao concreto com adição de sílica ativa, no entanto, não apresentou diminuição do pH da massa de concreto, que pode ser observada pela cor intensa na aspersão de fenolftaleína. Diferentemente da adição de sílica que apresentou cor clara na aspersão de fenolftaleína, assim com pH menor que 10,0. Quanto à profundidade de carbonatação, o impermeabilizante aplicado como tratamento superficial com ou sem lixamento, não se mostrou satisfatório, uma vez que apresentou resultados semelhantes ao concreto referência.

Em relação aos impermeabilizantes por cristalização utilizados como tratamentos superficiais com e sem o processo de lixamento, observou-se no ensaio de penetração de água sob pressão que quando submetido ao lixamento o produto obtinha melhor desempenho. Pois, o produto sem o processo de lixamento permitiu a penetração de água com mais intensidade resultando em total molhamento do corpo de prova.

O ensaio de velocidade de propagação de ondas foi eficiente quanto à avaliação da questão de autorreparação, uma vez que foi possível verificar o aumento da velocidade em praticamente todos os concretos estudados. Entretanto, os que receberam a pintura com o impermeabilizante e o com adição de sílica ativa são os que apresentaram os melhores resultados.

Constatou-se que a adição de sílica ativa foi a solução que apresentou melhor desempenho diante do ensaio de penetração de cloretos, reduzindo significativamente a permeabilidade a esse íon. O produto impermeabilizante por cristalização, quando analisado em relação ao ensaio de penetração de cloretos, mostra-se melhor que o concreto referência, quando utilizado como adição, contribuindo para a diminuição da permeabilidade. Já quando aplicado como tratamento superficial, não houve diferença significativa se comparado ao concreto de referência.

O produto impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial se mostrou eficiente para o fechamento das fissuras, visto que se trata de um sistema de proteção tapa poros e, portanto, estanca a superfície. No entanto, por se tratar de um sistema rígido de impermeabilização este se torna vulnerável às variações térmicas e estruturais.

A análise microscópica mostrou-se eficiente para analisar o possível autorreparo, visto que em todos os concretos verificou-se na profundidade visível dentro das fissuras a formação de alguns cristais, sendo estes mais perceptíveis nos concretos com adições. Além disso, notou-se que após os corpos de provas serem mantidos em ambiente úmido a formação de produtos no interior na fissura foi intensificada.

Para tanto, o produto impermeabilizante por cristalização na maioria dos casos teve melhor desempenho que o concreto referência, mas quando este é comparado com a sílica ativa para os materiais e as proporções utilizadas, verifica-se que o uso de sílica ativa como adição foi a melhor solução frente a diminuição da permeabilidade.

Embora tenham sido abordados diversos ensaios nesse trabalho para a análise do produto impermeabilizante por cristalização frente ao desempenho quanto à redução da permeabilidade,

este produto deve ser ainda analisado quanto a outros critérios, como distribuição dos poros capilares, higroscopicidade do produto utilizado e do concreto, e reatividade álcali-agregado, por exemplo.

Esse trabalho propôs um caminho interessante para prevenir as manutenções devidas à diminuição da durabilidade das estruturas. Os resultados têm relevância e são uma importante ferramenta para prolongar a vida útil das estruturas e reforçá-las diante dos agentes agressivos.

## REFERÊNCIAS

- 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.
- ANDRADE, J. J. O. Durabilidade de Estruturas de Concreto Armado: Análise das Manifestações Patológicas nas Estruturas no Estado de Pernambuco. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1997.
- ANDRADE, T. Tópicos sobre Durabilidade do Concreto. In: ISAIA, G. C (Ed) **Concreto**: Ensino, Pesquisa e Realizações. 1. ed. São Paulo: Ibracon, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 23**: cimento Portland e outros materiais em pó – determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.
- \_\_\_\_\_. **NBR 10787**: concreto endurecido - determinação da penetração de água sob pressão. Rio de Janeiro, 2011.
- \_\_\_\_\_. **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, 2014.
- \_\_\_\_\_. **NBR 8802**: concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2013.
- \_\_\_\_\_. **NBR NM 248**: agregados - determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.
- \_\_\_\_\_. **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 12142**: concreto - determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, 2010.
- \_\_\_\_\_. **NBR 5736**: cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1991.
- \_\_\_\_\_. **NBR 7211**: agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009.
- \_\_\_\_\_. **NBR 9575**: impermeabilização - seleção e projeto. Rio de Janeiro, 2010.

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

AYUB, T.; SHAFIQ, N.; KHAN, S. U. Durability of Concrete with Different Mineral Admixtures: A Review. *World Academy of Science, Engineering and Technology. Internacional Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering*. vol.7. n.8. p. 601-612. 2013.

BERRY, E. E.; MALHOTRA, V. M. **Fly Ash in Concrete**. CANMET SP85. Ottawa, Canada, 1986.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: Patologia, Reabilitação e Prevenção**. HELENE, P. Oficina de Textos, 2010.

BIRICIK, H.; SARIER, N. Comparative study of the characteristics of nano silica , silica fume and fly ash incorporated cement mortars. *Mat. Res.* vol.17 no.3 São Carlos May/June 2014 Epub May 09, 2014.

CRAUSS, C. **Penetração de cloretos em concretos com diferentes tipos de cimento submetidos a tratamento superficial**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2010.

CORRÊA, C. M. M. da S. Notas de aulas: As cores da fenolftaleína. Departamento de Química e Bioquímica da Faculdade de Ciências. Universidade do Porto. Disponível em: <<http://slideplayer.com.br/slide/1788820/>>. Acesso em: 2 set. 2016.

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.

FILHO, J. H.; MEDEIROS, M. H. F.; PEREIRA, E.; HELENE, P.; ISAIA, G. C. High-Volume Fly Ash Concrete with and without Hydrated Lime: Chloride Diffusion Coefficient from Accelerated Test. *Virginia, Journal of Materials in Civil Engineering*. ASCE – American Society of Civil Engineers, May. 2013.

GJØRV, O. E. **Durability and Service Life of Concrete Structures**. In Proceedings, The First FIB Congress, session 8, v.6. p. 1-16. Japan Prestressed Concrete Engineering Association, Tokyo, 2002.

GJØRV, O. E. **Durability of Concrete Containing Condensed Silica Fume**. In: MALHOTRA, V. M. (Ed). In Proceedings, CANMET/ACI Internacional Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. v. 2. p. 695-708. ACI SP-79, 1983.

GJØRV, O. E. Projeto de durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade. In: FIGUEIREDO, E. P.; HELENE, P. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2015.

HELENE, P. Manual para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto. PINI, 2ª ed. São Paulo, 1992.

HELENE, P. R. L. Corrosão em armaduras para concreto armado. 4. ed. São Paulo: PINI, 1999.

HELENE, P.; MEDEIROS, M. H. F.; GOBBI, A.; RÉUS, G. C. **Reinforced concrete in marine environment**: Effect of wetting and drying cycles, height and positioning in relation to the sea shore. *Construction and Building Materials*. v. 44, July, 2013.

HELENE.P.; ANDRADE.T. Concreto de Cimento Portland. In: ISAIA, G. C.(Ed). **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: Ibracon, 2010.

LI, H.; XIAO, H.; YUAN, J.; OU, J. Microstructure of cement mortar with nanoparticles. *Composites: Part B Engineering* 35. p.185–189. Elsevier, 2004.

ISAIA, G. C.; HELENE, P. R. L. Durabilidade de Concreto de Elevado Desempenho com Pozolanas. In: Seminário Qualidade e Durabilidade das Estruturas de Concreto, Porto Alegre, 1993. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS/CPGEC/NORIE, 1993.

JOHN, V.M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Civil. São Paulo, 2000.

KIRCHHEIM. A. P. **Concreto de cimento Portland branco estrutural: avaliação da carbonatação e absorção capilar**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2003.

