

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE MINAS,  
METALÚRGICA E DE MATERIAIS

DEISE SANTOS ADAMATTI  
ENGENHEIRA CIVIL

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESPAÇADORES NO CONCRETO ARMADO:  
Impacto da Corrosão por Íons Cloreto em Diferentes Condições de Exposição

Porto Alegre  
2016

DEISE SANTOS ADAMATTI  
ENGENHEIRA CIVIL

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESPAÇADORES NO CONCRETO ARMADO:  
Impacto da Corrosão por Íons Cloreto em Diferentes Condições de Exposição

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul como requisito à obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Orientador: Prof. PhD. Carlos Pérez Bergmann  
Coorientador: Prof. PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Porto Alegre  
2016

DEISE SANTOS ADAMATTI

ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DE ESPAÇADORES NO CONCRETO ARMADO:  
Impacto da Corrosão por Íons Cloreto em Diferentes Condições de Exposição

Esta dissertação foi analisada e julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia, na área de Ciência e Tecnologia dos Materiais, e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora designada pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e Materiais (PPGE3M) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

---

Prof. PhD. Carlos Pérez Bergmann

---

Prof. PhD. Luiz Carlos Pinto da Silva Filho

Aprovado em: \_\_\_ / \_\_\_ / \_\_\_

BANCA EXAMINADORA

Prof. PhD. Ângela Gaio Graeff – LEME/UFRGS

Prof. Dra. Luciani Somensi Lorenzi – NORIE/UFRGS

Prof. Dra. Margarete Regina Freitas Gonçalves – UFPEL

## AGRADECIMENTOS

Chegou a hora de refletir um pouco sobre tudo o que aconteceu nesses 31 meses de aprendizado. Alguns dias foram difíceis, complexos, deu vontade de desistir de tudo – principalmente no momento em que o ensaio dava errado e tínhamos que concretar tudo de novo, esperar o tempo de cura e iniciar o ciclo novamente! Nesses momentos, sempre estive ao lado de pessoas especiais, que me ampararam, que me ouviram, que me AJUDARAM muito, que mesmo que não fosse para “colocar a mão na massa comigo”, estavam ali a postos para qualquer coisa! Assim inicio demonstrando os meus sinceros agradecimentos:

Primeiramente a Deus, por Ele colocar pessoas tão especiais a meu lado, sem as quais eu certamente não teria dado conta!

À minha mãe querida, que, desde quando terminei a minha graduação na PUC, incentivou-me a continuar os estudos, sempre cobrando mais conhecimento adquirido, até o momento de iniciar o mestrado! Pai e mãe, vocês dois são a minha motivação diária para eu querer aprender mais todos os dias, e para trazer alegria à vida de vocês! Como eu sempre digo, se eu um dia for 50% do que vocês foram, já me sinto uma pessoa vencedora! Obrigada, meus queridos, por sempre acreditarem em minha capacidade e me acharem A MELHOR de todas, mesmo não sendo. Isso só me fortaleceu e me fez tentar – não ser A MELHOR, mas a fazer o melhor de mim. Obrigada pelo amor incondicional!

Ao meu Gali, meu noivo, meu companheiro para todas as horas, obrigada por me aguentar nos dias mais chatos, sempre a meu lado, me pondo para cima e me fazendo acreditar que posso mais que imagino. Foi com o seu companheirismo, amizade, paciência, compreensão, apoio, alegria e amor que este trabalho pôde ser concretizado.

Ao meu irmão, Alexandre, meu futuro engenheiro, colega de profissão, obrigada por estar sempre em casa me esperando para um momento de descontração, para a hora do chimas, quando comentávamos a situação atual de cada um, e um ajudava o outro, para que cada dia vivido fosse melhor!

Essas pessoas foram essenciais para que eu conseguisse estar psicologicamente preparada para iniciar essa jornada de muito trabalho! Pois é na família da gente que nos amparamos e ganhamos força para prosseguir sempre!

Mas falando do meio acadêmico... devo agradecer imensamente a uma das minhas maiores fontes de inspiração, o querido Professor Luiz Carlos, por ter aceitado me coorientar neste trabalho, pela dedicação e conhecimento que sempre demonstrou, ainda que em seus mais atarefados dias.

Agradeço também ao Professor Carlos Pérez Bergmann, meu orientador, pela confiança depositada em meu trabalho de pesquisa, oportunidade essa que auxiliou no meu crescimento pessoal e profissional.

Em especial, tenho que agradecer a minha orientadora de coração, a Professora Ângela Gaio Graeff, que foi minha maior companheira, que me ajudou na “ideia” inicial de pesquisa, que delimitou todo meu trabalho, que vibrou comigo com cada resultado encontrado. Dedico um agradecimento todo especial pela amizade, paciência, confiança e, acima de tudo, pelo carinho transmitido nesses meses de trabalho, pois, como falamos, acima de qualquer coisa, eu sei que foi de coração! Até a querida baby Isa já está sabendo tudo de espaçadores e corrosão, pois acompanhou toda a pesquisa dentro da barriga e agora junto com sua mãe, nos momentos de leitura.

Agradeço à minha auxiliar de pesquisa, a querida Rafa, que esteve ao meu lado em todos os momentos, cuidando da pesquisa como se fosse dela, com todo amor e carinho, sempre me motivando e dizendo que no final daria tudo certo!

Agradeço ao querido Mathias, também meu auxiliar, que entrou na pesquisa para ajudar com todo o cuidado e dedicação.

Às minhas queridas amigas do laboratório e da vida, Luiza e Morgane: vocês não imaginam o quanto me sinto em paz e segura ao lado de vocês! Obrigada por todo o apoio nas horas mais difíceis, pois sei bem o quanto me ouviram dizer, revoltada, que gostaria de largar tudo. Vocês duas sempre estiveram ali para me acalmar! Amo vocês demais! Amizade para a vida inteira!

Agradeço também as minhas amigas queridas Luciane Caetano e Julia, colegas de sala e vizinhas de mesa. Foi muito bom estar ao lado de vocês nesse tempo todo!

Ao meu amigo Lucas, que me ajudou em tudo, principalmente na parte de interpretação de resultados, sempre me motivando para eu não desistir e resolvendo tudo o que eu precisava em 5 minutos!

Agradeço à equipe do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais pela oportunidade de fazer parte de um grupo maravilhoso e nessa caminhada ter feito grandes amizades!

Ao Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS) pelo auxílio com o redimensionamento de barras de aço através de varredura com raios laser.

Agradeço à Renata, minha revisora e minha amiga querida. Este trabalho me fez conhecê-la um pouco melhor, e nos tornamos grandes amigas!

À empresa Nazale, que sempre me apoiou e incentivou a buscar novos conhecimentos.

E finalmente às empresas que doaram os espaçadores, obrigada!

*“A tarefa não é tanto ver aquilo que ninguém viu, mas pensar o que ninguém ainda pensou sobre aquilo que todo mundo vê.”*

*(Arthur Schopenhauer)*

## RESUMO

O concreto armado é um dos materiais de construção mais utilizados atualmente. Um dos fatores que levaram a essa preferência foi a maior durabilidade dos componentes, uma vez que o aço inserido no concreto se protege do ambiente externo e, conseqüentemente, de uma agressividade intensa pelo cobrimento de concreto empregado. Porém, mesmo considerando que um concreto adequadamente dosado, lançado e curado tende a ser durável, casos de deterioração prematura das estruturas de concreto podem ocorrer, trazendo à tona a importância do controle dos fatores responsáveis pela degradação natural da estrutura. Entre os fatores de deterioração, destaca-se a corrosão de armaduras, devido a sua elevada incidência e potencial de dano. Nas estruturas de concreto armado, são utilizados espaçadores para garantir o cobrimento especificado em projeto e o conseqüente confinamento do aço, garantindo assim o aumento da vida útil da estrutura. No entanto, a interface espaçador-concreto pode se tornar um ponto frágil para a entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência dessa interface utilizando espaçadores de argamassa industrializados e espaçadores de plástico, bem como a condição de exposição a que o concreto é submetido. Para a viabilização do estudo, foi utilizada a técnica de aceleração de corrosão, baseada no ensaio denominado Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM) com aplicação de voltagem constante e corrente constante. Foram moldados corpos de prova em laboratório, com dimensões de 10 x 10 x 20 cm, estabelecidas pelo CAIM, com a utilização de dois tipos de espaçadores e cobrimentos estabelecidos de 25 mm e 50 mm, além de uma barra de aço com diâmetro de 12,5 mm, simulando uma situação real. Para a avaliação dos dados, as amostras passaram por análise microscópica, ensaio colorimétrico e de redimensionamento a laser, a fim de realizar análises qualitativas e quantitativas dos resultados. Este estudo verificou que tanto espaçadores de argamassa quanto de plástico contribuíram para uma maior degradação na região dos espaçadores, porém os de plástico apresentaram desempenho inferior quanto à ascensão de cloretos já na fase da iniciação. Além disso, a condição de exposição por ciclos de calor influencia claramente na interface entre espaçador e concreto, em especial nos espaçadores de plástico.

Palavras-Chave: Espaçadores. Concreto Armado. Corrosão. Íons Cloreto.



## ABSTRACT

Reinforced concrete is one of the building materials most used today. One of the factors leading to this constructive choice was greater durability, since the steel is protected for the concrete cover from a strong aggressiveness of the external environment. However, even considering that an adequately dosed, cast and cured concrete, tends to be durable, cases of premature deterioration of concrete structures can occur, bringing to the fore the importance of control the factors responsible for the natural degradation of the structure. Among the deterioration factors, can be highlighted the rebars' corrosion, because of the high incidence and potential damage. In reinforced concrete structures, spacers are used to ensure structural design specified cover depths and the steel confinement, which helps to increase the structure service life. However, the spacer-concrete interface can become a weak point for the entry of aggressive agents, such as chloride ions. This study aims to understand the influence of the spacer-concrete interface, analysing industrialized mortar spacers and plastic spacers, as well the concrete subjected to different curing condition. In order to make this work possible, a corrosion acceleration technique was used, based on corrosion acceleration test method, with application of constant voltage and constant current. Samples sizing 100 x 100 x 200 mm were cast in the laboratory. The samples were subjected to accelerated corrosion process stimulation, using two different spacers and cover depths (25 mm and 50 mm) and one rebar diameter (12.5 mm), simulating a real situation. The losses of cross section were measured by using microscopic analysis, colorimetric tests and 3D image reconstruction with laser, in order to perform qualitative and quantitative analysis. The results show that both, mortar spacers as plastic spacers, contributed to increase the transport in the contact region, but the plastic spacers produced the largest increase at the first stages. Furthermore, the increase of the temperature in the condition of exposure analysis by heat cycles influences in the interface between spacer and concrete, particularly with the plastic spacers.

Keywords: Spacers. Reinforced Concrete. Corrosion. Chloride ions.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	OBJETIVOS.....	4
1.1.1	<b>Objetivos Gerais .....</b>	<b>4</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>4</b>
1.2	A PESQUISA .....	4
1.2.1	<b>Questões de Pesquisa.....</b>	<b>5</b>
1.2.2	<b>Delimitações.....</b>	<b>5</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>7</b>
2.1	NORMAS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E DE DESEMPENHO .	10
2.2	MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E DURABILIDADE.....	14
2.3	CORROSÃO DE ARMADURAS .....	17
2.3.1	<b>Iniciação da Corrosão .....</b>	<b>20</b>
2.3.2	<b>Propagação da Corrosão .....</b>	<b>21</b>
2.4	INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO DE ARMADURA NA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS.....	22
2.5	ESPAÇADORES .....	26
2.5.1	<b>Tipos de Espaçadores.....</b>	<b>31</b>
2.5.2	<b>Dificuldades de Utilização.....</b>	<b>36</b>
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA .....</b>	<b>40</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	41
3.1.1	<b>Cimento .....</b>	<b>41</b>
3.1.2	<b>Agregado Miúdo .....</b>	<b>42</b>
3.1.3	<b>Agregado Graúdo .....</b>	<b>43</b>
3.1.4	<b>Armadura.....</b>	<b>44</b>
3.1.5	<b>Água de Amassamento .....</b>	<b>44</b>
3.1.6	<b>Concreto.....</b>	<b>44</b>
3.1.7	<b>Solução Salina Agressiva .....</b>	<b>46</b>
3.1.8	<b>Espaçadores .....</b>	<b>46</b>
3.2	PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA.....	47
3.3	ANÁLISES .....	51
3.3.1	<b>Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM).....</b>	<b>52</b>
3.3.2	<b>Calibração .....</b>	<b>53</b>

<b>3.3.3</b>	<b>Iniciação .....</b>	<b>54</b>
<b>3.3.4</b>	<b>Propagação .....</b>	<b>55</b>
3.4	VARIÁVEIS DA PESQUISA.....	59
3.5	ENSAIOS REALIZADOS .....	60
<b>3.5.1</b>	<b>Microscopia Ótica .....</b>	<b>60</b>
<b>3.5.2</b>	<b>Ensaio Colorimétrico.....</b>	<b>61</b>
<b>3.5.3</b>	<b>Redimensionamento a Laser .....</b>	<b>64</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>67</b>
4.1	ANÁLISE DA MICROSCOPIA ÓTICA .....	67
4.2	ANÁLISE DA INICIAÇÃO DA CORROSÃO.....	72
<b>4.2.1</b>	<b>Análise Qualitativa da Iniciação .....</b>	<b>73</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Análise Quantitativa da Iniciação .....</b>	<b>79</b>
4.3.	ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO .....	87
<b>4.3.1</b>	<b>Análise Qualitativa da Propagação .....</b>	<b>89</b>
<b>4.4.2</b>	<b>Análise Quantitativa da Propagação.....</b>	<b>92</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>6</b>	<b>SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>102</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>103</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Cobrimentos de armadura na versão de 1978 da NBR 6118.....	12
Figura 2 – Cobrimentos de armadura na versão de 2003 da NBR 6118.....	12
Figura 3 – Pilha eletroquímica formada no processo de corrosão .....	18
Figura 4 – Processo de fissuração do concreto causado pela corrosão das armaduras .....	20
Figura 5 – Cobrimento de armadura na versão de 2014 da NBR 6118 .....	24
Figura 6 – Seção transversal mostrando a inserção dos espaçadores de argamassa e de plástico .....	29
Figura 7 – Espaçador de argamassa fabricado em obra.....	31
Figura 8 – Espaçador de plástico circular .....	32
Figura 9 – Espaçador centopeia de plástico .....	33
Figura 10 – Espaçador cavalete de plástico.....	33
Figura 11 – Espaçador torre ou cadeirinha de plástico .....	34
Figura 12 – Espaçador torre de argamassa .....	35
Figura 13 – Espaçador prisma de argamassa.....	35
Figura 14 – Espaçamento irregular e armadura negativa fora da posição .....	38
Figura 15 – Esquema das análises da pesquisa .....	41
Figura 16 – Distribuição granulométrica dos agregados miúdos.....	43
Figura 17 – Distribuição granulométrica dos agregados graúdos .....	44
Figura 18 – Espaçadores utilizados na pesquisa .....	46
Figura 19 – Medidas dos espaçadores .....	47
Figura 20 – Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores.....	48
Figura 21 – Preenchimento das formas com concreto.....	49
Figura 22 – Corpos de prova já moldados .....	49
Figura 23 – Ligação dos corpos de prova à fonte .....	54
Figura 24 – Grau de corrosão pela Lei de Faraday.....	56
Figura 25 – Regressão linear entre os valores do grau de corrosão previsto e o grau de corrosão experimental na fase da propagação .....	57
Figura 26 – Esquema de ligação dos corpos de prova com a fonte de alimentação.....	58
Figura 27 – Esquema da ligação em série (vista superior) .....	59
Figura 28 – Microscópio SteREO Discovery.V12.....	61

Figura 29 – Aspersão de Solução de Nitrato de Prata sobre o corpo de prova para verificação da penetração de cloretos.....	62
Figura 30 – Vista do programa utilizado para o cálculo da área de ascensão dos cloretos.....	63
Figura 31 – Rompimento dos corpos de prova para extração da barra de armadura .....	64
Figura 32 – Procedimento de limpeza das barras .....	65
Figura 33 – Barra de armadura durante o processo de digitalização .....	66
Figura 34 – Nomenclatura dos espaçadores.....	67
Figura 35 – Aparência dos corpos de prova após serem deformados .....	68
Figura 36 – Corpo de prova com espaçador centopeia após os ciclos de calor.....	69
Figura 37 – Imagens de corpos de prova no microscópio ótico (a) Centopeia de plástico sem estresse térmico; (b) Centopeia de plástico com estresse térmico; (c) Torre de plástico sem estresse térmico; (d) Torre de plástico com estresse térmico	70
Figura 38 – Imagens de corpos de prova no microscópio ótico (a) Prisma de argamassa sem estresse térmico; (b) Prisma de argamassa com estresse térmico; (c) Torre de argamassa sem estresse térmico (d) Torre de argamassa com estresse térmico .....	71
Figura 39 – Resultados da aplicação das voltagens de 10 V, 20 V e 30 V .....	72
Figura 40 – Medição da ascensão de cloretos após 24h de exposição .....	73
Figura 41 – (a) Referência 2 dias; (b) Referência 6 dias; (c) Referência 10 dias .....	74
Figura 42 – (a) Torre de argamassa 2 dias; (b) Torre de argamassa 6 dias; (c) Torre de argamassa 10 dias .....	74
Figura 43 – (a) Prisma de argamassa 2 dias; (b) Prisma de argamassa 6 dias; (c) Prisma de argamassa 10 dias .....	75
Figura 44 – (a) Torre de plástico 2 dias; (b) Torre de plástico 6 dias; (c) Torre de plástico 10 dias.....	75
Figura 45 – (a) Centopeia de plástico 2 dias; (b) Centopeia de plástico 6 dias; (c) Centopeia de plástico 10 dias .....	76
Figura 46 – (a) Torre de argamassa 2 dias; (b) Torre de argamassa 6 dias; (c) Torre de argamassa 10 dias .....	76
Figura 47 – (a) Prisma de argamassa 2 dias; (b) Prisma de argamassa 6 dias; (c) Prisma de argamassa 10 dias .....	77

Figura 48 – (a) Torre de plástico 2 dias; (b) Torre de plástico 6 dias; (c) Torre de plástico 10 dias.....	78
Figura 49 – (a) Centopeia de plástico 2 dias; (b) Centopeia de plástico 6 dias; (c) Centopeia de plástico 10 dias .....	78
Figura 50 – Localização da maior profundidade de ascensão dos cloretos .....	86
Figura 51 – Corpos de prova após aceleração da corrosão e antes do rompimento	87
Figura 52 – (a) e (b) Barra sem corrosão; (c) Referência com corrosão .....	89
Figura 53 – (a) Torre de argamassa sem estresse térmico; (b) Torre de argamassa com estresse térmico .....	90
Figura 54 – (a) Prisma de argamassa sem estresse térmico; (b) Prisma de argamassa com estresse térmico .....	90
Figura 55 – (a) Torre de plástico sem estresse térmico; (b) Torre de plástico com estresse térmico .....	91
Figura 56 – (a) Centopeia de plástico sem estresse térmico; (b) Centopeia de plástico com estresse térmico .....	91

**LISTA DE GRÁFICOS**

Gráfico 1 – Controle da resistência à compressão do concreto .....	45
Gráfico 2 – Ilustração do processo de ciclos de calor .....	50
Gráfico 3 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador torre de argamassa.....	79
Gráfico 4 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador prisma de argamassa.....	80
Gráfico 5 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador torre de plástico .....	81
Gráfico 6 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador centopeia de plástico.....	81
Gráfico 7 – Área de ascensão de cloretos em corpos de prova com diferentes espaçadores submetidos à cura úmida.....	82
Gráfico 8 – Área de ascensão de cloretos em corpos de prova com diferentes espaçadores submetidos a ciclos de calor .....	83
Gráfico 9 – Porcentagem de área de ascensão de cloretos para os diferentes espaçadores aos 10 dias de exposição .....	84
Gráfico 10 – Profundidade máxima de penetração de cloretos para os diferentes espaçadores aos 10 dias de exposição .....	85
Gráfico 11 – Escaneamento da barra com e sem corrosão .....	92
Gráfico 12 – Área da seção transversal das barras para o espaçador torre de argamassa.....	93
Gráfico 13 – Área da seção transversal das barras para o espaçador prisma de argamassa.....	93
Gráfico 14 – Área da seção transversal das barras para o espaçador torre de plástico .....	94
Gráfico 15 – Área da seção transversal das barras para o espaçador centopeia de plástico .....	94
Gráfico 16 – Cura úmida (sem estresse térmico) .....	95
Gráfico 17 – Ciclos de calor (com estresse térmico) .....	96

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 – Coeficientes de Dilatação Térmica Linear de diferentes materiais .....	30
Tabela 2 – Características qualitativas associadas aos níveis de controle da execução dos elementos de concreto armado .....	37
Tabela 3 – Caracterização química do cimento .....	42
Tabela 4 – Caracterização física do cimento.....	42
Tabela 5 – Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos .....	42
Tabela 6 – Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos .....	43
Tabela 7 – Traço .....	45
Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção e índice de vazios do concreto .....	46
Tabela 9 – Plano de concretagem dos corpos de prova .....	51
Tabela 10 – Variáveis da pesquisa .....	60
Tabela 11 – Designação dos cloretos em relação à superfície do concreto .....	63
Tabela 12 – Perda de massa considerando os diferentes espaçadores e influência da condição de exposição.....	88



## 1 INTRODUÇÃO

Um projeto bem elaborado deve conceder segurança às estruturas e assegurar-lhes comportamento eficiente em serviço, além de aparência aceitável. Dessa maneira, devem ser observadas as exigências relacionadas à capacidade, bem como às condições de uso para as quais a edificação foi projetada e, em especial, às especificações referentes à durabilidade. Nesse sentido, os erros de projeto, em conjunto com a utilização de materiais inapropriados, representam uma parcela relevante das ocorrências relacionadas ao aparecimento de manifestações patológicas. Outro aspecto importante para a vida útil das estruturas é a avaliação do grau de agressividade do meio ambiente. A fim de que sejam elaboradas especificações adequadas, torna-se essencial entender o comportamento dos materiais que compõem a estrutura quando submetida a diversas condições de exposição.

O concreto é um material que apresenta elevada resistência às tensões de compressão; entretanto, apresenta baixa resistência à tração (aproximadamente 10% de sua resistência à compressão). Dessa forma, é imprescindível agregar ao concreto um material com elevada resistência à tração, com a finalidade de suportar as tensões de tração atuantes, se disposto de maneira conveniente. Esse material composto é chamado de *concreto armado*. No concreto armado, as barras de armadura têm função de absorver as tensões de tração, e o concreto, de absorver as tensões de compressão.

Além disso, o conceito de concreto armado engloba também o fenômeno da aderência (TAVARES, 2012). É primordial que exista aderência entre o concreto e a armadura, uma vez que não basta somente juntar os dois materiais para se obter o concreto armado. Em suma, pode-se definir concreto armado como a junção e a aderência do concreto simples com um material resistente à tração – o aço – envolvido pelo concreto de tal maneira que ambos resistam solidariamente aos esforços solicitados.

A primeira teoria acerca do dimensionamento das peças de concreto armado surgiu em 1902, com uma publicação do pesquisador E. Mörsch, engenheiro e

professor da Universidade de Stuttgart. Suas teorias foram elaboradas a partir de ensaios experimentais, dando origem às primeiras normas para o cálculo e a construção em concreto armado. A treliça clássica de Morsch (estrutura reticulada resultante da combinação de diversas barras entrelaçadas) é uma das maiores invenções em concreto armado, sendo ainda aceita nos dias atuais (CARVALHO, 2008).

No Brasil, o assunto começou a ganhar evidência em 1904, quando foram construídas as primeiras casas e sobrados em concreto armado no bairro de Copacabana (RJ). Posteriormente, em 1908, foi construída no Rio de Janeiro uma ponte com 9 m de vão livre, executada pelo construtor Echeverria, com projeto e cálculo do francês François Hennebique. Em 1909, foi construída a ponte na Rua Senador Feijó, com vão de 5,4 m.

O motivo pelo qual o concreto armado é frequentemente utilizado em construções de diferentes portes e tamanhos ao redor do mundo se deve a algumas características importantes (FRANCO, 2008):

- Adaptabilidade: favorece a arquitetura pela sua simples modelagem.
- Conservação: de maneira geral, o concreto é durável, desde que utilizada dosagem adequada.
- Economia: principalmente no Brasil, os seus componentes são facilmente encontrados e possuem um custo relativamente baixo.
- Impermeabilidade: apresenta características impermeáveis, desde que dosado e executado da maneira correta.
- Rapidez de construção: a execução e o recobrimento são relativamente rápidos.
- Resistência a choques e vibrações: os problemas de fadiga são menores com estruturas de concreto armado do que as executadas com materiais que conduzam a um peso próprio menor.
- Segurança contra o fogo: desde que a armadura seja protegida por um cobrimento mínimo adequado de concreto, a estrutura desempenha uma proteção contra o fogo maior do que em estruturas puramente metálicas.

A durabilidade do concreto armado tem relação com quatro fatores: traço, compactação, cura e cobrimento (espessura em relação ao posicionamento das armaduras) (COUTO *et al.*, 2013). Entre esses fatores, o cobrimento representa a maior influência na durabilidade, o qual só poderá ser garantido com o uso adequado de espaçadores. Portanto, a durabilidade está diretamente relacionada com a utilização de espaçadores. O uso de espaçadores (também chamados de distanciadores) fixados às armaduras é um recurso de grande valia durante a execução de uma estrutura, para garantir o cobrimento das armaduras e para assegurar seu posicionamento no centro das formas. Esses elementos podem ser confeccionados em materiais variados, como argamassa ou plástico de alta densidade.

Existem vários tipos de espaçadores; contudo, todos devem seguir uma premissa básica: resistir às cargas das ferragens e do próprio concreto, a fim de evitar deformações. Além disso, devem ser concebidos de forma a não deixar caminhos para a penetração do ar e da água entre a superfície e a armadura. Sem a utilização dos espaçadores, ou com o uso inadequado destes, corre-se o risco de gerar problemas graves de estrutura, tendendo a apresentar diminuição considerável de sua vida útil (VAQUERO, 2007).

Entre os problemas está a corrosão de armadura, que é uma das mais relevantes manifestações patológicas de estruturas em concreto armado, sendo responsável por prejuízos de até 0,5% do PIB (RIBEIRO, 2014). A ausência de recobrimento adequado das armaduras de concreto armado, fora dos padrões de valores mínimos especificados pela NBR 6118 (ABNT, 2014), pode acarretar processos de corrosão das armaduras. Isso pode levar a manifestações como a expulsão da capa de cobrimento das armaduras, influenciando de maneira negativa na aderência e causando fissuramento e/ou falha no funcionamento do sistema impermeabilizante, entre outros.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivos Gerais

O principal objetivo estabelecido para a presente pesquisa é analisar o comportamento dos espaçadores de plástico e de argamassa industrializados mais usados no mercado do ponto de vista da corrosão do aço por íons cloreto e das diferentes condições de exposição – sem estresse térmico e com estresse térmico (ou cura úmida e ciclos de calor). A partir dos resultados obtidos, pretende-se então determinar quais modelos apresentam melhor desempenho para a vida útil de estruturas dispostas a frentes agressivas.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Visando atender o objetivo principal da pesquisa, definiu-se como objetivos específicos:

- a) Avaliar a taxa de ingresso de cloretos para o método proposto na iniciação da corrosão, para os quatro tipos de espaçadores analisados (torre de argamassa, prisma de argamassa, torre de plástico, centopeia de plástico);
- b) Verificar a diferença de interface entre espaçadores de plástico e de argamassa;
- c) Avaliar, tanto na iniciação quanto na propagação, a influência da condição de exposição em relação à ascensão de íons cloreto nos diferentes espaçadores;
- d) Avaliar, na propagação da corrosão, em qual local do aço ocorre a maior perda de massa.

## 1.2 A PESQUISA

A elucidação a respeito do tema proposto pelo trabalho é fundamental para o entendimento de quão relevantes são os espaçadores em estruturas de concreto armado. Para tanto, na sequência estão apresentadas as questões da pesquisa, bem como as delimitações do trabalho.

### 1.2.1 Questões de Pesquisa

Em síntese, busca-se com o desenvolvimento desta pesquisa prover respostas para as seguintes perguntas:

- De que maneira diferentes tipos de espaçadores afetam o desempenho de estruturas de concreto armado diante do ataque de íons cloreto?
- Como se dá a diferença da ascensão da penetração de cloretos no concreto nos dois tipos de materiais de espaçadores (plástico e argamassa)?
- Diante de estresse térmico<sup>1</sup> e na presença de espaçadores plásticos (situação em que se tem diferentes coeficientes de dilatação entre os o plástico e o concreto), haverá interferência na entrada de íons cloreto? Como se comporta a interface concreto-espaçador com estresse térmico e sem estresse térmico antes de passar pelo processo de corrosão acelerada?
- Através da propagação da corrosão nas armaduras, em que local do aço acontece a maior perda de massa?
- Qual o material e modelo de espaçador que se recomenda utilizar em estruturas de concreto armado para minimizar o ataque de cloretos à armadura?

### 1.2.2 Delimitações

Entre as delimitações da pesquisa, destaca-se a utilização apenas de concreto com resistência à compressão de 25 MPa, resistência muito usual em obras, principalmente no Rio Grande do Sul. Adições de fibras e de materiais pozolânicos foram descartadas, dado que dificultam a passagem de corrente elétrica, assim como cimentos pozolânicos, que poderiam dificultar o processo de corrosão acelerada. Foi definida a utilização do cimento Portland tipo CP V-ARI.

---

<sup>1</sup> O estresse térmico é entendido aqui como o processo que ocorre quando o concreto armado sofre uma exposição a ciclos de calor. É a imposição de ciclos de variação de temperatura, a fim de verificar os efeitos em termos de microfissuração da interface, que pode ser ocasionada pelos diferentes coeficientes de dilatação dos materiais (SILVA FILHO, 2016).

Foram estudados apenas dois tipos de espaçadores de plástico e dois de argamassa, que atendiam ao cobrimento mínimo (25 mm) e ao máximo (50 mm), estabelecidos na NBR 6118/2014. Buscou-se criar um ambiente com exposições a agressões ambientais provenientes de cloretos, com grau de agressividade de moderada a muito forte. Também não foi considerada, para fins desta pesquisa, a questão dos diversos tipos de revestimentos aplicados sobre o concreto em obras reais.

Foi utilizada apenas uma técnica de aceleração da corrosão, baseada no método do ensaio CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada), com aplicação de voltagem constante na iniciação e corrente constante na propagação. Também se definiu um grau de corrosão de 20% de perda de massa para os ensaios que levam em conta a propagação da corrosão. Optou-se por esse método em função dos resultados obtidos por vários pesquisadores do Laboratório de Modelos Estruturais da UFRGS (JADOVSKI *et al.*, 1992; SELISTRE *et al.*, 1993, 1994; MARCHESAN *et al.*, 1997; KIRCHHEIM *et al.*, 2005; TORRES, 2006; GRAEFF, 2007; CAETANO, 2008).

Neste trabalho, não será abordado o estudo sobre o efeito da carbonatação, uma vez que o programa experimental desta dissertação é baseado em corrosão de armadura por ataque de íons cloreto. Porém, sabe-se que as estruturas de concreto armado, quando sujeitas à corrosão de armaduras por ação da carbonatação, têm sua vida útil reduzida, com consequências graves na estabilidade global, na segurança, na estética e nos custos de manutenção.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Autores como Mehta e Monteiro (2014) mencionam que o índice de consumo do concreto é muito maior atualmente do que há 50 anos. Estima-se que esse consumo atual de concreto no mundo seja na ordem de 19 bilhões de toneladas métricas ao ano. Esse concreto é composto de água, cimento, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (pedra ou brita) e, em algumas situações, de aditivos e adições. Porém, na maior parte das vezes, o concreto não é utilizado sozinho; é aí que surge o concreto armado, o qual tem como vantagens o baixo custo em comparação com outros materiais estruturais, a resistência contra fogo e água, e a durabilidade. Embora não seja a única opção, o concreto armado é a técnica mais utilizada em todo o mundo para a construção de estruturas (KAEFER, 1998).

Além da sua elevada resistência mecânica, o concreto também tem a incumbência de proteger as armaduras, cobrindo o aço de modo a evitar seu contato direto com agentes corrosivos, como água e atmosferas poluídas. Em suma, quanto mais espessa for a camada de concreto sobre o aço, maior será a sua proteção contra a corrosão.

Quando não estão bem protegidas pelo concreto, as barras de aço podem vir a sofrer agressões do meio ambiente, podendo culminar em sua integral corrosão e consequente estabilidade comprometida da construção.

Nesse sentido, a importância dos espaçadores já está consolidada, bem como as possíveis manifestações patológicas causadas pelo seu mau uso. No entanto, a produção científica que relaciona especificamente o tipo de espaçador com a corrosão das armaduras ainda é limitada.

No âmbito da corrosão, o trabalho de Cascudo (1997), intitulado *O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas*, apresenta grande relevância. Nele, o autor destaca que a corrosão de armaduras é a principal manifestação patológica em estruturas de concreto armado. A incidência cada vez maior do fenômeno, aliada aos custos elevados que envolvem a deterioração do material e o risco de comprometimento da estabilidade estrutural são provas disso. Dentro desse contexto, o trabalho propõe uma metodologia para a inspeção das

estruturas, debatendo alternativas para a execução de reparos, e trazendo técnicas eletroquímicas voltadas para o monitoramento, avaliação e estudo da corrosão das armaduras.

Já a Tese de Doutorado produzida por Jairo José de Oliveira Andrade (2001), intitulada *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos*, debate vários aspectos originais. Primeiramente, são apresentados os principais mecanismos de transporte de massa dos materiais porosos, que fundamentam os mecanismos de degradação das estruturas, relacionando-os à corrosão das armaduras. Em um segundo momento, são apresentados os diversos parâmetros que influenciam na vida útil de uma estrutura de concreto armado, cujos principais modelos de penetração de cloretos são discutidos.

Como uma leitura mais atual, apresenta-se o livro *Corrosão em estruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise* (RIBEIRO, 2014), que traz uma análise detalhada sobre o assunto. Na introdução, escrita pelo Prof. Paulo Helene, é mostrada uma visão sistemática do problema da corrosão. Segundo Helene:

(...) desde a década de 1890, a comunidade técnica internacional tem dedicado majoritariamente sua atenção aos problemas de corrosão de armaduras, buscando os melhores caminhos para a especificação e o projeto de obras novas assim como para execução de reparos, reforços e reconstrução de um sem-número de obras com problemas patológicos. (HELENE, 2014, p. 3)

O autor salienta que a conscientização sobre o problema da corrosão de armaduras não é tarefa fácil, pois essa corrosão é, até certo ponto, considerada invisível. O problema só vem a aparecer com vários anos de uso da estrutura; raríssimas são as ocasiões em que a corrosão se manifesta em menos de dois anos. Assim, em muitos casos fica uma falsa impressão de que esses problemas não têm nada a ver com decisões equivocadas de projeto e má execução da estrutura.

Os estudos sobre espaçadores limitam-se a poucos textos acadêmicos, que enfocam a análise dos tipos e da distribuição de espaçadores nas armaduras. Estudos relevantes na área são de Takata (2009), que realizou um estudo de caso em obras, apresentando situações reais da execução de estruturas de concreto. O autor



observou que os projetos e materiais utilizados em geral são de qualidade, com metodologias previstas para tentar melhorar a obra. Porém, essas metodologias não estão sendo colocadas em prática, por falta de treinamento, qualificação e fiscalização da mão de obra contratada.

