

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA
DA INTERFACE ESPAÇADOR/CONCRETO
NA CORROSÃO DE ARMADURAS
DESENCADEADA POR ÍONS CLORETO**

RECIFE

2018

UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO, UNICAP-PE

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA
INTERFACE ESPAÇADOR/CONCRETO NA
CORROSÃO DE ARMADURAS DESENCADEADA
POR ÍONS CLORETO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

TÁCYLLA CECI MELO FREITAS DE BARROS

RECIFE - PE

2018

TÁCYLLA CECI MELO FREITAS DE BARROS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INTERFACE
ESPAÇADOR/CONCRETO NA CORROSÃO DE ARMADURAS
DESENCADEADA POR ÍONS CLORETO**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Engenharia de Construção Civil, para a obtenção do título de Mestre.

Prof(a). Dr(a). Eliana Cristina Barreto Monteiro

RECIFE

2018

TÁCYLLA CECI MELO FREITAS DE BARROS

**ESTUDO EXPERIMENTAL DA INFLUÊNCIA DA INTERFACE
ESPAÇADOR/CONCRETO NA CORROSÃO DE ARMADURAS
DESENCADEADA POR ÍONS CLORETO**

Dissertação apresentada à Universidade Católica de Pernambuco, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, área de concentração em Engenharia de Construção Civil, para a obtenção do título de Mestre.

Banca Examinadora

Prof(a). Dr(a). João Manoel de Freitas Mota – IFPE

Prof(a). Dr(a). Romilde Almeida de Oliveira – UNICAP

Prof(a). Dr(a). Eliana Cristina Barreto Monteiro - UNICAP

RECIFE

2018

Ao meu pai, Alessander
À minha mãe, Cintia
Aos meus avós
Aos meus irmãos

AGRADECIMENTOS

À professora Dr.^a Eliana Cristina Barreto Monteiro, pelo grande apoio e orientação durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos laboratoristas Washington e Glayzer, pela ajuda indispensável durante a realização dos ensaios em laboratório.

Às minhas amigas Marina Barbosa, Pryscylla Chaves e Rayanne Godê, por toda força, amizade e carinho.

Aos meus pais Alessandro e Cintia, meus avós Edinaldo e Terezita e padrinhos Edinaldo Jr e Polyanna pelo carinho, apoio e incentivo.

Aos meus familiares, por todo incentivo.

Em especial ao meu noivo Saulo Quental, por todo amor, carinho e compreensão durante toda a Pós-Graduação.

RESUMO

Atualmente, muitos casos de deterioração prematura, nas estruturas de concreto armado, vêm sendo registrados. Um dos que mais se destaca é a corrosão de armaduras, podendo ocorrer através de íons cloreto ou por uma frente de carbonatação. A fim de se garantir o cobrimento solicitado em projeto nas estruturas de concreto armado, são utilizados espaçadores. Com o cobrimento adequado, a durabilidade da peça tende a ser maior. Em contrapartida, a interface espaçador/concreto pode se tornar um ponto frágil para a entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto, por exemplo. O objetivo do trabalho foi realizar um estudo experimental, para analisar a influência da interface espaçador/concreto na corrosão de armaduras desencadeada por íons cloreto, quando utilizados diferentes tipos de espaçadores. A partir disso, três famílias de corpos de prova prismáticos de concreto armado foram moldadas, são elas: sem espaçador (referência), com espaçador de argamassa produzido em obra e com espaçador industrializado de argamassa. Esses corpos de prova, foram submetidos ao ensaio de indução da penetração de íons cloreto por meio de ciclos de secagem e imersão parcial. Ao longo do ensaio, o potencial de corrosão foi aferido. Realizou-se também, ensaios complementares de velocidade de onda ultrassônica, de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata e perda gravimétrica da massa das armaduras. Também foram realizados ensaios nos próprios espaçadores. Após a análise de todos os resultados, concluiu-se, que os corpos de prova com espaçadores industrializados de argamassa foram os que mais favoreceram o início da corrosão, evidenciando a influência direta da presença dos espaçadores na corrosão de armaduras do concreto.

Palavras-Chave: Concreto Armado, Corrosão de Armaduras, Espaçadores, Íons Cloreto.