KULAKOWSKI, M. P. Contribuição ao estudo da carbonatação em concretos e argamassas compostos com adição de sílica ativa. Tese (Doutorado em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

MAZLOOM, M.; RAMEZANIANPOUR, A.A.;BROOKS, J.J. Effect of silica fume on mechanical properties of high-strength concrete. *Cement and Concrete Composites*. 26(4). p.347-357. 2004.

MEDEIROS, M. H. F.; BORGES, P. C.; ALEIXO, D. M.; QUARCIONI, V. A.; MARCONDES, C. G. N.; HELENE, P. Reducing Water and Chloride Penetration Through Silicate Treatments for Concrete as a Mean to Control Corrosion Kinetics. *Internacional Journal of Electrochemical Science*, v.7. 2012.

MEDEIROS,M. H. F. de; ANDRADE,J. J. de O.; HELENE, P. Durabilidade e Via útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed) **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Ibracon, 2011. p. 773-808

MEHTA, P. K. Role of Pozzlanic and Cementitious Materials in Sustainable Development of the Concrete Industry. In *Sixth CANMET/ACI Internacional Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*. v. 1, p. 1-20. Bangkok, Thailand, 1998.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. In: HASPARYK, N. P. (Ed). 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MOSH, T. **Interface esquadria/alvenaria e seu entorno: análise das manifestações patológicas típicas e propostas de soluções.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2009.

MUHAMMAD, N.; KEYVANFAR, A; MAJID, M.; MIRZA, A. J.; Waterproof performance of concrete: A critical review on implemented approaches, *Construction and Building Materials*, 2015. v. 101 p. 80–90

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto.** In: CREMONINI, R. A. (Tradução) 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto.** In: CREMONINI, R. A. (Tradução) 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PEREIRA, F.S. da C. **Impermeabilização do concreto por cristalização.** Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Rio Grande do Norte. Natal, 2013 Disponível em: <<http://www.crea-rn.org.br/artigos/ver/109>>. Acesso em: 15 maio 2016.

RAMOS, N. M. M. **A importância da inércia higroscópica no comportamento higrotérmico dos edifícios.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.

RIBEIRO, D.V. Durabilidade e vida útil das estruturas de concreto. In: RIBEIRO, D.V (Ed) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D.V. Estrutura dos poros e mecanismos de transporte no concreto. In: RIBEIRO, D.V (Ed) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D.V; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D.V (Ed) **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de análise.** 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

SIL, A.; ROY, D. K. S. Performance of High Volume FlyAsh Concrete Using Local Power Plant Fly Ash”, *International Journal of Composite and Constituent Materials journals pub.* 2015.

SILVA FILHO, L. C. P. **Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito de permeação de água e da adição de microssilica.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 1994.

SONG, Z.; XUE, X.; LI, Y.; YANG, J.; HE, Z.; SHEN, S.; JIANG, L.; ZHANG, W.; XU, L.; ZHANG, H.; QU, J.; JI, W.; TAO, Z.; HUO, L.; WANG, B.; LIN, X.; ZHANG, N. **Experimental exploration of the waterproofing mechanism of inorganic sodium silicate-based concrete sealers.** *Construction and Building Materials.* Elsevier. p. 276-283. 2016.

SOUZA, J. C. S.; MELHADO, S. B. Considerações gerais sobre os sistemas de impermeabilização dos pisos do pavimento: tipo de edifícios. 31p. - (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia da Construção Civil, BT/PCC/196). São Paulo: EPUSP, 1998.



VERÇOZA, E. J. Impermeabilização na construção. Porto Alegre: Sagra, 1987. 151 p.

WONGKEO, W.; CHAIPANICH, A. Compressive strength, microstructure and thermal analysis of autoclaved and air cured structural lightweight concrete made with coal bottom ash and silica fume. *Materials Science and Engineering*. 527. p.3676-3684. 2010.

WU, M.; JOHANNESSON, B.; GEIKER, M. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. *Construction and Building Materials* 28. Elsevier. 2012. p.571-583

ZAYED, A.; SHANAHAN, N.; TRAN, V.; MARKANDEYA, A.; WILLIAMS, A.; ELNIHUM, A. Effects of Chemical and Mineral Admixtures on Performance of Florida Structural Concrete. Department of Civil and Environmental Engineering. University of South Florida. 2016.

ZHANG, P.; WITTMANN, F. H.; VILLMANN, B.; ZHAO, T. J.; SLOWIK, V. Moisture Diffusion in and Capillary Suction of Integral Water Repellent Cement based Materials. 5<sup>th</sup> International Conference on Water Repellent Treatment of Building Materials. Hydrophobe V. Aedificatio Publishers. p.273-286. 2008.

ZUBELLI, J. C. **Aditivos e impermeabilização de edifícios**. Rio de Janeiro: [s.n.], 199-. 246p.

## **APÊNDICE A – Ensaio de Resistência à Compressão**

Dados obtidos no Ensaio de Resistência à Compressão - NBR 5739 (ABNT, 2007)								
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa	
	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa	kN	MPa
<b>1</b>	321,60	40,95	338,60	43,12	374,60	47,70	430,90	54,87
<b>2</b>	333,80	42,50	327,30	41,68	387,40	49,33	476,90	60,72
<b>3</b>	303,50	38,64	320,40	40,79	399,20	50,83	459,20	58,47
<b>4</b>	336,10	42,79	340,40	43,32	388,40	49,45	428,30	54,54
<b>5</b>	325,50	41,45	344,30	43,84	376,10	47,89	440,40	56,08
<b>6</b>	322,10	41,01	350,80	44,66	351,20	44,71	437,40	55,70
<b>7</b>	329,00	41,88	334,70	42,62	335,60	42,74	440,90	56,14

## **APÊNDICE B – Ensaio de Absorção total**

Dados obtidos no Ensaio de Absorção Total - NBR 9778 (ABNT, 2009)					
Estufa a 60°C - <i>ms</i>					
CP	Concreto Referência	Pintura com Impermeabilizante	Pintura com Impermeabilizante e Lixado	Adição de Impermeabilizante	Adição de Sílica Ativa
1	3,484	3,598	3,570	3,558	3,562
2	3,524	3,612	3,536	3,586	3,486
3	3,458	3,648	3,630	3,526	3,568
4	3,430	3,610	3,632	3,634	3,572
Banho - <i>mi</i>					
Cp's	Concreto Referência	Pintura com Impermeabilizante	Pintura com Impermeabilizante e Lixado	Adição de Impermeabilizante	Adição de Sílica Ativa
1	2,128	2,192	2,180	2,226	2,164
2	2,160	2,204	2,136	2,244	2,122
3	2,120	2,234	2,214	2,196	2,158
4	2,092	2,194	2,214	2,260	2,180
Seco com pano úmido - <i>msat</i>					
Cp's	Concreto Referência	Pintura com Impermeabilizante	Pintura com Impermeabilizante e Lixado	Adição de Impermeabilizante	Adição de Sílica Ativa
1	3,680	3,794	3,768	3,782	3,740
2	3,734	3,808	3,742	3,816	3,674
3	3,670	3,836	3,816	3,750	3,736
4	3,640	3,800	3,812	3,834	3,746