Silva (2012) realizou um estudo em que o objetivo principal foi comparar os valores de cobertura em execução em obras de Porto Alegre em relação aos especificados em projeto. Pôde-se concluir que os valores do cobertura de armadura em 46% das medições não atendem ao valor estabelecido no projeto estrutural. O autor ainda salienta que “tal constatação é bastante preocupante, visto que o cobertura é um dos parâmetros utilizados para a determinação da durabilidade e previsão de vida útil das estruturas.” Logo, pode ocasionar diversos problemas estruturais e de manutenção relacionados à diminuição da durabilidade e vida útil da estrutura dos empreendimentos.

As pesquisas de Barreto (2014) e Maran (2015) fizeram com que o assunto *espaçadores* se tornasse tema de grande discussão. Barreto (2014) iniciou sua pesquisa identificando quão recorrente é o problema de cobrimentos insuficientes e quais suas prováveis causas. Também estabeleceu requisitos e critérios de desempenho baseados no comportamento em uso do produto; e como conclusão da pesquisa, evidenciou a grande necessidade do desenvolvimento de uma norma brasileira regulamentadora fundamentada em desempenho para os espaçadores. A autora salienta:

(...) fica comprovada a necessidade de uma norma regulamentadora para este produto, a fim de balizar a qualidade dos disponíveis no mercado, promovendo um aperfeiçoamento do material, bem como eliminação dos produtos insatisfatórios. (BARRETO, 2014, p. 102)

Maran (2015) fez uma análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobertura, com um foco mais voltado para as lajes de concreto armado. Ela realizou um estudo de caso em obras nos estados do Rio Grande do Sul e do Mato Grosso, cuja conclusão indicou uma grande variabilidade nos valores de cobertura encontrados. A partir do levantamento, observou-se que a tolerância de execução proposta em norma não é cumprida pelas empresas, e que nenhuma das empresas que foram analisadas apresentava qualquer metodologia

referente à medição e garantia da obtenção do cobrimento, seja pela distribuição e fixação dos espaçadores ou pelo cuidado dos operários durante a concretagem.

Com as novas exigências em relação à durabilidade, fica evidenciada a importância de estudos na área, especialmente relacionados à utilização de espaçadores.

Este capítulo apresenta na sequência uma revisão bibliográfica sobre os principais assuntos relacionados a esta pesquisa, como as normas de dimensionamento estrutural e de desempenho, as manifestações patológicas e a durabilidade, a corrosão de armaduras, a influência do cobrimento de armadura na vida útil das estruturas e os espaçadores.

## 2.1 NORMAS DE DIMENSIONAMENTO ESTRUTURAL E DE DESEMPENHO

No âmbito do dimensionamento de estruturas de concreto armado, a norma fundamental é a NBR 6118. A publicação da primeira edição da NBR 6118 caracterizou, em 1940, um importante marco de referência para o cálculo de estruturas de concreto. A norma foi oficializada por decreto do então Presidente Getúlio Vargas para uso obrigatório em obras públicas. Com apenas 24 páginas, essa versão foi influenciada pela DIN-1045. Chamada de NB-1, tinha como principal objetivo o dimensionamento das estruturas no estágio III.

Nessa evolução da norma, foram publicadas versões nos anos de 1960, 1978, 2003 e a última versão, em 2014. A cada nova publicação, a norma foi se aperfeiçoando. Nas versões mais atuais, merecem destaque os seguintes aspectos, que foram abordados de maneira mais aprofundada:

- Concretos com resistência até 90 MPa
- Concretos simples, armados e protendidos
- Garantia de qualidade (como obtê-la)
- Projetos de elementos estruturais especiais
- Durabilidade do concreto
- Classificação da agressividade no meio ambiente

- Limite mínimo do  $f_{ck}$  20 MPa para estruturas
- Elevação do cobrimento nominal nas armaduras

A norma também estabelece vários requisitos de qualidade para o concreto empregado nas estruturas, assim como o cobrimento mínimo das armaduras em função da agressividade do ambiente onde elas foram construídas. Vale destacar a mudança ocorrida no cobrimento nominal das armaduras de 1940 até hoje.

Os autores Santos, Sagave e Duarte (2011) comentam que as versões mais atuais da NBR 6118 trouxeram procedimentos que contribuem com a garantia da qualidade das estruturas de concreto, sobretudo no que diz respeito a sua durabilidade.

Na versão de 2003, foram introduzidas as classes de agressividade do ambiente – uma inovação em relação às edições anteriores. Também foram estabelecidos critérios de qualidade mínimos para o  $f_{ck}$  e a relação água/cimento ( $a/c$ ) do concreto utilizado em obra, levando-se em conta as condições de exposição dos elementos da estrutura de concreto às intempéries.

Outra medida ligada à vida útil diz respeito ao cobrimento das armaduras, definido também em função das condições de exposição da estrutura. Na versão de 1978, os cobrimentos não eram determinados em função das condições de exposição, como se pode observar na Figura 1. O cobrimento era determinado de acordo com o acabamento da estrutura, porém a norma não citava em que ambiente essa estrutura poderia ser encontrada.

Figura 1 – Cobrimentos de armadura na versão de 1978 da NBR 6118

6.3.3.1 Cobrimento	
Qualquer barra da armadura, inclusive de distribuição, de montagem e estribos, deve ter cobrimento de concreto pelo menos igual ao seu diâmetro, mas não menor que:	
a) para concreto revestido com argamassa de espessura mínima de 1 cm:	b) para concreto aparente:
- em lajes no interior de edifícios ..... 0,5 cm	- no interior de edifícios ..... 2,0 cm
- em paredes no interior de edifícios ..... 1,0 cm	- ao ar livre ..... 2,5 cm
- em lajes e paredes ao ar livre ..... 1,5 cm	c) para concreto em contato com o solo ..... 3,0 cm
- em vigas, pilares e arcos no interior de edifícios ..... 1,5 cm	- se o solo não for rochoso, sob a estrutura deverá ser interposta uma camada de concreto simples, não considerada no cálculo, com o consumo mínimo de 250 kg de cimento por metro cúbico e espessura de pelo menos 5 cm.
- em vigas, pilares e arcos ao ar livre ..... 2,0 cm	

Fonte: NBR 6118 - 1978

Na versão de 2003, surgiram então as classes de agressividade do meio ambiente. Essa versão mostrou-se bem mais criteriosa do que a anterior quanto aos cobrimentos estabelecidos, cujos valores mínimos apresentaram-se um pouco mais conservadores. Pode-se observar essa questão na Figura 2:

Figura 2 – Cobrimentos de armadura na versão de 2003 da NBR 6118

**Tabela 7.2 - Correspondência entre classe de agressividade ambiental e cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm**

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>3)</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>2)</sup>	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido <sup>1)</sup>	Todos	30	35	45	55

<sup>1)</sup> Cobrimento nominal da armadura passiva que envolve a bainha ou os fios, cabos e cordoalhas, sempre superior ao especificado para o elemento de concreto armado, devido aos riscos de corrosão fragilizante sob tensão.

<sup>2)</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento tais como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros tantos, as exigências desta tabela podem ser substituídas por 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>3)</sup> Nas faces inferiores de lajes e vigas de reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR 6118 - 2003

Na versão mais atual da norma, no ano de 2014, a principal mudança quanto à durabilidade foi o item do cobrimento em elementos com concreto protendido e em contato com o solo, no qual houve uma reorganização da tabela.

Nesse sentido, como forma de complementação, entrou em vigor em junho de 2013 a Norma de Desempenho de Edificações (NBR 15575), da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), que estabelece exigências de segurança, habitabilidade e sustentabilidade de edificações. Até então, nunca uma norma brasileira havia associado a qualidade de produtos ao resultado entregue ao cliente final, com instruções explícitas e transparentes de como fazer essa avaliação. As exigências estabelecidas na NBR 15575 beneficiam o consumidor e dividem obrigações entre fabricantes, projetistas, construtores e usuários.

Segundo o Eng. Francisco P. Graziano, em entrevista ao *site* TQS News (2013), os projetos das estruturas de edifícios deverão seguir as normas específicas; dessa forma, para uma estrutura de concreto armado, deve-se continuar utilizando a NBR 6118. A nova Norma de Desempenho NBR 15575 (ABNT, 2013), conforme Graziano, surge para preencher uma lacuna em relação ao estabelecimento de critérios de desempenho quanto à segurança das estruturas.

A NBR 15575 foi criada com a finalidade de orientar o desenvolvimento de projetos, estabelecendo requisitos de desempenho de edificações para o uso destas. Ela ressalta a importância da análise da durabilidade e define valores mínimos de vida útil esperada para cada subsistema. Assim, a norma gerou a necessidade de desenvolver e melhorar critérios e modelos de vida útil, entendendo como detalhes de cada situação impactam esse aspecto.

Para melhor compreensão do texto da Norma e da presente pesquisa, é importante definir alguns conceitos. A durabilidade está relacionada com a capacidade que partes de uma edificação têm de manter seu desempenho durante determinado tempo (SORONIS, 1992). Nireki (1996) definiu durabilidade como a habilidade de uma construção ou de partes dela, bem como componentes e materiais, de resistir às ações de agentes degradantes durante um tempo determinado.

Nesse sentido, o conceito de vida útil está ligado à durabilidade, e mais relacionado à questão do desempenho. Segundo as definições da Norma (ABNT, 2013):

período de tempo em que um edifício e/ou sistema se prestam a atividades para as quais foram projetados ou construídos, com atendimento dos níveis mínimos de desempenho previstos nesta Norma considerando a periodicidade e a correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo manual de uso, operação e manutenção (ABNT, 2013, p. 10).

Em relação ao desempenho, a Norma o define como “comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas” (ABNT, 2013, p. 6). Essa Norma especifica uma série de requisitos que cada um dos sistemas que formam uma edificação (estrutura, vedações, pisos, instalações e coberturas) deve contemplar.

Como decorrência do atendimento às normas, é esperada uma mudança na cultura da engenharia habitacional, passando pelas etapas de criação, edificação e manutenção. Segundo a norma, será necessário um olhar mais detalhado, começando pela concepção, passando pela definição do projeto, elaboração de plano de qualidade do empreendimento e um manual integral de operação, utilização e manutenção da edificação (ABNT, 2013).

A Norma de Desempenho deixa bem clara a relação entre seu cumprimento adequado e a vida útil. Percebe-se que o descumprimento dessa Norma está diretamente relacionado com a ocorrência de manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado.

## 2.2 MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS E DURABILIDADE

As manifestações patológicas em estruturas de concreto armado são comuns com o passar dos anos, uma vez que esse é um material que sofre reações quando em contato com o meio ambiente.

Em território brasileiro, é registrado um alto nível de deterioração dos imóveis, devido, especialmente, à ausência de controle dos processos construtivos, os quais influem de maneira expressiva no desempenho das estruturas de concreto armado

(HELENE; TERZIAN, 1993). Assim, a vida útil das estruturas depende das características do concreto e da espessura e qualidade do cobrimento da armadura. Para Neville e Brooks (2011), a durabilidade está associada à capacidade de um material de se manter em certo estado por um tempo determinado. Portanto, os parâmetros mínimos de qualidade do concreto a serem atendidos devem ser estabelecidos em ensaios de desempenho da durabilidade da estrutura, frente ao tipo e nível de agressividade ambiental previstos em projeto.

No decorrer da execução das estruturas de concreto armado (montagem de formas, armaduras e posicionamento do escoramento), surgem os fatores mais críticos que podem resultar em manifestações patológicas. Isso ocorre pelo fato de que a mão de obra, em muitos casos, não segue corretamente as orientações de projeto, por exemplo, com o mau posicionamento das formas, que diminui o cobrimento especificado (TAKATA, 2009).

Partindo do pressuposto de que o surgimento de manifestações patológicas é inevitável em decorrência das ações do meio ambiente, é essencial, no mínimo, que se tente minimizar a velocidade de seu surgimento. Nesse sentido, a realização correta de manutenção nas estruturas irá favorecer o cumprimento da sua função e a vida útil para a qual foram projetadas (OLIVEIRA, 2014). A diminuição da vida útil ocorre de forma consideravelmente mais lenta com manutenções preventivas e corretivas realizadas de maneira adequada e no tempo correto. A falta de manutenção faz com que manifestações patológicas até então irrelevantes evoluam para situações de desempenho insatisfatório, de deficiente aspecto estético, de iminente insegurança estrutural e de elevado custo de recuperação (OLIVEIRA, 2014).

Com a finalidade de quantificar, identificar ou diagnosticar as manifestações patológicas mais frequentes em estruturas de concreto armado, Helene (2014) cita estudos aprofundados no tema em vários países. Entre eles está um levantamento realizado por norte-americanos sobre a incidência de manifestações patológicas em estruturas de concreto. Nele se conclui que uma grande quantidade de recursos – em torno de 50 bilhões de dólares por ano – é utilizada para reparos decorrentes dessas manifestações.

Helene (2014) também salienta um estudo realizado pelo GEHO (*Grupo Español del Hormigón*). Esse estudo afirma que, em 52 províncias espanholas, em

uma análise de 844 casos, a corrosão foi a causa de 15% do total de manifestações patológicas encontradas, somente atrás de fissuras, cuja incidência chegou a 65%. Porém, estudos apontam que muitas vezes a origem da fissura pode estar mascarada pela corrosão de armaduras. O autor também apresenta estudos realizados por Antônio Carmona Filho e Arthur Marega, na obra intitulada *Retrospectiva da Patologia no Brasil*, nos quais aparecem dados de que a corrosão de armadura ocorreu em 27% do total dos casos analisados.

Com isso, o autor salienta:

a corrosão de armaduras em estruturas de concreto infelizmente tem grande incidência, tem acarretado acidentes fatais (...). Para evitar a ocorrência de corrosão em obras novas é necessário o conhecimento técnico atualizado e abrangente do problema. (HELENE, 2014, p. 6)

Dal Molin (1988) afirma que a corrosão de armaduras responde por 11,89% das fissuras presentes nas edificações do estado do Rio Grande do Sul. Segundo um estudo realizado na Região Amazônica por Aranha (1994), a corrosão em armaduras é responsável por 42,68% do total das manifestações patológicas encontradas em diferentes obras. Já no estudo feito na Andrade (1997), 64% das manifestações patológicas no estado de Pernambuco foram decorrentes da corrosão em armaduras.

Os problemas patológicos, salvo raras exceções, apresentam-se como manifestações de características externas, podendo-se assim deduzir qual a natureza, a origem e os mecanismos dos fenômenos envolvidos, assim como estimar possíveis consequências. Todo problema patológico, chamado de vício de construção, ocorre por meio de alguns mecanismos. No caso da corrosão de armaduras, os mecanismos principais são a carbonatação e a grande contaminação por íons cloreto. Entender e saber modelar os fenômenos que se apresentam na estrutura e no meio ambiente é de grande importância para os projetistas, para que eles possam, assim, adequar seus projetos aos aspectos de durabilidade (POLITO, 2006).

O fenômeno de corrosão de armaduras ocorre em função de diversos fatores que agem simultaneamente, devendo sempre ser analisado com uma visão sistêmica. Não é uma tarefa simples a de conscientização em relação aos problemas de corrosão, uma vez que os denominados sintomas visíveis geralmente só aparecem depois de vários anos de uso da estrutura – às vezes acima de 10 ou 15 anos. Raras



são as oportunidades em que um problema de corrosão se manifesta em curto prazo (menos de dois anos) ou mesmo durante a fase de execução de uma estrutura. Por esse motivo, há uma dificuldade de grande parte dos profissionais de Projeto e de Execução de obras em adotarem, ou mesmo entenderem e defenderem a utilização de medidas práticas de prevenção da corrosão.

Autores como Rosenberg *et al.* (1989), González *et al.* (1996), Cabral (2000) e Torres (2006) citam três consequências relevantes causadas pela corrosão de armaduras:

- Afeta a própria armadura, provocando a perda de seção e um decréscimo da resistência mecânica do concreto armado;
- No concreto, causa a fissuração e lascamento;
- Interfere na aderência na interface aço-concreto, inabilitando a transferência de tensões entre eles, prejudicando assim a funcionalidade da estrutura e sua vida útil.

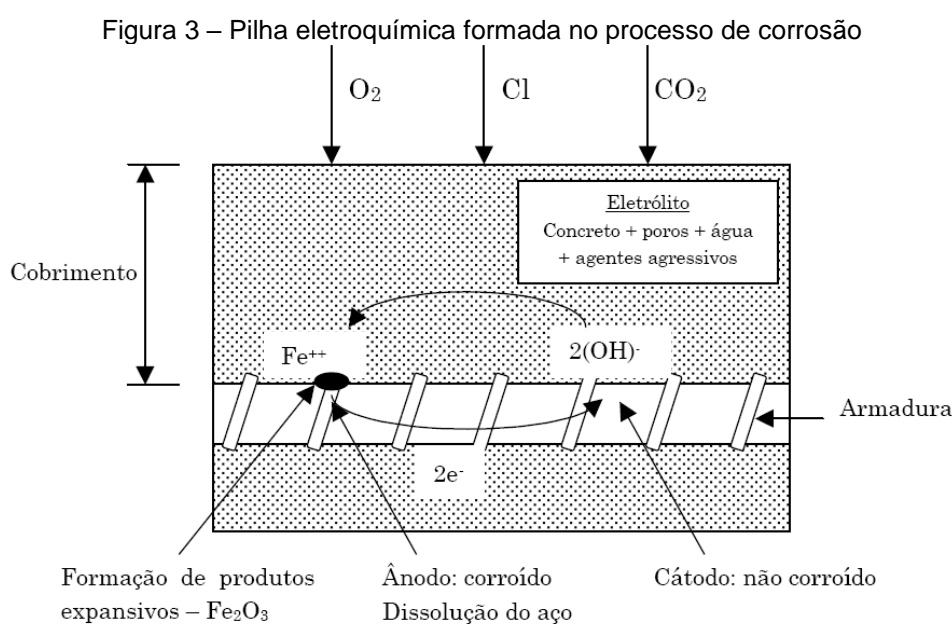
Devido à importância da corrosão de armaduras no que se refere à vida útil de estruturas de concreto armado, esse assunto é discutido mais detalhadamente a seguir.

### 2.3 CORROSÃO DE ARMADURAS

A corrosão das armaduras se caracteriza por ser um processo físico-químico gerador de óxidos e hidróxidos de ferro, que são denominados de produtos da corrosão. Estes ocupam um grande volume, o qual é superior ao volume original das barras metálicas. O mecanismo de corrosão pode ocorrer basicamente de duas formas: a primeira é a oxidação, que ocorre por uma reação gás-sólido na superfície do material; a segunda é chamada de corrosão eletroquímica, que é um tipo de deterioração observada por estruturas de concreto armado. Esses fenômenos de natureza expansiva podem levar ao aparecimento de tensões elevadas de tração no concreto, ocasionando, assim, a fissuração (ANDRADE, 2001).

De acordo com Helene (1993), todos esses fatores causam uma perda de seção transversal e de aderência entre a armadura e o concreto. Logo, passa a haver tensões entre os materiais, o que pode levar o elemento estrutural ao colapso.

A grande maioria dos ataques de corrosão de materiais é causada por ataques químicos, que ocorrem por uma ação eletroquímica. Segundo Cascudo (1997), esses mecanismos promovem a formação de pilhas eletroquímicas, gerando uma diferença de potencial, como pode ser observado na Figura 3.



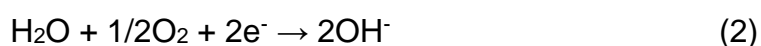
Fonte: Andrade, 2001, p. 23

Segundo Gentil (1996), essas pilhas são compostas por:

- Uma zona anódica, na qual ocorrem as reações de oxidação do ferro, com perda de elétrons e redução de massa, conforme a Equação 1:



- Uma zona catódica, na qual ocorre a redução (processo de ganho de elétrons) do oxigênio, não havendo perda de massa nesse trecho, conforme a Equação 2:



Para que haja a formação da pilha de corrosão, é necessária a existência de meios de transporte, para que os íons e os elétrons originários desse processo se movimentem entre as áreas anódicas e as catódicas. Os elétrons migram via contato direto metal-metal, e os íons, por dissolução e migração via solução. Resumindo, a combinação desses produtos de reações anódicas e catódicas gera os produtos de corrosão (GENTIL, 1996).

As armaduras podem sofrer os seguintes tipos de corrosão eletroquímica (RIBEIRO; CUNHA, 2014):

- Corrosão uniforme: corrosão em 100% da extensão da armadura quando esta fica exposta ao meio corrosivo;
- Corrosão puntiforme ou por pite: os desgastes são encontrados sob forma de pequenas cavidades, também conhecidas como alvéolos;
- Corrosão intragranular: é processada entre os grãos dos cristais do metal; quando os vergalhões sofrem principalmente tensões de tração, podem fraturar, perdendo assim sua estabilidade;
- Corrosão transgranular: é realizada nos intragrãos da rede cristalina, podendo levar à fratura da estrutura quando houver esforços mecânicos;
- Fragilização pelo hidrogênio: corrosão oriunda da ação do hidrogênio atômico na sua difusão pelos vergalhões da armadura, propiciando sua fragilização e, por consequência, a fratura. Dessa maneira, esse fenômeno é extremamente raro.

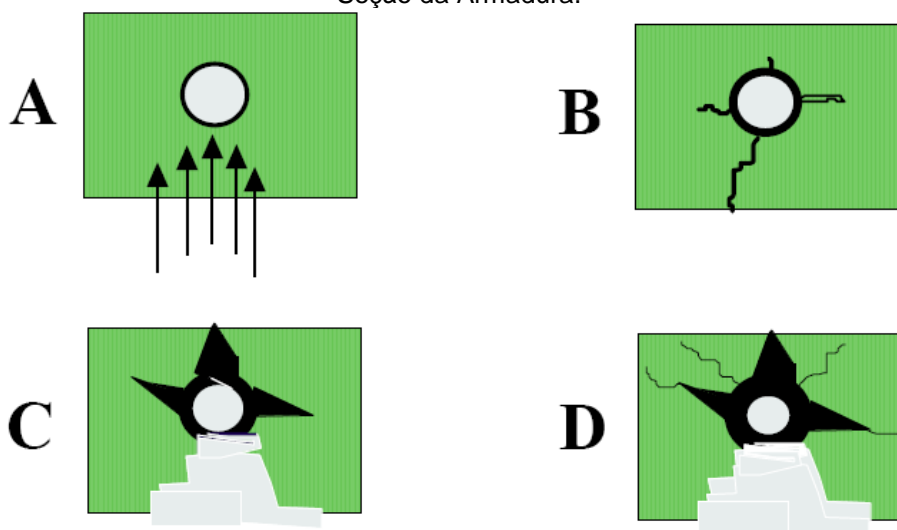
Conforme muitos autores afirmam (ANDRADE, 2001; GENTIL, 1996; CASCUDO, 1997; HELENE, 1993), existem dois agentes básicos que podem levar ao início do processo corrosivo: o gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) presente na atmosfera – que origina o fenômeno conhecido como carbonatação – e os íons cloreto ( $\text{Cl}^-$ ).

Nas regiões em que o recobrimento do concreto não é executado de forma compatível com o projeto, a corrosão começa a se tornar progressiva com a consequente formação de óxi-hidróxidos de ferro. Estes acabam ocupando volumes

de 3 a 10 vezes maiores do que o original do aço da armadura, podendo causar pressões de expansão superiores a 15 MPa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Inicialmente essas tensões provocam a fissuração do concreto em uma direção paralela à armadura corroída, favorecendo a carbonatação e a penetração do CO<sub>2</sub> e de outros agentes agressivos. Desse modo, isso pode causar o lascamento, isto é, a quebra do concreto, como apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Processo de fissuração do concreto causado pela corrosão das armaduras  
(A) Penetração de Agentes Agressivos; (B) Fissuração devido às Forças da Expansão dos Produtos de Corrosão; (C) Lascamento do Concreto e Corrosão Acentuada; (D) Redução Significativa da Seção da Armadura.



Fonte: Helene, 1999, p. 12

### 2.3.1 Iniciação da Corrosão

De acordo com Cascudo (1997), para que a corrosão da armadura seja iniciada, é necessário que agentes agressivos capazes de destruir a camada passivadora do aço atravessem o cobrimento do concreto e alcancem a armadura em concentrações suficientes para que seja provocada a sua despassivação.

A perda da passividade natural da armadura do concreto pode ser ocasionada em duas condições. A primeira delas é a presença de íons cloreto em quantidades suficientes para destruir de forma localizada a camada passivadora; esses íons podem advir tanto do meio externo por difusão, quanto do meio interno, através da água de amassamento, agregados contaminados ou até mesmo pela utilização de aditivos aceleradores de pega. A segunda condição é a diminuição da alcalinidade do

concreto. Essa redução de alcalinidade ocorre através da penetração de substâncias ácidas; em alguns casos pode se dar por ataque das águas, como é o caso da lixiviação. Assim, a despassivação acaba ocorrendo de forma generalizada pela redução da alcalinidade do concreto em regiões que estão próximas a armaduras (CASCUDO, 1997).

O processo pelo qual se inicia a corrosão envolve, além da despassivação da armadura, o mecanismo de transporte do CO<sub>2</sub> e dos íons cloreto, que se dá através dos poros do concreto. Assim, são de suma importância as características da estrutura dos poros e a capacidade dessas substâncias de se fixarem nesses poros. Outro fator que influencia na iniciação da corrosão é a grande fissuração do concreto, pois as fissuras se constituem como um caminho mais rápido de penetração dos agentes agressivos até a armadura, fazendo com que seja facilitado o acesso do oxigênio e da umidade – fatores necessários para que a corrosão seja iniciada (RIBEIRO; CUNHA, 2014).

### **2.3.2 Propagação da Corrosão**

Cascudo (1997) ressalta que, após despassivada a armadura, independentemente da forma como isso ocorre – pela ação de cloretos ou por carbonatação, ou ainda pelos dois fenômenos – inicia-se então o período de propagação. De acordo com Helene (1986), nesse processo, os produtos da corrosão são avermelhados, pulverulentos e porosos – denominados ferrugem. O autor ainda salienta que para ocorrer a corrosão, devem existir os seguintes elementos: eletrólito, diferença de potencial e oxigênio. Também podem estar presentes agentes agressivos. Esses elementos são descritos a seguir, conforme Helene (1999):

- Existência de um eletrólito: quem assume o papel de eletrólito é a água contida nos poros do concreto.
- Existência de diferença de potencial: essa diferença de potencial (ddp) é necessária para que o processo de formação da pilha eletroquímica ocorra, as causas dessas ddps podem ser diferenças de umidades, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço.
- Existência de oxigênio: é necessário que haja a presença de oxigênio para que ocorra a formação de ferrugem.

- Existência de agentes agressivos: estes contribuem para acelerar a corrosão; entre eles pode-se citar os íons sulfeto, os íons cloreto, o dióxido de carbono, os nitritos, os óxidos de enxofre.

Graeff (2007) ainda salienta que se qualquer um dos elementos acima não estiver presente, o fenômeno não se desenvolve. Entre as maneiras de contaminação do concreto, a corrosão por ataques de íons cloreto é uma das formas mais agressivas de deterioração das estruturas em concreto armado. Cascudo (1997) afirma que sua gravidade é particularmente grande no Brasil, pois o país possui uma grande faixa litorânea, na qual existem muitos prédios e obras construídas; estes estão submetidos à ação agressiva dos ambientes marinhos, ricos em cloretos.

## 2.4 INFLUÊNCIA DO COBRIMENTO DE ARMADURA NA VIDA ÚTIL DAS ESTRUTURAS

O cobrimento de armaduras de concreto armado, segundo Menezes e Azevedo (2009), tem como finalidade a proteção mecânica, química e física de uma estrutura de concreto armado. Essa proteção se dá das seguintes formas:

- Mecânica: impede o surgimento de células eletroquímicas que poderiam resultar na corrosão da armadura;
- Química: ocorre quando o concreto de cobrimento adquire um caráter alcalino;
- Física: caracterizada pela impermeabilidade, acontecendo quando o concreto possui compacidade, homogeneidade e elementos internos adequados.

O cobrimento deve preservar todas as barras da armadura. Ele é medido da face externa da estrutura até a barra mais rente dela (TAKATA, 2009). A existência da camada de cobrimento de concreto é fundamental no que se refere à proteção da armadura, pois ela atua como uma espécie de impermeabilizante da estrutura, evitando – na medida do possível – os processos de difusão. Esse é o processo com o qual está relacionada a grande maioria dos fatores causadores de corrosão (como a carbonatação, a penetração de íons agressivos e a entrada de oxigênio que possibilitaria as reações eletroquímicas).

O valor do cobrimento mínimo de armadura é indicado em todos os projetos estruturais. Para definir esse valor, é necessário analisar qual a classe de agressividade ambiental à qual a estrutura estará exposta. Dal Molin, em 1988, afirmou que é aconselhável, sempre que não interferir de maneira relevante no custo e no desempenho do elemento estrutural, que se execute a estrutura com um valor de cobrimento maior do que o mínimo, a fim de que a estrutura obtenha um grau de durabilidade maior.

Outros aspectos também podem intervir na qualidade do concreto de cobrimento. Destes, merecem destaque a cura da superfície e a compactação dos elementos, além de impedir “ninhos” e segregações. Quando se dobra o valor da espessura do cobrimento de concreto, a vida útil da armadura é ampliada em quatro vezes (DAL MOLIN, 1988).

Conforme prescreve a NBR 6118 (2014), para garantir o cobrimento mínimo da armadura ( $c_{min}$ ), que é a menor distância livre entre a face externa e a camada de barras mais próxima dessa face, o projeto estrutural e a execução devem considerar também o cobrimento nominal ( $c_{nom}$ ), que é o cobrimento mínimo acrescido da tolerância de execução ( $\Delta c$ ), que a norma define em 10 mm.

Neto (2006) menciona que os cobrimentos nominais levam em consideração as falhas dos processos produtivo e construtivo; logo, consideram a impossibilidade de se obter retilidade nas barras, quando aplicadas. Considera-se que, se for aplicado diretamente o cobrimento efetivo na obra, a não retilidade das barras irá ocasionar que diversos pontos tenham um cobrimento menor, por conta das deformações das barras de superfície e estribos, além das imperfeições de amarração. Assim, Neto enfatiza o motivo de a NBR 6118 acrescentar as dimensões dos cobrimentos efetivos necessários à durabilidade; foram acrescentados 10 mm ao valor do cobrimento mínimo, perfazendo o cobrimento nominal, que deve ser prescrito em projeto.

A Norma 6118 também permite uma redução nessa tolerância. Quando houver um adequado controle de qualidade e rígidos limites de tolerância da variabilidade das medidas durante a execução, pode ser adotado o valor  $\Delta c = 5$  mm. Porém, a exigência de controle rigoroso deve ser explicitada nos desenhos do projeto. Os valores estabelecidos pela versão de 2014 da NBR 6118 podem ser vistos na Figura 5:

Figura 5 – Cobrimento de armadura na versão de 2014 da NBR 6118  
Tabela 7.2 – Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal para  $\Delta c = 10$  mm

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV <sup>c</sup>
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje <sup>b</sup>	20	25	35	45
	Viga/pilar	25	30	40	50
	Elementos estruturais em contato com o solo <sup>d</sup>	30		40	50
Concreto protendido <sup>a</sup>	Laje	25	30	40	50
	Viga/pilar	30	35	45	55

<sup>a</sup> Cobrimento nominal da bainha ou dos fios, cabos e cordoalhas. O cobrimento da armadura passiva deve respeitar os cobrimentos para concreto armado.

<sup>b</sup> Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal  $\geq 15$  mm.

<sup>c</sup> Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

<sup>d</sup> No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal  $\geq 45$  mm.

Fonte: NBR 6118, 2014

Helene (2004) enfatiza, em seus estudos de vida útil de estruturas de concreto utilizando o modelo de estimativa com base nas experiências anteriores, que em 1910, quando foi publicada a primeira norma norte-americana para o projeto e a construção de obras em concreto armado, já se especificava cobrimentos mais rigorosos. Os norte-americanos tinham uma postura de especificar espessuras de cobrimento de concreto adequadas às armaduras; isso perdura até os dias atuais. Helene fez um comparativo entre a norma norte-americana e a brasileira daquela época, e chegou à conclusão de que a norma brasileira era muito mais ousada, permitindo cobrimentos bem inferiores e desprezando a agressividade do meio ambiente. Logo, tem-se hoje o resultado dos enormes prejuízos causados, com a perda precoce da vida útil de inúmeras obras públicas e privadas. O autor salienta que a norma brasileira, àquela época, era temerária, quase irresponsável.

Em estudos mais recentes na área, pode-se citar a Tese de Doutorado de Possan (2010), que realizou previsões de vida útil, abordando também a importância da espessura de cobrimento. A autora afirma que a qualidade do concreto, a espessura de cobrimento e a cura controlam a permeabilidade, a porosidade e a



difusão. Estas, por sua vez, dificultam ou facilitam o ingresso dos agentes agressivos para o interior do concreto.

Possan (2010) afirma ainda que, no que se refere à espessura de cobrimento e à resistência à compressão do concreto, estes dois parâmetros têm grande influência na vida útil. Suas pesquisas concluíram que o aumento da espessura de cobrimento e da resistência à compressão eleva a vida útil da estrutura. Ela cita:

Concretos com resistência de 40 MPa, associados à espessura de cobrimento de 30 mm, podem atingir uma vida útil superior a 100 anos, enquanto que concretos com 20 MPa e espessura de cobrimento de 60 mm não atingem 50 anos. De fato, concretos de resistências reduzidas (20 MPa) conduzem a elevadas profundidades de carbonatação. (POSSAN, 2010, p. 214)

Para superar o desafio atual de se obter estruturas de concreto armado com vida útil de 75 anos, busca-se atrasar ao máximo o início da corrosão, processo no qual a espessura de cobrimento tem fundamental importância (WEYERS, 1998). Freire (2005) afirma que a espessura do cobrimento da armadura é um fator importante de controle da movimentação dos íons agressivos: quanto maior a espessura, maior o intervalo de tempo até que as concentrações dos íons atinjam a armadura. Assim, a qualidade do concreto quanto à baixa penetrabilidade e a espessura do cobrimento atuam em conjunto.

O tempo para o início da corrosão de armaduras em concreto é considerado relativamente curto, em geral alguns anos (SHI *et al.*, 2012). No entanto, existe um conceito geral de que para se obter uma melhora considerável na durabilidade do concreto armado, duas características são fundamentais: a qualidade do concreto e a espessura do cobrimento (SHI *et al.*, 2012). O cobrimento é de fundamental importância, pois atrasa o início da corrosão; porém, deve ser mantido dentro de certos limites por razões de esforços mecânicos e de ordem prática (HARTT *et al.*, 1999).

A proteção contra corrosão pode ocorrer de diversas maneiras: com a adição de inibidores de corrosão ao concreto, o uso de concreto de alto desempenho, um cobrimento adequado, o uso de aço inoxidável e de sistemas de proteção catódica. Todavia, entre esses métodos, o mais atrativo, devido ao custo mais acessível, é a utilização de uma camada adequada de cobrimento (CRIADO *et al.*, 2016).

O cobrimento do concreto somente pode ser garantido com a utilização adequada de espaçadores. Eles são os principais responsáveis por garantir a proteção da armadura.