ABSTRACT

Currently, many cases of premature deterioration in reinforced concrete structures have been recorded. One of the most outstanding is the corrosion of reinforcements, which may occur through chloride ions or by a carbonation front. In order to guarantee the required design coverage in reinforced concrete structures, spacers are used. With adequate cover, the durability of the piece tends to be higher. In contrast, the spacer/concrete interface can become a fragile point for the entry of aggressive agents, such as chloride ions, for example. The objective of this work was to conduct an experimental study to analyze the influence of the spacer/concrete interface on the corrosion of reinforcements triggered by chloride ions, when using different types of spacers. From this, three families of prismatic reinforced concrete specimens were molded, they are: without spacer (reference), with mortar spacer produced on site and with industrialized mortar spacer. These test specimens were submitted to the chloride ion penetration induction test by means of cycles of drying and partial immersion. Throughout the test, the corrosion potential was measured. Also, complementary tests of ultrasonic wave velocity, presence of chlorides by the colorimetric method with silver nitrate and gravimetric loss of the mass of the reinforcements were carried out. Tests were also carried out on the spacers themselves. After the analysis of all the results, it was concluded that the specimens with industrialized mortar spacers were the ones that favored the beginning of the corrosion, evidencing the direct influence of the presence of the spacers in the corrosion of concrete reinforcement.

Keywords: Reinforced Concrete, Corrosion of Reinforcement, Spacers, Chloride Ions.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	Justificativa e importância do tema	9
1.2	Objetivo geral.....	11
1.3	Objetivos específicos	11
1.4	Estruturação do trabalho	11
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	13
2.1	Normas estruturais e de desempenho	16
2.2	Durabilidade e vida útil das estruturas.....	22
2.3	Patologia das estruturas	24
2.3.1	Origens	25
2.3.2	Sintomas	26
2.3.3	Mecanismos	26
2.3.4	Causas.....	28
2.4	Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado.....	30
2.5	Corrosão de armaduras no concreto.....	31
2.5.1	Aspectos gerais	31
2.5.2	Passivação.....	32
2.5.3	Processo corrosivo	34
2.5.4	Formas de corrosão.....	37
2.5.5	Efeitos da corrosão de armaduras no concreto armado	46
2.6	Espaçadores	48
2.7	Classificação dos espaçadores.....	50
2.7.1	Quanto à Função	50

2.7.2	Quanto o formato.....	50
2.7.3	Quanto o material utilizado em sua fabricação	52
2.8	Distribuição e posicionamento dos espaçadores	56
3	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	59
3.1	Materiais utilizados.....	61
3.1.1	Cimento	61
3.1.2	Agregado miúdo	62
3.1.3	Agregado graúdo	63
3.1.4	Armadura	64
3.1.5	Água	64
3.1.6	Corpos de prova.....	64
3.1.7	Moldagem e cura	68
3.1.8	Preparação dos corpos de prova	71
3.2	Ensaio e Análises	73
3.2.1	Caracterização dos espaçadores.....	73
3.2.2	Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos.....	77
3.2.3	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.....	79
3.2.4	Indução da penetração de íons cloreto nos corpos de prova por meio de ciclos de secagem e imersão parcial	81
3.2.5	Potencial de Corrosão	84
3.2.6	Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata	90
3.2.7	Perda de massa gravimétrica	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
4.1	Caracterização dos espaçadores	94

4.2	Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos	98
4.3	Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica	100
4.4	Potencial de corrosão.....	102
4.5	Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata 107	
4.6	Perda de massa gravimétrica	107
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	109
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	112
	REFERÊNCIAS	113

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.....	17
Figura 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.	17
Figura 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.	19
Figura 4 - Origem dos problemas patológicos.....	25
Figura 5 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H ₂ O a 25°.....	33
Figura 6 - Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado.....	35
Figura 7 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação.	39
Figura 8 - Representação esquemática da carbonatação em poros totalmente vazios.....	40
Figura 9 - Representação esquemática de carbonatação em poros totalmente cheios.....	41
Figura 10 - Representação esquemática de carbonatação em poros parcialmente preenchidos.	41
Figura 11 - Formas de apresentação dos íons cloreto nas estruturas de concreto.	45
Figura 12 - 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.	47
Figura 13 - Espaçador cadeirinha.	51
Figura 14 – Espaçador circular raiado.....	51
Figura 15 - Espaçador prisma circular.....	51
Figura 16 - Espaçador multiapoio.	51
Figura 17 – Espaçador metálico fabricado em obra.	52
Figura 18 – Espaçador metálico industrializado.....	52
Figura 19 – Espaçador de argamassa industrializado.....	53
Figura 20 – Espaçador de argamassa produzido em obra.	54
Figura 21 - Espaçadores plásticos industrializados.	55
Figura 22 - Distribuição de espaçadores normatizada para armadura positiva em lajes.....	58
Figura 23 - Fluxograma das análises da pesquisa.	60