## **APÊNDICE C – Ensaio de Penetração de água sob pressão**

Dados obtidos no Ensaio de Penetração de água sob pressão									
Cp's	Tipos de Concretos	Área Direita total	Área Esquerda total	Média Área Total	Área Direita Molhada	Área Esquerda Molhada	Média Área Molhada	% área molhada	% média área molhada
1	Concreto Referência	282,28	282,92	282,60	146,09	144,04	145,07	51,33%	57,50%
2		282,92	283,33	283,13	149,40	151,43	150,42	53,13%	
3		-	-	-	-	-	-	-	
4		283,33	283,33	283,33	191,36	194,13	192,75	68,03%	
1	Pintura com Impermeabilizante	-	-	-	-	-	-	-	100,00%
2		281,23	282,28	281,76	281,23	282,28	281,76	100,00%	
3		282,28	282,48	282,38	282,28	282,48	282,38	100,00%	
4		282,68	282,68	282,68	282,68	282,68	282,68	100,00%	
1	Pintura com Impermeabilizante e Lixado	279,60	280,89	280,25	133,70	138,46	136,08	48,56%	53,05%
2		280,89	281,65	281,27	150,97	158,34	154,66	54,98%	
3		281,65	281,70	281,68	155,88	157,31	156,60	55,59%	
4		-	-	-	-	-	-	-	
1	Adição de Impermeabilizante	284,17	284,17	284,17	189,57	181,06	185,32	65,21%	63,84%
2		284,17	284,17	284,17	184,75	179,45	182,10	64,08%	
3		-	-	-	-	-	-	-	
4		284,17	284,17	284,17	178,75	174,97	176,86	62,24%	
1	Adição de Sílica Ativa	284,17	284,17	284,17	138,99	177,66	158,33	55,71%	51,90%
2		284,50	284,78	284,64	137,65	141,93	139,79	49,11%	
3		285,05	285,05	285,05	147,85	137,67	142,76	50,08%	
4		285,05	285,05	285,05	153,34	147,14	150,24	52,71%	

## **APÊNDICE D – Ensaio de Carbonatação**



Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 78 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	18,20	15,90	19,86	14,98	16,15	17,28	12,66	11,60	11,50	13,47
	2	16,06	14,05	13,74	10,82	12,47	13,06	13,72	10,16	7,92	10,54
	3	14,22	13,74	10,43	13,32	15,74	14,45	16,00	10,42	10,37	12,22
	4	13,51	14,87	12,82	9,99	15,74	15,27	9,32	11,86	10,75	11,83
	5	17,13	16,66	13,90	12,07	15,33	15,87	14,60	11,60	9,05	13,12
	Média Face A	15,82	15,04	14,15	12,24	15,09	15,19	13,26	11,13	9,92	12,24
Face B	1	16,70	17,04	12,11	13,53	11,46	16,44	13,73	14,76	10,38	13,26
	2	14,95	12,73	9,19	11,66	9,82	14,93	10,38	13,09	7,93	9,84
	3	14,24	12,40	9,94	12,49	10,23	15,28	11,26	13,94	7,74	9,48
	4	16,20	13,71	11,82	11,04	11,66	11,90	11,09	11,56	10,19	11,12
	5	14,90	15,00	13,60	12,70	14,94	13,59	10,56	14,42	7,93	10,48
	Média Face B	15,40	14,18	11,33	12,28	11,62	14,43	11,40	13,55	8,83	10,84
Face C	1	16,18	14,80	13,40	11,86	17,18	15,61	9,94	11,89	8,50	12,38
	2	12,37	11,86	10,93	11,86	9,81	13,06	13,01	14,78	10,31	13,29
	3	15,53	12,87	7,54	12,48	8,59	12,06	10,07	13,93	10,90	12,93
	4	15,73	11,45	8,42	16,02	12,88	11,30	10,31	10,87	9,84	11,11
	5	14,75	16,01	12,12	16,64	9,20	14,41	12,52	10,53	10,43	11,11
	Média Face C	14,91	13,40	10,48	13,77	11,53	13,29	11,17	12,40	10,00	12,16
Face D	1	18,01	15,41	12,42	11,24	16,37	13,97	14,25	16,66	12,98	12,21
	2	13,09	14,50	13,29	11,87	9,21	12,33	10,26	11,56	12,29	11,66
	3	12,93	11,32	14,61	8,95	11,25	15,17	12,53	12,92	7,47	12,76
	4	16,17	12,21	10,96	12,29	10,64	14,07	10,96	12,75	10,46	11,85
	5	15,79	15,74	16,11	13,53	16,37	14,04	13,17	12,41	9,47	11,48
	Média Face D	15,20	13,84	13,48	11,58	12,77	13,92	12,23	13,26	10,53	11,99
Média das faces	15,33	14,11	12,36	12,47	12,75	14,20	12,02	12,59	9,82	11,81	
Média dos Cp's	14,72		12,41		13,48		12,30		10,81		

Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 100 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	18,41	21,88	22,61	20,35	19,28	21,61	19,83	18,98	16,19	13,97
	2	12,13	18,63	22,48	17,90	20,08	20,88	16,55	18,21	15,96	14,44
	3	18,49	19,10	19,81	17,61	18,08	18,98	17,83	16,90	13,11	17,00
	4	15,14	19,33	19,56	18,00	20,55	18,83	14,41	19,08	14,31	15,14
	5	16,39	22,22	21,72	20,25	19,75	21,46	18,54	16,90	15,89	15,25
	Média Face A	16,11	20,23	21,24	18,82	19,55	20,35	17,43	18,01	15,09	15,16
Face B	1	20,27	25,72	20,34	16,84	20,52	24,79	18,84	18,05	14,21	17,48
	2	18,51	22,64	15,54	15,93	18,50	23,71	15,07	14,07	13,66	14,67
	3	19,92	23,69	14,79	13,21	18,50	21,43	15,23	15,48	15,27	15,35
	4	20,39	23,37	15,04	19,88	19,55	22,90	16,35	17,41	14,20	14,80
	5	24,04	23,23	19,83	17,14	19,46	24,39	18,92	18,37	13,82	17,50
	Média Face B	20,63	23,73	17,11	16,60	19,31	23,44	16,88	16,68	14,23	15,96
Face C	1	22,52	22,04	21,18	20,55	21,05	24,16	14,97	16,98	15,81	15,53
	2	21,17	20,07	19,22	17,42	20,33	20,17	14,52	14,80	13,27	13,88
	3	19,71	19,93	18,66	19,38	18,36	19,15	16,41	15,11	12,61	14,17
	4	18,25	22,95	17,33	16,44	15,61	19,79	14,41	17,03	12,52	13,09
	5	19,08	23,31	19,71	21,96	19,67	19,53	15,08	17,79	13,17	15,81
	Média Face C	20,15	21,66	19,22	19,15	19,00	20,56	15,08	16,34	13,48	14,50
Face D	1	17,03	23,35	21,01	18,97	17,91	21,20	16,25	17,17	15,23	16,20
	2	20,08	21,80	19,24	18,55	18,06	21,18	16,35	15,63	14,03	14,82
	3	14,94	18,68	16,36	17,58	17,67	20,27	16,29	14,53	16,15	15,62
	4	20,25	20,70	18,24	19,04	17,01	22,09	16,26	14,53	14,43	17,66
	5	20,23	21,76	19,91	21,29	18,30	23,00	15,24	16,59	15,76	18,75
	Média Face D	18,51	21,26	18,95	19,09	17,79	21,55	16,08	15,69	15,12	16,61
Média das faces	18,85	21,72	19,13	18,41	18,91	21,48	16,37	16,68	14,48	15,56	
Média dos Cp's	20,28		18,77		20,19		16,52		15,02		

Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 120 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	25,95	25,76	28,13	23,43	23,67	30,52	21,82	18,89	16,64	21,19
	2	24,92	25,84	27,26	23,62	23,16	30,00	19,84	20,09	15,39	20,17
	3	25,58	27,14	24,66	21,97	22,42	26,82	23,92	20,67	17,11	18,94
	4	25,30	26,65	25,37	21,39	21,09	27,23	24,84	21,16	17,90	19,52
	5	26,97	26,81	24,43	21,68	23,90	25,89	23,98	20,31	18,03	20,17
	Média Face A	25,74	26,44	25,97	22,42	22,85	28,09	22,88	20,22	17,01	20,00
Face B	1	27,01	24,83	20,60	24,62	26,35	25,47	18,72	22,62	20,59	19,46
	2	25,32	22,46	24,44	24,47	24,57	24,24	19,59	22,33	19,76	19,30
	3	26,20	22,17	26,26	24,73	27,39	24,75	19,22	21,56	16,30	18,17
	4	25,73	23,22	24,31	26,45	26,66	25,06	22,46	21,66	18,40	19,38
	5	26,01	24,35	24,66	25,33	27,29	22,81	21,22	21,56	17,83	20,52
	Média Face B	26,05	23,41	24,05	25,12	26,45	24,47	20,24	21,95	18,58	19,37
Face C	1	28,04	25,50	23,40	21,87	22,08	23,69	16,98	18,73	15,94	18,44
	2	25,35	24,59	23,38	22,95	20,59	21,19	18,06	19,41	17,31	19,02
	3	23,79	22,56	22,29	21,74	19,42	23,76	19,23	18,60	15,74	17,44
	4	23,58	25,40	22,45	23,36	18,38	24,76	16,90	18,40	14,37	17,29
	5	24,41	25,20	22,76	23,96	18,83	25,69	15,89	17,66	17,77	19,73
	Média Face C	25,03	24,65	22,86	22,78	19,86	23,82	17,41	18,56	16,23	18,38
Face D	1	23,88	22,37	27,35	24,36	23,30	26,64	21,32	19,99	21,27	19,64
	2	24,71	22,65	27,05	22,79	23,48	27,91	20,00	20,66	21,93	18,50
	3	24,40	20,43	28,04	22,34	21,55	28,47	21,10	19,90	17,98	17,87
	4	24,19	23,16	25,87	23,69	23,02	28,07	23,63	23,80	18,34	20,03
	5	25,12	23,77	28,23	25,66	24,86	26,00	22,20	25,23	16,21	17,04
	Média Face D	24,46	22,48	27,31	23,77	23,24	27,42	21,65	21,92	19,15	18,62
Média das faces	25,32	24,24	25,05	23,52	23,10	25,95	20,55	20,66	17,74	19,09	
Média dos Cp's	24,78		24,28		24,52		20,60		18,42		

Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 142 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	31,34	30,62	26,41	32,82	28,19	28,45	25,98	28,84	23,45	23,77
	2	31,14	30,03	25,43	32,08	28,01	29,80	24,71	26,62	24,26	23,77
	3	29,63	29,93	24,82	31,78	26,18	30,83	21,08	27,34	22,34	26,15
	4	30,35	30,62	25,19	33,42	25,09	30,67	24,31	26,98	23,67	22,94
	5	33,16	29,93	25,56	35,59	26,82	30,75	24,12	29,43	25,07	24,22
	Média Face A	31,12	30,23	25,48	33,14	26,86	30,10	24,04	27,84	23,76	24,17
Face B	1	28,63	30,05	29,61	28,73	28,70	27,80	24,68	29,24	21,66	24,48
	2	28,56	25,50	27,66	29,84	31,37	27,71	23,89	30,09	21,01	20,09
	3	27,75	26,98	29,37	27,76	29,67	21,50	24,41	28,90	21,19	22,19
	4	29,19	27,45	27,66	27,76	28,54	27,18	23,72	28,30	22,41	26,21
	5	31,08	25,89	27,41	27,53	28,14	25,76	23,46	28,22	23,70	22,38
	Média Face B	29,04	27,17	28,34	28,32	29,28	25,99	24,03	28,95	21,99	23,07
Face C	1	27,70	24,44	26,83	26,77	26,18	30,72	20,45	26,62	21,06	21,59
	2	26,25	24,79	23,19	25,51	26,18	28,95	21,37	23,39	23,53	21,94
	3	27,34	25,92	23,87	27,07	22,75	24,45	21,83	26,85	23,53	20,87
	4	28,15	25,49	28,89	29,21	23,68	31,78	24,06	25,27	21,53	19,93
	5	31,49	26,97	26,83	30,24	26,04	31,69	22,99	27,15	23,77	19,79
	Média Face C	28,19	25,52	25,92	27,76	24,97	29,52	22,14	25,86	22,68	20,82
Face D	1	29,34	26,61	30,39	30,34	23,12	29,32	21,45	27,43	21,67	26,07
	2	28,94	25,06	32,55	30,52	23,21	27,16	25,52	25,44	21,43	24,16
	3	27,02	23,90	30,07	29,96	23,93	27,79	23,78	26,48	23,99	23,34
	4	27,90	25,22	30,39	29,22	23,75	29,67	22,80	29,81	22,42	22,98
	5	30,22	26,84	30,18	30,06	25,83	31,90	24,75	29,24	24,58	26,25
	Média Face D	28,68	25,53	30,72	30,02	23,97	29,17	23,66	27,68	22,82	24,56
Média das faces	29,26	27,11	27,62	29,81	26,27	28,69	23,47	27,58	22,81	23,16	
Média dos Cp's	28,19		28,71		27,48		25,53		22,98		

Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 162 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	32,18	38,44	35,14	36,27	30,96	32,53	31,15	26,81	26,18	26,46
	2	30,76	37,56	33,98	35,99	32,88	30,22	29,31	27,91	27,07	26,83
	3	31,65	35,84	34,61	35,35	34,44	30,02	30,60	29,76	27,42	23,77
	4	32,00	35,42	34,08	34,08	33,47	32,33	31,60	30,94	27,14	25,33
	5	32,79	34,73	36,40	35,72	32,87	32,73	31,42	26,81	28,38	25,71
	Média Face A	31,88	36,40	34,84	35,48	32,92	31,57	30,82	28,45	27,24	25,62
Face B	1	31,97	34,86	32,34	33,83	30,00	37,70	28,17	28,64	26,58	25,58
	2	31,35	31,82	31,53	34,40	30,60	33,61	28,26	28,87	26,35	26,06
	3	31,23	33,45	32,05	31,90	30,30	36,52	30,36	28,20	25,81	25,11
	4	30,61	31,07	31,53	33,67	29,62	38,01	29,63	25,12	25,12	24,71
	5	31,66	33,66	34,33	32,14	31,13	40,13	28,63	26,96	25,73	25,50
	Média Face B	31,36	32,97	32,36	33,19	30,33	37,19	29,01	27,56	25,92	25,39
Face C	1	32,99	27,11	31,01	33,22	29,15	34,56	26,22	22,23	22,56	27,86
	2	31,15	25,90	29,37	31,58	30,22	30,45	25,65	24,96	24,06	28,28
	3	27,05	24,69	28,63	29,22	29,22	30,74	25,17	26,73	25,42	29,11
	4	29,81	24,09	30,35	30,37	27,68	29,27	30,01	26,88	22,56	28,14
	5	32,20	24,09	33,22	32,44	31,29	31,23	26,38	25,55	25,87	28,90
	Média Face C	30,64	25,18	30,52	31,37	29,51	31,25	26,69	25,27	24,09	28,46
Face D	1	33,41	32,09	34,53	34,70	30,33	36,78	33,96	23,13	25,59	29,05
	2	34,77	32,02	32,42	32,05	27,96	36,78	31,38	22,30	25,42	28,50
	3	34,82	30,29	33,22	33,56	27,49	35,14	29,17	23,24	25,94	27,64
	4	37,70	31,12	32,35	34,13	29,57	36,61	29,81	23,34	26,28	27,83
	5	38,84	33,00	35,62	37,03	31,09	36,35	31,10	24,39	27,73	30,97
	Média Face D	35,91	31,70	33,63	34,29	29,29	36,33	31,08	23,28	26,19	28,80
Média das faces	32,45	31,56	32,84	33,58	30,51	34,09	29,40	26,14	25,86	27,07	
Média dos Cp's	32,00		33,21		32,30		27,77		26,46		