## 2.5 ESPAÇADORES

Os espaçadores de armadura têm a função de posicionar e manter a armadura em um determinado local durante o processo de concretagem, garantindo o cobrimento pelo concreto, evitando assim exposição e corrosão do aço. Existem diversos tipos de espaçadores, entre eles o caranguejo e as pastilhas argamassadas, que podem ser confeccionados na própria central de corte e dobra do canteiro. No entanto, seu custo-benefício é mais baixo, e eles podem diminuir a velocidade da obra. Existem também peças prontas de fábrica, como espaçadores de plástico e de argamassa, que elevam a produtividade e, dependendo do modelo de contratação da execução das armaduras, podem chegar a um custo final menor.

Takata (2009) afirma que os espaçadores servem para manter a armadura na posição durante a montagem, o lançamento e adensamento do concreto, a fim de garantir o cobrimento mínimo orientado no projeto. Existem alguns tipos de espaçadores, específicos para cada caso, atendendo às demandas pontuais de cada estrutura em determinados ambientes. A NBR 14931 descreve a utilização correta dos espaçadores:

O cobrimento especificado para a armadura no projeto deve ser mantido por dispositivos adequados ou espaçadores e sempre se refere à armadura mais exposta. É permitido o uso de espaçadores de concreto ou argamassa, desde que apresente relação água/cimento menor ou igual a 0,5, e espaçadores plásticos, ou metálicos com as partes em contato com a fôrma revestidas com material plástico ou outro material similar. Não devem ser utilizados calços de aço cujo cobrimento, depois de lançado o concreto, tenha espessura menor do que o especificado no projeto. (ABNT, NBR 14931, 2004, Item 8.1.5.5, p. 13)

No Brasil, não existe uma norma específica para espaçadores, apenas as normas que envolvem as estruturas de concreto citam a sua utilização. Também não existe um controle de qualidade, nem mesmo ensaios prescritos em normas para testes desses materiais; no entanto, esses problemas se estendem também a outros países.

Na Espanha, por exemplo, Vaquero (2007) cita que não existe um corpo normativo que permita avaliar os distintos espaçadores existentes no mercado e que possa estabelecer adequado padrão de desempenho para os projetos. Logo, eles acabam adotando as recomendações do Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB, 1990). Existe também a instrução espanhola EHE (2008), que indica que os espaçadores utilizados devem se constituir de materiais que resistam à alcalinidade do concreto e que não incitem a corrosão das armaduras. A instrução também proíbe a utilização de resíduos de tijolo, concreto, madeira, bem como qualquer outro material residual. Os espaçadores de argamassa devem ter a mesma qualidade dos materiais utilizados na execução.

O Reino Unido é quem está mais evoluído em relação a esse assunto. O país possui uma norma – Norma Britânica 7973-2 (2001) – que define os requisitos de desempenho, bem como os métodos de avaliação dos espaçadores. Além disso, também existem entidades de certificação para a realização de testes e inspeções.

Maran (2015) traz as definições apresentadas pela Norma Britânica e pelo Comitê Euro-Internacional:

O comitê euro-internacional CEB (1990) e a norma britânica BS 7973-2 (2001) estabelecem uma classificação dos espaçadores conforme sua aplicação, dividindo-os em:

- a) solicitação leve: Para proporcionar cobrimento em armaduras verticais mais próximas da superfície de concreto ou em armaduras horizontais com seção pequena e sem possibilidade de tráfego. Não é adequado para barras maiores que 16 mm;
  - b) solicitação normal: Para proporcionar cobrimento em armaduras com barras de 20 mm ou menos;
  - c) solicitação pesada: Para proporcionar cobrimento em armaduras com barras maiores que 20 mm;
  - d) cadeira: Para apoiar a parte superior da armadura em lajes, de modo a garantir o cobrimento do topo ou separar as camadas de armaduras.
- (CEB, 1990; BS 7973-2, 2001 *apud* MARAN, 2015, p. 42)

Conforme a afirmação de Vaquero (2007), os espaçadores de plástico não suportam efeitos de carga, por exemplo, vigas mais pesadas. Assim, o principal cuidado ao empregar espaçadores é procurar materiais e peças certificados. Contudo, para os espaçadores de plásticos, não há certificação compulsória por parte do Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro). Por esse motivo, é importante procurar por produtos testados em laboratório para saber se são confiáveis e sustentáveis. Com espaçadores não certificados e sem qualidade

comprovada, o risco de haver várias quebras durante a obra, sem nenhuma maneira de recuperá-los, é maior.

Contudo, Nakamura (2011) coloca que os espaçadores de plástico são utilizados na maioria das construções atualmente, por serem os mais baratos e por virem prontos para serem instalados. Além disso, proporcionam grande aderência ao concreto devido aos seus formatos e, segundo a autora, são um produto uniforme. Com isso, os espaçadores são comercializados de acordo com o cobrimento desejado. Um mesmo modelo em diferentes tamanhos proporciona cobrimentos distintos; porém, durante sua utilização deve-se ter total atenção para não confundir seus modos de uso e usá-los erroneamente nos distintos elementos estruturais.

Ao testar os espaçadores de plástico, Barreto (2014) chegou à conclusão de que muitas vezes não se obteve o cobrimento final correto, uma vez que este depende da qualidade dos espaçadores, e nenhum modelo de espaçador provou ser satisfatório para todos os requisitos e critérios estabelecidos.

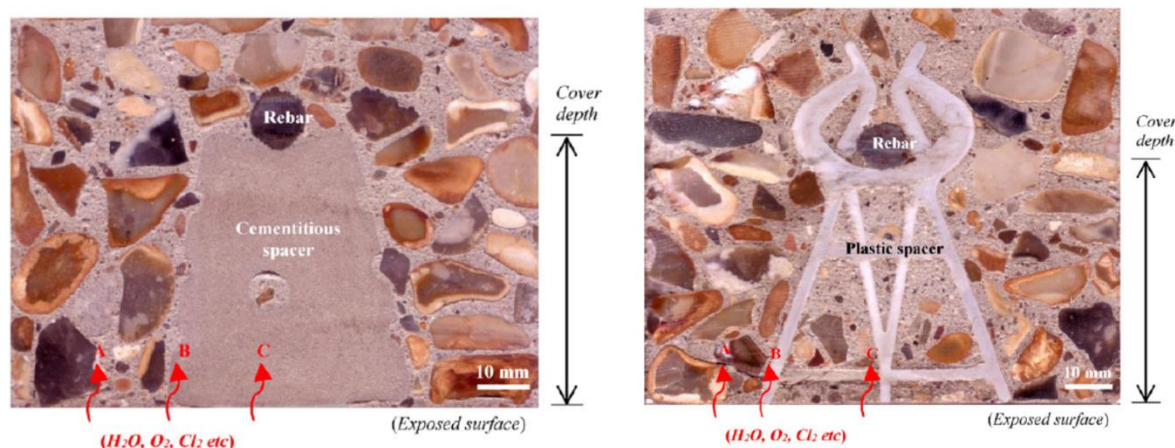
Em uma recente pesquisa intitulada *A Influência dos Espaçadores em Propriedades de Transporte de Massa e Durabilidade de Estruturas de Concreto* (2016, traduzido pela autora), os autores Alzyoud, Wong e Buenfeld trazem de forma inovadora um estudo sobre espaçadores. Seus resultados vêm ao encontro da presente pesquisa.

Os autores salientam que a necessidade de utilização de espaçadores no concreto armado é inquestionável; porém, sua influência na durabilidade e propagação da corrosão permanece sem respostas até o presente momento. Em seu estudo sobre os efeitos do transporte de massa em estruturas de concreto com a utilização de espaçadores, eles realizaram ensaios de difusão, permeabilidade, absorção, penetração de cloretos e análise de imagem em amostras com diferentes espaçadores, profundidade de cobrimento, tamanho dos agregados, idades e condições de exposição.

Segundo Alzyoud *et al.* (2016), os espaçadores podem provocar uma ligação entre a superfície externa e a barra de aço, oferecendo um caminho para a penetração de agentes agressivos na interface entre o espaçador e o concreto. Isso pode vir a

comprometer a eficácia do cobrimento que está protegendo essa barra de aço, como pode ser visto na Figura 6:

Figura 6 – Seção transversal mostrando a inserção dos espaçadores de argamassa e de plástico



Fonte: Alzyoud *et al.*, 2016, p. 33

Os resultados obtidos pelos autores indicam que os espaçadores aumentam o transporte de agentes agressivos em todos os casos, mas a magnitude depende do tipo de espaçador. Os espaçadores de plástico produziram um maior aumento, seguidos por espaçadores industrializados de argamassa e posteriormente pelos espaçadores metálicos. Os espaçadores de plástico obtiveram os piores resultados em todas as propriedades testadas. Ainda que os espaçadores metálicos tenham apresentado os melhores resultados, isso se deve principalmente ao fato de que o aço não é um material poroso. Além disso, eles aumentam o risco de corrosão da armadura, não sendo indicada sua utilização (ALZYUOD *et al.*, 2016).

Outro fator que pode ter favorecido os piores resultados dos espaçadores de plástico é a incompatibilidade existente entre as propriedades do plástico e do concreto em termos de expansão e contração decorrentes de variações térmicas. É importante salientar a questão da diferença dos coeficientes de dilatação entre os diversos tipos de espaçadores e o concreto.

A dilatação térmica de um material nada mais é do que um aumento em suas dimensões, causado pelo aumento da agitação de suas moléculas em função de uma maior temperatura (maior energia vibracional) e conseqüente aumento na distância média entre elas (HALLIDAY; RESNICK, 1974).

Halliday e Resnick (1974) citam que para cada tipo de dilatação existe um coeficiente relacionado: coeficiente de dilatação linear, superficial e volumétrico, representados respectivamente pelas letras  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$ . Porém, salienta que toda dilatação é volumétrica, mas em alguns casos pode-se considerar apenas uma ou duas dimensões para facilitar o estudo.

A Tabela 1 apresenta os coeficientes de dilatação dos principais materiais que compõem a estrutura de concreto armado, inclusive o plástico dos espaçadores:

Tabela 1 – Coeficientes de Dilatação Térmica Linear de diferentes materiais

<b>Substância</b>	<b>Coeficiente de Dilatação Linear (<math>10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}</math>)</b>
Aço	11
Concreto	12
Plástico	70

Fonte: adaptado de Callister, 2008

Analisando os dados da tabela, fica evidente que o aço e o concreto, em função da pouca diferença entre seus coeficientes de dilatação linear, apresentam aderência; assim, não há grande risco do surgimento de fissuras em função de dilatações não uniformes. Todavia, quando são inseridos os espaçadores de plástico nas estruturas, estes apresentam um coeficiente de dilatação muito superior aos demais materiais que estão em seu entorno, provocando um efeito “parede” entre os dois corpos. Ao aumentar a temperatura, aumenta-se a agitação de suas moléculas, o que pode causar um acréscimo no tamanho do objeto aquecido. Se o objeto for resfriado, acontece o processo inverso; nesse caso a agitação das moléculas diminui, e o objeto contrai, podendo causar algumas fissuras nos elementos.

Avaliando os tipos de espaçadores apenas do ponto de vista dos coeficientes de dilatação, percebe-se que as melhores opções seriam os espaçadores de argamassa e os metálicos. Esses últimos apresentam aderência com o aço e o concreto, uma vez que se trata do mesmo material. No entanto, esses espaçadores metálicos são facilitadores para a propagação da corrosão, uma vez que facilitam a entrada de agentes agressivos. Assim, nesse ponto, os espaçadores de argamassa apresentam uma vantagem de utilização em relação aos demais.

Fazendo uma análise superficial, pode-se ter a impressão de que o espaçador é uma peça tão pequena que não faria diferença dentro da estrutura, mas não é

exatamente isso que acontece. Eles são distribuídos ao longo da armadura e deixados lá permanentemente; assim, em uma estrutura, há milhares de espaçadores, e o seu efeito combinado pode ser expressivo.

### 2.5.1 Tipos de Espaçadores

De acordo com Weber (2014), os espaçadores mais utilizados nas obras de concreto armado são os confeccionados com argamassa no canteiro e os de plástico. Há ainda os espaçadores metálicos, mas estes são raramente utilizados, por aumentarem o risco de corrosão da armadura. Segundo Barreto (2014), a norma NBR 14931 (2004) especifica que “os espaçadores metálicos podem ser utilizados desde que as partes em contato com a forma sejam revestidas com material plástico ou outros, não podendo nenhuma parte ficar exposta” (BARRETO, 2014, p. 29).

Os espaçadores feitos de argamassa (Figura 7) produzidos no próprio canteiro de obras, em relação aos outros tipos de espaçadores, apresentam um custo menor, porém em muitas vezes uma qualidade inferior. Além disso, demandam mais tempo para serem confeccionados. Já os espaçadores de plástico são peças prontas para a utilização na obra, viabilizando a produtividade. Também existem espaçadores de argamassa fabricados em empresas especializadas, que são desenvolvidos com baixa absorção de água e elevada resistência à compressão.

Figura 7 – Espaçador de argamassa fabricado em obra



Fonte: Construção Dinâmica na TV [online], 2016<sup>2</sup>

<sup>2</sup> <<http://www.construcaodinamicanativ.com.br/?acao=programa&cod=97>>. Acesso em: 02 abr. 2016.

Silva (2012) relata que existem diversos modelos de espaçadores de plástico disponíveis no mercado. Eles variam a partir da estrutura em que são empregados – pilar, laje, viga, bloco de fundação, etc. – e a amplitude do espaçamento desejado. Os modelos mais empregados em obras são os espaçadores de plástico circular, o centopeia de plástico, o espaçador cavalete e o espaçador torre.

Na Figura 8 observa-se os espaçadores *circulares*, que são utilizados em pilares, estacas, paredes, vigas, postes.

Figura 8 – Espaçador de plástico circular



Fonte: Acervo da pesquisa

A Figura 9 apresenta o espaçador *centopeia de plástico*, utilizado no fundo de vigas, lajes, pré-moldados e sapatas. Esse espaçador garante mais agilidade na obra, com seu sistema de encaixe para expansão, portanto seu modo adequado é apoiar dois pontos das armaduras.



Figura 9 – Espaçador centopeia de plástico



Fonte: Fameth [online], 2016<sup>3</sup>

Na Figura 10, pode-se observar o espaçador *cavalete* ou *garra*, utilizado em armaduras positivas, ou seja, eles são indicados para apoiar a ferragem da laje e da parte inferior das vigas.

Figura 10 – Espaçador cavalete de plástico



Fonte: Nossa Casa na Web [online], 2016<sup>4</sup>

Na Figura 11, tem-se o espaçador de *torre* ou *cadeirinha*, que serve de apoio para a barra de ferro, a fim de restringir seu movimento. Este, por sua vez, suporta

<sup>3</sup> <[http://www.fameth.com.br/site2014/paginas/prod\\_multiapoio.php](http://www.fameth.com.br/site2014/paginas/prod_multiapoio.php)>. Acesso em: 02 abr. 2016.

<sup>4</sup> <[http://www.nossacasanaweb.com/2015\\_02\\_01\\_archive.html](http://www.nossacasanaweb.com/2015_02_01_archive.html)>. Acesso em: 02 abr. 2016.

vários aços, ou seja, é resistente e durável, sendo indicado para armaduras horizontais como lajes, fundo de vigas, piso industrial, entre outros.

Figura 11 – Espaçador torre ou cadeirinha de plástico



Fonte: AEC Web [online], 2016<sup>5</sup>

Os espaçadores de argamassa industrializados estão voltando ao mercado por não apresentarem alta porosidade, não se deformarem, resistirem ao peso das armaduras e aos esforços de concretagem (NETO, 2011). Além disso, apresentam aderência entre o concreto e o espaçador, uma vez que se trata de materiais semelhantes, com coeficientes de dilatação muito parecidos. Esses espaçadores também promovem as dimensões de cobrimento especificadas em projeto. A Figura 12 apresenta os espaçadores do tipo *torre*, utilizados em peças horizontais de concreto armado, como lajes e pisos, com capacidade de carga de 2.000 kgf e resistência de 40 MPa.

---

<sup>5</sup> <[http://www.aecweb.com.br/prod/e/distanciador-plastico-tipo-cadeirinha-para-tela-soldada-cpp\\_1162\\_15856](http://www.aecweb.com.br/prod/e/distanciador-plastico-tipo-cadeirinha-para-tela-soldada-cpp_1162_15856)>. Acesso em: 02 abr. 2016.

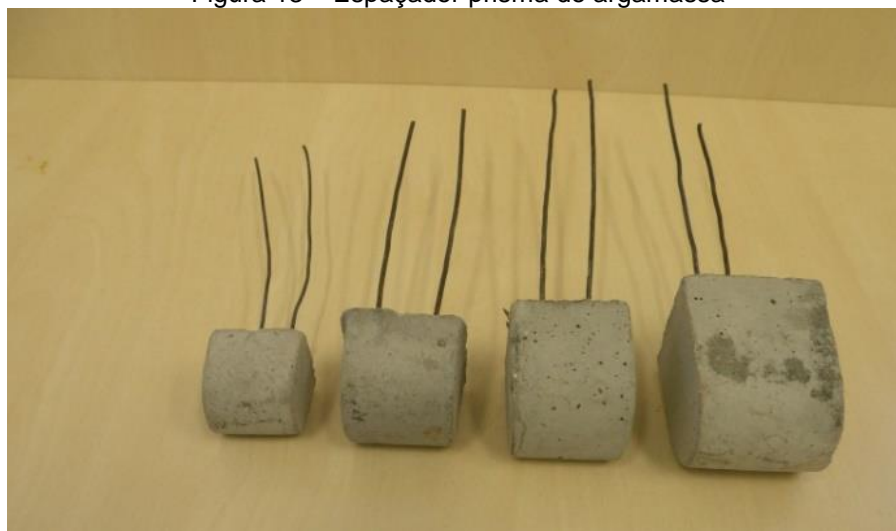
Figura 12 – Espaçador torre de argamassa



Fonte: Acervo da pesquisa

A Figura 13 apresenta o espaçador *prisma de argamassa*, utilizado em todos os elementos de concreto e para qualquer diâmetro de barra de aço. Sua capacidade de carga é de 600 kgf e a resistência mínima de cada peça é de 50 MPa.

Figura 13 – Espaçador prisma de argamassa



Fonte: Acervo da pesquisa

Segundo Vaquero (2007), devem ser considerados alguns aspectos relevantes na escolha do tipo de espaçador:

- Valor do cobrimento nominal estabelecido no projeto

- Cargas que o espaçador precisará suportar em função do peso da armadura, do procedimento de colocação, da movimentação de trabalhadores e das cargas produzidas durante a concretagem
- Diâmetro e posição da armadura
- Tipo de armadura
- Tipo de fixação mais adequado
- Agentes externos que podem afetar o concreto, como pressão, temperatura, ataques químicos, ciclos de umidade, fogo ou corrosão
- Marcas deixadas pelo espaçador sobre a superfície do concreto, principalmente se essa superfície ficar exposta
- Tipo de acabamento da superfície do concreto
- Facilidade de colocação dos espaçadores, rendimento e custo

### **2.5.2 Dificuldades de Utilização**

Segundo Oliveira (2014), um dos pontos mais críticos na utilização de espaçadores é sua distribuição e posicionamento. Como não existe uma normativa que especifique a distribuição dos espaçadores, é iminente o surgimento de uma gama ampla de valores de cobertura nos elementos estruturais das obras, uma vez que os espaçadores acabam não conseguindo desempenhar adequadamente seu papel. Isso já foi apresentado nos trabalhos de Weber (2014), que observou, com base em uma coleta de dados, que os valores de cobrimentos de armadura em 66% das medições não atendiam o valor estabelecido no projeto estrutural.

Maran (2015) identificou que a maior variação dos valores de cobrimentos se encontra em lajes maciças; algumas medições apresentaram uma grande variabilidade, chegando ao valor mínimo de cobertura igual a 3 mm e valor máximo igual a 22 mm para um mesmo elemento estrutural.

Estudos realizados por Andrade (2001) apontam que o coeficiente de variação da espessura de cobertura das armaduras está entre 0,14 cm e 0,54 cm. O autor

cita que Silva (1998) também constatou que tal propriedade varia consideravelmente, em função do nível do controle característico de cada empreendimento em particular.

Logo, a fim de categorizar qualitativamente os diversos níveis de controle de qualidade existentes na execução dos elementos de concreto armado, Andrade (2001) estabeleceu níveis de controle. A Tabela 2 apresenta esses níveis de controle da execução dos elementos de concreto armado:

Tabela 2 – Características qualitativas associadas aos níveis de controle da execução dos elementos de concreto armado

Nível de controle	Características qualitativas
Baixo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inexistência de um plano de distribuição dos espaçadores em relação à área e/ou volume dos elementos estruturais;</li> <li>• Emprego de espaçadores inadequados (espessura variável, traço diferente do traço de concreto da estrutura);</li> <li>• Excesso de movimentação das fôrmas no momento da montagem, podendo levar a um deslocamento dos espaçadores;</li> <li>• Escoramento inadequado ou insuficiente;</li> <li>• Concreto lançado inadequadamente (altura excessiva).</li> </ul>
Alto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Existência de um plano adequado de distribuição dos espaçadores;</li> <li>• Emprego de espaçadores adequados;</li> <li>• Controle rigoroso do lançamento do concreto nas fôrmas.</li> </ul>

Fonte: Andrade, 2001, p. 153

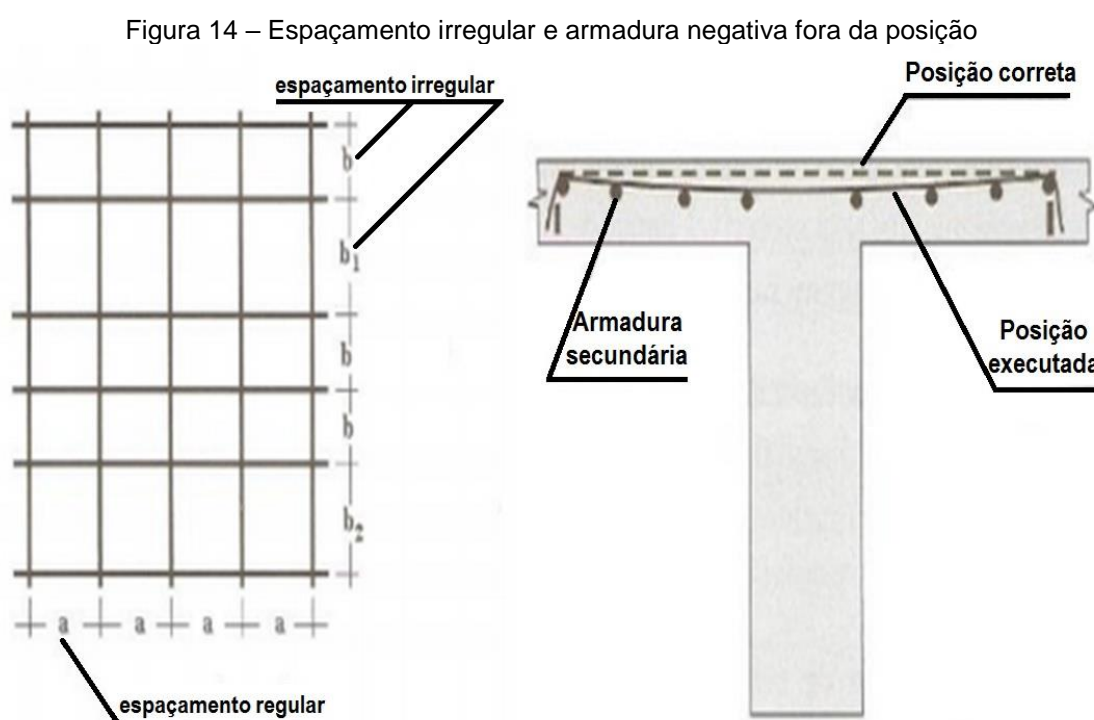
Observando a tabela, pode-se notar que o nível baixo de controle na utilização dos espaçadores pode causar grandes danos à obra e gastos desnecessários, que poderiam ser evitados.

Com base no posicionamento dos espaçadores, é de grande importância a criação de um caminho específico para o tráfego de materiais e de trabalhadores, pois o fluxo de pessoas sobre as armaduras, na concretagem ou em sua preparação, pode deslocar os espaçadores, danificando a estrutura. Esse problema é muito comum em empresas que atentam muito para a rapidez da execução e esquecem um elemento muito importante nesse processo: o fluxo de materiais e pessoas (TAKATA, 2009).

Segundo Weber (2014), o posicionamento dos espaçadores é fundamental para sua aplicação. Entretanto, a maioria das construtoras os instala de forma

aleatória, sem planejamento. Além disso, por muitas vezes a execução do plano não ocorre da forma correta, trazendo mais danos e riscos às obras.

Em relação às patologias causadas pela deficiência ou por erros de colocação nas armaduras, Souza e Ripper (1998) descrevem que os espaçadores são fundamentais para garantir o posicionamento correto das barras de armaduras. A Figura 14 apresenta uma distorção em um espaçamento irregular e uma armadura negativa fora da posição:



Fonte: Souza e Ripper, 1998, p. 32

Para o Comitê Euro-Internacional do Concreto e a Norma Britânica, o espaçador deve se manter íntegro no decorrer do processo de concretagem, resistindo ao carregamento requerido – como o peso total da armadura, as operações de montagem e concretagem e o peso de operários e máquinas – sob uma carga mínima estimada de 3,0 kN. O espaçador deve ser facilmente aplicável às barras de aço; dessa maneira, não é preciso mão de obra qualificada para a sua aplicação. Para isso, não devem requerer mais de 0,15 kN (força essa aplicável por qualquer adulto) para sua colocação no maior diâmetro de barra informado pelo fabricante (BARRETO, 2014).

Em relação aos espaçadores de plástico, uma das maiores dificuldades de utilização é a aderência com o concreto. Seu formato precisa propiciar uma união entre esses dois materiais de forma que os diferentes coeficientes de dilatação possam ser compensados. Para isso, é preciso que haja cavidades no formato do espaçador, uma vez que estas são as responsáveis por tal compensação (VAQUERO, 2007).

Os espaçadores de argamassa industrializados, por sua vez, precisam apresentar características de resistência à compressão, permeabilidade, higroscopicidade e dilatação térmica. Entre as vantagens desse espaçador, vendido pronto no mercado, estão sua capacidade de oferecer grande tenacidade e peso reduzido, além de assegurar o valor de cobrimento adequado e apresentar resistência ao fogo (VAQUERO, 2007).

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS DA PESQUISA

Neste capítulo é detalhado como foi definido o programa experimental. São descritos os métodos adotados, os equipamentos e os materiais utilizados para a realização dos ensaios.

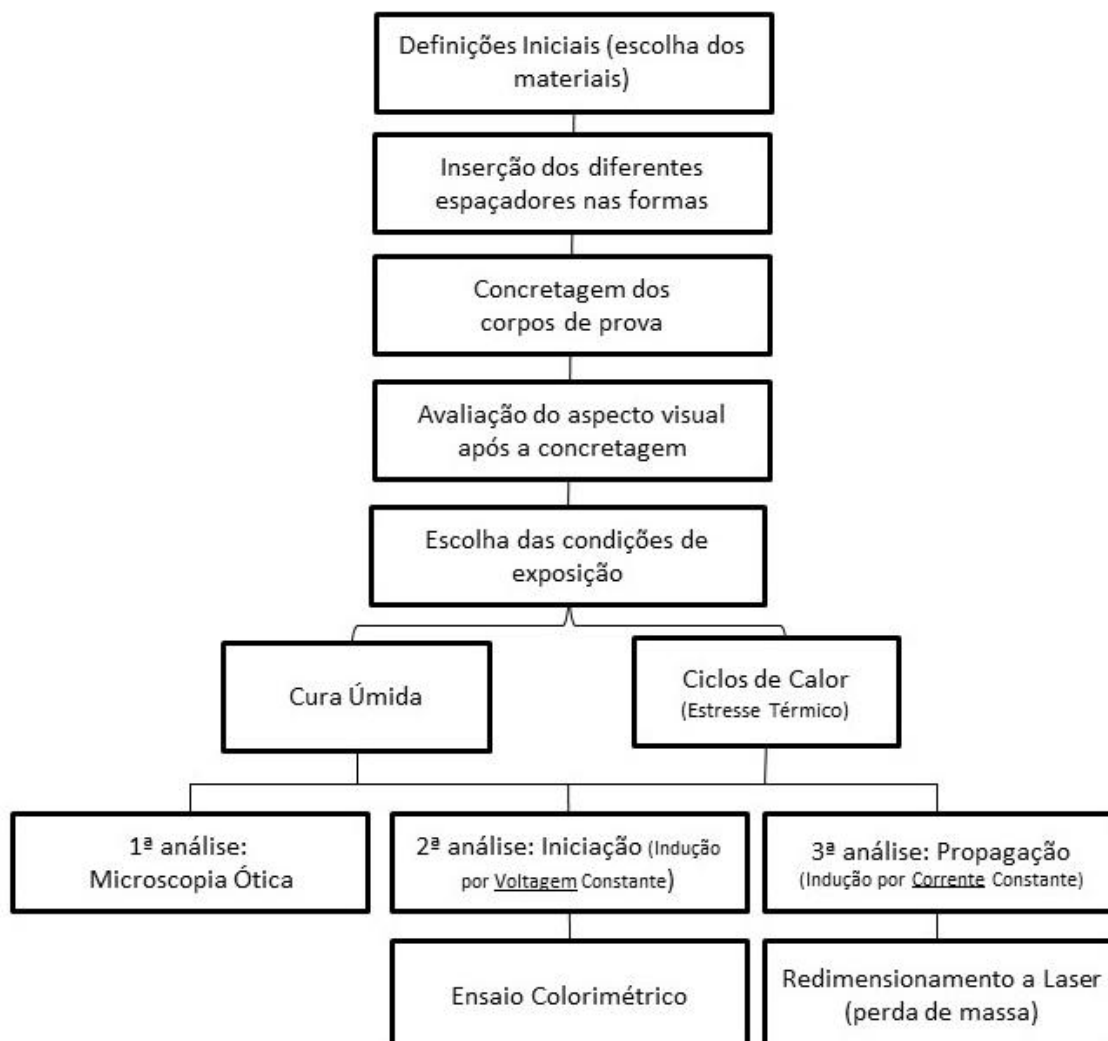
A presente pesquisa traçou uma estratégia que se divide nas seguintes análises:

- Foi utilizada a microscopia ótica para a visualização da interface entre os espaçadores e o concreto, observando a existência de fissuras e possíveis perdas de aderência entre eles.
- Foi utilizado o método CAIM (Corrosão Acelerada por Imersão Modificada) com aplicação de voltagem constante, em armaduras inseridas em corpos de prova de concreto com espaçadores de plásticos e de argamassa, a fim de avaliar os efeitos da ascensão de íons cloreto no concreto.
- Foi utilizado o método CAIM com aplicação de corrente constante e espaçadores de plástico e de argamassa, para avaliar se houve perda de seção próxima ao espaçador, a fim de verificar a possível entrada facilitada de íons cloreto pela superfície do espaçador.

Para melhor entendimento da pesquisa, é apresentado na Figura 15 um esquema detalhado das análises realizadas nos corpos de prova, descritas detalhadamente no decorrer deste capítulo.



Figura 15 – Esquema das análises da pesquisa



### 3.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Neste item são apresentados os materiais empregados para confecção dos corpos de prova utilizados na parte experimental da pesquisa. São fornecidas informações sobre o traço do concreto e as propriedades de seus componentes (cimento, areia e brita), assim como das barras de armadura inseridas nele.

#### 3.1.1 Cimento

O cimento utilizado na pesquisa foi o cimento Portland de alta resistência inicial (CPV-ARI-RS). Esse cimento foi escolhido por apresentar o menor teor de adições em sua composição, obtendo as características físicas desejáveis (hidratação e

resistência à compressão), além de ser facilmente encontrado no mercado no sul do país. Os ensaios químicos para o cimento utilizado, de acordo com informações do fabricante em relação ao lote utilizado, podem ser visualizados na Tabela 3. A caracterização física está apresentada na Tabela 4.

Tabela 3 – Caracterização química do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Perda ao Fogo – PF	ABNT NM 18/12	%	2,56	≤ 4,5
Óxido de Magnésio – MgO	ABNT NM 21/12	%	1,42	≤ 6,5
Trióxido de Enxofre - SO <sub>3</sub>	ABNT NM 16/12	%	2,93	≤ 4,5
Anidrido Carbônico - CO <sub>2</sub>	ABNT NM 20/12	%	2,27	≤ 3,0

Tabela 4 – Caracterização física do cimento

Ensaio	Metodologia	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm <sup>2</sup> /g	4.401	≥ 3.000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm <sup>3</sup>	3,11	não aplicável
Início de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	140	≥ 60
Fim de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	187	≤ 600

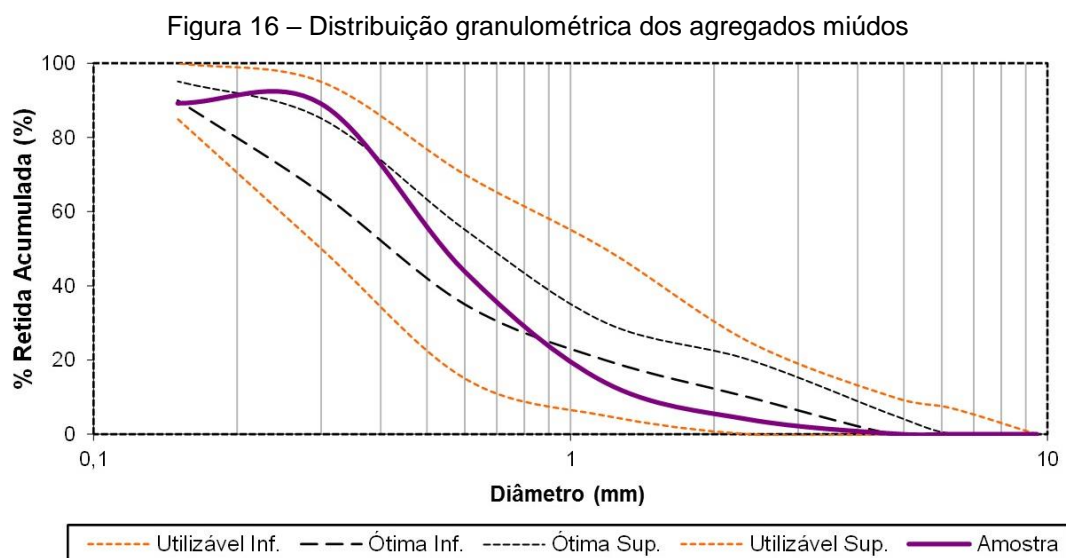
### 3.1.2 Agregado Miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média proveniente do Rio Jacuí, com origem quartzosa, que se encontra disponível no mercado local. As características físicas e granulométricas dos agregados miúdos estão expostas na Tabela 5, com o respectivo método de ensaio normatizado.

Tabela 5 – Características físicas e granulométricas dos agregados miúdos

Característica		Método de ensaio	Areia natural média	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,63	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,36	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,4	
Abertura da peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
Distribuição granulométrica	4,75		0,2	0
	2,38		3,8	4
	1,18		10,0	14
	0,60		29,9	44
	0,30		45,3	89
	0,15		0,1	89

As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 16, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).