Figura 24 - Composição granulométrica do agregado miúdo.	62
Figura 25 - Composição granulométrica do agregado graúdo.	63
Figura 26 - Detalhes dos corpos de prova com cobrimento de 2,5 cm.	65
Figura 27 - Espaçadores utilizados para confecção dos corpos de prova.	(a)
Espaçador industrializado de argamassa.	(b)
Espaçador de argamassa produzido em obra.	66
Figura 28 - Comparação entre as barras antes e depois da limpeza.	67
Figura 29 - Fôrma utilizada para moldagem dos corpos de prova.	68
Figura 30 – (a) Preparação da forma com espaçador de argamassa produzido em obra. (b) Preparação da fôrma com espaçador industrializado de argamassa.	69
Figura 31 - Lançamento do concreto nas fôrmas dos corpos de prova.	70
Figura 32 - Acabamento superficial dos corpos de prova após o adensamento.	70
Figura 33 - Corpo de prova com armadura protegida por fita isolante.	71
Figura 34 - Pintura dos corpos de prova.	72
Figura 35 - Corpo de prova com fios flexíveis.	72
Figura 36 - Ensaio de resistência à compressão nos espaçadores de argamassa produzidos em obra.	73
Figura 37 - Ensaio de resistência à compressão nos espaçadores industrializados de argamassa.	74
Figura 38 - Realização do ensaio de absorção por capilaridade.	75
Figura 39 - Fervura dos corpos de prova.	76
Figura 40 – Moldagem e adensamento dos corpos de prova cilíndricos.	78
Figura 41 – Realização do ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos.	78
Figura 42 - Ascensão capilar nos corpos de prova cilíndricos.	79
Figura 43 – Realização do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.	81
Figura 44 - Etapa de secagem no procedimento de indução da penetração de íons cloreto.	83
Figura 45 - Etapa de umedecimento no procedimento de indução da penetração de íons cloreto.	84
Figura 46 - Desenho esquemático do sistema para medição do potencial de corrosão de meia célula.	86
Figura 47 - Preparação do eletrodo de barra.	87

Figura 48 - Eletrodo de barra preenchido com solução saturada de sulfato de cobre.	88
Figura 49 - Eletrodo de barra e conexão positiva acoplados no CANIN+.	88
Figura 50 - Esquema dos pontos de medição do potencial de corrosão nos corpos de prova. .	89
Figura 51 - Realização da medição do potencial de corrosão.	90
Figura 52 - Corpo de prova após aspersão de solução de nitrato de prata.	91
Figura 53 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do espaçador de argamassa produzido em obra.	96
Figura 54 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do espaçador industrializado de argamassa.	96
Figura 55 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do concreto.	99
Figura 56 – Resultados da ascensão capilar após o ensaio de capilaridade do concreto.	100
Figura 57- Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova REF.	100
Figura 58 - Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova EAPO.	101
Figura 59 - Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova EIA.	101
Figura 60 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova REF.	103
Figura 61 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EAPO.	104
Figura 62 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EIA.	105
Figura 63 – Resultados da média dos potenciais de corrosão em relação ao tempo dos corpos de prova REF, EAPO E EIA.	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.	28
Tabela 2 - Fontes de íons cloreto em concreto.	43
Tabela 3 - Distância recomendada entre espaçadores.	57
Tabela 4 – Análise química do aglomerante.	61
Tabela 5 – Propriedades físicas do aglomerante.	61
Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo.	62
Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo.	63
Tabela 8 – Características das armaduras.	64
Tabela 9 – Traço do concreto.	66
Tabela 10 – Famílias dos corpos de prova moldados.	71
Tabela 11 - Classificação da qualidade do concreto conforme a velocidade do pulso ultrassônico.	80
Tabela 12 - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos.	82
Tabela 13 - Critérios de avaliação dos resultados das medidas de potenciais.	85
Tabela 14 - Medições do potencial de corrosão (mV) nos corpos de prova.	87
Tabela 15 - Designação dos cloretos em relação à superfície do concreto.	91
Tabela 16 – Quadro resumo dos ensaios realizados no procedimento experimental.	93
Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado nos espaçadores.	94
Tabela 18 - Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do espaçador de argamassa produzido em obra.	95
Tabela 19 - Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do espaçador industrializado de argamassa.	95
Tabela 20 - Variação dimensional dos espaçadores de argamassa produzidos em obra.	97
Tabela 21 - Variação dimensional dos espaçadores industrializados de argamassa.	97
Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto.	98
Tabela 23 – Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto.	99
Tabela 24 – Média das velocidades de onda ultrassônica para cada família.	102

Tabela 25 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova REF.	103
Tabela 26 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EAPO.	104
Tabela 27 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova com espaçadores industrializados de argamassa.	105
Tabela 28 – Perda de massa gravimétrica média dos corpos de prova prismáticos.	107

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa e importância do tema

Uma das principais causas da degradação das edificações de concreto armado é a corrosão de armaduras. Podendo ocorrer pela penetração de íons cloreto na estrutura. Tais íons penetram o concreto gradativamente, ou estão presentes em sua composição (aditivos, água e areia contaminadas). Quando o teor de íons cloreto atinge níveis críticos, a armadura pode ser despassivada dando início ao processo de corrosão, comprometendo significativamente a durabilidade, a estabilidade, a funcionalidade, a estética das estruturas, e, conseqüentemente, sua vida útil (MONTEIRO, 2002).