Dados obtidos no Ensaio de Carbonatação - 176 dias											
Tipos de Concretos	Concreto Referência		Pintura com Impermeabilizante		Pintura com Impermeabilizante e Lixado		Adição de Impermeabilizante		Adição de Sílica Ativa		
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	
Face A	1	42,51	36,74	41,15	46,46	39,20	39,18	34,63	38,07	34,40	34,51
	2	40,33	37,26	37,85	45,70	38,83	42,32	31,03	35,52	32,93	32,88
	3	40,43	35,25	38,26	43,09	36,20	43,16	30,58	34,53	31,69	32,31
	4	38,52	39,01	37,85	42,84	39,58	38,55	32,38	34,25	32,00	35,56
	5	40,43	40,06	39,23	43,34	43,33	42,53	36,52	34,67	32,69	32,88
	Média Face A	40,44	37,66	38,87	44,29	39,43	41,15	33,03	35,41	32,74	33,63
Face B	1	35,35	36,77	38,71	42,59	36,42	36,90	32,04	32,43	32,75	32,34
	2	32,89	37,65	35,88	42,81	35,48	39,63	32,04	32,43	32,34	31,01
	3	36,22	34,12	37,34	40,50	33,98	37,11	31,88	34,27	27,67	33,18
	4	35,35	34,78	38,96	41,10	37,55	36,06	30,93	34,70	25,47	30,04
	5	36,22	34,23	39,05	41,69	36,04	37,32	31,64	34,13	29,94	31,73
	Média Face B	35,21	35,51	37,99	41,74	35,89	37,40	31,71	33,59	29,63	31,66
Face C	1	35,47	34,62	37,23	35,06	30,95	34,49	29,78	29,82	29,85	32,04
	2	35,73	35,58	38,42	36,34	30,95	33,15	27,87	29,82	29,64	31,94
	3	35,73	34,88	34,54	36,00	32,45	37,38	28,77	29,45	26,83	31,56
	4	33,17	35,67	34,10	35,63	31,51	37,48	28,77	30,08	31,32	31,75
	5	34,23	34,97	33,35	36,00	30,39	38,72	27,75	32,21	30,55	31,94
	Média Face C	34,87	35,14	35,53	35,81	31,25	36,24	28,59	30,28	29,64	31,85
Face D	1	38,41	38,11	38,16	39,49	38,30	43,35	33,08	34,11	33,76	33,91
	2	39,75	36,90	36,44	39,74	36,61	40,17	31,95	34,74	33,07	34,28
	3	38,41	37,01	39,69	39,99	35,86	40,82	32,86	31,98	32,04	35,41
	4	38,07	37,67	41,51	42,15	37,73	41,72	32,28	30,22	34,19	36,31
	5	39,63	36,57	41,80	39,49	37,55	41,23	29,92	32,73	34,02	35,41
	Média Face D	38,85	37,25	39,52	40,17	37,21	41,46	32,02	32,76	33,42	35,06
Média das faces	37,34	36,39	37,98	40,50	35,95	39,06	31,34	33,01	31,36	33,05	
Média dos Cp's	36,87		39,24		37,50		32,17		32,20		

## **APÊNDICE E – Ensaio de Penetração de íons cloreto**

Dados obtidos no Ensaio de Penetração de íons cloreto - ASTM C 1202													
Corrente medida em mA durante o ensaio													
Idade das Amostras: 36 dias													
Tipos de Concretos	00:00	00:30	01:00	01:30	02:00	02:30	03:00	03:30	04:00	04:30	05:00	05:30	06:00
Concreto Referência	57,00	63,00	64,00	66,00	68,00	69,00	70,00	71,00	72,00	73,00	73,00	74,00	74,00
Pintura com Impermeabilizante	56,00	63,00	65,00	67,00	69,00	70,00	71,00	72,00	74,00	75,00	75,00	75,00	77,00
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	54,00	59,00	61,00	63,00	64,00	66,00	67,00	68,00	70,00	71,00	71,00	72,00	72,00
Adição de Impermeabilizante	46,00	51,00	52,00	53,00	52,00	53,00	54,00	55,00	56,00	57,00	57,00	58,00	58,00
Adição de Sílica Ativa	17,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	18,00	19,00	18,00
Idade das Amostras: 37 dias													
Concreto Referência	64,85	69,86	72,91	75,19	77,62	79,80	81,98	84,13	85,90	87,10	88,76	90,57	92,27
Pintura com Impermeabilizante	62,22	67,27	69,50	71,62	73,82	75,77	77,33	78,92	79,27	81,42	82,54	83,83	85,06
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	61,02	66,01	68,36	70,13	70,78	70,71	71,86	73,55	74,89	76,18	77,21	78,27	79,38
Adição de Impermeabilizante	46,99	49,77	51,57	52,52	53,32	54,43	55,40	56,47	57,31	58,05	58,77	59,52	60,33
Adição de Sílica Ativa	18,28	18,79	19,08	19,30	19,47	19,61	19,75	19,86	19,90	19,88	19,93	19,95	20,05
Idade das Amostras: 38 dias													
Concreto Referência	59,14	65,62	67,98	69,40	71,56	73,47	75,15	76,88	78,36	79,75	81,14	82,66	83,10
Pintura com Impermeabilizante	54,14	60,18	62,65	64,24	65,92	67,59	69,01	70,60	71,85	73,08	74,25	75,53	76,43
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	53,51	58,92	60,88	62,50	63,41	64,83	66,22	67,54	68,51	69,58	70,39	71,34	72,06
Adição de Impermeabilizante	39,84	42,94	44,39	44,90	45,79	46,67	47,41	48,20	48,85	49,45	50,04	50,65	51,11
Adição de Sílica Ativa	16,03	16,27	16,50	16,62	16,76	16,83	16,87	16,91	16,89	16,85	16,91	16,96	16,99
Idade das Amostras: 39 dias													
Concreto Referência	53,95	57,86	59,41	58,62	56,73	57,82	58,71	59,68	60,95	62,34	63,25	63,99	64,74
Pintura com Impermeabilizante	53,86	57,88	59,46	61,60	63,60	65,39	65,76	68,09	69,74	70,51	71,63	72,99	73,89
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	56,55	60,64	63,04	64,50	65,43	67,17	68,51	69,78	71,11	72,47	73,41	74,80	76,00
Adição de Impermeabilizante	38,97	40,42	41,80	43,63	44,34	45,01	45,75	46,47	47,26	47,96	48,48	49,12	49,79
Adição de Sílica Ativa	15,07	15,21	15,41	15,56	15,72	15,87	15,95	15,95	16,14	16,21	16,24	16,35	16,43



Dados Penetração de Cloretos com aspersão de Nitrato de Prata				
Tipos de Concretos	Lado	Área total	Área Nitrato de Prata	% área de Nitrato de Prata
<b>Idade das Amostras: 36 dias</b>				
<b>Concreto Referência</b>	1	39,12	9,78	25,00%
	2	39,99	7,98	19,97%
<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	1	35,92	7,49	20,85%
	2	40,35	9,34	23,15%
<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	1	37,00	6,74	18,22%
	2	39,82	6,51	16,36%
<b>Adição de Impermeabilizante</b>	1	36,70	5,56	15,14%
	2	35,77	5,59	15,64%
<b>Adição de Sílica Ativa</b>	1	39,12	1,23	3,15%
	2	35,27	1,33	3,78%
<b>Idade das Amostras: 37 dias</b>				
<b>Concreto Referência</b>	1	34,54	8,61	24,92%
	2	38,54	8,84	22,94%
<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	1	36,92	7,67	20,78%
	2	40,97	9,47	23,10%
<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	1	35,95	7,41	20,60%
	2	38,26	5,56	14,53%
<b>Adição de Impermeabilizante</b>	1	41,54	8,05	19,38%
	2	34,42	5,80	16,84%
<b>Adição de Sílica Ativa</b>	1	34,66	1,44	4,15%
	2	41,56	2,88	6,93%
<b>Idade das Amostras: 38 dias</b>				
<b>Concreto Referência</b>	1	39,03	12,56	32,19%
	2	33,09	9,11	27,52%
<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	1	37,46	9,32	24,88%
	2	37,76	8,48	22,45%
<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	1	42,39	8,56	20,18%
	2	32,70	6,60	20,17%
<b>Adição de Impermeabilizante</b>	1	41,90	5,79	13,81%
	2	34,96	3,86	11,03%
<b>Adição de Sílica Ativa</b>	1	41,07	2,02	4,92%
	2	34,86	1,96	5,62%
<b>Idade das Amostras: 39 dias</b>				
<b>Concreto Referência</b>	1	39,29	7,09	18,04%
	2	34,60	8,00	23,12%
<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	1	39,36	8,21	20,86%
	2	35,26	6,60	18,71%
<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	1	35,86	7,67	21,38%
	2	36,26	7,52	20,74%
<b>Adição de Impermeabilizante</b>	1	34,82	5,52	15,85%
	2	38,41	4,61	12,00%
<b>Adição de Sílica Ativa</b>	1	40,68	2,74	6,74%
	2	31,43	2,22	7,06%