Fonte: Acervo da pesquisa

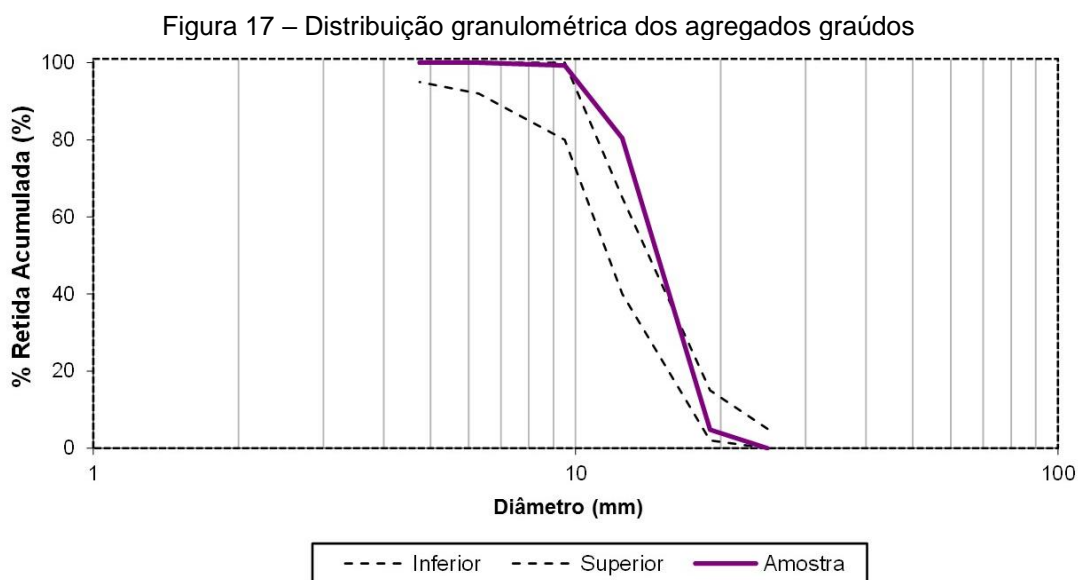
### 3.1.3 Agregado Graúdo

O agregado graúdo utilizado foi rocha basáltica britada. As características físicas e granulométricas dos agregados graúdos estão expostas na Tabela 6, com o respectivo método de ensaio normatizado.

Tabela 6 – Características físicas e granulométricas dos agregados graúdos

Característica		Método de ensaio	Brita 1	
Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,90	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	19	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	7,04	
Abertura da peneira (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
Distribuição granulométrica	25		0,0	0,0
	19		4,8	5
	12,5		75,7	80
	9,5		18,9	99
	6,3		0,7	100
	4,75		0	100
2,36	0	100		

As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 17, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211 (ABNT, 2009).



### 3.1.4 Armadura

As barras de armadura utilizadas nos ensaios são compostas por aço CA-50, que corresponde a uma resistência nominal à tração de 500 MPa. As barras utilizadas apresentavam diâmetro de 12,5 mm, e 145 mm de comprimento. Antes do ensaio, as barras foram limpas com auxílio de escovas de aço, para a retirada de qualquer tipo de impurezas que pudessem afetar a determinação da massa inicial ou provocar desencadeamento do processo corrosivo em sua superfície.

### 3.1.5 Água de Amassamento

Em toda a pesquisa, foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição de Porto Alegre.

### 3.1.6 Concreto

O traço do concreto utilizado foi o mesmo de Graeff (2007), com resistência estimada à compressão de  $\leq 25$  Mpa, com o objetivo de contribuir para a criação de

um banco de dados para o grupo de pesquisas do Laboratório de Ensaios e Modelos Estruturais (LEME). Esse parâmetro foi almejado com base no fato de que no Rio Grande do Sul grande parte do concreto das estruturas já construídas apresenta resistência próxima a esse valor.

A Tabela 7 apresenta o traço utilizado (GRAEFF, 2007).

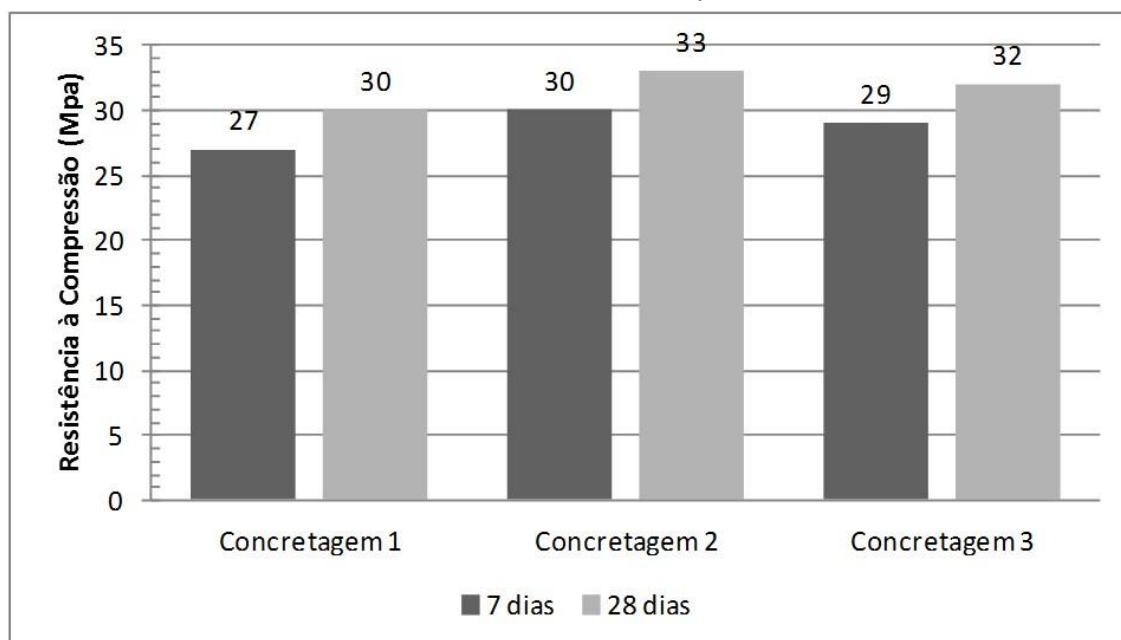
Tabela 7 – Traço

Concreto	Cimento	Areia	Brita	Relação <i>a/c</i>
25 MPa	1	2,9	3,6	0,65

Fonte: Graeff (2007, p. 64)

A resistência dos corpos de prova foi verificada por meio de ensaios de compressão realizados aos 7 e 28 dias, cujos resultados estão apresentados no Gráfico 1, que indica que foram atingidos os valores de resistência  $f_c$  requeridos. Os corpos de prova foram moldados e rompidos de acordo com os procedimentos da NBR 5738 (2015) e NBR 5739 (2007).

Gráfico 1 – Controle da resistência à compressão do concreto



Foram realizados ensaios de absorção do concreto, seguindo as premissas da norma NBR 9778 (2009). O resultado do ensaio de absorção avalia a relação da porosidade com a quantidade de água absorvida. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Resultados obtidos nos ensaios de absorção e índice de vazios do concreto

Absorção (%)	6,0%
Índice de Vazios (%)	8,4%
Massa Específica Seca (kg/m <sup>3</sup> )	1451
Massa Específica Saturada (kg/m <sup>3</sup> )	1535
Massa Específica Real (kg/m <sup>3</sup> )	1683

### 3.1.7 Solução Salina Agressiva

O ensaio de corrosão acelerada foi realizado com auxílio de uma solução salina composta de água e cloreto de sódio (NaCl). Foram empregados 35 g de NaCl por litro de água, para simular a salinidade das águas do Oceano Atlântico.

### 3.1.8 Espaçadores

Foram utilizados espaçadores de plástico e de argamassa encontrados no mercado, que atendem os cobrimentos nominais de 25 mm e 50 mm. Os espaçadores de plástico são feitos em polipropileno; os espaçadores de argamassa são feitos de argamassa com resistência à compressão de 60 MPa e absorção média de 3,5%. Na Figura 18, observa-se os espaçadores utilizados.

Figura 18 – Espaçadores utilizados na pesquisa

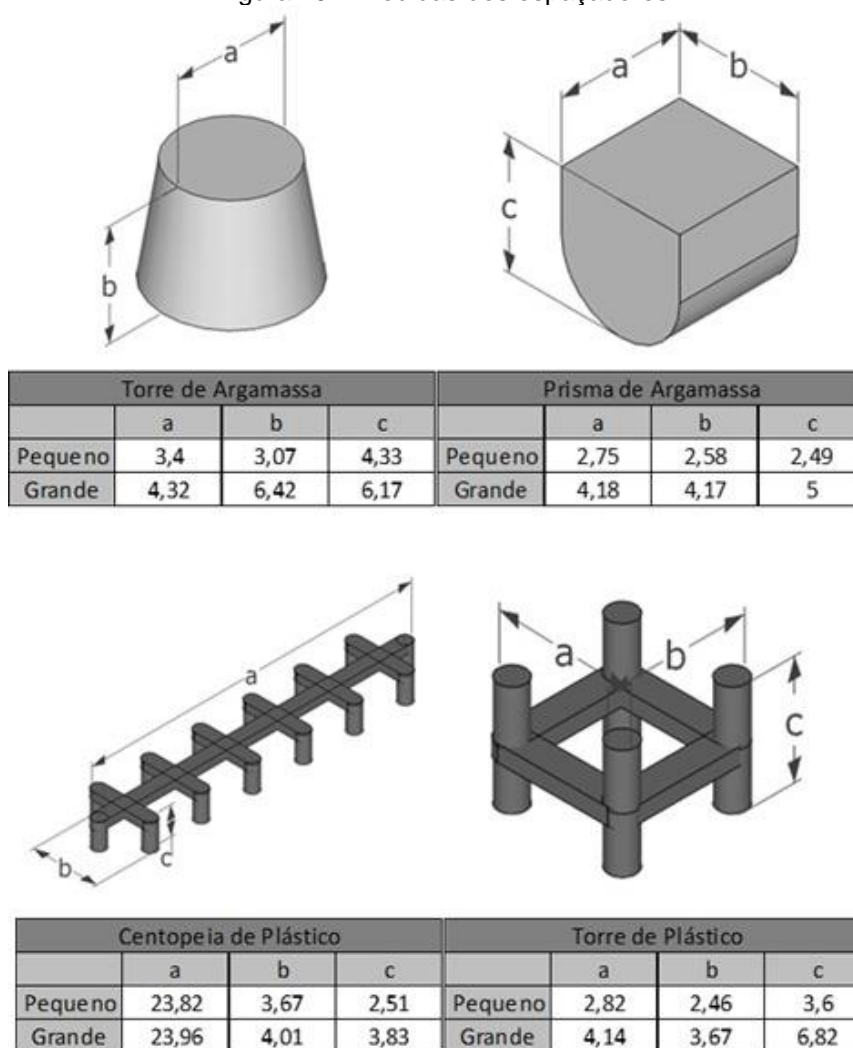


Fonte: Acervo da pesquisa

Na Figura 19, encontram-se as medidas detalhadas de cada um dos espaçadores utilizados. Todas as medidas apresentadas nas tabelas estão em

centímetros. A fim de tornar possível o uso do espaçador centopeia de plástico dentro das limitações das formas de moldagem, optou-se por cortá-lo em um seguimento de 19 cm.

Figura 19 – Medidas dos espaçadores



Fonte: Acervo da pesquisa

### 3.2 PREPARAÇÃO E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

Os corpos de prova utilizados nesta pesquisa seguiram o método já utilizado por pesquisadores do grupo de pesquisas do LEME para os ensaios de corrosão acelerada. Esse método será explicado no Item 3.3.1 - *Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)*.

Os corpos de prova possuem formato prismático, apresentam dimensões de 100 x 100 x 200 mm e contêm uma barra de armadura de 12,5 mm de diâmetro e 145

mm de comprimento inserida em seu centro, posicionada com auxílio de espaçadores, como se observa na Figura 20. No corpo de prova referência (sem espaçador), a barra de aço foi inserida no concreto com auxílio de um suporte, a fim de que esta atendesse o cobrimento estabelecido.

Figura 20 – Vista das formas prismáticas, com as barras posicionadas nos espaçadores



Fonte: Acervo da pesquisa

Antes da moldagem dos corpos de prova, foi fixado um fio de cobre desencapado sobre o comprimento da barra, utilizando um espaçador para auxílio, evitando que o fio de cobre estabelecesse contato elétrico com a barra.

O concreto empregado foi preparado em laboratório, com auxílio de uma betoneira de eixo vertical, previamente imprimada com argamassa de cimento e areia. A ordem de colocação dos materiais na betoneira foi mantida constante para todas as misturas: brita, 50% da água, cimento, o restante da água e areia. Isso garante uma melhor homogeneidade da mistura. Para assegurar que os concretos tivessem similaridade, a pesquisa foi dividida em três concretagens (concretagem 1: microscopia ótica, concretagem 2: iniciação, concretagem 3: propagação). Após a medição da consistência do concreto por meio do ensaio de abatimento de tronco de cone (*slump test*), foi efetuada a moldagem dos corpos de prova. Estabeleceu-se, como parâmetro de controle, que o abatimento das misturas frescas deveria ficar em  $100 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$ . O processo de adensamento utilizado foi mecânico, com auxílio de vibrador de agulha. Na Figura 21, pode-se observar a forma sendo preenchida com



concreto. O lançamento do concreto nas formas foi realizado em camadas, com auxílio de uma colher de pedreiro.

Figura 21 – Preenchimento das formas com concreto



Fonte: Acervo da pesquisa

Na Figura 22, observa-se os corpos de prova já moldados.

Figura 22 – Corpos de prova já moldados

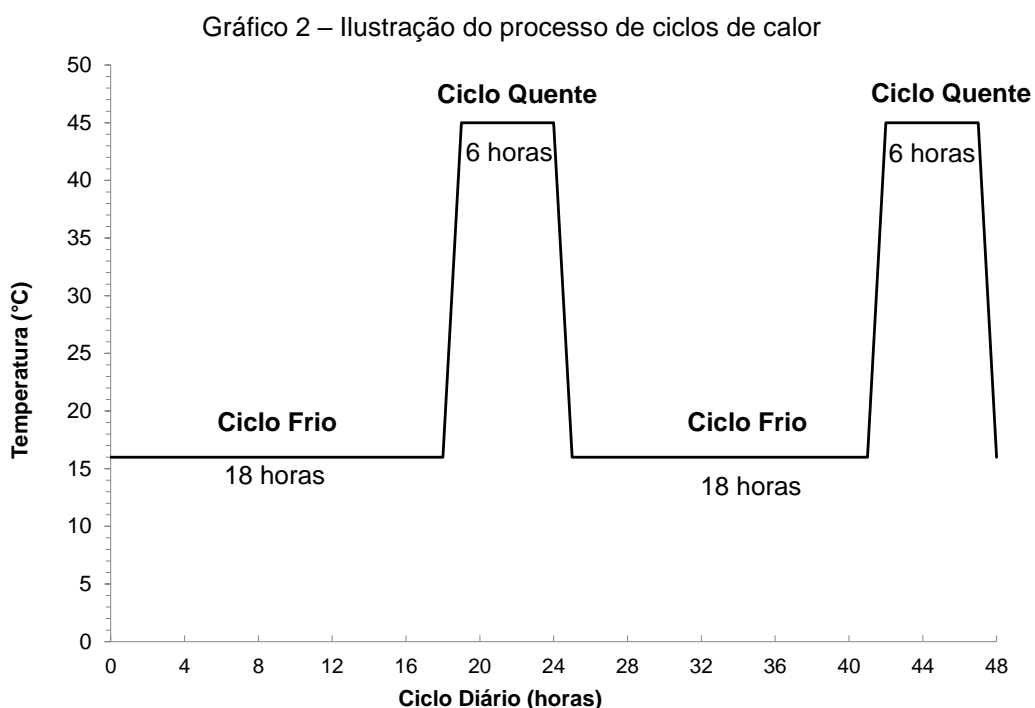


Fonte: Acervo da pesquisa

Os corpos de prova foram desmoldados após 24h e imediatamente submetidos a duas condições diferentes de exposição. Uma delas foi realizada em câmara úmida, com temperatura de  $23 \pm 2^\circ\text{C}$  e UR > 90%. A outra foi realizada com ciclos de calor, na qual uma parte da amostra ficava exposta a variações de temperatura semelhantes

às encontradas comumente ao longo do ano no Rio Grande do Sul, conforme observação dos dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Nesta pesquisa, definiu-se que a exposição à câmara úmida será denominada de exposição *sem estresse térmico*. Da mesma forma, a exposição aos ciclos de calor será chamada de *com estresse térmico*.

No Gráfico 2, apresenta-se uma ilustração dos ciclos de calor em 48 horas. Os corpos de prova eram mantidos em estufa com aquecimento de 45°C por um período de 6 horas e resfriados por 18 horas dentro da sala refrigerada a 16°C. Esse processo durou 28 dias.



Para esta pesquisa, foram moldados 136 corpos de prova. Ao término do processo de 28 dias de exposição às duas condições, os corpos de prova foram divididos em três grupos. O primeiro grupo foi composto de 16 corpos de prova, sendo quatro para cada tipo de espaçador – dois para a cura úmida e dois para os ciclos de calor. Esse grupo foi submetido à análise de microscopia ótica. No segundo grupo, foram moldados 100 corpos de prova, sendo 20 para cada tipo de espaçador, assim como para o referênci (sem espaçador), em cada uma das condições de exposição. Esse segundo grupo passou pela análise da iniciação. O terceiro grupo foi composto

de 20 corpos de prova, sendo dois para cada tipo de espaçador, assim como para o referência (sem espaçador), em cada uma das condições. O último grupo passou pela análise da propagação. Para uma melhor compreensão, é possível visualizar, na Tabela 9, a quantidade de corpos de prova nas três concretagens.

Tabela 9 – Plano de concretagem dos corpos de prova		
Quantidade de Corpos de Prova		
<b>1ª análise: Microscopia Ótica</b>		
1ª Concretagem	<b>Sem estresse térmico</b>	<b>Com estresse térmico</b>
	2 CPs com espaçador torre de argamassa 50 mm	2 CPs com espaçador torre de argamassa 50 mm
	2 CPs com espaçador prisma de argamassa 50 mm	2 CPs com espaçador prisma de argamassa 50 mm
	2 CPs com espaçador torre de plástico 50 mm	2 CPs com espaçador torre de plástico 50 mm
	2 CPs com espaçador centopeia de plástico 50 mm	2 CPs com espaçador centopeia de plástico 50 mm
<b>TOTAL</b>		<b>16</b>
<b>2ª análise: Iniciação</b>		
2ª Concretagem	<b>Sem estresse térmico</b>	<b>Com estresse térmico</b>
	10 CPs com espaçador torre de argamassa 50 mm	10 CPs com espaçador torre de argamassa 50 mm
	10 CPs com espaçador prisma de argamassa 50 mm	10 CPs com espaçador prisma de argamassa 50 mm
	10 CPs com espaçador torre de plástico 50 mm	10 CPs com espaçador torre de plástico 50 mm
	10 CPs com espaçador centopeia de plástico 50 mm	10 CPs com espaçador centopeia de plástico 50 mm
10 CPs referência	10 CPs referência	
<b>TOTAL</b>		<b>100</b>
<b>3ª análise: Propagação</b>		
3ª Concretagem	<b>Sem estresse térmico</b>	<b>Com estresse térmico</b>
	2 CPs com espaçador torre de argamassa 25 mm	2 CPs com espaçador torre de argamassa 25 mm
	2 CPs com espaçador prisma de argamassa 25 mm	2 CPs com espaçador prisma de argamassa 25 mm
	2 CPs com espaçador torre de plástico 25 mm	2 CPs com espaçador torre de plástico 25 mm
	2 CPs com espaçador centopeia de plástico 25 mm	2 CPs com espaçador centopeia de plástico 25 mm
2 CPs referência	2 CPs referência	
<b>TOTAL</b>		<b>20</b>
<b>TOTAL DE CORPOS DE PROVA MOLDADOS</b>		<b>136</b>

Os ensaios de corrosão acelerada serão detalhados a seguir.

### 3.3 ANÁLISES

A presente pesquisa constituiu-se de três análises fundamentais. Foi realizada a análise preliminar de microscopia ótica, que será detalhada no Item 3.5.1 – *Microscopia Ótica*. A seguir, realizou-se uma *calibração* do ensaio de aceleração da corrosão, para então desenvolver a segunda análise, chamada de *iniciação*. A terceira análise, que não dependeu dos resultados das anteriores, foi a *propagação*. Para a *iniciação*, a aceleração da corrosão foi baseada em ensaios já realizados por Torres (2006), em que foram feitos alguns ajustes. Na *propagação*, os ensaios de aceleração da corrosão foram baseados em Graeff (2007).

Para que as análises a respeito do desempenho de espaçadores frente a agentes agressivos pudessem ser avaliadas, foi necessário definir qual método de aceleração de corrosão seria utilizado. Optou-se pelo método CAIM, que será descrito a seguir.

### **3.3.1 Corrosão Acelerada por Imersão Modificada (CAIM)**

O ensaio CAIM – Corrosão Acelerada por Imersão Modificada – é um ensaio acelerado de corrosão que se enquadra entre os ensaios eletroquímicos e concentra-se na avaliação direta do efeito da corrosão sobre a barra de aço. Considera-se uma técnica com grande potencial de utilização para avaliação da degradação provocada pela corrosão por íons cloreto em estruturas de concreto armado, podendo ser usado de forma eficiente para obter dados comparativos. O ensaio baseia-se num princípio similar ao dos ensaios encontrados na literatura: ocorre a exposição de um corpo de prova de concreto contendo uma barra de aço em seu interior a uma solução com cloretos, com aplicação de um estímulo elétrico para que os íons cloreto migrem na direção da barra.

O ensaio CAIM teve seu primeiro uso na Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), por Lima (1990), a partir de uma concepção empregada por Varela e Espinosa (1988). Um recipiente de vidro sem fundo era fixado sobre um corpo de prova, com auxílio de massa vedante. Dentro do recipiente era colocada uma solução com 3,5% de concentração de NaCl e uma placa metálica, que se conectava ao polo negativo da fonte de alimentação. A barra de armadura do corpo de prova ficava parcialmente inserida na amostra e era conectada ao polo positivo da fonte. Uma ddp de 60V era aplicada para favorecer a migração dos cloretos à barra. Após o término do ensaio, aproximadamente 7h, o corpo de prova era rompido, e a barra de aço era limpa e analisada segundo a perda de massa. O método também já foi empregado com sucesso por vários pesquisadores do Grupo de Pesquisa LEME (JADOVSKI, 1992; SELISTRE *et al.*, 1993, 1994; MARCHESAN *et al.*, 1997; KIRCHHEIM, 2005; TORRES, 2006; GRAEFF, 2007; CAETANO, 2008).

Dada a dificuldade na operação e fixação dos aquários, os pesquisadores do LEME reformularam o ensaio, optando por imergir os corpos de prova até a altura da barra, em uma solução de NaCl de 35 g/l (TORRES, 2006). Isso obrigava a umidade

a penetrar na amostra no sentido inverso à gravidade, por efeito de capilaridade – o que mais se aproxima da condição real. Alterações na voltagem e no tempo de ensaio também foram feitas, para adaptá-lo a concretos com estruturas de poros reduzidas ou barras protegidas. Optou-se também por desacoplar a barra do fio de contato elétrico com a fonte de tensão, para evitar que ocorresse corrosão mais acentuada no ponto de contato do fio.

Sabendo que no presente estudo se desejava estabelecer uma comparação entre diferentes tipos de espaçadores, considerou-se que seria necessário modificar a técnica de ensaio. Como etapa preliminar, foi preciso definir a ddp a ser aplicada, detalhada no Item 3.3.2 – *Calibração*. No primeiro momento, passou-se a trabalhar com excitação pela imposição de diferença de potencial constante e sem controle da corrente passante, a fim de observar a taxa de ascensão de íons cloreto no corpo de prova (esse processo será detalhado no Item 3.3.3 - *Iniciação*). No segundo momento, foi utilizada a corrente constante de baixa densidade para a análise da perda de massa das barras de aço (a ser detalhada no Item 3.3.4 – *Propagação*).

### **3.3.2 Calibração**

A fim de adaptar o método CAIM para a análise da iniciação, a definição da ddp a ser aplicada foi fundamental para a realização do ensaio. Foram moldados corpos de prova que eram submetidos a diferentes ddps, a fim de controlar o tempo de ensaio e a deterioração do corpo de prova ao final deste. Três patamares de ddp foram testados: 30V, 20V e 10V. Os corpos de prova foram submetidos ao CAIM e rompidos um dia após o ensaio, a fim de determinar qual ddp proporcionava um controle mais detalhado da ascensão de íons cloreto, de forma a permitir o controle de ascensão de cloretos ao longo de alguns dias (ddps elevadas favorecem uma ascensão muito rápida, impossibilitando o controle, enquanto ddps muito baixas podem estender a análise em semanas e meses, inviabilizando a pesquisa). Após a análise dos resultados, a ddp de 10V foi escolhida, já que proporcionava uma ascensão lenta dos íons cloreto, que poderia ser controlada ao longo de alguns dias.

### 3.3.3 Iniciação

A análise da eficiência dos espaçadores frente à corrosão de íons cloreto precisava ser feita de maneira que a ascensão dos íons no concreto fosse verificada, a fim de determinar uma taxa em que os íons cloreto se aproximam da barra de aço. Assim, foram moldados 20 corpos de prova para cada tipo de espaçador: torre de plástico, torre de argamassa, prisma de argamassa, centopeia de plástico e o referênciã. Os espaçadores utilizados nessa análise foram os com cobertura nominal de 50 mm (o corpo de prova referênciã não possuía espaçador, apenas o cobertura de 50 mm), para que a distância entre a barra e o fundo da forma fosse maior, permitindo assim uma análise mais detalhada da ascensão de cloretos.

O método adotado para os ensaios de corrosão acelerada foi similar à de Torres (2006), porém a ddp utilizada foi aquela determinada após a calibração (10V). Em um recipiente plástico, os corpos de prova foram posicionados lado a lado, com quatro exemplares por recipiente, onde ficavam sob uma camada de água com NaCl. Um fio de cobre desencapado circundava os corpos de prova e era ligado à fonte de alimentação como polo negativo, ao mesmo tempo em que os corpos de prova eram ligados em paralelo, ou seja, ligados um a um e finalmente ligados à fonte como polo positivo, conforme a Figura 23.

Figura 23 – Ligação dos corpos de prova à fonte



Fonte: Acervo da pesquisa

Para uma análise completa do comportamento dos espaçadores, após 28 dias, os corpos de prova foram impermeabilizados lateralmente com selante elástico à base

de polímero, criando uma película que impedia a passagem da água. Assim, a passagem de íons cloreto era unidirecional, ascendendo apenas da base inferior do corpo de prova.

A duração do ensaio foi definida em 2, 4, 6, 8 e 10 dias, para que a ascensão de cloretos fosse bem observada. De dois em dois dias, eram retirados dois corpos de prova de cada condição de exposição, os quais eram rompidos longitudinalmente com o auxílio de uma prensa hidráulica, e era feita a análise dos resultados.

### **3.3.4 Propagação**

Uma das maiores preocupações quando se trata de corrosão de armaduras é a perda de massa e despassivação das barras de aço. Os espaçadores podem se tornar um foco de entrada de agentes agressivos pela interface junto ao concreto, o que pode aumentar a perda de massa. A fim de investigar como se comporta a perda de massa de barras de aço na presença dos espaçadores, foram moldados quatro corpos de prova por tipo de espaçador: torre de plástico, torre de argamassa, prisma de argamassa, centopeia de plástico e o referência, totalizando 20 corpos de prova. Os espaçadores utilizados foram os com cobrimento nominal de 25 mm (o corpo de prova referência não possuía espaçador, apenas o cobrimento de 25 mm), a fim de facilitar o processo corrosivo. Baseado no trabalho dos autores Graeff (2007) e Caetano (2008), a densidade de corrente de corrosão escolhida para essa análise foi de  $500 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ . Um regime de corrente constante foi empregado, para que a corrosão fosse melhor controlada.

Nessa fase da pesquisa, as barras de aço foram deixadas livres para corroer, ao contrário da fase anterior, na qual a frente de cloretos não chegava a corroer a barra, apenas provocava a sua despassivação. O tempo necessário para acelerar a corrosão nos corpos de prova, com vistas à realização de ensaios específicos posteriores, foi baseado nos resultados encontrados por Graeff (2007), de tal maneira que fossem obtidos graus de corrosão em torno de 20%, determinados pela perda de massa estimada das barras de armaduras. A teoria utilizada para prever a perda de massa e conseqüentemente o grau de corrosão foi a Lei de Faraday, já empregada por autores como Helene (1993), Graeff (2007) e Caetano (2008). O grau de corrosão

previsto pela referida Lei corresponde à área sob a curva de corrente ( $i$ ) do gráfico  $i \times t$ , como mostrado na Figura 24.

Figura 24 – Grau de corrosão pela Lei de Faraday



Fonte: Graeff, 2007, p. 58

Para os casos em que a aceleração da corrosão é feita pela aplicação de corrente constante, essa área pode ser aproximada por um retângulo, sendo o grau de corrosão obtido pela multiplicação simples do tempo pela corrente de corrosão, como descrito na Equação 3. A Equação 4, por sua vez, determina a perda de massa através da Lei de Faraday:

$$GC = I \times t \quad (3)$$

Onde:

- $GC$  = grau de corrosão (em Coulomb)
- $I$  = corrente aplicada (em Ampere)
- $t$  = tempo de aceleração da corrosão (em segundo)

$$\Delta m = \frac{M \times I \times t}{z \times F} \quad (4)$$

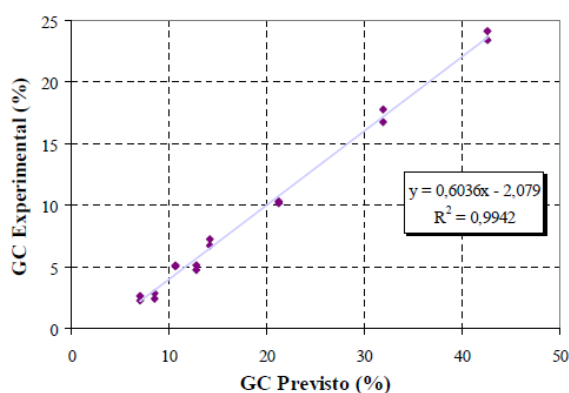
Onde:

- $\Delta m$  = massa de aço consumida (em grama)
- $M$  = peso atômico do metal (= 56 para Fe)
- $I$  = corrente aplicada (em Ampere)
- $t$  = tempo de aceleração da corrosão (em segundo)
- $z$  = carga iônica (= 2)
- $F$  = constante de Faraday (= 96500 Ampere/segundo)



Como já foi analisado por Graeff (2007), os tempos de corrosão determinados pela Lei de Faraday não atingiram resultados satisfatórios para que os graus de corrosão fossem alcançados. Esses resultados, então, indicaram que eram necessários tempos de ensaio maiores que os previstos com a aplicação simples da Lei de Faraday, para que fossem encontrados os graus de corrosão desejados. Segundo a autora, isso pode ser decorrente da desconsideração do tempo necessário para a migração dos íons e despassivação da armadura. Para fins da presente pesquisa, decidiu-se adotar a mesma metodologia de Graeff (2007), que focou na modelagem entre a relação do grau de corrosão previsto e o experimental na fase de propagação, conseguindo uma regressão linear com alto índice de correlação, expresso pelo  $R^2$  de 0,9942, como mostra a Figura 25.

Figura 25 – Regressão linear entre os valores do grau de corrosão previsto e o grau de corrosão experimental na fase da propagação



Fonte: Graeff, 2007, p. 99

A autora cita:

Como na Lei de Faraday o tempo é diretamente proporcional à perda de massa, a partir destes resultados se determinou que o tempo necessário para se obter um determinado grau de corrosão seria dado pela seguinte equação:

$$t_{acel} = t_{LF} \times 1,66 + 3,44$$

Onde:

$t_{acel}$  = tempo necessário para aceleração da corrosão

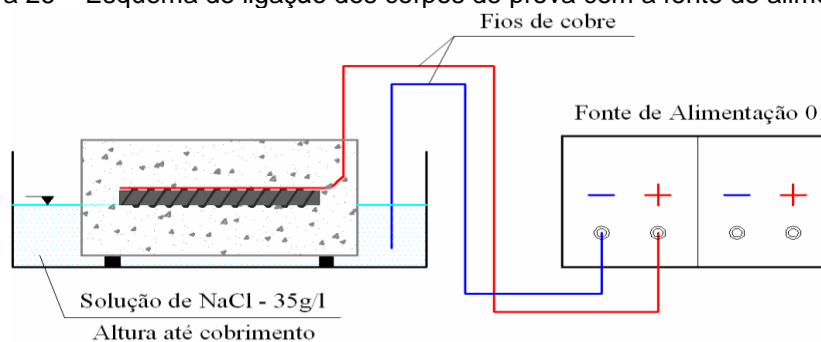
$t_{LF}$  = tempo previsto pela Lei de Faraday

1,66 e 3,44 são provenientes da inversão da regressão mostrada no gráfico (GRAEFF, 2007, p. 99)

Aplicando a regressão linear de Graeff (2007), obtém-se o tempo calculado para a aceleração da corrosão de 52 dias de ensaio para uma perda de massa de aproximadamente 20%. Então, após 28 dias da concretagem, os corpos de prova foram impermeabilizados lateralmente com selante elástico à base de polímero, criando uma película que impedia a passagem da água. Dessa forma, a passagem de íons cloreto era unidirecional, ascendendo apenas da base inferior do corpo de prova.

Os corpos de prova foram ligados à fonte de alimentação conforme mostrado na Figura 26:

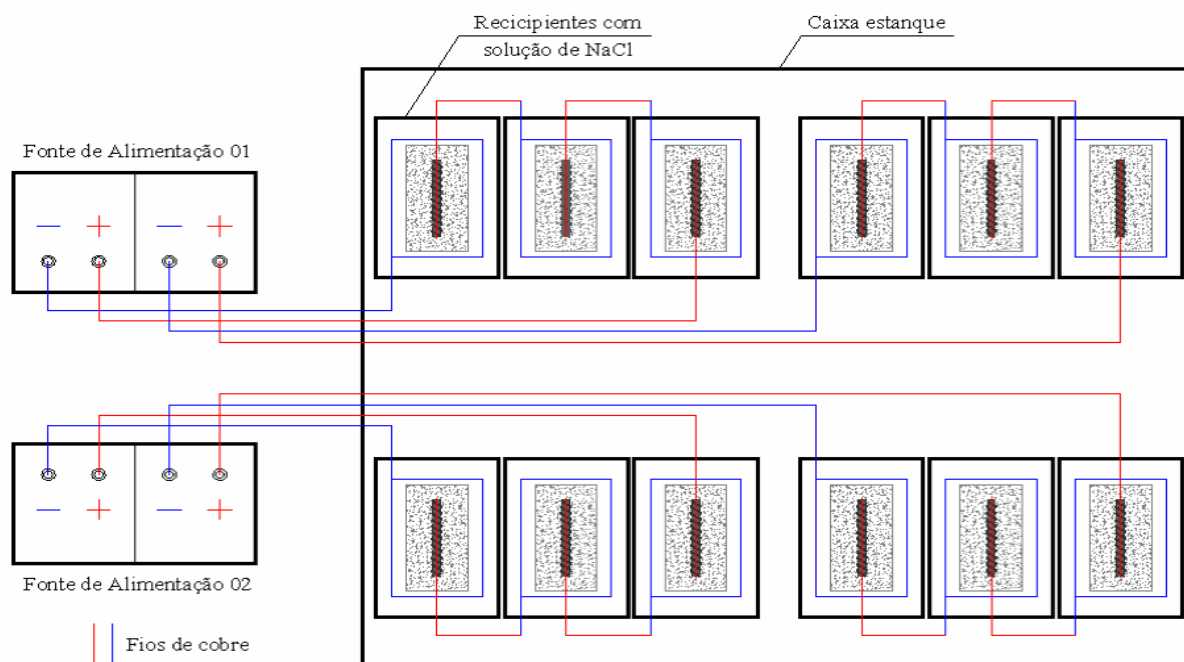
Figura 26 – Esquema de ligação dos corpos de prova com a fonte de alimentação



Fonte: Graeff, 2007, p. 55

Um fio de cobre foi posicionado acima da barra de armadura, sem contato elétrico, antes da moldagem das amostras. No momento do ensaio, ele era conectado ao polo positivo da fonte – atuando como ânodo no processo eletroquímico. Outro fio de cobre foi colocado na solução de cloretos e conectado ao polo negativo da fonte de alimentação – servindo como cátodo no processo eletroquímico. Essa metodologia é a mesma utilizada por Graeff (2007), com aplicação de corrente constante. Houve necessidade de ligar em série alguns corpos de prova (geralmente em grupos de três), para que um maior número de amostras pudesse ser ensaiado simultaneamente. Na Figura 27 pode ser visualizado o desenho esquemático da ligação dos corpos de prova.