Atualmente, inúmeros são os casos de corrosão de armaduras nas estruturas e em sua maioria não é fácil nem rápido justificar o seu motivo. A corrosão é um processo de natureza predominantemente eletroquímica, ocorrendo na presença de água, íons e oxigênio, podendo ser propagada mais rapidamente por motivos intrínsecos (espessura do revestimento, permeabilidade do concreto, resistividade elétrica, tipo de cimento, água, areia e brita utilizada) e extrínsecos (o meio onde a estrutura encontra-se inserida) (SILVA, 2006).

Ainda de acordo com Silva (2006), a corrosão eletroquímica ocorre nas armaduras das estruturas na presença de pelo menos um eletrólito e oxigênio dissolvido no mesmo. A corrosão poderá ser mais agressiva, caso haja também a presença de cloretos, sulfatos e outros gases atmosféricos.

Existem três conseqüências importantes provocadas pela corrosão de armaduras, são elas: perda de seção transversal da armadura e redução de sua resistência mecânica; formação de óxidos e hidróxidos que incorporam moléculas de água em sua composição, gerando tendência à expansão, o que pode resultar em fissuras, e, em situações mais drásticas, deslocamento da camada do revestimento; perturbação na interface aço/concreto, provenientes do desgaste das camadas externas do aço e do acúmulo de óxidos, afetando a transferência de tensões entre eles (TORRES, 2011).

Quando a estrutura está sujeita ao ataque de íons cloreto, a corrosão das armaduras desenvolvida possui característica puntiforme ou localizada. A corrosão puntiforme é

consideravelmente grave, visto que, pode haver uma elevada perda da área da seção transversal em regiões ao longo da armadura. Na corrosão localizada, ocorre o desgaste pontual da armadura sob a forma de pites ou alvéolos, os quais evoluem enraizando-se, podendo causar a ruptura pontual (LIBERATI, 2014).

Diante dessa problemática, muitos estudos foram desenvolvidos para compreender os principais fatores que aceleram e facilitam a ocorrência da corrosão de armadura nas estruturas, visando prolongar sua durabilidade. De acordo com Couto et al. (2013 apud ADAMATTI, 2016), a durabilidade do concreto armado está relacionada a quatro fatores, são eles: traço, compactação, cura e cobrimento. Dentre esses fatores, tem-se o cobrimento, o qual pode ser garantido através do uso de espaçadores. Dessa forma, o uso de espaçadores está ligado diretamente a durabilidade das estruturas.

Os espaçadores podem ser produzidos na própria obra, ou podem ser industrializados em diferentes tipos de materiais (argamassa ou plástico) e formatos. Entretanto, todos os modelos devem seguir a mesma premissa básica: resistir às cargas das ferragens e do concreto, evitando deformações. Devem também, ser utilizados de forma que não permitam a passagem do ar e da água entre a superfície e a armadura. A falta do uso dos espaçadores, ou sua má utilização, pode causar sérios problemas na estrutura, tendendo a redução de sua vida útil (VAQUERO, 2007).

De acordo com Barreto (2014), o uso de espaçadores é essencial na execução das estruturas de concreto armado e protendido. Sua utilização se dá em grandes quantidades, em obras que consideram esse tipo de solução estrutural, compreendendo a maior parte do país.

Atualmente, não há nenhuma norma específica para os espaçadores no Brasil. A sua utilização é citada apenas nas normas que envolvem as estruturas. Não há também nenhum controle de qualidade, ou ensaios para testar a eficiência desses materiais. Entretanto, o mesmo problema ocorre em outros países (ADAMATTI, 2016). Barreto (2014) acrescenta, que a falta de uma norma específica para regulamentação da produção e do uso dos espaçadores, bem como, a inexistência de certificação de qualidade por um órgão responsável pela fiscalização do produto, contribuem para uma má fabricação e utilização dos espaçadores.