## **APÊNDICE F – Ensaio de Onda ultrassônica**

Dados Ensaio Onda ultrassônica - 28 dias												
Cp's	1		2		3		4		5		6	
Medida	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
<b>Concreto Referência</b>	24,8	24,3	28,1	28,6	24,7	24,4						
	25,1	24,8	28,2	28,6	24,8	24,3						
	24,8	24,1	28,3	28,6	24,4	24,6						
<b>Pintura com Impermeabilizante</b>	27,1	23,9	23,8	23,7								
	27,1	24,5	24,4	23,4								
	26,7	23,9	23,8	23,3								
<b>Pintura com Impermeabilizante e Lixado</b>	24,2	23,9	23,7	23,8	25,3	23,6						
	23,8	23,7	23,9	23,4	25,3	23,3						
	23,9	23,4	23,8	23,3	25,1	23,3						
<b>Adição de Impermeabilizante</b>	23,4	23	23,2	23,8	22,9	23,8	23,4	23,3	23,9	23,9	23,2	27,1
	23,3	22,9	22,8	23,8	23,2	23	23,3	23,3	23,8	23,7	22,9	26,6
	23,2	22,8	22,9	23,8	22,8	23	23,8	23,1	23,9	23,3	22,8	26,3
<b>Adição de Sílica Ativa</b>	24	24,4	24,9	26,7	23,4	23,8	24,6	24,2	28,1	23		
	24,3	24,6	24,9	26,9	23,7	23,9	24,3	24,1	28,2	23,8		
	24,4	24,5	24,8	27,3	23,8	24,2	24,3	23,8	28,1	23,8		

Dados Ensaio Onda ultrassônica - 51 dias																								
Cp's	1				2				3				4				5				6			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
<b>Medida</b>	33,2	60,3	33,6	63,4	40,2	74,3	41,9	61,0	38,7	59,0	36,9	60,4												
<b>Concreto</b>	33,1	60,3	33,6	62,9	40,1	75,0	42,1	61,2	38,0	59,8	37,0	60,8												
<b>Referência</b>	33,1	60,5	33,7	63,2	43,2	75,2	42,1	69,5	38,5	60,0	37,0	60,3												
<b>Pintura com</b>	43,8	64,5	33,2	61,2	45,0	78,6	30,0	61,6																
<b>Impermeabilizante</b>	46,3	71,7	33,9	61,3	46,0	87,1	30,2	62,4																
	46,6	67,5	33,2	62,1	45,6	68,4	30,2	62,5																
<b>Pintura com</b>	44,5	60,1	28,8	57,2	35,8	58,0	48,2	58,5	37,6	59,8	32,2	61,7												
<b>Impermeabilizante</b>	43,9	60,4	28,6	57,1	42,2	59,4	48,2	59,0	38,0	59,8	32,6	61,6												
<b>e Lixado</b>	44,6	60,2	27,4	57,8	35,3	59,0	48,1	56,8	37,9	59,5	32,4	61,8												
<b>Adição de</b>	36,4	58,9	35,6	60,3	43,7	77,6	37,0	71,9	36,3	58,5	36,2	60,0	36,3	60,2	37,0	71,7	36,5	59,4	43,4	60,3	36,1	57,5	36,8	59,8
<b>Impermeabilizante</b>	36,5	59,3	35,8	60,6	40,2	77,1	39,8	72,1	39,2	75,5	36,2	59,7	36,6	60,0	37,1	60,3	36,5	59,9	44,0	59,3	36,5	56,8	37,1	60,2
	36,2	59,0	36,7	50,5	43,5	71,4	39,8	72,3	36,3	58,9	36,4	64,0	36,4	60,3	37,7	60,5	36,6	59,4	44,5	59,5	36,0	56,8	37,1	60,4
<b>Adição de Sílica</b>	46,2	77,7	31,1	60,1	36,8	57,8	39,9	61,5	32,3	61,1	41,4	61,0	35,4	60,0	33,1	62,3	30,6	63,5	42,3	61,9				
<b>Ativa</b>	46,1	72,9	35,5	60,3	36,6	58,6	36,8	59,3	32,4	60,8	42,0	61,3	35,2	60,0	33,1	61,9	30,5	63,0	45,5	62,1				
	46,1	72,5	35,8	60,1	36,8	58,9	39,6	57,7	32,3	60,7	42,4	77,1	35,2	60,3	33,0	62,1	31,0	57,0	42,0	62,1				

Dados Ensaio Onda ultrassônica - 62 dias																									
Cp's	1				2				3				4				5				6				
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Medida Concreto Referência	29,4	57,5	30,0	53,9	39,0	56,8	36,1	58,3	34,7	54,8	29,8	56,7													
	29,5	56,7	32,7	60,3	39,0	56,7	36,5	58,3	34,9	55,4	29,8	56,7													
	29,4	57,4	29,8	53,7	39,4	56,9	36,4	57,8	35,1	56,2	30,2	56,7													
Pintura com Impermeabilizante	32,0	55,5	25,1	49,4	24,7	57,5	25,5	58,2																	
	32,4	55,4	25,1	52,8	24,8	57,1	25,4	58,8																	
	32,5	55,5	24,7	53,3	24,7	57,4	25,8	57,8																	
Pintura com Impermeabilizante e Lixado	25,5	53,0	24,2	62,4	37,8	55,0	32,8	52,4	31,8	56,5	29,1	57,6													
	25,7	56,9	24,7	56,8	37,8	56,0	31,6	54,9	31,1	56,3	28,6	57,6													
	25,2	54,5	24,4	56,3	37,2	55,4	32,4	52,4	32,0	56,2	29,0	57,4													
Adição de Impermeabilizante	33,0	55,6	33,9	56,8	36,9	67,0	35,7	67,8	39,9	54,9	32,8	55,4	32,8	70,8	33,1	56,3	32,6	55,7	40,9	54,7	32,5	54,3	33,9	64,3	
	32,1	55,3	33,6	57,0	36,3	67,2	35,3	68,1	39,9	54,9	32,9	55,5	32,6	73,3	33,5	56,4	32,5	55,0	40,3	55,1	31,8	55,3	34,0	67,3	
	32,6	55,4	34,0	57,1	36,9	67,4	35,8	68,3	40,1	55,2	33,0	55,8	32,8	73,4	33,7	56,4	32,4	55,2	40,5	54,7	32,2	54,9	34,4	57,0	
Adição de Sílica Ativa	27,1	57,4	27,3	56,6	33,1	55,4	33,5	54,7	28,4	65,6	32,3	58,1	22,3	56,3	29,2	57,9	27,2	60,8	29,4	58,5					
	27,0	57,1	26,9	56,8	32,9	55,2	33,5	55,0	28,5	66,4	32,2	57,7	22,1	56,1	29,6	58,2	27,0	60,3	29,4	58,5					
	27,2	57,3	27,6	56,7	32,6	54,9	33,4	54,4	28,3	66,5	32,8	58,2	22,3	51,3	29,9	58,2	27,0	60,3	29,2	58,4					



## **TRABALHOS PUBLICADOS**

CAPPELLESSO, V. G.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B.; PETRY, N. S. Uso de impermeabilizante por cristalização para o aumento da durabilidade do concreto. In: Congresso Brasileiro de Patologia das Construções, 2016, Belém- PA. Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções. São Leopoldo: Casa Leiria, 2016. v. 1. p. 2145-2156.