Figura 27 – Esquema da ligação em série (vista superior)



Fonte: Graeff, 2007, p. 56

Os corpos de prova foram posicionados individualmente em recipientes plásticos, sendo cobertos para impedir que a água evaporasse para o ambiente.

### 3.4 VARIÁVEIS DA PESQUISA

A variável de pesquisa mais relevante foi o tipo de espaçador. Os tipos escolhidos foram espaçadores bastante utilizados no mercado da construção civil: dois espaçadores de plástico, conhecidos como *torre de plástico* e *centopeia de plástico*, utilizados em lajes, vigas e pilares; dois espaçadores de argamassa, o *torre de argamassa* e o *prisma de argamassa*, também utilizados em vigas, lajes e pilares.

Outra variável de pesquisa foi a condição de exposição do concreto. Os corpos de prova foram moldados e separados em dois tipos de exposição. A cura úmida (sem estresse térmico) foi feita em temperatura constante e controlada em uma câmara úmida, cujos procedimentos foram adotados conforme prescrito na NBR 5738 (ABNT, 2003), com tempo de cura de 28 dias. A outra condição de exposição (com estresse térmico) foi escolhida para evidenciar as condições climáticas encontradas no Rio Grande de Sul, onde se tem um clima subtropical, com mudanças bruscas de temperatura em menos de 24 horas, provocando um estresse térmico nos materiais. Como já foi apresentado anteriormente, em função dessa diferença de temperatura

frequente na região, alguns corpos de prova foram mantidos em estufa com temperatura de 45°C por um período de seis horas. Após, essa estufa era desligada, e os corpos de prova eram mantidos dentro dela, mas com a porta aberta, para que o resfriamento fosse feito lentamente, chegando a uma temperatura de 16°C, com auxílio de refrigeração mecânica do ambiente. Esse processo foi feito por 28 dias.

Tomou-se como terceira variável de estudo os dias de corrosão para os ensaios de iniciação, que ficaram definidos como 2, 4, 6, 8 e 10 dias; a cada dia era analisada a ascensão de cloretos no concreto.

A Tabela 10 apresenta de forma resumida as variáveis da pesquisa.

Tabela 10 – Variáveis da pesquisa

Variáveis da Pesquisa	Valores
Tipo de espaçador	Referência Torre de plástico Centopeia de plástico Torre de argamassa Prisma de argamassa
Exposição	Úmida (Sem estresse térmico) Ciclos de Calor (Com estresse térmico)
Dias de corrosão (somente para análise da iniciação)	2 dias 4 dias 6 dias 8 dias 10 dias

Por fim, os ensaios realizados serão detalhados no item a seguir.

### 3.5 ENSAIOS REALIZADOS

Para a obtenção dos resultados para análise, foi necessária a elaboração e execução de dois ensaios: o *ensaio colorimétrico* durante a análise da iniciação e o *redimensionamento a laser* durante a análise da propagação. Além disso, durante todo o processo foram feitas análises preliminares de *microscopia ótica*. Esses ensaios estão descritos detalhadamente na sequência.

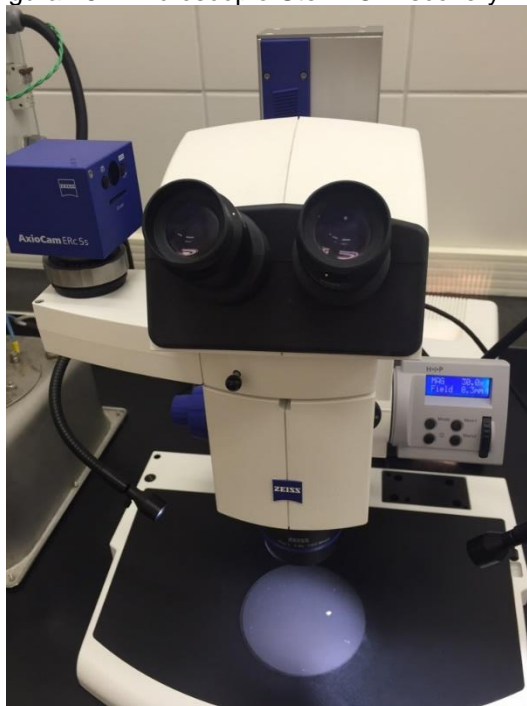
#### 3.5.1 Microscopia Ótica

A fim de analisar o comportamento da interação entre os materiais dos espaçadores e o concreto, foi utilizado um microscópio estereoscópio modelo SteREO

Discovery.V12 da marca ZEISS (Figura 28) para a visualização da interface entre os materiais. Os corpos de prova passaram por dois tipos de exposição: a cura úmida e a exposição a ciclos de calor.

Após esse processo, os corpos de prova eram posicionados no microscópio, observando a existência de fissuras e possíveis perdas de aderência entre os materiais. A utilização desse equipamento permitiu um detalhamento da região estudada, pela obtenção de imagens digitais com auxílio de *softwares*, por conta dos dois caminhos óticos separados do microscópio que proporcionam ângulos de visão diferentes da amostra. O lote de amostras utilizado nessa etapa da pesquisa não foi submetido à corrosão, já que a análise a ser feita se limitava à observação da interface entre o concreto e os espaçadores utilizados após as duas diferentes condições de exposição.

Figura 28 – Microscópio SteREO Discovery.V12



Fonte: Acervo da pesquisa

### 3.5.2 Ensaio Colorimétrico

Após a exposição dos corpos de prova ao processo de iniciação da corrosão, com a aplicação da tensão constante com uma ddp de 10V, estes foram rompidos

axialmente em prensa hidráulica. A seguir, a zona fraturada dos corpos de prova foi submetida ao ensaio de Aspersão de Nitrato de Prata.

O método de Aspersão de Solução de Nitrato de Prata no concreto foi desenvolvido na década de 1970 no intuito de determinar a frente de penetração de cloretos em estruturas inseridas em ambiente marinho. O método colorimétrico de Aspersão de Nitrato de Prata é um ensaio qualitativo para detecção de cloretos livres em concretos. Seu método é baseado na aplicação de um indicador químico capaz de alterar a coloração do concreto na presença de cloretos (MOTA, 2012).

A solução de Nitrato de Prata ( $\text{AgNO}_3$ ), quando aspergida em concreto contaminado por cloretos, reage com eles e forma um precipitado branco e floculento de cloreto de prata ( $\text{AgCl}$ ). O procedimento aplicado ao presente estudo foi baseado na norma italiana UNI 7928 (1978), que estipula uma solução de Nitrato de Prata com concentração de 0,1 mol/l, ou seja, 17 g de  $\text{AgNO}_3$  para 1 litro de água destilada.

A solução preparada em laboratório era aspergida nos corpos de prova e, após alguns minutos, eram feitas leituras da profundidade de penetração de cloretos ou mesmo da existência de cloretos, conforme a Figura 29.

Figura 29 – Aspersão de Solução de Nitrato de Prata sobre o corpo de prova para verificação da penetração de cloretos



Fonte: Acervo da pesquisa

A Tabela 11 relaciona a coloração da superfície de concreto com a presença ou ausência de cloretos livres. Essa tabela serviu de parâmetro para a análise dos resultados encontrados.

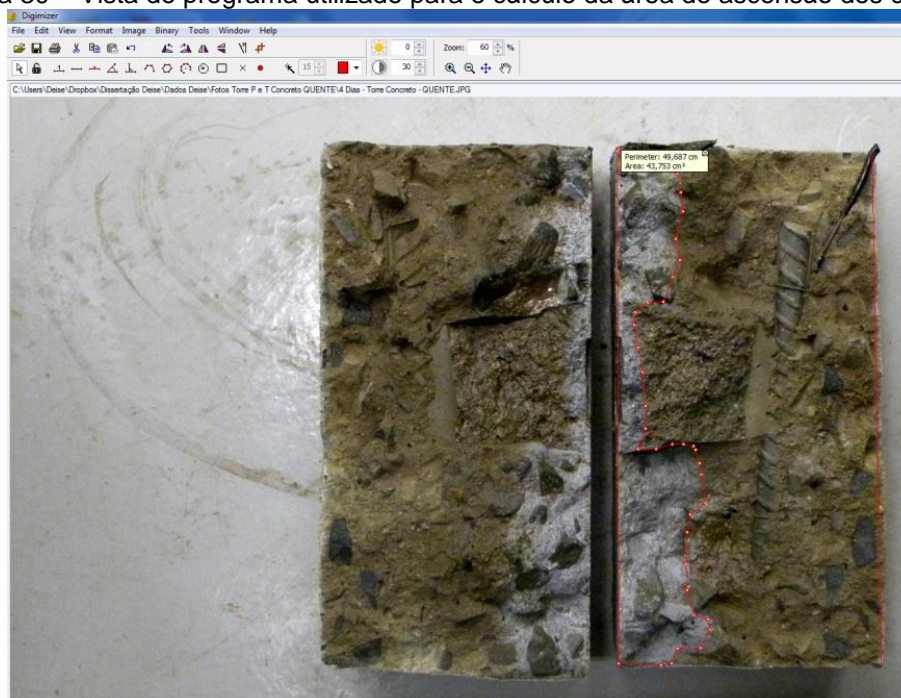
Tabela 11 – Designação dos cloretos em relação à superfície do concreto

Coloração da Superfície do Concreto	Designação
Branco	Presença de Cloretos Livres
Marrom	Ausência de Cloretos Livres

Fonte: França, 2011, p. 45

Após cerca de 10 minutos, os corpos de prova eram fotografados perpendicularmente, com o cuidado de mantê-los sempre na mesma posição. Para isso, usou-se um tripé fotográfico, a fim de facilitar as comparações. Essa imagem foi inserida no *software Digimizer 4.3.0* e passou por um tratamento de imagem. Após, foi calculada a profundidade máxima de penetração, assim como a área da ascensão dos cloretos nos corpos de prova para o posterior cálculo da média dessa área. Isso pode ser observado na Figura 30.

Figura 30 – Vista do programa utilizado para o cálculo da área de ascensão dos cloretos



Fonte: Acervo da pesquisa

### 3.5.3 Redimensionamento a Laser

Para a realização desse ensaio, o material precisou passar por uma preparação prévia. Executou-se a limpeza das barras, bem como a determinação da perda de massa e da redução de seção.

Após a aceleração da corrosão com corrente constante, os corpos de prova foram rompidos axialmente com auxílio da prensa hidráulica, para retirada da barra que estava no seu interior, conforme a Figura 31.

Figura 31 – Rompimento dos corpos de prova para extração da barra de armadura



Fonte: Acervo da pesquisa

Antes de realizar a pesagem das barras, realizou-se a limpeza com a solução recomendada pela ASTM A380 (1996). Esse procedimento de limpeza já foi utilizado por autores como Kirchheim *et al.* (2005), Torres (2006), Graeff (2007) e Caetano (2008).

O excesso de concreto ao redor da barra foi retirado manualmente. As barras foram imersas em uma solução contendo 3,5 g de hexametileno tetramina diluídos em 500 ml de ácido clorídrico e 500 ml de água reagente, de acordo com os procedimentos preconizados pela ASTM G1-03 (2003), e mantidas nessa solução por um período de 40 minutos.

As barras foram retiradas da solução e limpas em água corrente para que fosse eliminado qualquer resíduo que pudesse ter permanecido na superfície do metal. Na etapa posterior, os fragmentos de barra foram colocados em uma estufa, com



temperatura média de 25°C. Após a secagem, as barras foram polidas com uma escova de aço rotativa para eliminar quaisquer resquícios de concreto.

As várias etapas envolvidas nos procedimentos de recuperação e limpeza da barra podem ser vistas na Figura 32.

Figura 32 – Procedimento de limpeza das barras



Imersão em solução contendo 3,5 g de hexametileno



Lavagem em água corrente



Polimento com escova de aço rotativa para eliminar quaisquer resquícios de concreto



Barra pronta para ir para o ensaio de Redimensionamento a Laser

Fonte: Acervo da pesquisa

Após a limpeza, foi feita a pesagem das barras e calculado o valor de perda de massa devido ao processo corrosivo, conforme a Equação 5:

$$GC(\%) = \frac{\Delta m}{m_{inic}} \times 100 \quad (5)$$

Onde:

$GC$  = grau de corrosão (em %)

$\Delta m$  = variação de massa após o processo de corrosão (em gramas)

$m_{inic}$  = massa inicial da barra de armadura (em gramas)

O grau de corrosão é dado pela porcentagem de massa que foi consumida, em relação à massa inicial da barra de armadura.

Após essa pesagem, as barras foram submetidas ao Ensaio de Redimensionamento a Laser, realizado no Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM/UFRGS), que possui um Scanner Tridimensional a Laser, capaz de gerar nuvens de pontos em ambiente 3D de qualquer superfície.

Esse processo propicia a verificação da área exata das seções transversais das barras de armadura em intervalos a cada 5 mm. Com isso, pode-se analisar exatamente em que local ocorreu a maior perda de massa. A Figura 33 apresenta uma amostra de uma barra sendo digitalizada.

Figura 33 – Barra de armadura durante o processo de digitalização



Fonte: Acervo da pesquisa

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão discutidos os resultados obtidos no programa experimental desenvolvido neste estudo, de acordo com o fluxograma apresentado no Capítulo 3. Os dados obtidos de cada experimento serão analisados de forma a subsidiar as conclusões da pesquisa, que estão relatadas no capítulo seguinte.

A fim de facilitar o entendimento dos resultados, como já mencionado em capítulo anterior, definiu-se que corpos de prova que foram submetidos à cura úmida serão designados como *sem estresse térmico*, enquanto corpos de prova que passaram pelo processo de ciclos de calor serão chamados de *com estresse térmico*.

Os espaçadores utilizados foram: torre de plástico, centopeia de plástico, torre de argamassa e prisma de argamassa, conforme mostra a Figura 34:

Figura 34 – Nomenclatura dos espaçadores



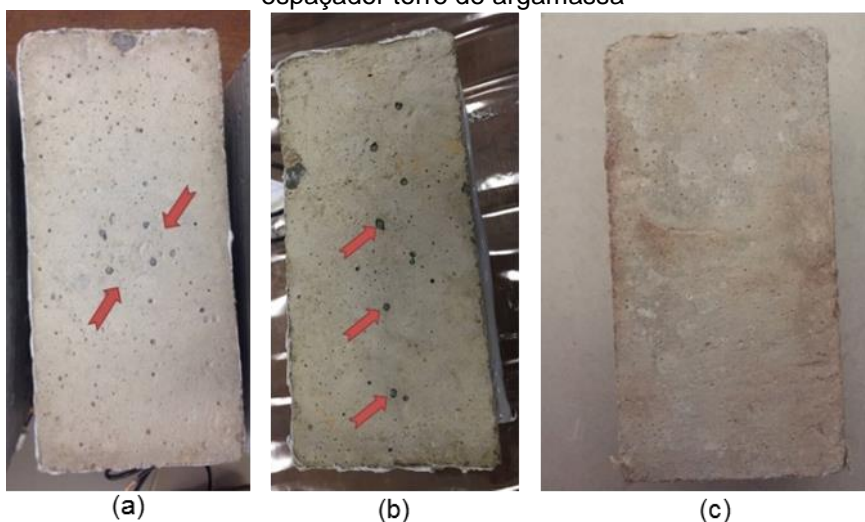
Fonte: Acervo da Pesquisa

### 4.1 ANÁLISE DA MICROSCOPIA ÓTICA

Anteriormente aos ensaios de microscopia ótica, foi feita uma avaliação visual, sem auxílio de qualquer equipamento na visualização. Na Figura 35, pode-se observar os corpos de prova, logo após a retirada da forma e antes de serem ensaiados. A face que ficou em contato com a forma muitas vezes expôs o espaçador de plástico, como pode ser visto nas imagens (a) e (b). Esses pequenos orifícios na superfície de

concreto – que ficam sem a proteção da pasta de cimento – deixam espaços para a entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto, facilitando assim sua ascensão. Na imagem (c), observa-se um corpo de prova com a utilização de espaçador de argamassa, na qual fica muito difícil identificar os dois elementos separadamente. Essa primeira avaliação visual, sem a aplicação da metodologia proposta, já apresenta fortes indícios de que a utilização de modelos de espaçadores de plástico diminui a vida útil das estruturas, uma vez que é evidente a presença de poros na face.

Figura 35 – Aparência dos corpos de prova após serem deformados  
(a) Uso do espaçador torre de plástico; (b) Uso do espaçador centopeia de plástico; (c) Uso do espaçador torre de argamassa



Fonte: Acervo da pesquisa

A microscopia ótica foi uma fase preliminar do estudo, que incluiu a primeira análise da pesquisa, uma vez que os resultados encontrados podem servir como respostas aos dados e resultados obtidos nos ensaios subsequentes. Foi utilizado um zoom de 30 vezes para que os resultados fossem melhor observados.

Na Figura 36, pode-se observar como o corpo de prova com a utilização do espaçador centopeia de plástico se comportou frente aos ciclos de calor (com estresse térmico). Foram realizadas medidas do tamanho da abertura das fissuras, as quais ficaram entre 0,12 mm e 0,52 mm. Existem algumas classificações quanto ao tamanho da abertura de fissuras. Segundo a norma de impermeabilização (NBR 9575:2003), as microfissuras têm abertura inferior a 0,05 mm. As aberturas com até 0,5 mm são chamadas de fissuras e, por fim, as maiores de 0,5 mm e menores de 1,0 mm são

chamadas de trincas. Nesse caso, em alguns pontos ocorreram trincas no concreto, que são altamente prejudiciais, facilitando o ingresso de agentes agressivos.

Figura 36 – Corpo de prova com espaçador centopeia após os ciclos de calor



Fonte: Acervo da pesquisa

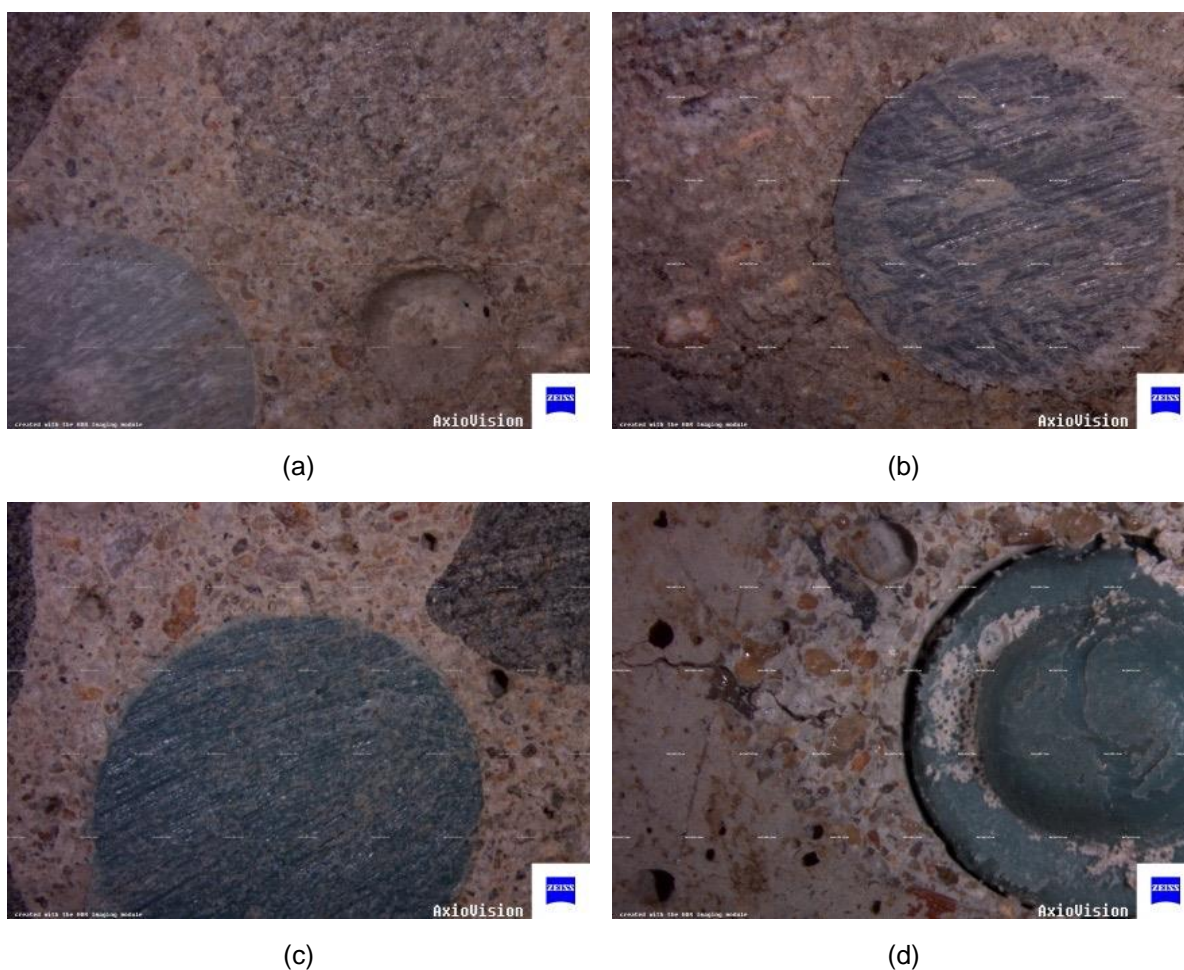
As fissuras e trincas encontradas são de origem térmica e estão relacionadas com as propriedades físicas do material e com a intensidade da variação da temperatura. Elas surgem como alívio de tensões residuais ocasionadas pelo acúmulo de energia elástica durante a contração diferenciada no resfriamento do corpo de prova. Nesse caso, quando utilizado o espaçador de plástico, este possui coeficiente de dilatação térmica diferente do concreto; logo, quando um elemento constituído por esses dois materiais é submetido a variações de temperatura, apresenta dilatações e contrações diferenciadas, auxiliando no aparecimento de fissuras e trincas. Em uma situação real, a principal fonte de calor que atua sobre os elementos é o sol, e os principais fatores responsáveis por esses ciclos são a diminuição ou o aumento da incidência solar, e até mesmo a vazão das chuvas.

Na Figura 37, pode-se observar as imagens de corpos de prova quando submetidos à microscopia ótica. Na imagem (a), foi utilizado o espaçador centopeia de plástico, porém esse corpo de prova foi submetido à cura úmida; assim, não houve dilatação entre os materiais, deixando íntegra a interface entre concreto e plástico. Na

imagem (b), também foi utilizado o mesmo espaçador, com exposição a ciclos de calor; nesse caso, foi observada uma fissura na interface entre o espaçador e o concreto com abertura de 0,4 mm, causada pela dilatação térmica dos materiais concreto e plástico.

Nas imagens (c) e (d), foi utilizado o espaçador torre de plástico. Na imagem (c), com a utilização de cura úmida, não houve dilatação entre concreto e plástico. No corpo de prova que passou pelos ciclos de calor, surgiu uma fissura no tamanho de 0,5 mm.

Figura 37 – Imagens de corpos de prova no microscópio ótico (a) Centopeia de plástico sem estresse térmico; (b) Centopeia de plástico com estresse térmico; (c) Torre de plástico sem estresse térmico; (d) Torre de plástico com estresse térmico

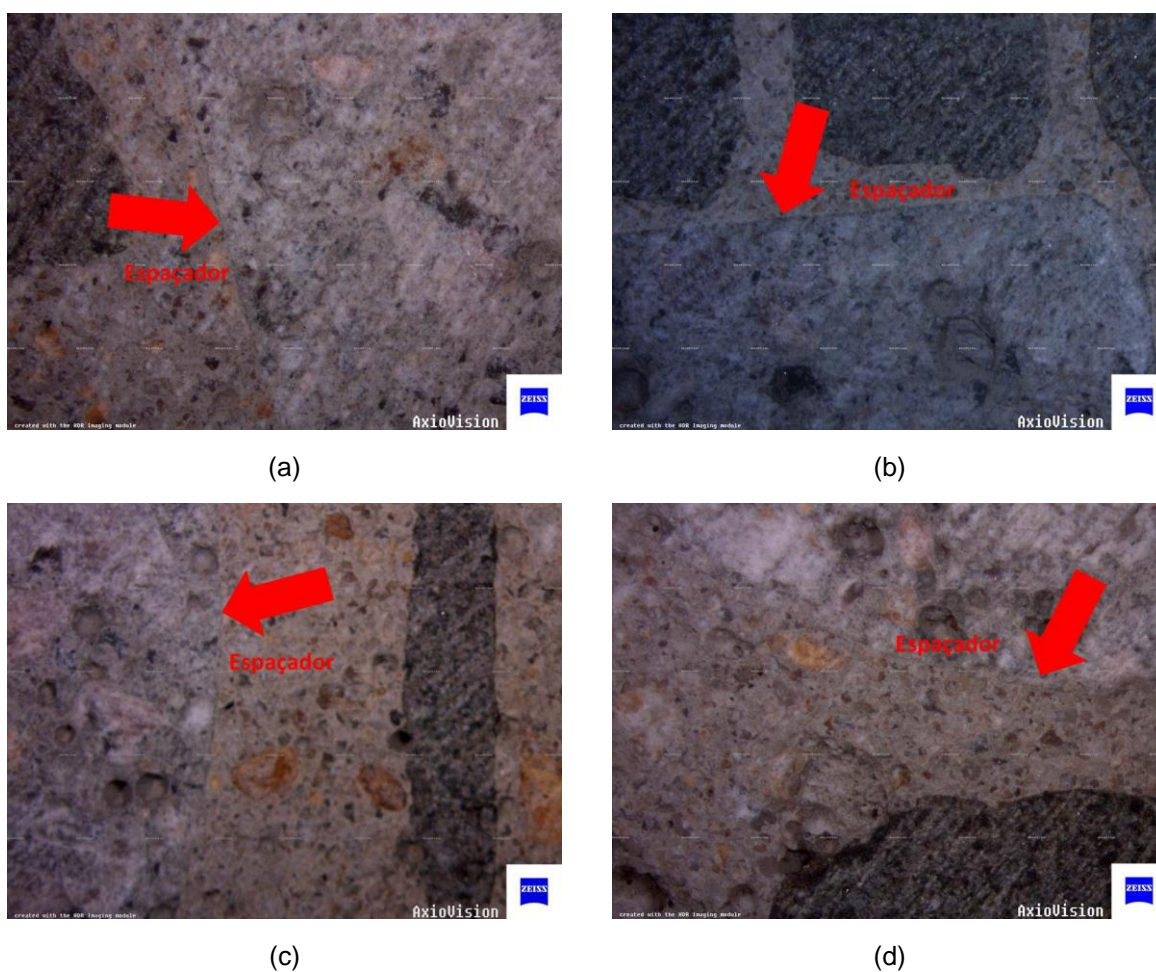


Fonte: Acervo da pesquisa

É apresentado na Figura 38 um conjunto de imagens referentes à utilização dos espaçadores de argamassa. Nas imagens, pode-se observar que mesmo com a

utilização das duas condições de exposição (com e sem estresse térmico), a interface não apresentou qualquer interferência para a análise. Assim, ela não compromete a aderência entre os dois materiais, o que se explica pelo fato de que eles possuem semelhante coeficiente de dilatação térmica, apresentando uma interface continuada entre o espaçador e o concreto.

Figura 38 – Imagens de corpos de prova no microscópio ótico (a) Prisma de argamassa sem estresse térmico; (b) Prisma de argamassa com estresse térmico; (c) Torre de argamassa sem estresse térmico (d) Torre de argamassa com estresse térmico



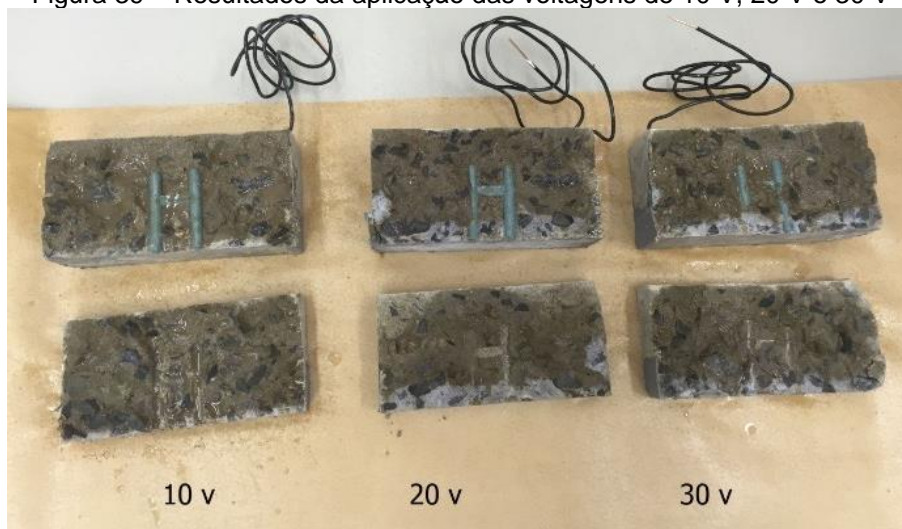
Fonte: Acervo da pesquisa

A partir dessa análise preliminar, fica evidente a relevância do estresse térmico ao qual as amostras foram expostas e sua importância do ponto de vista dos estudos da corrosão. Em estruturas reais, que são construídas em dias de calor, frio, chuva, ventania, essas fissuras podem surgir pela dilatação diferenciada dos diferentes materiais utilizados.

## 4.2 ANÁLISE DA INICIAÇÃO DA CORROSÃO

Foi necessário realizar uma calibração prévia, que serviu de base para os ensaios de iniciação, pois nessa calibração se definiu a ddp necessária para viabilizar o acompanhamento da ascensão de cloretos a cada dois dias, como descrito no Capítulo 3. A duração do ensaio de calibração foi de 24 horas, e os corpos de prova foram submetidos a uma ddp de 10, 20 e 30 V, como já foi explicado no Item 3.3.2. Na Figura 39, pode-se observar, com o auxílio de nitrato de prata, a ascensão de cloretos no ensaio de calibração nas três voltagens utilizadas.

Figura 39 – Resultados da aplicação das voltagens de 10 V, 20 V e 30 V

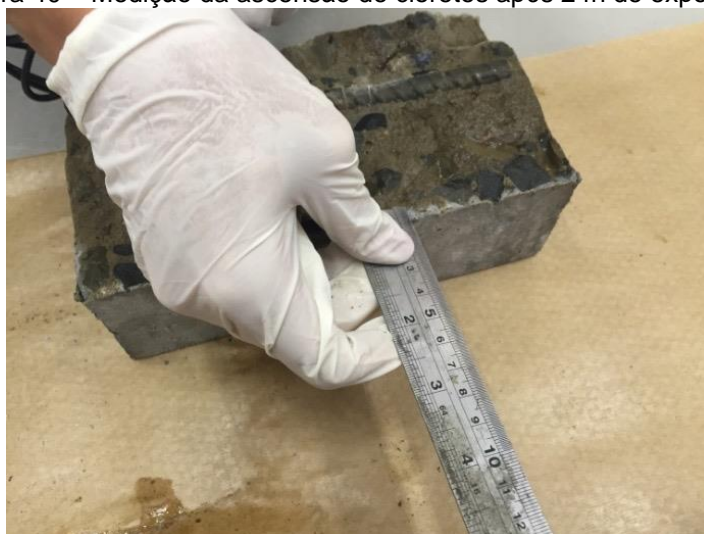


Fonte: Acervo da pesquisa

Os corpos de prova submetidos à ddp de 10 V apresentaram uma ascensão menor de cloretos, se comparados aos submetidos a 20 e 30 V. A taxa de ascensão foi de 0,5 cm em 24 horas para a ddp de 10 V, como pode ser observado na Figura 40.



Figura 40 – Medição da ascensão de cloretos após 24h de exposição



Fonte: Acervo da pesquisa

As voltagens de 20 e 30 V não trouxeram bons resultados, pois com essas diferenças de potencial os cloretos chegariam muito rapidamente à barra (para a ddp de 20 V, a taxa de ascensão foi de 2 cm em 24h; na ddp de 30 V, foi de 2,5 cm no mesmo período). Como o objetivo dos ensaios de iniciação foi analisar a ascensão de cloretos a cada dois dias, essas ddp não seriam adequadas para este programa experimental. Assim, foi escolhida a ddp de 10 V para uma análise mais minuciosa.

Depois de definida a ddp a ser utilizada, iniciou-se o processo de aceleração da corrosão, com a aplicação de voltagem constante. Após o tempo determinado de corrosão, os corpos de prova foram submetidos ao ensaio colorimétrico, conforme as especificações descritas no Item 3.5.2.

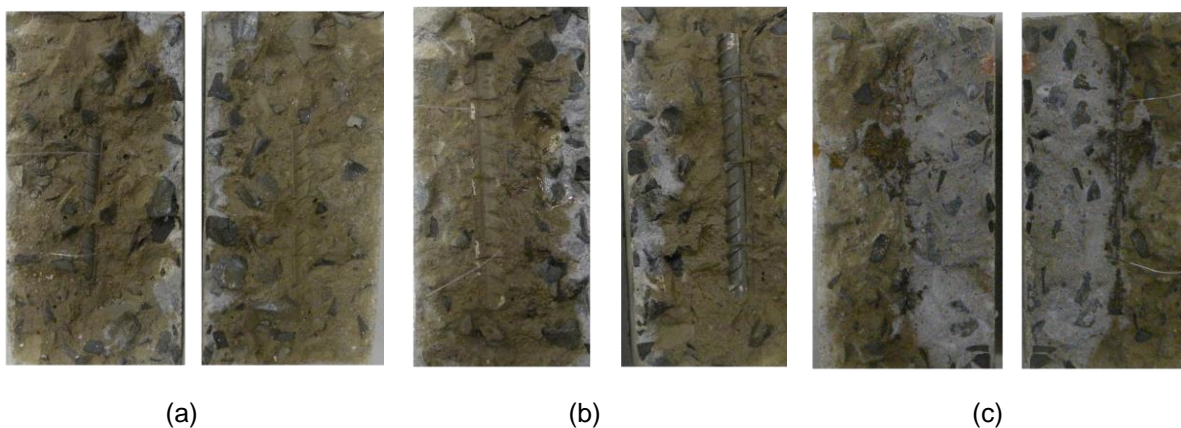
#### 4.2.1 Análise Qualitativa da Iniciação

As Figuras 41 a 49 apresentam os resultados de uma análise qualitativa realizada nos corpos de prova. São apresentadas as imagens dos corpos de prova com 2 dias, 6 dias e 10 dias de aceleração da corrosão. As demais imagens (4 e 8 dias) se encontram no Anexo A. As imagens apresentadas são referentes aos corpos de prova submetidos à cura em câmara úmida (sem estresse térmico).