Boa parte da literatura atual relaciona o uso de espaçadores a espessura do cobrimento nas estruturas, e, o quanto isso pode influenciar na durabilidade das mesmas. Entretanto, o trabalho em questão propõe uma análise do mesmo problema por outro ângulo, buscando

investigar se a interface espaçador/concreto torna-se um ponto frágil na edificação, e se esse ponto frágil facilita a entrada de agentes agressivos, como os íons cloreto, por exemplo. Tal análise foi demonstrada também na dissertação de mestrado de Adamatti (2016). Vale salientar, que a análise da influência dos espaçadores como facilitadores e aceleradores da corrosão de armaduras, ainda é uma abordagem muito superficial e escassa.

1.2 Objetivo geral

Realizar um estudo experimental para analisar a influência da interface espaçador/concreto na corrosão de armaduras desencadeada por íons cloreto, quando utilizados diferentes tipos de espaçadores.

1.3 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico acerca dos temas relacionados à questão em estudo, com objetivo de formar um embasamento teórico necessário para o desenvolvimento da pesquisa;
- Realizar moldagem de corpos de prova prismáticos de concreto armado, com diferentes tipos de espaçadores;
- Realizar ensaio de indução da penetração de íons cloreto por meio de ciclos de secagem e imersão parcial nos corpos de prova prismáticos de concreto armado;
- Analisar o potencial de corrosão dos corpos de prova prismáticos de concreto armado;
- Realizar ensaios complementares nos corpos de prova prismáticos de concreto armado;
- Realizar ensaios complementares nos espaçadores utilizados na pesquisa.

1.4 Estruturação do trabalho

O Capítulo 2 compreende os temas julgado relevantes para um total entendimento do trabalho. Foram abordadas todas as definições necessárias para se entender o procedimento experimental, como: as normas estruturais e de desempenho, a durabilidade e a vida útil do concreto, a patologia das estruturas, a corrosão de armaduras no concreto e os espaçadores.

No Capítulo 3 estão presentes todas as etapas executadas no procedimento experimental e descrição do ensaio. Neste capítulo encontram-se o planejamento da pesquisa, a definição das séries de ensaios, a caracterização dos materiais utilizados e seus resultados, os corpos de prova, o procedimento de indução da penetração de íons cloreto e o procedimento de medição do potencial de corrosão.

No Capítulo 4 foram analisados e discutidos todos os resultados obtidos no procedimento experimental.

E no capítulo 5 estão presentes as considerações finais do trabalho.

No capítulo 6 é apresentada as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O concreto é um material consumido em larga escala, que possui alta resistência à compressão e desempenha um papel importante nas edificações em geral. Além de resistir aos esforços de compressão solicitados, o concreto atua também protegendo as armaduras em seu interior. Essa proteção ocorre por meio de dois fatores. O primeiro a proteção física, na qual o concreto funciona como uma barreira entre o meio externo e as armaduras. O segundo a proteção química, assegurada pelo elevado pH do concreto, que promove a formação de uma película passivadora envolta de todo o aço (SANTOS, 2015).

Apesar de toda a proteção imposta pelo concreto ao aço, é possível que esse sistema apresente falhas e as armaduras entrem em processo de despassivação, dando início a corrosão, comprometendo a durabilidade, a estabilidade, a funcionalidade, a estética das estruturas, e, conseqüentemente, sua vida útil (MONTEIRO, 2002). Afim de minimizar tais falhas, alguns procedimentos são realizados no período de construção da edificação. Pode-se citar o uso de espaçadores. Entretanto, a produção científica que relaciona um tipo de espaçador específico com a corrosão de armaduras ainda é escassa (ADAMATTI, 2016).

Em se tratando da corrosão, o trabalho realizado por Cascudo (1997), nomeado de O Controle da Corrosão de Armaduras em Concreto: inspeção, e técnicas eletroquímicas, é de grande importância no âmbito científico. O autor classifica a corrosão de armaduras como a principal manifestação patológica nas estruturas de concreto armado. O trabalho enfatiza a gravidade do problema, explanando sobre o crescente aumento da quantidade de ocorrências da manifestação, e, relaciona ao mesmo tempo, os altos custos para seu reparo. A partir disso, é proposto um método de inspeção nas estruturas em geral, onde possibilidades para execução de reparos foram discutidas, com a introdução de técnicas eletroquímicas com o objetivo de monitorar, avaliar e estudar a corrosão das armaduras.