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. Influência do uso de impermeabilizante por cristalização na penetração de cloretos em concretos. In: XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 2016, São Paulo. XVI Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído. São Paulo: ANTAC, 2016. v. 1. p. 2424-2437.

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. Analysis of the crystalline waterproofing behavior in repairing cracks in concrete. In: 41st IAHS World Congress On Housing: Sustainability and Innovation for the Future. Materials and Building Technology, 2016, Albufeira. 41st IAHS World Congress On Housing: Sustainability and Innovation for the Future, 2016. v. 1. p. 1-10.

CAPPELLESSO, V. G.; PETRY, N. S.; DAL MOLIN, D. C. C.; MASUERO, A. B. Uso de impermeabilizante por cristalização na proteção do concreto armado. In: I Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão, 2016, Lisboa. I Encontro Luso- Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão. Lisboa: LNEC, 2016. v. 1. p. 1-12.

CAPPELLESSO, VANESSA GIARETTON; DOS SANTOS PETRY, NATÁLIA; DAL MOLIN, DENISE CARPENA COITINHO ; MASUERO, ANGELA BORGES . Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete. DOI: 10.1007/s41024-016-0012-7. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2016.





## Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções CBPAT2016

Abril de 2016  
ISSN 2448-1459



### USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO PARA O AUMENTO DA DURABILIDADE DO CONCRETO

**V.G. CAPPELLESSO**

Estudante  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Rio Grande do Sul; Brasil  
vanessa@cappellesso.com.br

**N. S. PETRY**

Pesquisadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Rio Grande do Sul; Brasil  
nataliapetry@yahoo.com.br

**D.C.C. DAL MOLIN**

Professora e Pesquisadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Rio Grande do Sul; Brasil  
dmolin@ufrgs.br

**A.B. MASUERO**

Professora e Pesquisadora  
Universidade Federal do Rio Grande do Sul  
Rio Grande do Sul; Brasil  
angela.masuero@ufrgs.br

#### RESUMO

A água está presente na maioria dos casos de deterioração do concreto. A baixa permeabilidade deste material contribui para o aumento da durabilidade. O intuito desta pesquisa é estudar a influência do uso de produto impermeabilizante por cristalização, tanto como tratamento superficial quanto como adição, na absorção de água em concretos. O desempenho destes será comparado com concretos com e sem adição de sílica ativa. Os ensaios desenvolvidos para avaliar o desempenho deste material foram: absorção total - NBR 9778 (ABNT, 2009), penetração de água sob pressão (30kPa), e complementarmente aos ensaios de permeabilidade foi realizado o ensaio de resistência à compressão - NBR 5739 (ABNT, 2007). Os resultados mostram que a adição de sílica ativa é mais eficiente que o impermeabilizante por cristalização estudado, pois contribuiu com a resistência à compressão e reduziu a absorção e a penetração de água. Palavras-chave: permeabilidade, durabilidade, impermeabilizante.

#### ABSTRACT

Water is present in most cases of concrete deterioration. The low permeability of the same contributes to increase of durability of this material. The purpose of this research is to study the influence of the use crystalline waterproofing product, as surface treatment and as addition, in the absorption of concrete. The performance of these will be compared to concrete with and without silica. The tests carried out to evaluate the performance of this material were: total absorption - NBR 9778 (ABNT, 2009), water penetration under pressure (30kPa), and compared to permeability tests were also performed compressive strength test - NBR 5739 (ABNT, 2007). The results show that the addition of silica is more efficient than the crystalline waterproofing studied, as it contributed to the compressive strength and also helped in reducing absorption and penetration.

Keywords: permeability, durability, waterproofing.

#### 1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto tem ganhado enfoque nos últimos anos. A partir da segunda metade do século XX houve um aumento nos danos causados pela deterioração das construções; os reparos dessas obras de concreto têm se intensificado nos dias de hoje e a preocupação com o aumento da durabilidade também [1]. Problemas relacionados com essa questão tendem a se agravar, visto que muitas edificações contruídas nas décadas passadas estão completando mais de 40 anos de vida, o que gera gastos com manutenções e reparos, resultado de maior preocupação com definições de projeto que aumentem a durabilidade das estruturas [2].



## XVI ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO

Desafios e Perspectivas da Internacionalização da Construção  
São Paulo, 21 a 23 de Setembro de 2016

### INFLUÊNCIA DO USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO NA PENETRAÇÃO DE CLORETOS EM CONCRETOS<sup>1</sup>

**CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton (1); PETRY, Natália dos Santos (2); DAL MOLIN, Denise Carpena Coifinho (3); MASUERO, Angela Borges (4)**

(1) UFRGS, e-mail: vgcappelless@gmail.com; (2) UFRGS, e-mail: nataliapetry@yahoo.com.br; (3) UFRGS, e-mail: dmolin@ufrgs.br; (4) UFRGS, e-mail: angela.masuero@ufrgs.br

#### RESUMO

O uso de diferentes tecnologias e materiais tem contribuído para o aumento da durabilidade frente aos agentes agressivos que prejudicam as estruturas de concreto. Manter baixa a relação água/cimento e utilizar pozolanas na mistura diminui a permeabilidade do concreto, mas às vezes só estas alternativas não são suficientes. Neste caso podem-se utilizar outros produtos como é o caso dos impermeabilizantes. Esta pesquisa avaliou o uso de impermeabilizante por cristalização e como tratamento superficial a fim de conhecer os benefícios que o mesmo pode proporcionar como meio de mitigar a penetração de cloretos, visto que esses foram comparados com concretos sem e com adição de sílica ativa, essa pozolana é utilizada usualmente como forma de reduzir a porosidade. Variaram-se apenas as adições (impermeabilizante por cristalização e sílica ativa) e o tratamento superficial (impermeabilizante por cristalização). A penetração de cloretos foi avaliada segundo a norma ASTM C 1202, e também foi realizado o ensaio de resistência à compressão – NBR 5739. Os resultados mostram que as adições são satisfatórias para a resistência à compressão. E, para o ensaio de penetração de cloretos a adição de sílica ativa se apresenta mais eficiente do que os demais tratamentos.

**Palavras-chave:** Concreto. Durabilidade. Cloretos. Impermeabilizante.

#### ABSTRACT

*The use of different technologies and materials has contributed to the increased durability due to aggressive agents that damage the concrete structures. Retain lower the water / cement relation and to use pozzolan in the mixture decreases the permeability of the concrete, but it is sometimes not enough, in this case can be used other products such as the waterproofing. This study evaluated the use of crystalline waterproofing as addition and as a surface treatment in order to know the benefits it can provide as a means of mitigating the penetration of chlorides, as these were compared with concrete without and with addition of silica fume, this pozzolan is usually used as a way to reduce the porosity. Diversify only additions (crystalline waterproofing and silica fume) and surface treatment (crystalline waterproofing). The chloride penetration was evaluated according to ASTM C 1202, and was also performed the compressive strength test - NBR 5739 (ABNT, 2007). The results show that the additions are satisfactory to compression resistance. However, to the penetration of chlorides the silica fume is more efficient than other treatments.*

<sup>1</sup> CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton et al. Influência do uso de impermeabilizante por cristalização na penetração de cloretos em concretos. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16., 2016, São Paulo. **Anais...** Porto Alegre: ANTAC, 2016.