Na Figura 41, são apresentadas as imagens dos corpos de prova referência, nos quais não foi utilizado nenhum tipo de espaçador. É possível perceber que a

ascensão de cloretos foi uniforme ao longo dos dias em que os corpos de provas foram observados, conforme esperado.

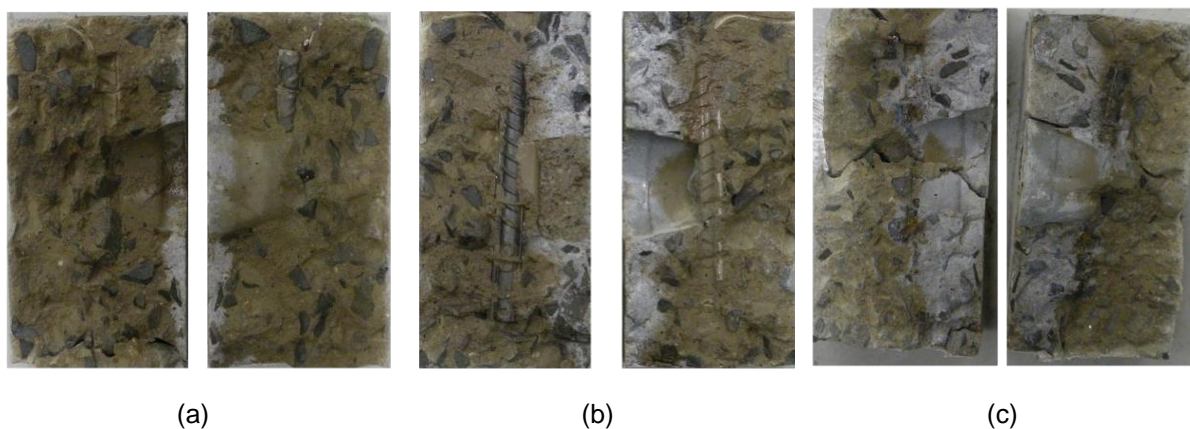
Figura 41 – (a) Referência 2 dias; (b) Referência 6 dias; (c) Referência 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

A Figura 42 apresenta os corpos de prova com a utilização do espaçador torre de argamassa. Pode-se ver, na imagem (b), que os cloretos ascendem em direção à barra, mas que no interior do espaçador essa penetração se torna mais difícil.

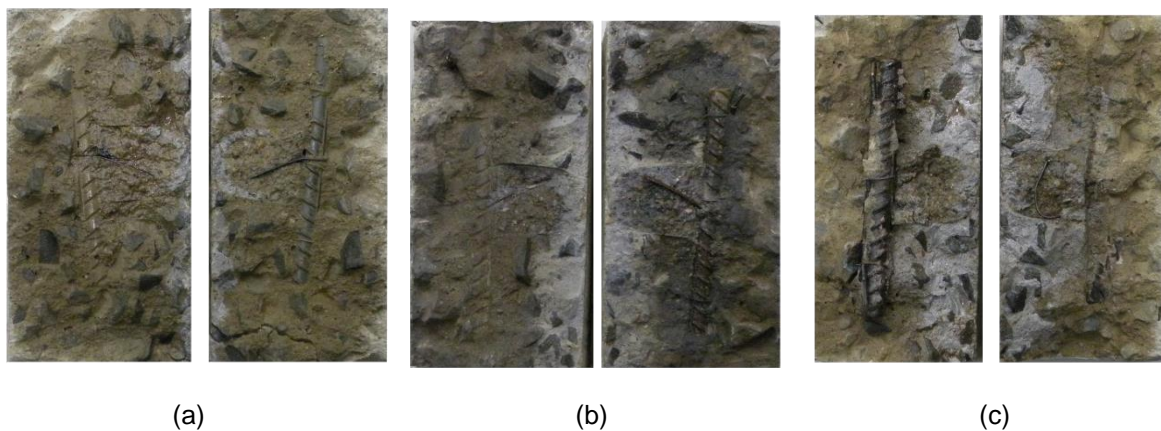
Figura 42 – (a) Torre de argamassa 2 dias; (b) Torre de argamassa 6 dias; (c) Torre de argamassa 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

O mesmo comportamento se observa na Figura 43, na qual são exibidos os corpos de prova com a utilização do espaçador prisma de argamassa. Nesse caso, a velocidade de penetração de cloretos no interior do espaçador parece ter sido menor.

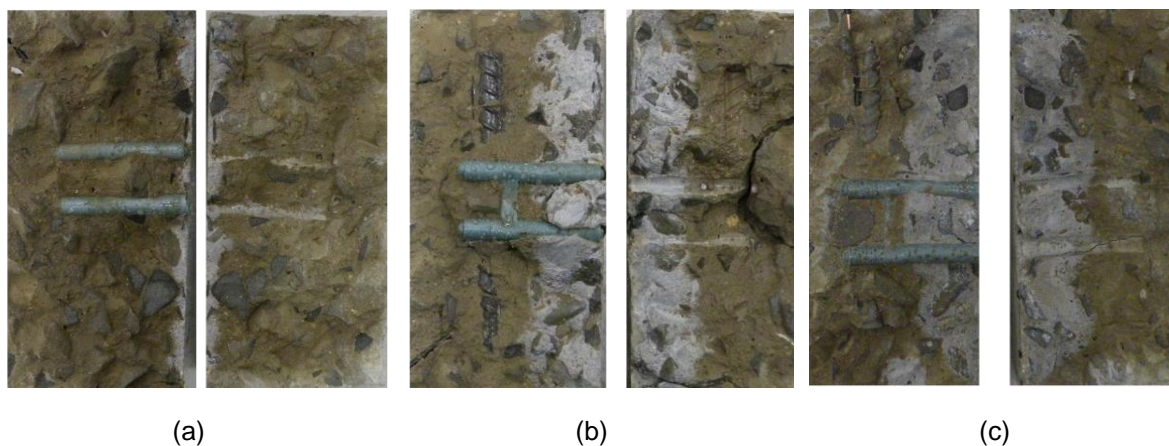
Figura 43 – (a) Prisma de argamassa 2 dias; (b) Prisma de argamassa 6 dias; (c) Prisma de argamassa 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

Pode-se observar, na Figura 44, a utilização do espaçador de plástico modelo torre. Se compararmos as duas condições de exposição, a ascensão dos corpos de prova sem estresse térmico foi mais lenta, chegando à barra ao término do ensaio, próximo aos 10 dias. No outro caso (com ciclos de calor, que está apresentado na Figura 45, mais adiante), já se observou os cloretos chegando até a barra no segundo dia de ensaio.

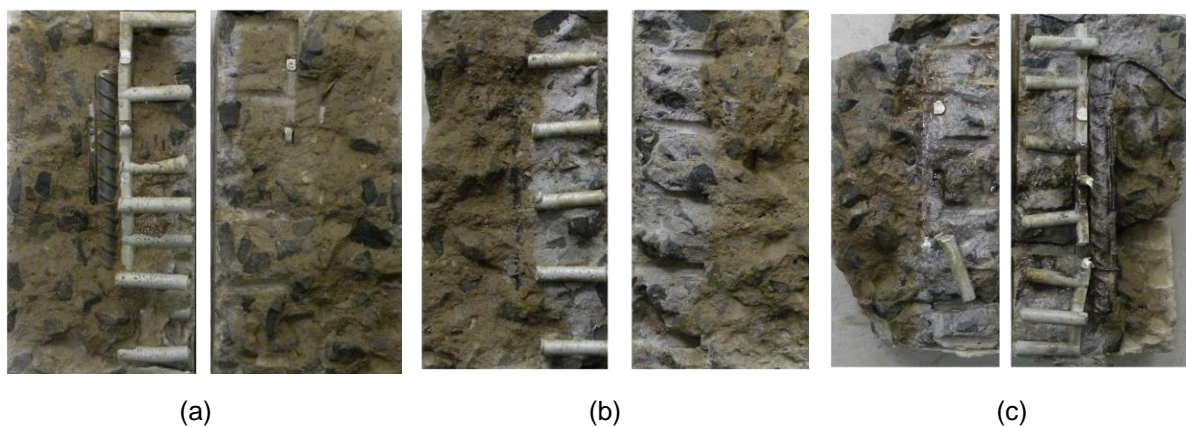
Figura 44 – (a) Torre de plástico 2 dias; (b) Torre de plástico 6 dias; (c) Torre de plástico 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

A mesma evidência se comprovou com a utilização do espaçador centopeia de plástico (Figura 45), ou seja, os cloretos penetraram mais lentamente até a barra quando não foram submetidos a ciclos de calor.

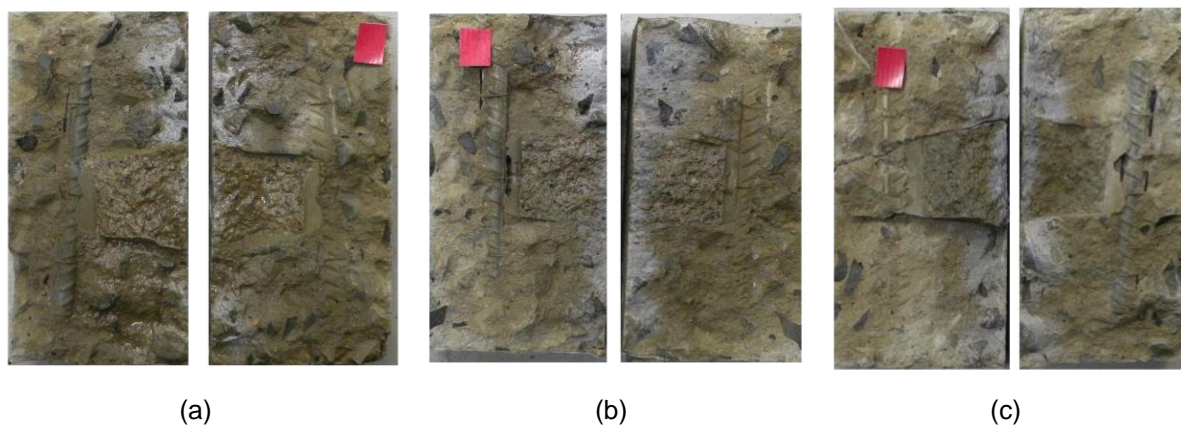
Figura 45 – (a) Centopeia de plástico 2 dias; (b) Centopeia de plástico 6 dias; (c) Centopeia de plástico 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

A partir da Figura 46, são apresentados os corpos de prova que foram submetidos a ciclos de calor (marcados em uma das faces por uma etiqueta vermelha, a fim de facilitar a identificação). Nas imagens da Figura 43, são apresentados os corpos de prova com a utilização do espaçador torre de argamassa. Observa-se o início da entrada de cloretos na área mais clara, onde acontece a maior concentração dos íons. Nessa sequência de imagens, nota-se que, por ser utilizado o espaçador de argamassa, a maior entrada de cloretos se deu fora da região do espaçador. Os cloretos demoram mais tempo para penetrar no espaçador, por ele apresentar uma absorção de água menor em relação ao concreto utilizado.

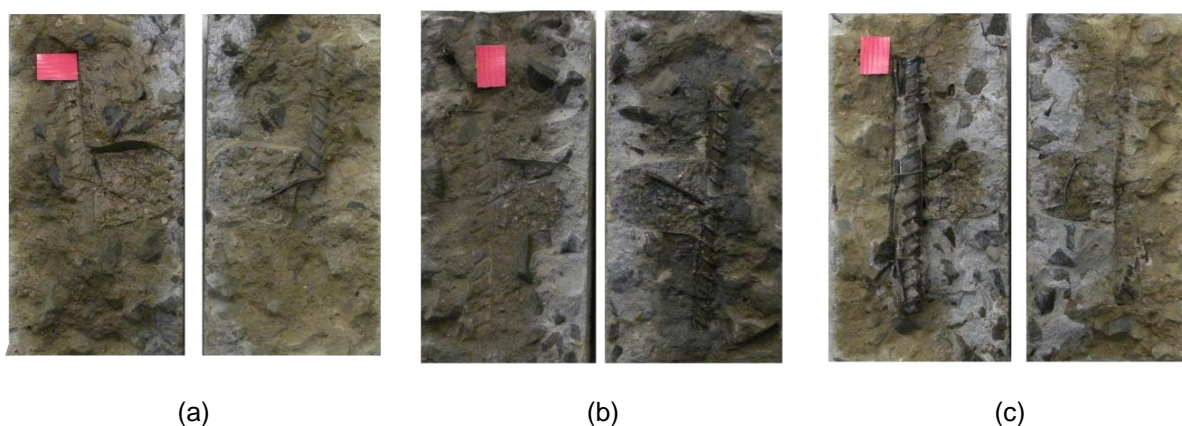
Figura 46 – (a) Torre de argamassa 2 dias; (b) Torre de argamassa 6 dias; (c) Torre de argamassa 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

É possível visualizar na Figura 47 os corpos de prova com a utilização do espaçador prisma de argamassa. Percebe-se uma semelhança com o caso anterior, ou seja, uma maior ascensão na área do concreto do que na do espaçador. Vê-se, na imagem (c), a grande diferença entre a ascensão de cloretos no concreto e na superfície do espaçador.

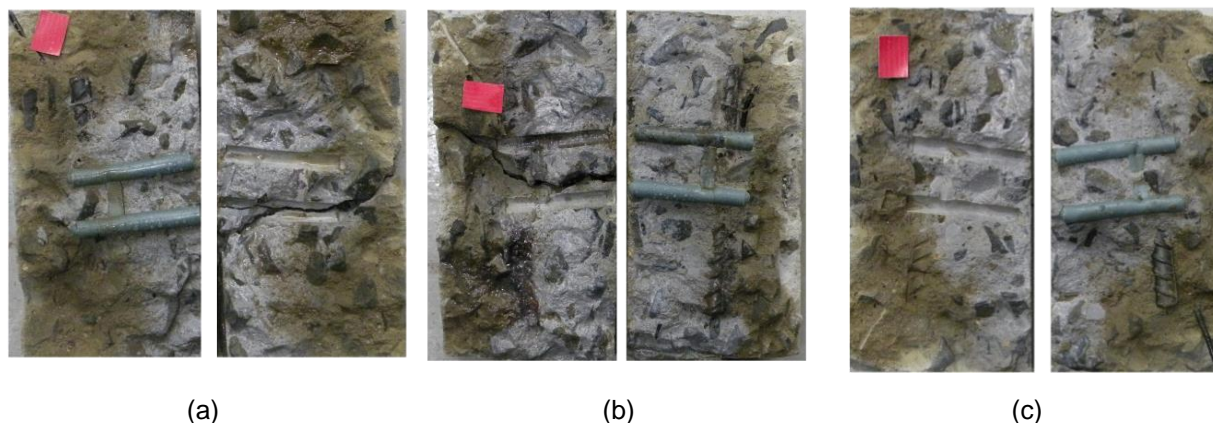
Figura 47 – (a) Prisma de argamassa 2 dias; (b) Prisma de argamassa 6 dias; (c) Prisma de argamassa 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

A Figura 48 mostra a utilização dos espaçadores de plástico, modelo torre. Pode-se notar que, com dois dias de aceleração da corrosão, os cloretos já atingiram a barra, apresentando nitidamente um ponto mais alto no local em que se encontra o espaçador de plástico. Isso evidencia a maior entrada de cloretos através do espaçador, comprovando assim o que foi visto na análise microscópica: fissuras e pequenos vazios entre os dois materiais após o estresse térmico, que facilitariam a penetração de cloretos.

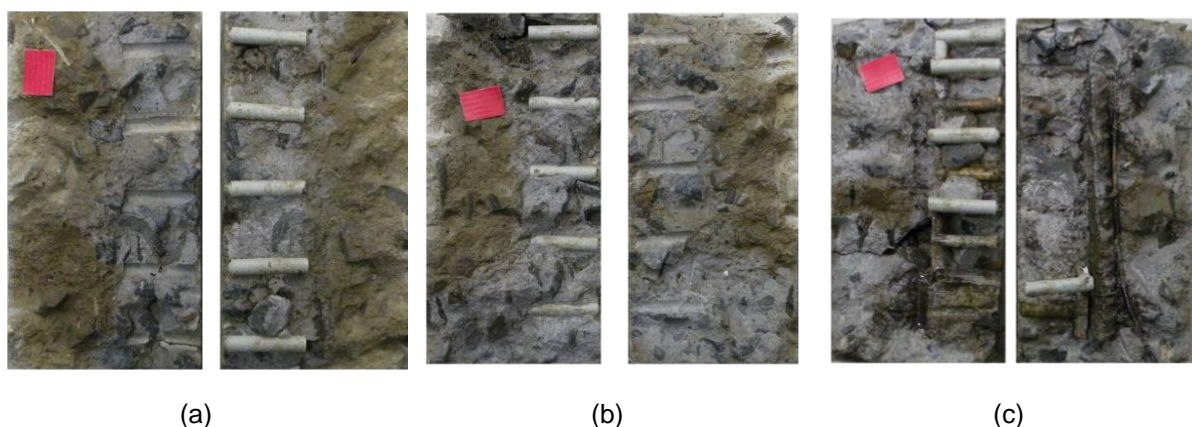
Figura 48 – (a) Torre de plástico 2 dias; (b) Torre de plástico 6 dias; (c) Torre de plástico 10 dias



Fonte: Acervo da pesquisa

A utilização do espaçador centopeia de plástico é exibida na Figura 49. Aqui ocorre um caso semelhante ao da figura anterior, porém muito mais agressivo. O espaçador utilizado, também de plástico, possui uma superfície de contato elevada (em comparação com os demais espaçadores) com o meio externo, propiciando o aparecimento de muitas falhas de concretagem durante a confecção do corpo de prova. É possível observar que a ascensão de cloretos se deu muito rapidamente; o corpo de prova está totalmente coberto de cloretos ao término do ensaio.

Figura 49 – (a) Centopeia de plástico 2 dias; (b) Centopeia de plástico 6 dias; (c) Centopeia de plástico 10 dias



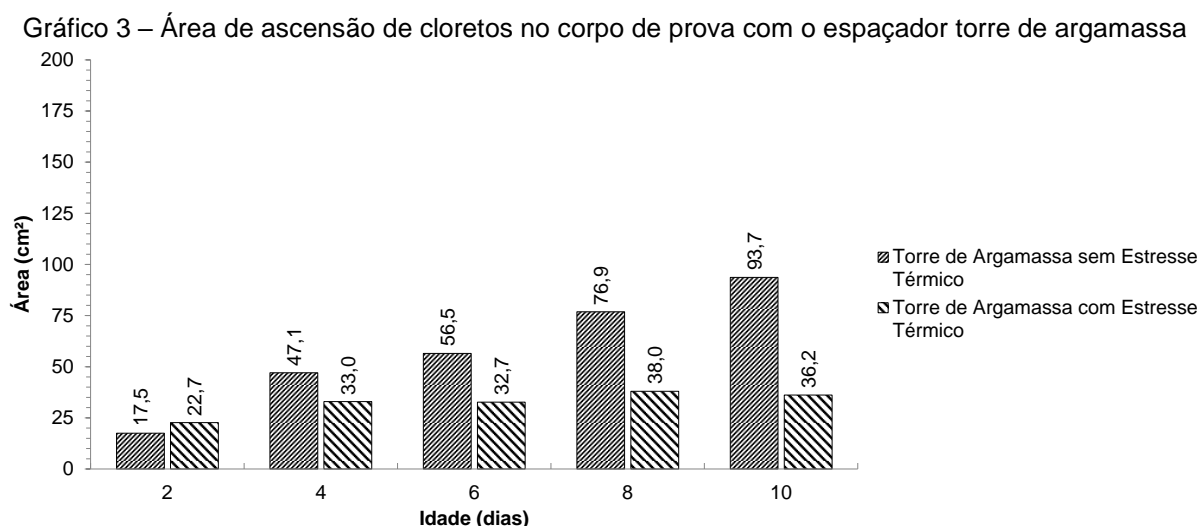
Fonte: Acervo da pesquisa

#### 4.2.2 Análise Quantitativa da Iniciação

A análise quantitativa compreende a medição da área de cloretos que ascenderam no corpo de prova. A primeira análise apresenta a interferência da condição de exposição nos resultados, conforme os gráficos a seguir.

Nessa etapa, os corpos de prova foram submetidos às duas condições de exposição: cura úmida e ciclos de calor. Pode-se observar nos gráficos a seguir que há uma gradativa elevação da ascensão de cloretos à medida que o tempo de exposição aumenta.

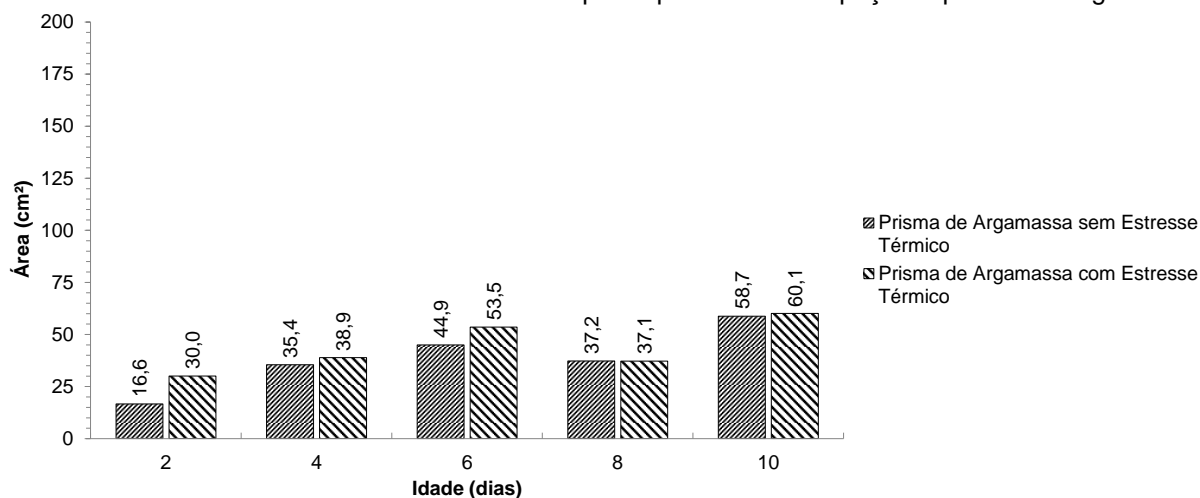
No Gráfico 3, é apresentado o resultado da análise com o espaçador torre de argamassa.



A diferença de área encontrada entre os espaçadores de argamassa sem estresse térmico e com estresse térmico pode se dar em função de uma compactação mais eficaz na hora da moldagem. Isso já ficou evidenciado na análise microscópica, visto que não foi possível perceber qualquer fissuração, nem interferência entre a interface espaçador-concreto.

A análise do espaçador prisma de argamassa é apresentada no Gráfico 4.

Gráfico 4 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador prisma de argamassa



Pode-se observar que a ascensão continuou gradativa com o passar dos dias; porém, no oitavo dia, ocorreu um decréscimo em relação ao sexto. A causa desse fenômeno ainda é desconhecida, mas é possível que tenha sido causado por algum ruído experimental, ou até mesmo pela compactação diferenciada do concreto (uma vez que a cada dia de análise são utilizados novos corpos de prova). No entanto, pela análise dos dados, constatou-se que o valor das áreas afetadas pelos cloretos ao longo dos dias é muito semelhante (em comparação com o espaçador torre de argamassa, por exemplo). Essa pouca diferença na variação da área está relacionada ao fato de que este apresenta um formato anatômico, tornando-se muito aderente à pasta de concreto.

Nos Gráficos 5 e 6, com espaçadores de plástico, percebe-se que o efeito da exposição fica mais evidente, visto que em todos os dias de ensaio o corpo de prova submetido aos ciclos de calor apresentou áreas consideravelmente maiores. A explicação desse fenômeno se dá porque os coeficientes de dilatação térmica do plástico e do concreto são diferentes. Assim, na exposição a ciclos de calor, essa dilatação e contração do plástico resultam no surgimento de fissuras, que facilitam a entrada de cloretos no corpo de prova.



Gráfico 5 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador torre de plástico

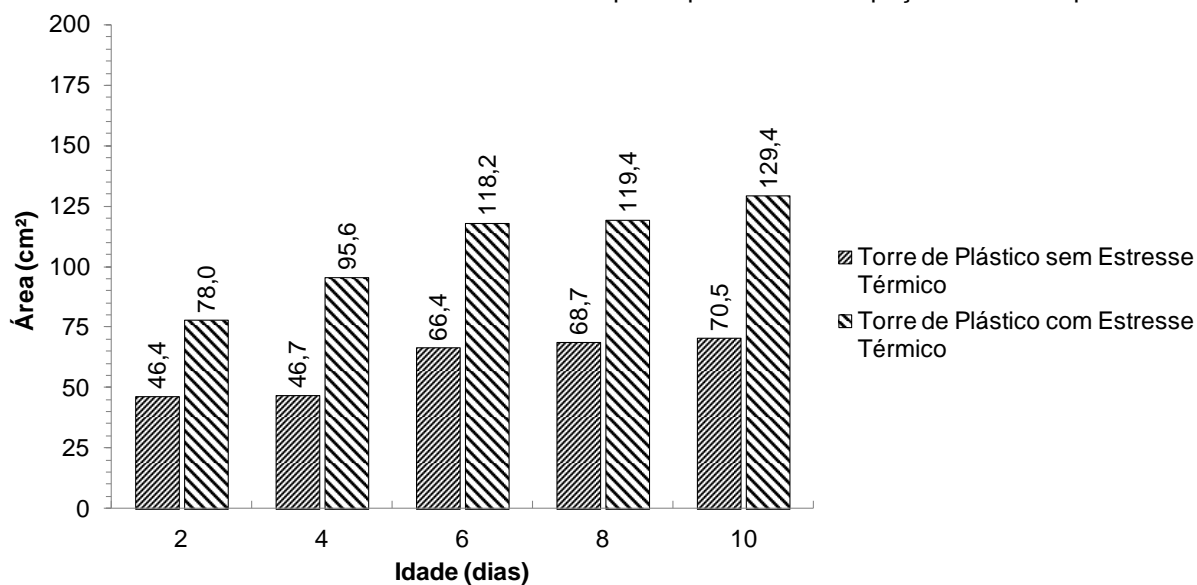
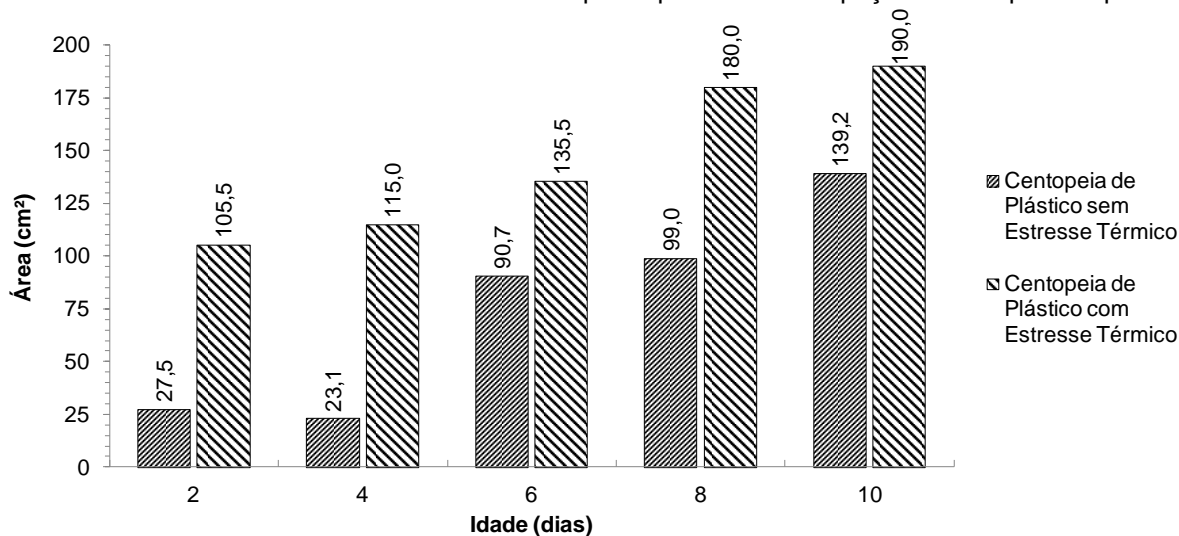


Gráfico 6 – Área de ascensão de cloretos no corpo de prova com o espaçador centopeia de plástico

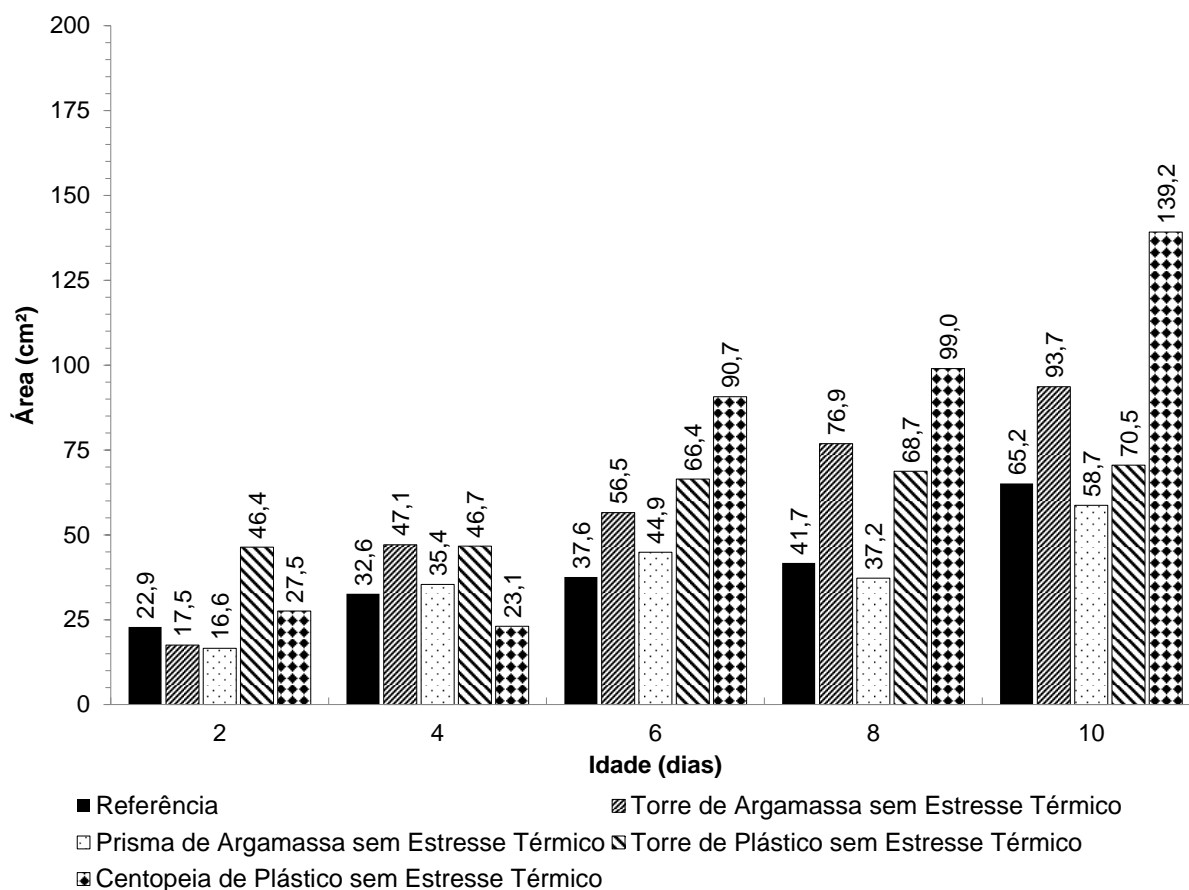


Dessa forma, pode-se observar que a condição de exposição dos corpos de prova é um fator que interfere quantitativamente na ascensão de cloretos ao interior do corpo de prova.

Os Gráficos 7 a 10 apresentam a interferência do tipo de espaçador na área de ascensão dos cloretos em corpos de prova submetidos à mesma condição de exposição.

No Gráfico 7, estão representados os espaçadores referência, torre de argamassa, torre de plástico, centopeia de plástico e prisma de argamassa, submetidos à cura úmida.

Gráfico 7 – Área de ascensão de cloretos em corpos de prova com diferentes espaçadores submetidos à cura úmida

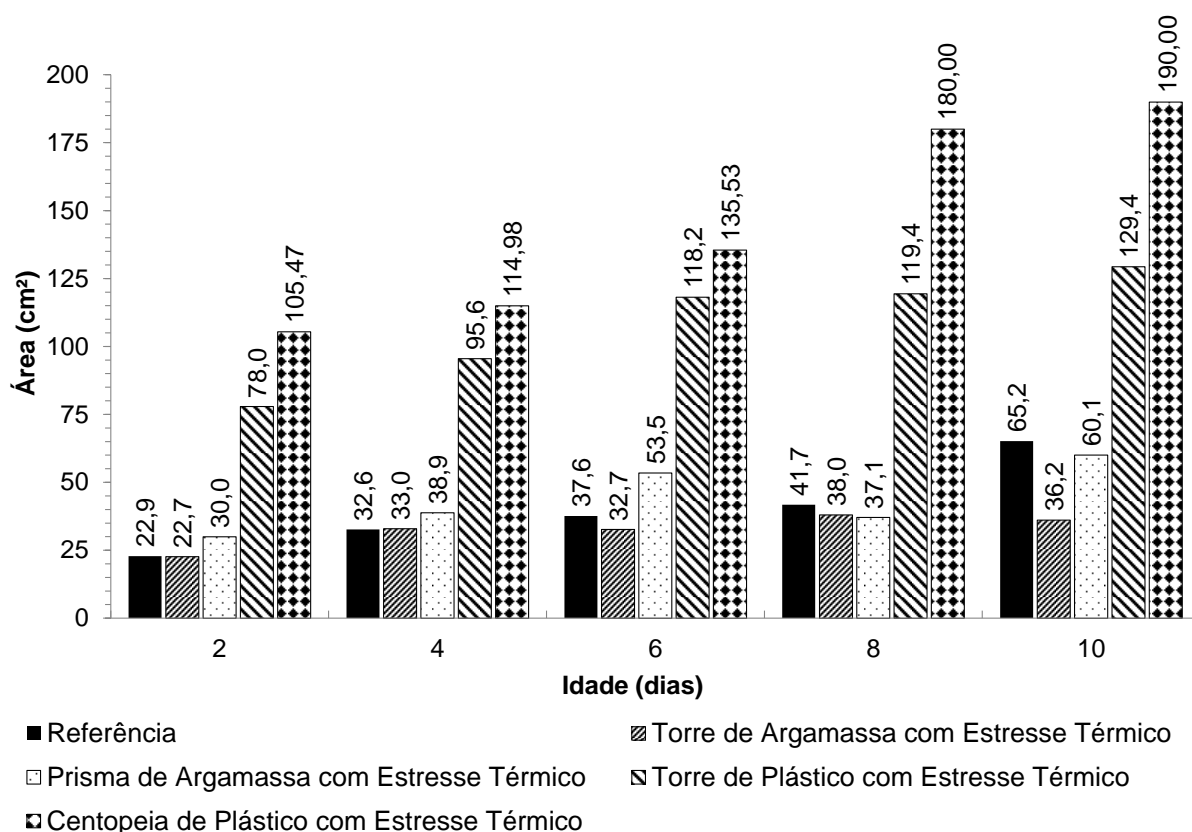


Sob a mesma condição de exposição, na análise dos modelos de espaçadores representados no gráfico, percebe-se que, no segundo dia de ensaio, os corpos de prova que contêm espaçadores de plástico apresentaram uma área maior de ascensão de cloretos. No sexto dia, o espaçador centopeia de plástico apresentou um aumento de área considerável. No oitavo dia de ensaio, os valores seguiram uma linha de tendência como no sexto dia. Ao fim do ensaio, no décimo dia, o espaçador centopeia de plástico atingiu a maior área computada, já que, como observado nos demais ensaios, a interface entre o plástico e o concreto é descontinuada, facilitando a entrada de cloretos.