Ainda no âmbito da corrosão, a dissertação de mestrado produzida por Leonardo Gomes de Sá Carvalho (2014), intitulada: Resistência à corrosão dos aços CA-24 e CA-50 frente à ação dos cloretos, traz uma análise mais aprofundada do tema. A princípio, o autor explica de forma detalhada todo o processo da corrosão, correlacionando o problema com a durabilidade das estruturas. O trabalho dispõe também, de um procedimento experimental responsável por verificar a resistência à corrosão em dois diferentes tipos de aço (CA-24 e CA-50), para diferentes diâmetros. Foi constatado, que a variável “classe de aço” se mostrou importante

somente na fase de propagação da corrosão, sendo que o CA-24 apresentou-se mais resistente a corrosão. Foi constatado também, que os aços de menores diâmetros apresentaram maior atividade corrosiva.

A tese de Doutorado desenvolvida por Djalma Ribeiro da Silva (2006), cujo título: Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria na sua durabilidade, apresenta um relevante estudo sobre a corrosão. O trabalho debateu o uso de inibidores de corrosão aplicados no aço, a fim de retardar o aparecimento da manifestação patológica. O autor frisou a importância do combate a degradação em questão e o quanto a mesma afeta negativamente a vida útil e a durabilidade de uma edificação. Desta forma, foi analisada a adição de diferentes inibidores no concreto, nas proporções de 0,5 a 3,5%, em relação à massa de cimento. Dentre todos os inibidores e proporções, o nitrito de sódio na proporção de 2,0% obteve os melhores resultados de proteção da armadura.

No que se trata a corrosão de armaduras ocasionada por íons cloreto, a Tese de Doutorado elaborada por Ariela da Silva Torres (2011), nomeada de: Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: Uma meta-análise, debate importantes conceitos. A autora relatou os altos custos gastos em manutenção predial provocados pelo aparecimento da manifestação patológica. Todas as etapas que envolvem a corrosão de armaduras causadas por íons cloreto, foram explicadas de forma detalhada. O trabalho teve como objetivo realizar uma validação dos ensaios de corrosão por cloretos, em estruturas de concreto armado, a partir de meta-análise dos dados de técnicas eletroquímicas utilizadas nos trabalhos de teses e dissertações desenvolvidos no Brasil. Foi concluído, através do uso de técnicas estatísticas, a falta de diversas combinações de variáveis para criação de um modelo brasileiro confiável.

Os trabalhos acadêmicos envolvendo o uso de espaçadores ainda é escasso, com foco na análise dos tipos mais utilizados e na distribuição desses espaçadores nas armaduras das estruturas. Oliveira (2014), apresentou estudos relevantes sobre o tema. O trabalho realizou um levantamento do panorama das empresas de construção civil na cidade de Porto Alegre, no que se refere ao processo de distribuição dos espaçadores em estruturas de concreto armado, com a finalidade de garantir o cobrimento de concreto exigido em projeto. Após reunir conceitos importantes sobre concreto armado, durabilidade e manifestações patológicas, foi desenvolvido um questionário sobre o processo de execução das estruturas. O mesmo foi respondido pelos engenheiros civis e mestres de obras das obras visitadas. Após profunda análise das respostas, observou-se uma significativa disparidade entre elas, concluindo-se que as empresas não

possuem um padrão na distribuição dos espaçadores, sendo frisada a importância de estudos que levem a normatização dessa distribuição, fundamentada em critérios provenientes das características dos elementos de concreto armado a serem executados.

O trabalho de Silva (2012) também teve grande relevância nos estudos envolvendo os espaçadores. O autor frisou que para a viabilização de uma obra de qualidade, é necessário o uso correto dos materiais disponíveis, aliado a uma execução eficaz e ao cumprimento do projeto estrutural da edificação. O trabalho realizou uma análise nos valores de cobrimentos em diferentes obras com estruturas de concreto armado, na cidade de Porto Alegre, identificando qual a correlação da variabilidade do cobrimento em execução comparado com os valores especificados em projeto. Os resultados apontaram que em 46% das medições os valores de cobrimento real estavam abaixo dos valores de projeto. Conclui-se, que os números encontrados são consideravelmente preocupantes, tendo em vista que o cobrimento é um dos parâmetros utilizados para a determinação da durabilidade e previsão de vida útil das estruturas.

Apesar da maioria dos trabalhos acadêmicos envolvendo os espaçadores se basearem na análise dos tipos mais utilizados e na distribuição desses espaçadores nas armaduras das estruturas, Adamatti (2016) realizou um estudo responsável por avaliar a interface espaçador/concreto frente ao ataque de íons cloreto. Foram moldados corpos de prova com diferentes tipos de espaçadores e cobrimento, os quais foram submetidos a um processo de aceleração da corrosão. Os resultados obtidos apontaram os espaçadores plásticos com o pior desempenho. Desta forma, foram os que mais facilitaram o avanço da corrosão.