41<sup>st</sup> IAHS WORLD CONGRESS  
Sustainability and Innovation for the Future  
13-16<sup>th</sup> September 2016  
Albufeira, Algarve, Portugal

## ANALYSIS OF THE CRYSTALLINE WATERPROOFING BEHAVIOR IN REPAIRING CRACKS IN CONCRETE

Vanessa G. Cappelleso, Natália dos S. Petry, Denise C. C. Dal Molin and Angela B. Masuero

Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação  
Civil Engineering School  
Federal University of Rio Grande do Sul  
Osvaldo Aranha, 99. Porto Alegre – Brazil  
web: <http://noriegec.cpgec.ufrgs.br/norie/>  
e-mail: [vgcappelleso@gmail.com](mailto:vgcappelleso@gmail.com)  
[nataliapetry@yahoo.com.br](mailto:nataliapetry@yahoo.com.br)  
{dmolin, angela.masuero}@ufrgs.br

**Keywords:** Concrete, Pathological Manifestations, Cracks, Waterproofing, Crystalline Waterproofing.

**Abstract** *Cracks are the most incident pathological manifestations in concrete structures and their appearance represents a major problem, as it undermines the durability and lifespan of the buildings. There are many ways to prevent and treat this event, however, this paper will be given approach for the use of crystalline waterproofing products as an additive in the concrete mix as well as a surface treatment after the appearance of the cracks, they will be compared to concrete without and with silica fume. The crystalline waterproofing has in its composition active compounds which aims to form crystals in the spaces generated by cracks performing a self-healing process. The purpose of this paper is to analyze the crystalline waterproofing capacity to close the cracks in the concrete and what form of use is the most suitable for the product. Therefore, prismatic specimens (9x9x32) cm of concrete were molded with the armor at the bottom, varying only the type of treatment used. After that, there was the opening of the cracks with the help of a willing four-point support, which is used to determine of tension strength in flexure of prismatic specimens. However, the applied load was not to break of tension strength in flexure, was applied only to the opening of the first crack. Then, some of the specimens received surface treatment applied as paint in crack site, and some of these also had the sanded paint after curing the same. The monitoring of the self-healing of the cracks was tracked with the aid of an ultrasound device, this determines the ultrasonic wave transmission velocity. In parallel, there was microscopic analysis of the cracks. The results show that the test of ultrasonic wave transmission velocity was efficient on the question of self-healing. It is noteworthy that the concrete receiving painting with waterproofing and with the addition of silica fume, are those with the best results. Microscopic analysis proved to be efficient to analyze qualitatively the possible self-healing.*



## IIº Encontro Luso-Brasileiro de Degradação de Estruturas de Betão

Lisboa • LNEC • 27 a 29 de setembro de 2016



LABORATÓRIO NACIONAL  
DE ENGENHARIA CIVIL

### USO DE IMPERMEABILIZANTE POR CRISTALIZAÇÃO NA PROTEÇÃO DO CONCRETO ARMADO

*Vanessa Giaretton Cappellesso<sup>1</sup>, Natália dos Santos Petry<sup>2</sup>, Denise Carpena Coitinho Dal Molin<sup>3</sup>,  
Angela Borges Masuero<sup>4</sup>*

<sup>1</sup>Engenharia Civil, UFRGS, [vgcappellesso@gmail.com](mailto:vgcappellesso@gmail.com), <sup>2</sup>Engenharia Civil, UFRGS, [nataliapetry@yahoo.com.br](mailto:nataliapetry@yahoo.com.br),  
<sup>3</sup>Engenharia Civil, UFRGS, [dmolin@ufrgs.br](mailto:dmolin@ufrgs.br), <sup>4</sup>Engenharia Civil, UFRGS, [angela.masuero@ufrgs.br](mailto:angela.masuero@ufrgs.br)

#### RESUMO

Em estruturas de concreto armado há uma grande preocupação com a corrosão de armaduras, e entre os principais fatores responsáveis por essa manifestação patológica tem-se a penetração de íons cloretos e/ou a carbonatação. A penetração de íons cloreto e do dióxido de carbono é facilitada quando a qualidade do concreto não é adequada. No entanto, podem-se minimizar esses efeitos melhorando a mistura de concreto e reduzindo sua porosidade com o uso de adições na mistura, como as pozolanas, por exemplo, ou impedindo a entrada desses agentes agressivos com a impermeabilização da superfície do concreto. O intuito desse trabalho é avaliar o uso de impermeabilizante por cristalização como adição e como tratamento superficial a fim de conhecer os benefícios que o mesmo pode proporcionar como meio de mitigar a penetração de cloretos e a carbonatação. Os concretos foram produzidos com cimento pozolânico com traço em massa 1: 1,5: 2,34 (cimento: areia: brita), além disso, foram utilizados aditivos plastificantes e relação água/aglomerante 0,41. Variaram-se apenas as adições (impermeabilizante por cristalização e sílica ativa) e o tratamento superficial (impermeabilizante por cristalização). A penetração de cloretos foi avaliada segundo a norma ASTM C 1202. A carbonatação foi avaliada pelo método da pulverização de fenolftaleína. Os resultados mostram que as adições são satisfatórias. No entanto, a adição de sílica ativa se mostra mais eficiente do que os demais tratamentos quanto à redução na penetração de íons cloreto. Em relação à carbonatação ambas as adições tiveram os melhores desempenhos comparados aos demais.

Palavras-chave: Concreto armado/ Corrosão/ Penetração de cloretos/ Carbonatação/  
Impermeabilizante por cristalização



RESEARCH ARTICLE

## Use of crystalline waterproofing to reduce capillary porosity in concrete

Vanessa Giaretton Cappelleso<sup>1</sup> · Natália dos Santos Petry<sup>2</sup> · Denise Carpena Coitinho Dal Molin<sup>2</sup> · Angela Borges Masuero<sup>2</sup>

Received: 30 June 2016 / Accepted: 14 October 2016  
 © Springer International Publishing Switzerland 2016

**Abstract** The use of different technologies have contributed to the increase in durability facing the aggressive agents that damage the concrete structures. Therefore, it is possible to reduce the capillary porosity in concrete lowering the ratio water/binder; using pozzolan, hydrophobic or waterproofing products in the mixture; applying hydrophobic products or waterproofing in the concrete surface; replacing pure cements for compounds cements, pozzolanic cements or cements with blast furnace slag; among other actions. The waterproofing has the function to prevent the water or fluid passage in liquid or steam state, thereby protecting structures. The waterproofing creates a barrier when coating is applied to close surface pores with the aim of preventing the water pervasion by any transport mechanism. This paper has evaluated the use of crystalline waterproofing as admixtures, as well as a coating, sanding and no-sanding, in order to know the benefits it can bring to the concrete water absorption, comparing their performance with other concretes with or without silica fume admixture. Developed tests were: total absorption, under pressure water penetration (30 kPa) and compressive strength test. The results have showed that the silica fume

admixture is more efficient than the analyzed crystalline waterproofing, as it has contributed to the compressive strength increase and decrease of water absorption and penetration. The crystalline waterproofing admixture has contributed to compressive strength increase; however, there was also an increase in the absorption and penetration. On the other hand, the coating waterproofing has not influenced the compressive strength, but reduced absorption and penetration when sanded.

**Keywords** Concrete · Capillary porosity · Crystalline waterproofing · Impermeability

### 1 Introduction

The concrete structures durability has been in focus in recent years. During the second half of the 20th century there was an increase in damage caused by the deterioration of buildings; repairs of these concrete buildings have nowadays been intensified and also increased the concern of its durability [1]. Problems related to this issue tend to aggravate, as many buildings constructed in the past decades are now more than 40-years-old, thus resulting in cost increase of maintenance and repair, which is the greatest concern for project settings that increase the structures durability [2].

Due to physical, chemical and mechanical characteristics the concrete used in different environments gets exposed to several harmful agents, that compromise its durability [3]. The assessment of durability is related with the expected product performance, in which some factors are decisive for its good understanding, is set, knowing the material composition and its behavior allows to assess changes caused by the product interaction with external aggressive agents and measure the damage over time [4].

✉ Vanessa Giaretton Cappelleso  
 vgcappelleso@gmail.com

Natália dos Santos Petry  
 nataliapetry@yahoo.com.br

Denise Carpena Coitinho Dal Molin  
 dmolin@ufrgs.br

Angela Borges Masuero  
 angela.masuero@ufrgs.br

<sup>1</sup> Federal University of Rio Grande do Sul (UFRGS)/Center for Innovation Oriented Building (NORIE), Porto Alegre, Brazil

<sup>2</sup> UFRGS/NORIE, Porto Alegre, Brazil