Ao compararmos os espaçadores utilizados, percebemos que o espaçador centopeia apresentou piores resultados em termos de área afetada, enquanto o prisma de argamassa obteve os melhores resultados. Em relação ao centopeia, isso se dá em função do surgimento de um maior número de fissuras entre o espaçador e a pasta já na retirada da forma (devido ao maior tamanho em comparação com o torre de plástico). Acredita-se que o prisma obteve melhores resultados em função de seu formato, em conjunto com a argamassa que adere ao concreto.

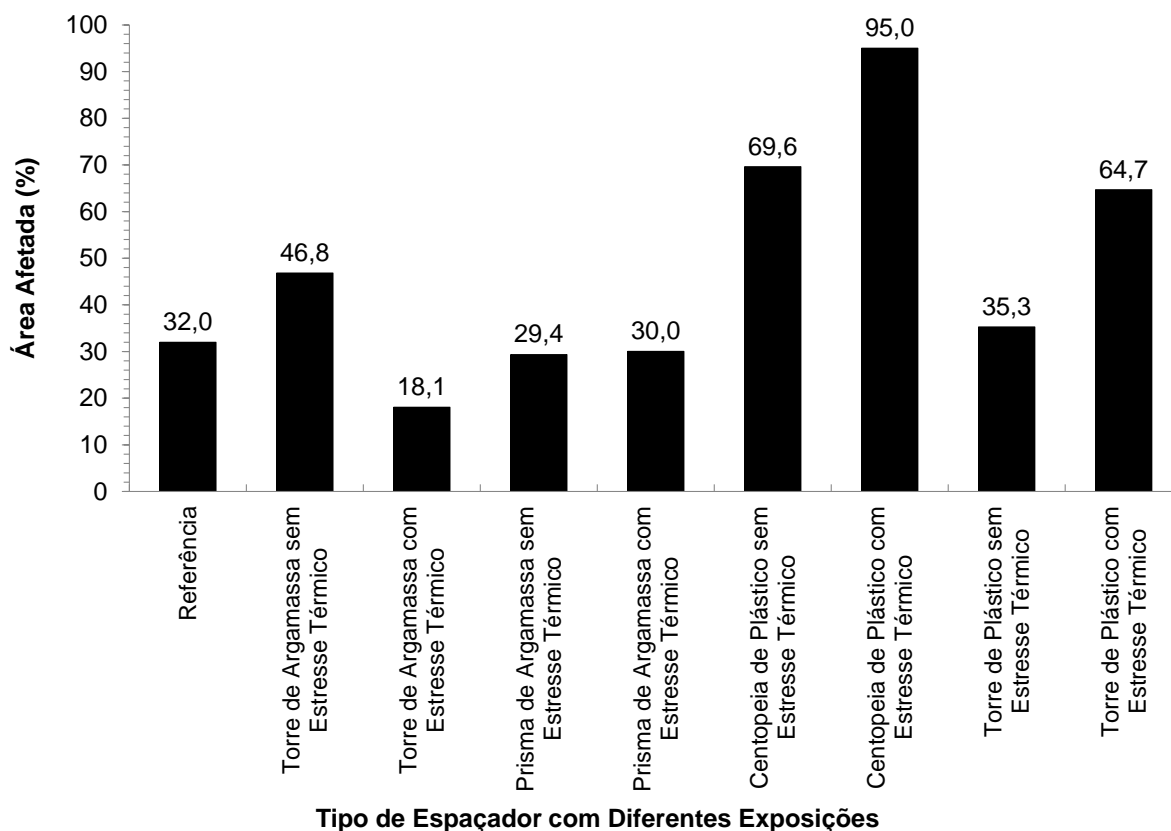
Realizando uma comparação entre os tipos de espaçadores com a condição de exposição a ciclos de calor, apresentada no Gráfico 8, notamos resultados semelhantes aos observados qualitativamente nas imagens, ou seja, com os corpos de prova com espaçadores de plástico apresentando uma área maior de ascensão de cloretos. Isso fica evidenciado desde a análise microscópica, devido à dilatação diferenciada dos materiais.

Gráfico 8 – Área de ascensão de cloretos em corpos de prova com diferentes espaçadores submetidos a ciclos de calor



No Gráfico 9, está representada a porcentagem de área do corpo de prova afetada pela ascensão de cloretos. Foram utilizados os resultados de todos os espaçadores, no 10<sup>o</sup> dia, nas duas condições de exposição.

Gráfico 9 – Porcentagem de área de ascensão de cloretos para os diferentes espaçadores aos 10 dias de exposição

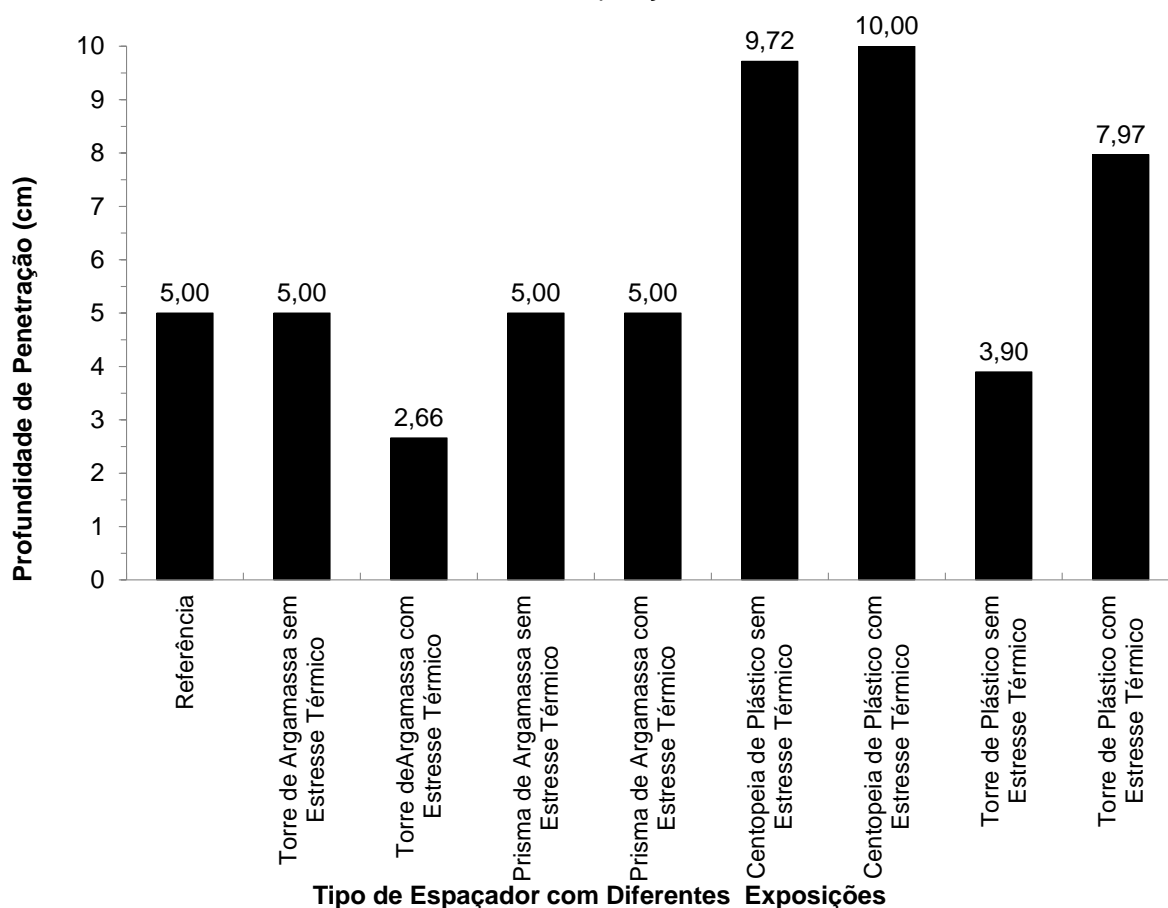


Comparando os tipos de materiais (argamassa e plástico), constata-se que os espaçadores de plástico, em geral, tiveram uma área maior de ascensão de cloretos, exceto o espaçador torre de plástico sem o estresse térmico, cuja área foi muito semelhante ao referência e ao de argamassa. O espaçador centopeia de plástico, mesmo sem ser submetido a uma exposição por ciclos de calor, já apresentou uma ascensão maior de cloretos do que o referência e os demais espaçadores, por ter uma área maior de contato entre o plástico e o concreto.

O que ficou evidenciado é que a condição de exposição, para os espaçadores de plástico, teve influência visível na área atingida pelos cloretos. Em vários estudos que abordam a corrosão de armaduras, esse fator – que pode diminuir consideravelmente a vida útil de uma estrutura – não é levado em consideração.

No Gráfico 10, é mostrada a profundidade máxima de penetração dos cloretos nos corpos de prova. Foram utilizados os resultados de todos os espaçadores, no 10º dia, nas duas condições de exposição.

Gráfico 10 – Profundidade máxima de penetração de cloretos para os diferentes espaçadores aos 10 dias de exposição



Constata-se que, com 10 dias de exposição, em alguns corpos de prova os cloretos chegaram até a barra, e em outros até passaram da barra, sendo mais agressivos. O comportamento esperado, se não houvesse interferência do espaçador com a migração de cloretos, seria igual ao do corpo de prova referência, que chegou a 5 cm com 10 dias.

É interessante observar os resultados apresentados pelo espaçador torre de argamassa com ciclos de calor, cuja ascensão foi mais lenta. Suspeita-se que o aquecimento do material influenciou positivamente nessa fase de hidratação do cimento, resultando num fechamento maior dos poros. Também é possível perceber que o espaçador torre de plástico apresentou uma ascensão menor do que o

referência, o que poderia ser justificado por uma eventual compactação diferenciada do concreto. Novamente ficou evidenciado que a condição de exposição é um aspecto relevante, e deve ser considerado atentamente nos estudos de corrosão.

Para um melhor entendimento do Gráfico 10, apresenta-se a Figura 50, que ilustra a localização da maior profundidade de ascensão dos cloretos.

Figura 50 – Localização da maior profundidade de ascensão dos cloretos



Fonte: Acervo da pesquisa

Fazendo uma análise mais detalhada da profundidade, pode-se observar que, em alguns casos, como no torre de argamassa com estresse térmico, essa profundidade máxima não se deu no local do espaçador, e sim em outro ponto do concreto. O mesmo fato é observado no espaçador prisma de argamassa, independentemente da exposição de cura.

No caso do espaçador centopeia de plástico, a ascensão foi generalizada. Esse espaçador tem uma área de contato maior (da extensão do corpo de prova), o que poderia justificar os resultados obtidos. Ao se observar o espaçador torre de plástico com estresse térmico, ficou evidenciado que a entrada e maior profundidade de ascensão ocorreu exatamente na região do espaçador.

### 4.3. ANÁLISE DA PROPAGAÇÃO DA CORROSÃO

Os corpos de prova utilizados nesta análise da propagação foram submetidos ao processo de aceleração da corrosão por meio de corrente constante. A Figura 51 permite a visualização dos corpos de prova após a aceleração da corrosão e antes da ruptura para extração das barras.

Figura 51 – Corpos de prova após aceleração da corrosão e antes do rompimento



Fonte: Acervo da pesquisa

Pode-se visualizar a presença de produtos da corrosão em praticamente todos os corpos de prova no local onde se encontra o espaçador. Isso se dá porque no ponto onde está o espaçador ocorre uma fragilização do concreto, em função do fato de que, mesmo nos espaçadores de argamassa, há invariavelmente uma quebra na unidade do material, além da expansão natural do ferro ao corroer. Esse fenômeno acarreta tensões de tração, que provocam microfissuras nessa região do espaçador.

A única exceção é o corpo de prova referência, em cuja imagem foi colocada uma flecha vermelha, já que neste não foi utilizado espaçador. Assim, sua superfície é lisa, sem acumulação de produtos de corrosão em qualquer ponto fragilizado, já que esse produto se espalha pelo corpo de prova.

Os corpos de prova foram rompidos para extração das barras, que foram submetidas ao processo de limpeza conforme o Item 3.5.3. Após a pesagem das barras, foi determinada a perda de massa, cujos resultados estão mostrados na Tabela 12. Foram utilizados dois corpos de prova de cada tipo de espaçador e condição de exposição, para que posteriormente fosse feita uma média entre eles.

Tabela 12 – Perda de massa considerando os diferentes espaçadores e influência da condição de exposição

Tipo de Espaçador	Perda de massa (%)	Média (%)
Centopeia de plástico sem estresse térmico	26,64%	25,13%
Centopeia de plástico sem estresse térmico	23,63%	
Centopeia de plástico com estresse térmico	22,46%	21,83%
Centopeia de plástico com estresse térmico	21,21%	
Prisma de argamassa sem estresse térmico	20,66%	20,50%
Prisma de argamassa sem estresse térmico	20,33%	
Prisma de argamassa com estresse térmico	20,92%	21,03%
Prisma de argamassa com estresse térmico	21,14%	
Referência sem estresse térmico	21,01%	23,21%
Referência sem estresse térmico	25,41%	
Referência com estresse térmico	22,27%	26,77%
Referência com estresse térmico	31,28%	
Torre de argamassa sem estresse térmico	27,73%	25,65%
Torre de argamassa sem estresse térmico	23,58%	
Torre de argamassa com estresse térmico	19,30%	20,42%
Torre de argamassa com estresse térmico	21,55%	
Torre de plástico sem estresse térmico	23,21%	23,49%
Torre de plástico sem estresse térmico	23,77%	
Torre de plástico com estresse térmico	23,31%	22,35%
Torre de plástico com estresse térmico	21,40%	



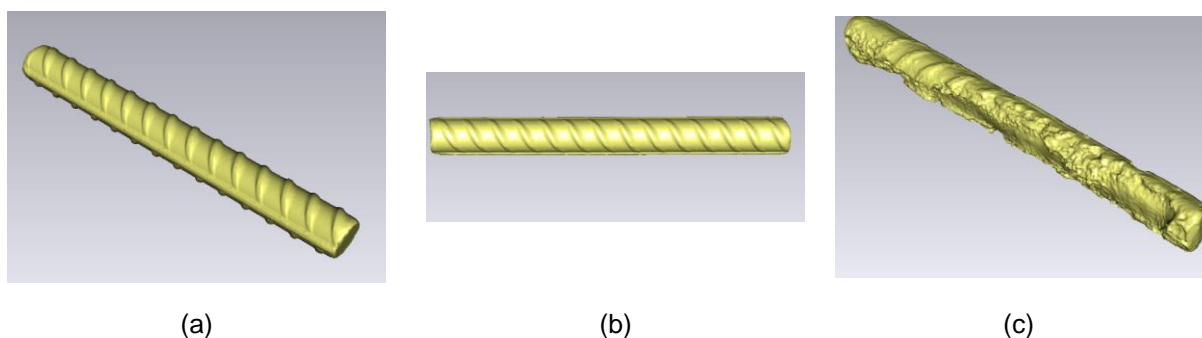
Observando a tabela, percebe-se que todos atingiram os 20% de perda de massa, conforme o esperado. Alguns tiveram um valor acima disso, o que pode ser causado por um ruído experimental ou pela heterogeneidade do concreto.

#### 4.3.1 Análise Qualitativa da Propagação

Esta pesquisa permitiu avaliar a área exata da seção transversal das barras com intervalos a cada 5 mm. Para isso, foi realizado um escaneamento 3D, no qual se digitalizou a superfície da barra por meio de uma varredura com raios laser, conforme descrito no Item 3.5.3.

A Figura 52 apresenta as barras digitalizadas com e sem corrosão, do corpo de prova referência, a fim de facilitar a comparação com as barras que continham espaçadores.

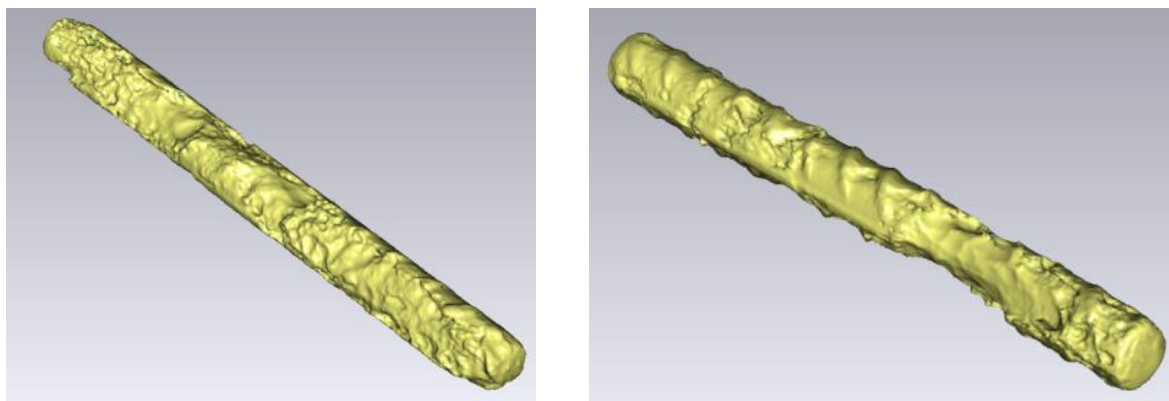
Figura 52 – (a) e (b) Barra sem corrosão; (c) Referência com corrosão



Na imagem (c), pode-se observar que o corpo de prova referência apresenta uma corrosão uniforme ao longo da barra, pois não possuía a interferência do espaçador para facilitar a entrada de cloretos.

Na Figura 53 (a) e (b), com o espaçador torre de argamassa, verifica-se uma diminuição de seção um pouco mais pronunciada nas regiões de interface entre o concreto e o espaçador. Esse fato pode ser devido à quebra de unidade do material ou à compactação diferenciada do concreto no mesmo corpo de prova.

Figura 53 – (a) Torre de argamassa sem estresse térmico; (b) Torre de argamassa com estresse térmico

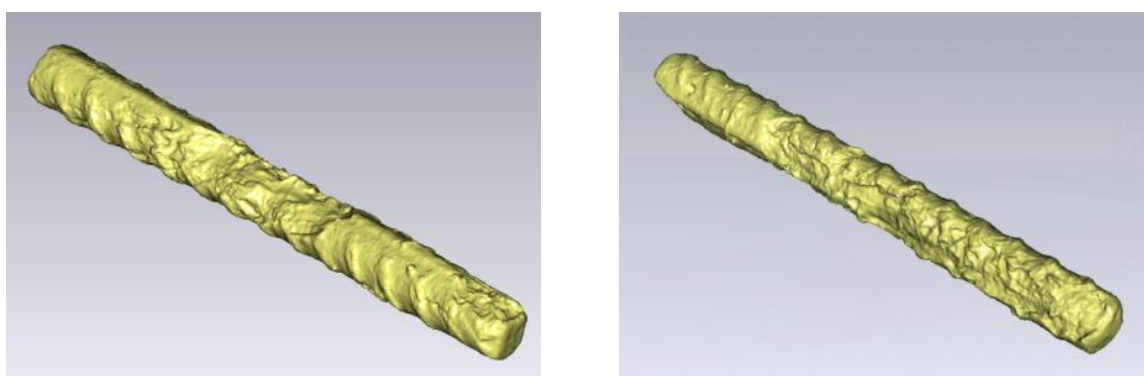


(a)

(b)

Na Figura 54 (a) e (b), observa-se o foco de corrosão no centro da barra (mais pronunciado na imagem (a)), próximo ao espaçador tipo prisma de argamassa, no qual é visível uma maior perda de seção. Isso está de acordo com a imagem da Figura 51, onde se percebe que a presença do espaçador faz com que ocorra uma perda de unidade no material, assim como uma compactação diferente nessa região.

Figura 54 – (a) Prisma de argamassa sem estresse térmico; (b) Prisma de argamassa com estresse térmico



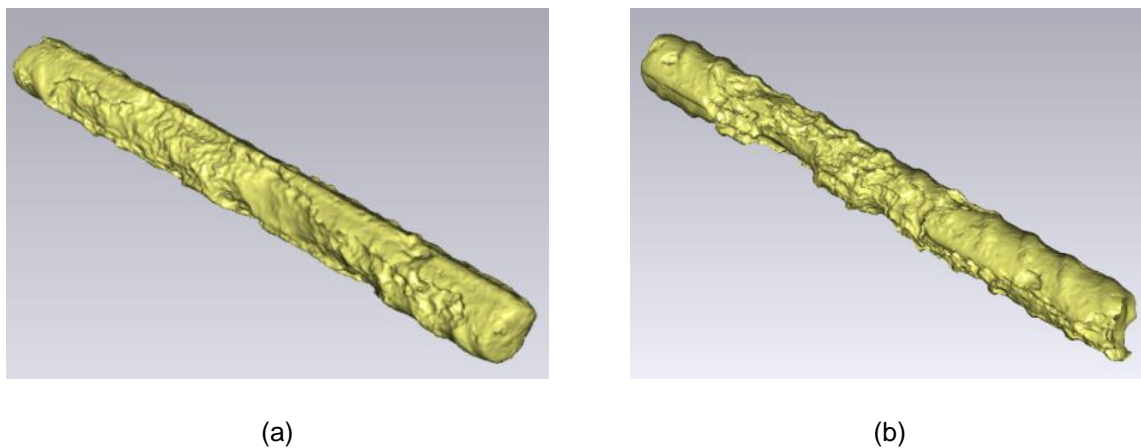
(a)

(b)

São apresentadas na Figura 55 as imagens geradas com a utilização do espaçador torre de plástico. Pode-se observar que, em ambas as imagens, nas seções próximas ao posicionamento do espaçador, houve uma maior perda de seção.

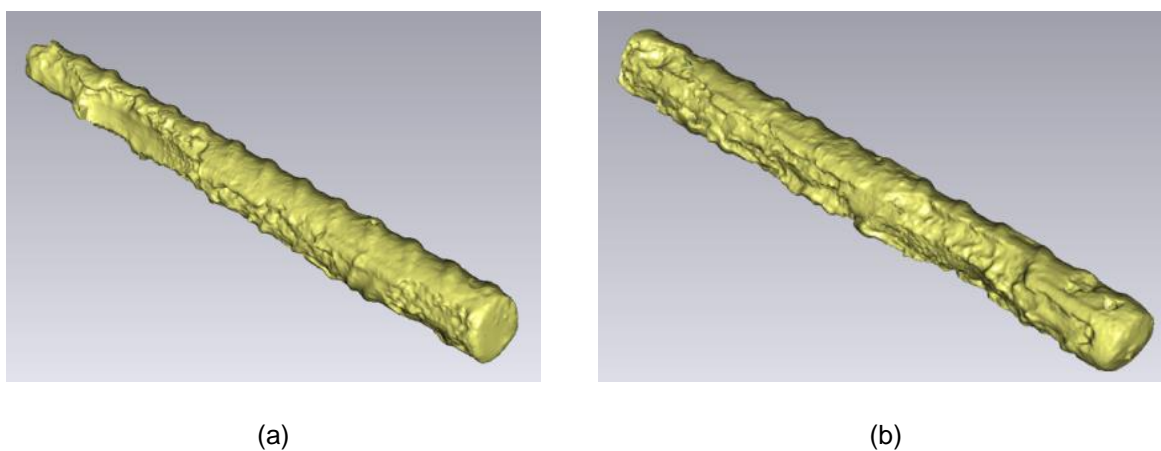
Esse fato está relacionado também com a interface conflitante entre os dois materiais e também ao possível surgimento de fissuras devido aos produtos da corrosão.

Figura 55 – (a) Torre de plástico sem estresse térmico; (b) Torre de plástico com estresse térmico



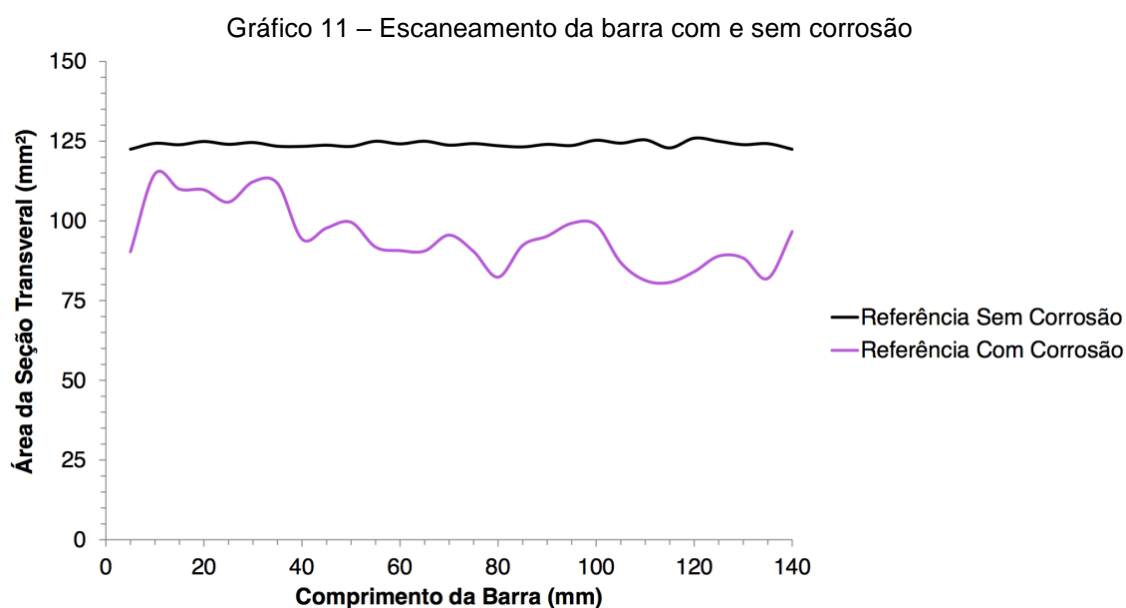
Na Figura 56, vê-se a utilização do espaçador centopeia de plástico. Percebe-se que, indiferentemente do tipo de exposição, a diminuição da seção se dá ao longo de toda a barra. Entretanto, na imagem (a), na extremidade esquerda, percebe-se uma maior perda de seção devido a uma provável compactação diferenciada e também à concentração de fissuras oriundas dos produtos da corrosão.

Figura 56 – (a) Centopeia de plástico sem estresse térmico; (b) Centopeia de plástico com estresse térmico



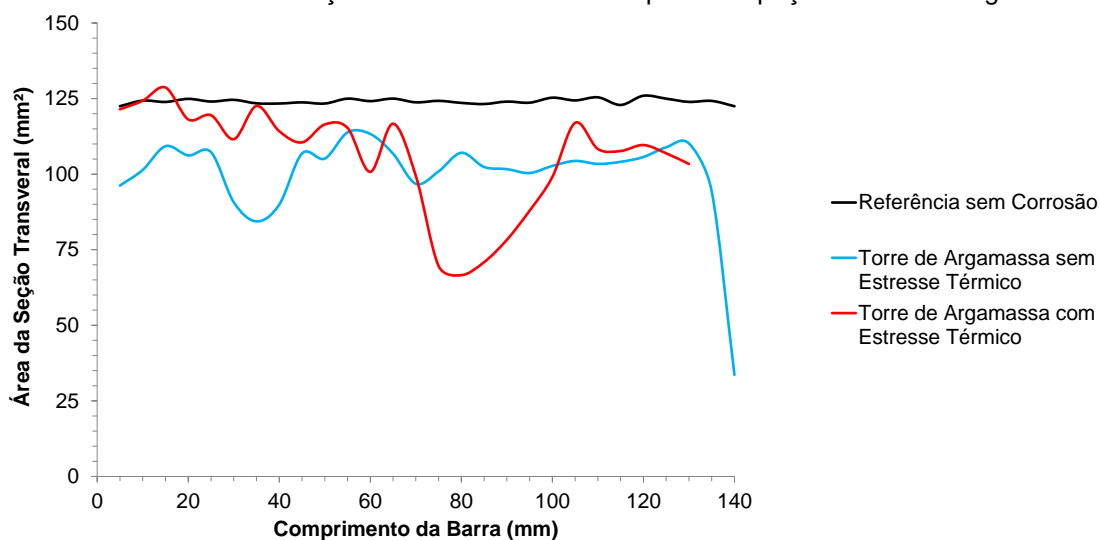
#### 4.4.2 Análise Quantitativa da Propagação

No Gráfico 11, pode-se observar o comportamento de uma barra de aço referência, com e sem corrosão, após sua digitalização para facilitar a compreensão da análise dos demais gráficos. Neste gráfico é apresentada a área das seções transversais medidas em intervalos de 5 mm ao longo de toda a extensão da barra.



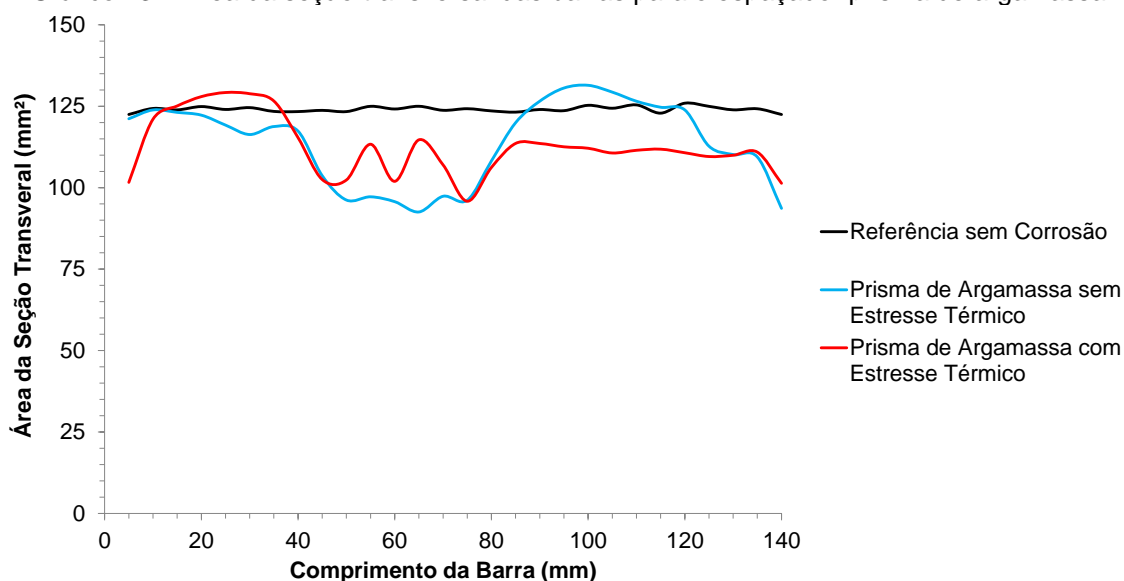
No Gráfico 12, com o espaçador torre de argamassa, percebe-se que a menor área computada das seções transversais (próximo ao ponto 75 mm) acontece na interface entre o espaçador e o corpo de prova naqueles submetidos a estresse térmico (b).

Gráfico 12 – Área da seção transversal das barras para o espaçador torre de argamassa

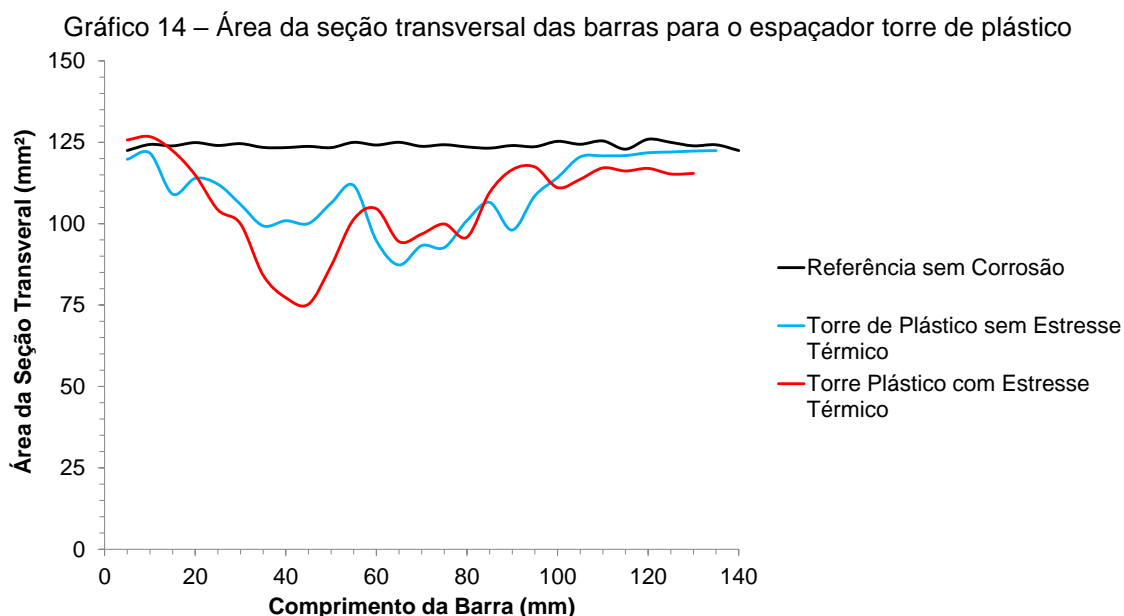


O comportamento do espaçador prisma de argamassa está mostrado no Gráfico 13. No caso dos corpos de prova submetidos ao estresse térmico, seus vales de diminuição de seção ocorreram na interface entre o espaçador e o concreto, que foi afetada devido aos ciclos de calor aos quais o corpo de prova foi submetido. No entanto, percebe-se também a diminuição de seção ao longo de toda a barra. Já no corpo de prova com o espaçador prisma de argamassa sem estresse térmico, ocorreu diminuição de seção no local do espaçador.