Strømme (2017) desenvolveu um estudo sobre a influência de fissuras e espaçadores na penetração de cloretos em estruturas de concreto armado. O autor deixou claro que em comparação as fissuras, a literatura relacionando espaçadores a corrosão ainda é limitada, embora estudos recentes apontem que os mesmos podem ter impactos significativos na corrosão de armaduras. Para realização do trabalho foram investigadas quatro colunas de concreto (duas com densidade normal e duas em concreto estrutural leve), expostas a zona de maré por mais de 30 (trinta) anos. Três regiões das colunas foram analisadas, as que apresentavam fissuras, as que não apresentavam fissuras e as que apresentavam espaçadores. Os resultados revelaram que não houve uma clara influência das fissuras na penetração dos cloretos. Foi observada uma possível tendência para o aumento da profundidade da penetração próxima as fissuras, porém quando comparadas com as amostras não fissuradas, as que continham fissuras não apresentaram penetração mais profunda. Já as amostras com os espaçadores obtiveram um

aumento na penetração dos cloretos na interface concreto/espçador, obtendo em sua maioria resultados mais severos quando comparados com as amostras fissuradas.

2.1 Normas estruturais e de desempenho

A norma que rege o dimensionamento das estruturas de concreto armado é a NBR 6118. A sua primeira edição foi no ano de 1940, oficializada por decreto pelo então presidente Getúlio Vargas, o qual obrigava seu uso em obras públicas. A norma possuía 24 (vinte e quatro) páginas, 7 (sete) capítulos e recebeu como título a sigla NB-1. A sua elaboração e oficialização representou um importante avanço para engenharia nacional.

Após a sua primeira publicação, a norma passou por atualizações e evoluiu ao longo dos anos, resultando nas versões de 1960, 1978, 2003 e a última versão, em 2014. Assuntos importantes foram abordados e aprofundados nas últimas publicações, dentre eles, pode-se citar a durabilidade das estruturas de concreto, que ganhou um capítulo à parte em 2003, sendo aprimorado em 2014.

A publicação de 2003 normatizou as classes de agressividade do ambiente e estabeleceu critérios de qualidade mínimos para o f_{ck} e a relação água/cimento (a/c) do concreto utilizado em obra, de acordo com a exposição onde a estrutura se encontra. Também foram introduzidos parâmetros de cobrimento mínimo das armaduras, em função da classe de agressividade em que a edificação está inserida. Vale salientar, que na versão anterior de 1978 os cobrimentos não eram determinados através da agressividade do meio, mas sim, de acordo com o acabamento da estrutura, não sendo citada a influência do ambiente (ADAMATTI, 2016).

Nas Figuras 1 e 2 a seguir, pode-se observar a relação entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto, e a relação entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal, respectivamente, retiradas da NBR 6118:2003.

Figura 1 - Correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto.

Concreto	Tipo	Classe de agressividade (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
NOTAS					
1 O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.					
2 CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.					
3 CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.					

Fonte: NBR 6118:2003.

Figura 2 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.

Tipo de estrutura	Componente ou elemento	Classe de agressividade ambiental (tabela 6.1)			
		I	II	III	IV ³⁾
		Cobrimento nominal mm			
Concreto armado	Laje ²⁾	20	25	35	45
	Viga/Pilar	25	30	40	50
Concreto protendido ¹⁾	Todos	30	35	45	55
¹⁾ 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.					
²⁾ 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 ≥ 15 mm.					
³⁾ 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 ≥ 45 mm.					

Fonte: NBR 6118:2003.

A NBR 6118:2014 ainda está em vigência e foi reconhecida internacionalmente em 2015, pela ISO (International Organization for Standardization), sendo registrada no seletor rol de normas técnicas que atendem às exigências internacionais, podendo ser consultada em qualquer local do planeta para o projeto de estruturas de concreto (OLIVEIRA, 2015). Essa última versão da norma, apresentou certas mudanças em relação as anteriores, algumas delas são:

1. Introdução do Grupo II de resistência que abrange concretos entre 55 e 90 MPa;
2. Limitação da dimensão mínima dos pilares em 14 cm, diferente da versão anterior que previa pilares com até 12 cm de espessura;
3. Aumento significativo nas seções mínimas das lajes de piso, cobertura e balanço;
4. Alteração no comprimento de ancoragem básico;
5. Modificações nos cobrimentos das armaduras.

Em se tratando das mudanças em relação à durabilidade das estruturas, as mais pertinentes foram no âmbito dos cobrimentos nominais mínimos. Houve a introdução de recomendações para elementos em contato direto com o solo e mudança na especificação de cobrimento em concretos protendidos e em superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, passando a exigir cobrimento da classe de agressividade IV (50 mm).