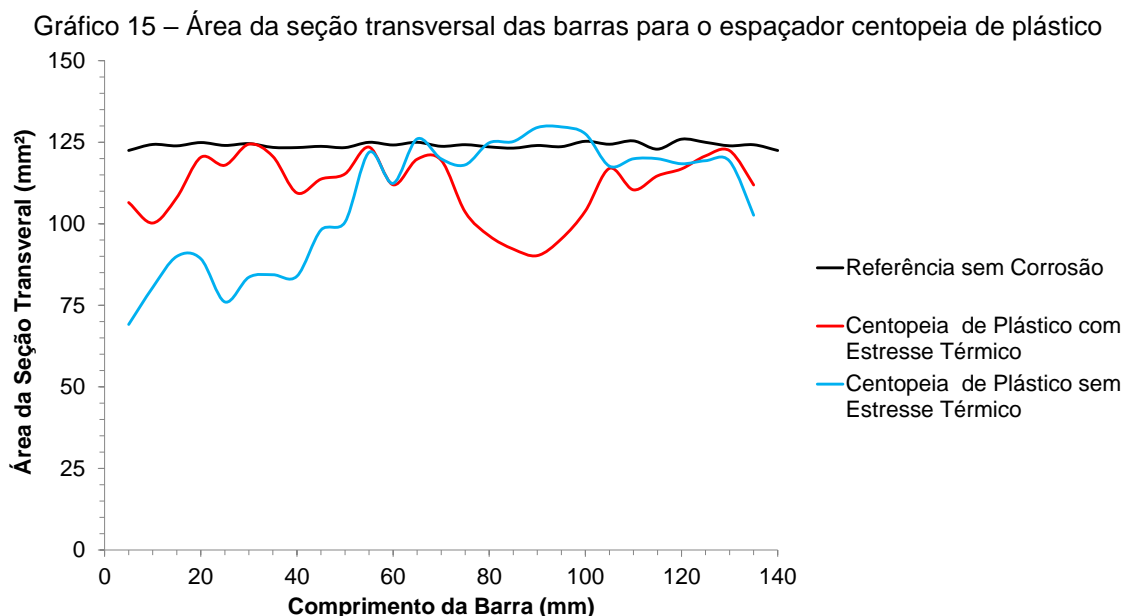
Gráfico 13 – Área da seção transversal das barras para o espaçador prisma de argamassa



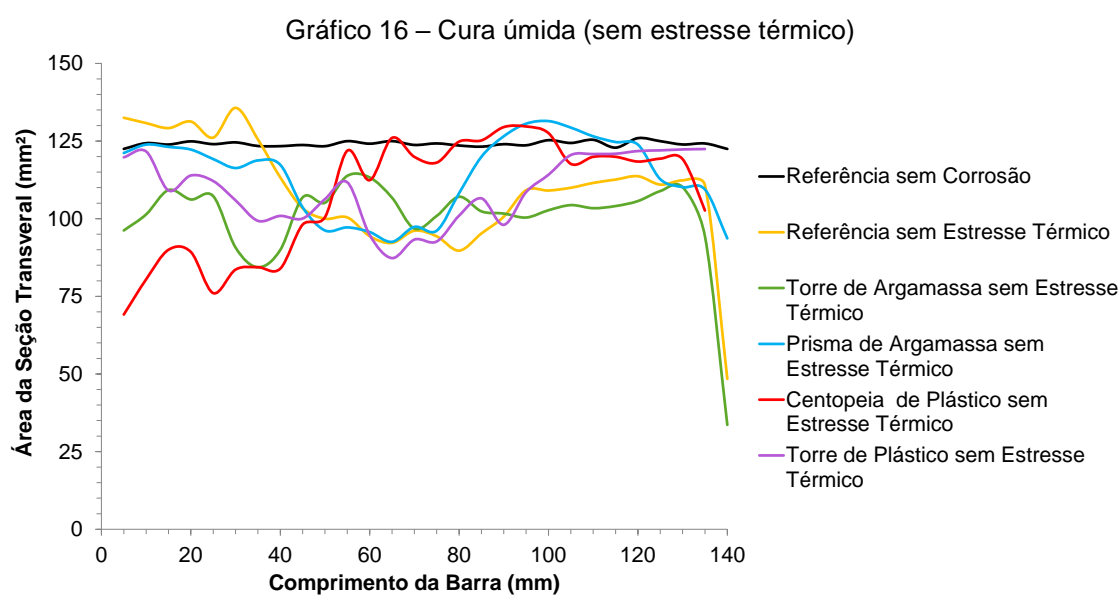
Observa-se, no Gráfico 14, uma diminuição de seção na posição central, onde se encontra o espaçador do tipo torre de plástico, com uma acentuação no corpo de prova que foi submetido ao ciclo de calor.



No Gráfico 15, com o espaçador centopeia de plástico, pode-se perceber uma diminuição de seção em pontos diferentes da barra, independentemente da exposição a que foram submetidos os corpos de prova, já que esse espaçador cobre grande parte do corpo de prova e possui muitas entradas frágeis para a frente de cloretos.

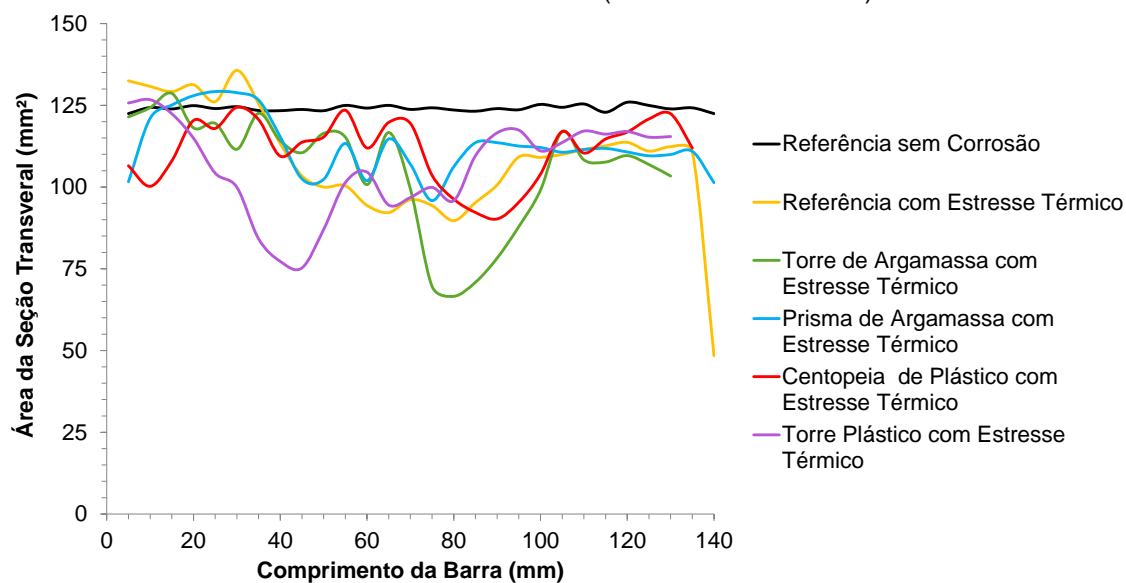


No Gráfico 16, são comparados os diferentes espaçadores sob a condição de cura úmida, em que é possível notar uma linha de tendência na qual os espaçadores não possuem grandes vales de diminuição de seção, já que as interfaces entre espaçadores e corpo de prova não foram danificadas. Um bom ponto a ser observado é o do espaçador centopeia de plástico, que se afasta da linha, no começo do gráfico, provavelmente por conta do surgimento de fissuras nessa região.



Já o Gráfico 17, com ciclos de calor, mostra que, independentemente do tipo de espaçador escolhido, as diminuições de seção foram semelhantes, com destaque para o torre de argamassa e o torre de plástico, cujos vales se deram no local do espaçador. É importante ressaltar que os espaçadores de plástico possuem um comportamento muito mais agressivo na interface entre os materiais, fazendo com que a diminuição de seção seja maior nesses casos.

Gráfico 17 – Ciclos de calor (com estresse térmico)



Salienta-se que os resultados apresentados são de apenas um corpo de prova por condição de exposição. São necessárias mais pesquisas, com mais corpos de prova, a fim de que se obtenha uma conclusão mais precisa com relação a esses dados.



## 5 CONCLUSÕES

Esta pesquisa realizou uma avaliação do efeito da utilização dos espaçadores nas estruturas de concreto armado, fazendo uma análise da interferência da condição de exposição e do tipo de espaçador frente a íons cloreto.

A avaliação visual comprovou que, onde foram utilizados os espaçadores de plástico, a face que ficou em contato com a forma expôs o espaçador, deixando pequenos orifícios na superfície de concreto. Assim, fica evidenciado que esses espaçadores parecem ser facilitadores para a entrada de agentes agressivos.

Quando foi utilizado o espaçador de argamassa, formou-se uma camada mais homogênea, sem a existência dos orifícios observados com os espaçadores de plástico. Dessa maneira, acredita-se que uma menor quantidade de poros proporciona uma maior durabilidade ao concreto.

Ao submeter os corpos de prova com espaçadores de plástico à microscopia ótica, concluiu-se que somente ocorreram fissuras naqueles expostos aos ciclos de calor. Assim, afirma-se que tais fissuras são de origem térmica, e que estão relacionadas com as propriedades físicas dos materiais e com a intensidade da variação de temperatura. O responsável por esse fenômeno é o coeficiente de dilatação térmica diferente entre os dois materiais.

Em contrapartida, o mesmo não ocorreu com os corpos de prova com espaçadores de argamassa. Em nenhuma das condições de exposição foi possível perceber fissuras, devido ao coeficiente de dilatação térmica semelhante do concreto e da argamassa.

Com relação aos ensaios de aceleração da corrosão pelo método de voltagem constante, utilizado para a análise da iniciação, a voltagem de 10 V mostrou-se mais adequada aos objetivos desta pesquisa. Da mesma forma, a utilização do ensaio CAIM como técnica de aceleração da corrosão pôde simular adequadamente o processo corrosivo na fase de iniciação.

Nas análises qualitativa e quantitativa da iniciação, pode-se concluir o seguinte:

- Nos corpos de prova referência, a ascensão de cloretos foi uniforme no decorrer dos dias.

- Com os espaçadores de argamassa:
  - Sob as duas condições de exposição, os cloretos ascenderam em direção à barra, mas no interior do espaçador a penetração foi mais difícil, por ele apresentar uma absorção de água menor em relação ao concreto utilizado.
  - O espaçador tipo prisma de argamassa apresentou os melhores resultados em termos de maior dificuldade para a ascensão de cloretos.
  - A condição de exposição não teve grande influência na ascensão dos cloretos.
  - A maior entrada de cloretos se deu fora da região dos espaçadores.
  - A diferença de área de ascensão de cloretos encontrada entre os espaçadores de argamassa sem estresse térmico e com estresse térmico pode ser resultado de diferentes compactações durante a moldagem.
  - Nos espaçadores de argamassa tipo prisma, a uniformidade da área de ascensão de cloretos ao longo do corpo de prova está relacionada ao formato anatômico do espaçador, tornando-se mais aderente à pasta de concreto.
  - Os espaçadores de argamassa apresentaram os melhores resultados em termos de área de ascensão de cloretos, sendo o melhor o do tipo torre de argamassa com estresse térmico.
  - Em relação à profundidade de penetração de cloretos, esses espaçadores atingiram, no máximo, a marca de 5 cm, como o referênci. A exceção é o espaçador torre de argamassa com estresse térmico, que apresentou um comportamento melhor do que os demais. Supõe-se que o aquecimento do material resultou num melhor fechamento dos poros do concreto.
  - A profundidade máxima de penetração de cloretos não se deu no local do espaçador em nenhum dos corpos de prova com espaçadores de argamassa, em nenhuma das condições de exposição.
- Com os espaçadores de plástico:

- Comparando as duas condições de exposição, com os ciclos de calor os cloretos chegaram mais rapidamente até a barra. Da mesma forma, as áreas de ascensão de cloretos foram maiores a cada dia de ensaio.
- O espaçador centopeia de plástico apresentou o pior desempenho quanto à ascensão dos cloretos.
- O ponto mais alto de ascensão dos cloretos se deu no local do espaçador, evidenciando que fissuras e vazios entre os dois materiais facilitam a entrada de cloretos.
- O espaçador torre de plástico sem estresse térmico teve uma área de ascensão de cloretos muito semelhante à área do referênciã e à do de argamassa.
- Em termos de área afetada pelos cloretos nas duas condições de exposição, o espaçador do tipo centopeia de plástico novamente teve o pior desempenho. Ainda assim, o pior desempenho em relação à ascensão de cloretos desse espaçador se deu na condição de exposição por ciclos de calor. Pelos resultados apresentados, fica evidenciado que este é um modelo que se indica ser evitado.
- Em relação à profundidade de penetração de cloretos, o esperado era que se chegasse a 5 cm, mesma marca do referênciã. Sem estresse térmico, o torre de plástico teve um desempenho satisfatório referente à ascensão de cloretos. Com estresse térmico, tanto o torre quanto o centopeia de plástico apresentaram resultados muito insatisfatórios.
- A maior profundidade de penetração do corpo de prova com espaçador torre de plástico foi exatamente no local do espaçador.

Com relação aos resultados obtidos após os ensaios de aceleração da corrosão pelo método de corrente constante, para a análise da propagação, verificou-se que a perda de massa encontrada após o ensaio chegou a 20%, conforme o esperado. Os resultados que apresentaram valores muito maiores de 20% podem ter sido causados por um ruído experimental ou pela heterogeneidade do concreto.

É interessante notar que houve uma compatibilidade entre os resultados de evolução de corrente, perda de massa e avaliação visual, evidenciando que o método de ensaio avaliado é robusto e pode gerar dados relevantes. Além disso, a técnica de medição da perda de área de seção através do redimensionamento em 3D das barras corroídas apresentou alteração considerável da perda de área. Essa técnica de varredura a laser se mostrou eficaz para obter a área de cada seção transversal.

Quanto às análises qualitativas e quantitativas da propagação, foi possível chegar às seguintes conclusões:

- O corpo de prova referência apresentou uma corrosão uniforme ao longo da barra, pois não possuía ponto para facilitar para a entrada de cloretos.
- Em relação aos espaçadores de argamassa:
  - Tanto no caso do prisma quanto no do torre, a maior perda de seção dos corpos de prova foi na interface entre o espaçador e o concreto.
  - A localização da maior perda de seção dos corpos de prova está diretamente relacionada com a quebra de unidade que ocorre entre os materiais (concreto e argamassa), bem como com a compactação diferenciada do concreto nos corpos de prova.
  - Acredita-se ser necessário repetir os ensaios de propagação com estes espaçadores, a fim de avaliar mais detalhadamente os resultados obtidos.
- Em relação aos espaçadores de plástico:
  - No caso do centopeia, a diminuição da seção ocorreu ao longo de toda a barra, de forma não uniforme, indiferentemente do tipo de exposição. Isso é resultado do formato do espaçador, que possui grande superfície de contato. Percebeu-se que esse espaçador apresenta um comportamento mais agressivo em relação à corrosão.
  - No espaçador do tipo torre, a diminuição de seção ocorreu no local do espaçador em ambas as condições de exposição, mas com acentuação no corpo de prova submetido ao estresse térmico.

Esta pesquisa demonstrou a importância do estudo dos espaçadores. Sabe-se que são itens de uso comum e fundamentais para qualquer projeto de engenharia civil. No entanto, ainda há pouco material para estudo e poucas pesquisas disponíveis

sobre eles, tanto no âmbito nacional como internacional. Da mesma forma, não há uma norma regulamentadora da qualidade desses produtos disponíveis no mercado.

Quando se analisa estruturas de concreto armado, uma das questões essenciais é sua vida útil. Por consequência, os estudos de corrosão merecem destaque devido ao fato de essa manifestação patológica ser uma das que mais comumente afetam as estruturas de concreto armado. Uma das peças fundamentais ligada à corrosão é exatamente o uso dos espaçadores, mas percebe-se uma abordagem muito superficial das pesquisas publicadas sobre o comportamento desses elementos.

Ao final desta pesquisa, pode-se afirmar que os espaçadores influenciam diretamente não apenas na entrada de íons cloreto no concreto (aumentando a velocidade da iniciação da corrosão), como também na perda de massa das barras de aço (aumentando a formação de pites ou zonas mais deterioradas nas barras de armadura). Esta pesquisa mostrou que os espaçadores de plástico apresentaram um desempenho inferior em relação àqueles de argamassa na fase de iniciação, quando avaliados do ponto de vista de íons cloreto. Entretanto, na fase de propagação, até mesmo os espaçadores de argamassa contribuíram para uma maior concentração de degradação na região dos espaçadores.

Outra questão de suma importância, apresentada de forma inovadora por esta pesquisa, e que ficou comprovada através dos ensaios realizados é a condição de exposição do concreto. Sabe-se que há um cenário ideal de cura do concreto, obtido em laboratório seguindo-se as recomendações de norma específica, e um cenário real que acontece em canteiros de obra de várias regiões do país. Esta pesquisa procurou reproduzir esse cenário real, através dos ensaios com exposição dos corpos de prova a ciclos de calor.

Levando em consideração as diferentes condições de exposição, a contribuição que se considera mais relevante é a influência dos ciclos de calor no comportamento da interface entre o espaçador e o concreto, especialmente nos espaçadores de plástico. Assim, é preciso que os estudos futuros de corrosão levem em conta esse fator, para que seja possível projetar com mais segurança uma maior vida útil das estruturas.

## 6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Após a realização deste trabalho, é possível sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Criar e/ou adequar um modelo de espaçador que minimize os efeitos da entrada de íons cloreto na estrutura.
- Utilizar outros modelos de espaçadores de plástico e de argamassa, a fim de fazer uma comparação com os resultados obtidos nesta pesquisa.
- Utilizar outros tamanhos de espaçadores, por exemplo, para atingir cobrimentos de 30 e 40 mm.
- Estudar a possibilidade de acelerar a corrosão por outro método, como câmaras de névoa salina, com a finalidade de aproximar ainda mais os resultados ao mecanismo de corrosão existente nas estruturas reais.
- Avaliar a possibilidade de utilização de graus de corrosão menores do que 20% no ensaio de propagação.
- Utilizar outros traços de concreto com resistências e características diferentes do traço desta pesquisa.
- Avaliar o concreto sob o ponto de vista da porosidade e capacidade de retenção de íons cloreto.
- Realizar um estudo comparativo do ensaio CAIM com outros ensaios eletroquímicos nas mesmas condições do concreto e do ambiente.
- Fazer uma análise englobando outros quesitos para avaliar o quão melhor é um modelo de espaçador em relação a outro.
- Quantificar a redução da vida útil da estrutura a partir dos resultados apresentados.
- Desenvolver ou ajustar modelos de vida útil a partir dos dados coletados.
- Desenvolver trabalhos semelhantes de qualificação de ensaios com outros métodos e técnicas.

## REFERÊNCIAS

ALZYOUD, S.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Influence of reinforcement spacers on mass transport properties and durability of concrete structures. **Cement and Concrete Research**, [on-line], v. 87, p. 31-44, 2016.

ANDRADE, J. J. O. **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras:** iniciação por cloretos. 2001. 256f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2001.

ANDRADE, R. B. O Caminho da Evolução. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Desempenho de edificações habitacionais:** guia orientativo para atendimento à norma ABNT 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

ANDRADE, R. B. O. **Durabilidade das estruturas de concreto armado:** análise das manifestações patológicas nas estruturas no estado de Pernambuco. 1997. 139f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1997.

ARANHA, P. M. S. **Contribuição ao Estudo das Manifestações Patológicas nas Estruturas de Concreto Armado na Região Amazônica.** 1994. 144f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 1978.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118:** projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 14931:** execução de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** agregados para concreto – especificação. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** argamassa e concreto endurecidos – determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739**: concreto – ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **Desempenho de edificações habitacionais**: guia orientativo para atendimento à norma ABNT 15575/2013. Câmara Brasileira da Indústria da Construção. Fortaleza: Gadioli Cipolla Comunicação, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15575-2**: edificações habitacionais – desempenho. Parte 2: Requisitos para os sistemas estruturais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738**: concreto – procedimentos para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, 2015.

BARRETO, M. F. F. M. **Avaliação do Desempenho de Espaçadores Plásticos**: Proposição e Avanço de Métodos de Avaliação. 2014. 115 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2014.

BIGOLIN, M.; PACHECO, L. S.; SILVA FILHO, L. C. P.. Inspeção predial e norma de desempenho - agentes intervenientes. In: **Congresso Brasileiro do Concreto**, 2014, Natal/RN.

BRASIL. Conselho de Arquitetura e Urbanismo do Brasil. **Norma de desempenho da ABNT traz grandes mudanças para construção de residências**. Disponível em: <<http://www.caubr.gov.br/?p=9134>> Acesso em: 14 ago. 2015.

CABRAL, A. E. B. **Avaliação da Eficiência de Sistemas de Reparo no Combate à Iniciação e à Propagação da Corrosão do Aço Induzida por Cloretos**. 2000. 165f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2000.

CAETANO, L. F. **Estudo do comportamento da aderência em elementos de concreto armado submetidos à corrosão e elevadas temperaturas**. 2008. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2008.

CALLISTER, W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. Rio de Janeiro: LTC, 2008.



CARVALHO, J. D. N. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. **Revista Tecnológica**, [on-line], v. 17, p. 19-28, 2008.

CASCUDO, O. **O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto**: Inspeções e técnicas eletroquímicas. São Paulo: Pini; Goiânia: Editora UFG, 1997.

COUTO, J. A. S. *et al.* O concreto como material de construção. **Caderno de Graduação – Ciências Exatas e Tecnológicas**, Sergipe, v. 1, n. 17, p. 49-58, out. 2013.

CRIADO, M. *et al.* Corrosion behaviour of coated steel rebars in carbonated and chloride-contaminated alkali-activated fly ash mortar. **Progress in Organic Coatings**, v. 99, 2016, p. 11-22.

DAL MOLIN, D. C. C. **Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. 1988. 220f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1988.

FRANÇA, C. B. **Avaliação de cloretos livres em concretos pelo método de aspersão de solução de Nitrato de Prata**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Católica de Pernambuco. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Recife, 2011.

FRANCO, B. L. M. A tecnologia do Concreto Reforçado com Fibras de Aço. **Concreto e Construções**. São Paulo, n. 50, p. 42-47, 2008.

FREIRE, T. M. **Planejamento operacional e custos**. 2005. MBA – Anotação de aula (Tecnologia e Gestão na Produção de Edifícios) – Programa de Educação Continuada em Engenharia. Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2005.

FREIRE, T. M. **Produção de estruturas de concreto armado, moldadas in loco, para edificações: caracterização das principais tecnologias e formas de gestão adotadas em São Paulo**. 2001. 325p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

GIRIBOLOA, M. Espaçadores para armadura. **Revista Equipe da Obra**, São Paulo, v. 62, ago. 2013.

GONZÁLES, J. A. *et al.* Some questions on the corrosion of steel in concrete – Part I: when, how and how much steel corrodes. **Materials and Structures**, v. 29, p. 40-46, Jan.-Feb., 1996.

GONZÁLEZ, J. A. Corrosion behavior of new stainless steels reinforcing bars embedded in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 37, p.1463-1471, 2007.

GRAEFF, A. G. **Avaliação Experimental e Modelagem dos Efeitos Estruturais da Propagação da Corrosão em Elementos de Concreto Armado**. 2007. 163 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2007.

GRAZIANO, F. P. **O desafio da nova norma de desempenho**. TQS News, [on-line], n. 37, set. 2013.

GUIMARÃES, A. T. C.; HELENE, P. Grau De Saturação Do Concreto: Um Importante Fator Na Difusão De Cloretos. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, Rio Grande, v. 2, p. 55-64, mai. 2001. Disponível em: <<http://repositorio.furg.br/bitstream/handle/1/1476/GRAU%20DE%20SATURA%C3%87%C3%83O%20DO%20CLORETO.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R. **Física II**. Rio de Janeiro: Ao Livro Técnico, 1974.

HARTT, W.; CHARVIN, S.; LEE, S. **Influence of permeability reducing and corrosion inhibiting admixtures in concrete upon initiation of salt induced embedded metal corrosion**. Final report prepared for the Florida Department of Transportation, 1999.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em estruturas de concreto armado**. 1993. 231f. Tese (Livre Docência em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, São Paulo, 1993.

HELENE, P. R. L. **Corrosão em Armaduras para Concreto Armado**. São Paulo: Pini, 1986.

HELENE, P. R. L. Introdução. In: RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014, p. 1-12.

HELENE, P. R. L. **Manual Prático para Reparo e Reforço de Estruturas de Concreto**. São Paulo: Pini, 1988.

HELENE, P. R. L. Vida útil das estruturas de concreto. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS, p. 1-30. Disponível em: <<http://www.concretophd.com.br/imgs/files/185.pdf> >. Acesso em: 17 ago. 2015.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de Dosagem e Controle do Concreto**. São Paulo: Pini, 1993.

JADOVSKI, I. *et al.* A influência da espessura do cobrimento no fenômeno da corrosão de armaduras. In: VIII Congresso Regional de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, 1992, Joinville. **Anais...** Joinville: FEJ/ UDESC.

KAEFER, L. F. **A Evolução do Concreto Armado**. Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos, São Paulo, dez. 1998.

KIMURA, AI. ABNT NBR 6118: Evolução, Tendência e Desafios. **ENECE**, São Paulo, v. 16. 2013, São Paulo, p. 1-75, 2013.

KIRCHHEIM, A. P.; PASA, V.; DAL MOLIN, D.; SILVA FILHO, L. C. P. Análise comparativa da utilização de diferentes sistemas de proteção de corrosão de armaduras na aderência entre concreto branco e barras de aço. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto, 2005, Recife. **Anais...** Vol. VII – Métodos de Proteção, Reforço Reparo de Estruturas de Concreto, Recife.

KULISCH, D. **Ataque por Sulfatos em Estruturas de Concreto**. 2011. 108f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Paraná. Curso de Engenharia Civil, Curitiba, 2011.

LIMA, M. G. **Influência dos componentes do concreto na corrosão de armaduras**. 1990. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 1990.

LORENZI, L.S. **Análise Crítica e Proposições de Avanço nas Metodologias de Ensaio Experimentais de Desempenho à Luz da ABNT NBR 15575 (2013) para Edificações Habitacionais de Interesse Social (HIS) Térreas**. 2013. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, RS.

MARAN, A. P. **Análise da influência da distribuição de espaçadores plásticos na garantia da espessura de cobrimento especificada em lajes de concreto armado**. 2015. 123f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2015.

MARCHESAN, P. R. C. *et al.* Estudo da influência da aplicação de revestimentos no controle da corrosão. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções e VI Congresso de Controle de Qualidade, 1997, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: LEME/CPGEC/UFRGS.

MEHTA, K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014.

MENEZES, L. F.; AZEVEDO, M. T. **Análise da influência do cobrimento das armaduras na durabilidade das estruturas de concreto armado**. Salvador: Universidade Católica de Salvador, 2009. Disponível em: <<http://info.ucsal.br/banmon/index.html>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

MERRETEZ, W. Achieving concrete cover in construction. **Concrete in Australia**, Austrália, v. 36, n. 1, 2010.

MOTA, J. M. F. *et al.* Corrosão de Armadura em Estruturas de Concreto Armado devido ao Ataque de Íons Cloreto. In: Congresso Brasileiro Do Concreto, 54. 2012, Maceió. **Anais...** Maceió: Ibracon, 2012. p. 1-16. Disponível em: <<http://www.vieiramota.com.br/corrosao-0880.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2015.

NAKAMURA, J. Cobrimento de armaduras. **Revista Equipe da Obra**, São Paulo, v 45, [on-line], dez. 2011.

NETO, E. H. **Cobrimento de armaduras**: espessura de camada de concreto sobre o aço de pilares, vigas e lajes varia de acordo com o ambiente em que a obra é construída. Portal Metálica – Construção Civil, [on-line], n. 45, dez. 2011. Disponível em: <<http://www.metalica.com.br/estruturas-de-concreto-armado-a-protecao-do-aco-pelo-concreto>>. Acesso em: 10 ago. 2016.

NETO, G. N. A. **Influência da Argamassa de Revestimento na Resistência à Compressão Axial em Prismas de Alvenaria Resistente de Blocos Cerâmicos**. 2006. 72f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Engenharia Civil, Recife, 2006.

NEVILLE, A.M; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NIREKI, T. Service life design. **Construction and Building Materials**, v. 10, n. 5, p. 403–406, 1996.

NOGUEIRA, R. Significado das medidas de potencial de eletrodo em estruturas de concreto. In: Seminário de Corrosão na Construção Civil, 4, 1990, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRACO, 1990, p.1-8.

OLIVEIRA, A. B. **Cobrimento de Armaduras de Estruturas de Concreto Armado: Levantamento de Critérios Adotados na Utilização de Espaçadores**. 2014. 88f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2014.

OLIVEIRA, A. R. **Corrosão e tratamento de superfície**. Belém: IFPA; Santa Maria: UFSM, 2012.

PADARATZ, I. J. Custos de recuperação e prevenção em estruturas de concreto armado: uma análise comparativa. In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, IX, 2002, Foz do Iguaçu. **Anais...** Porto Alegre: 2002, p. 1425-1432.

PEIXOTO, B. L. F. **Inovações tecnológicas e a produtividade na construção civil, caso distanciadores plásticos sub-setor edificações do Ceará**. 2006. 216f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, João Pessoa, 2006.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação**. 2006. 191f. Trabalho de Conclusão (Especialização) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2006.

POSSAN, E. **Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em ambiente urbano**. 2010. 263f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2010.

RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RIBEIRO, D. V.; CUNHA, M. P. T. Deterioração das estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, D. V. (Org.). **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014, p. 87-118.

ROSENBERG, A *et al.* Mechanisms of corrosion of steel in concrete. In: SKALNY, J. (Ed.) **The Materials Science of Concrete**. The American Ceramic Society, 1989, p. 285-313.

SANTOS, S.; SAVAGE, A.; DUARTE, L. A Nova NBR 6118 e a durabilidade das estruturas. **Informativo da Comunidade AltoQi**, [on-line], n. 32, jun. 2003. Disponível em: <<http://faq.altoqi.com.br/content/277/681/pt-br/a-nova-nbr-6118-e-a-durabilidade-das-estruturas.html>>. Acesso em: 15 ago. 2015.

SELISTRE, S. C.; BOTH, A. A. A influência do fator a/c, do cobrimento e do tempo de cura na corrosão de armaduras. In: V Salão de Iniciação Científica e II Feira de Iniciação Científica, 1993, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1993.

SELISTRE, S. C.; GASTAL, F. P. S. L.; CAMPAGNOLO, J. L. Estudo de técnicas para reversão do processo corrosivo em estruturas de concreto contaminadas com cloretos. In: VI Salão de Iniciação Científica e III Feira de Iniciação Científica, 1994, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: UFRGS, 1994.

SHAW, C. The Long Term Durability of Plastic Spacers in Reinforced Concrete: A Case Study. In: 7<sup>th</sup> International Congress on Concrete. 2008. **Proceedings...** 2008.

SHI, X. *et al.* Durability of steel reinforced concrete in chloride environments: An overview. **Construction and Building Materials**, v. 30, dez. 2011, p. 125-138.

SILVA, O.S.P. **Cobrimento de Armaduras em Estruturas de Concreto Armado**: Análise Comparativa entre o Valor Especificado em Projeto e o em Execução em Obras na Cidade de Porto Alegre. 2012. 83f. Tese (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2012.

SILVA, T. J. Predicción de la Vida Útil de Forjados Unidireccionales de Hormigón Mediante Modelos Matemáticos de Deterioro. 1998. 290f. Tesis Doctoral – Universitat Politècnica de Catalunya. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos, Barcelona, 1998.

SORONIS, G. The problem of durability in building design. **Construction and Building Materials**, v. 6, n. 4, p. 205–211, 1992.

SOUZA, V. C. M.; RIPPER, T. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 1998.

TAKATA, L.T. **Aspectos executivos e a qualidade de estruturas de concreto armado**: estudo do caso. 2009. 149 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos. Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, São Carlos, 2009.

TAVARES, A. J. **Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios pull-out e APULOT**. 2012. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2012.

TORRES, A. S. **Avaliação da sensibilidade do ensaio CAIM – corrosão acelerada por imersão modificada – frente ao processo de corrosão de armaduras de concreto armado**. 2006. 141f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2006.

VAQUERO, J. Separadores para hormigón estructural, **Zuncho**, n. 13, Sep. 2007.

VARELA, H.; ESPINOZA, L. V. Penetrabilidad de Iones cloruros en Morteros con y sin Revestimiento. In: VII Jornadas Chilenas del Hormigón e I Jornada Lationamericana del Cimento y Hormigón. 1988, Santiago de Chile. **Anais...** Santiago de Chile: Instituto Profesional de Santiago, 1988, p. 82-91.

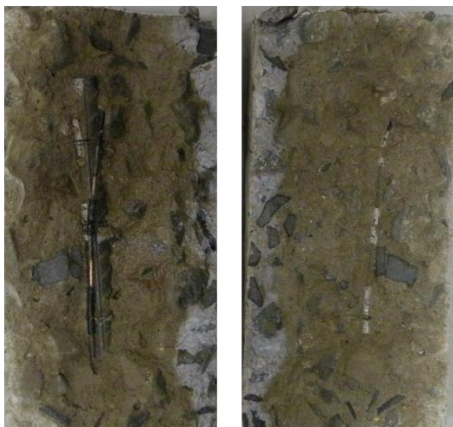
VILASBOAS, J. M. L. **Durabilidade das Edificações de Concreto Armado em Salvador**: Uma Contribuição para a Implantação da NBR 6118:2003. 2004. 230 f. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Universidade Federal da Bahia. Curso de Tecnologia Ambiental, Salvador, 2004.

WEBER, L. F. L. **Cobrimento de Armadura em Estruturas de Concreto Armado**: Análise Comparativa entre os Valores Projetados e Executados nas Obras do Vale do Taquari. 2014. 97f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Centro Universitário UNIVATES. Curso de Engenharia Civil, Lajeado, 2014.

WEYERS, R. E. **Corrosion Service Life Model, in Repair and Rehabilitation of Reinforced Concrete Structures**: The State of the Art. Reston (VA): American Society of Civil Engineers, 1998.

**ANEXO A – IMAGENS DOS 4 E 8 DIAS DA INICIAÇÃO**

Referência – 4 dias de ensaio



Referência – 8 dias de ensaio



Torre de Argamassa – 4 dias de ensaio – cura úmida



Torre de Argamassa – 4 dias de ensaio – ciclos de calor



Torre de Argamassa – 8 dias de ensaio – cura úmida



Torre de Argamassa – 8 dias de ensaio – ciclos de calor





Prisma de Argamassa – 4 dias de ensaio – cura úmida



Prisma de Argamassa – 4 dias de ensaio – ciclos de calor



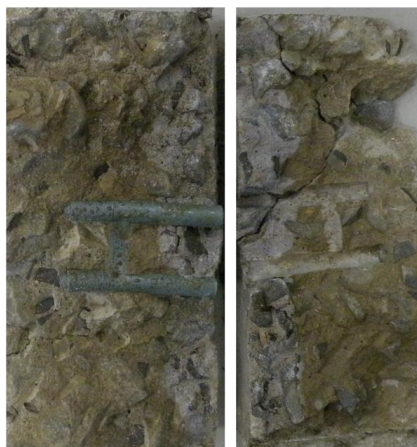
Prisma de Argamassa – 8 dias de ensaio – cura úmida



Prisma de Argamassa – 8 dias de ensaio – ciclos de calor



Torre de Plástico – 4 dias de ensaio – cura úmida



Torre de Plástico – 4 dias de ensaio – ciclos de calor



Torre de Plástico – 8 dias de ensaio – cura úmida



Torre de Plástico – 8 dias de ensaio – ciclos de calor



Centopeia de Plástico – 4 dias de ensaio – cura úmida



Centopeia de Plástico – 4 dias de ensaio – ciclos de calor



Centopeia de Plástico – 8 dias de ensaio – cura úmida



Centopeia de Plástico – 8 dias de ensaio – ciclos de calor