Tais mudanças podem ser observadas na Figura 3 (NBR 6118:2014) a seguir:

Figura 3 - Correspondência entre a classe de agressividade ambiental e o cobrimento nominal.

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

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

^b 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 ≥ 15 mm.

^c 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.

^d No trecho dos pilares em contato com o solo junto aos elementos de fundação, a armadura deve ter cobrimento nominal ≥ 45 mm.

Fonte: NBR 6118:2014.

A evolução da NBR 6118 evidenciou uma forte preocupação da engenharia nacional no que diz respeito à durabilidade e vida útil das estruturas. Tendo em vista essa preocupação, em junho de 2013 entrou em vigor a Norma de Desempenho em Edificações Habitacionais (NBR 15575:2013), a qual estabelece exigências de habitabilidade, segurança e sustentabilidade, além dos níveis de desempenho mínimos, que devem ser atingidos pelas edificações.

A NBR 15575:2013 foi elaborada com o objetivo de orientar o desenvolvimento de projetos, determinando requisitos de desempenho de edificações para o uso destas. A análise da durabilidade e a definição de valores mínimos de vida útil desejada para cada subsistema, são pontos relevantes discutidos na norma (ADAMATTI, 2016).

A fim de se obter uma correta compreensão da norma desempenho, é necessário o entendimento da sua estrutura e de algumas definições importantes. Quanto a sua estrutura a norma é dividida em seis partes, são elas:

- Parte 1 – Requisitos Gerais: estabelece os requisitos e critérios de desempenho do sistema estrutural; segurança contra incêndio; segurança no uso e na operação; estanqueidade; desempenho térmico; desempenho acústico; desempenho luminoso; durabilidade e manutenibilidade; saúde, higiene e qualidade do ar; funcionalidade e acessibilidade; conforto tátil e antropodinamico; e adequação ambiental.
- Parte 2 – Requisitos para os sistemas estruturais: estabelece requisitos que atendem apenas ao sistema estrutural.
- Parte 3 – Requisitos para os sistemas de pisos: estabelece requisitos que atendem apenas ao sistema de pisos, como exemplo, segurança ao fogo.
- Parte 4 – Requisitos para os sistemas de vedações verticais internas e externas: estabelece requisitos que atendem apenas ao sistema de vedações verticais.
- Parte 5 – Requisitos para os sistemas de coberturas: estabelece requisitos que atendem apenas ao sistema de cobertura.
- Parte 6 – Requisitos para sistemas hidrossanitários: estabelece requisitos que atendem apenas ao sistema hidrossanitário.

Nota-se que a norma apresenta regras a serem cumpridas nos novos projetos e construções, buscando a mudança no paradigma sobre as construções e o resgate da função da edificação como um habitat seguro, por meio da qual ele possa se defender das hostilidades do meio em que vive (MARQUES, 2015).

Quanto a algumas definições importantes que a NBR 15575:2013 apresenta, deve-se ficar atento:

- Critérios de desempenho: Especificações quantitativas dos requisitos de desempenho, expressos em termos de quantidades mensuráveis, a fim de que possam ser objetivamente determinados.
- Desempenho: Comportamento em uso de uma edificação e de seus sistemas.
- Durabilidade: Capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenção.

- Vida útil: Período de tempo em que um edifício e/ou seus sistemas se prestam às atividades para as quais foram projetados e construídos considerando a periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção (a vida útil não pode ser confundida com prazo de garantia legal e certificada).
- Vida útil de projeto: Período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos nesta norma, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o cumprimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção (a VUP não deve ser confundida com tempo de vida útil, durabilidade, prazo de garantia legal e certificada).

A NBR 15575:2013 é a primeira legislação brasileira que define como um edifício deve se comportar ao longo do tempo, a fim de atender as expectativas dos usuários quanto a quesitos de “conforto” e segurança. A norma beneficia os consumidores, uma vez que, regimenta que um edifício ou sistema deve conseguir alcançar um bom desempenho no tempo de vida útil de projeto (VUP), delegando sua total responsabilidade aos projetistas, construtores e incorporadores (MARQUES, 2015).

Dessa forma, novas obras a serem desenvolvidas deverão ser elaboradas, a fim de que atendam uma durabilidade potencial de vida útil de projeto. Para se atingir níveis de durabilidade desejáveis, é necessário o cumprimento das exigências de todas as normas relacionadas aos materiais envolvidos nos projetos. Ou seja, as normas que regem a construção civil se complementam e todas devem ser devidamente cumpridas.

Com o atendimento às normas, é prevista uma mudança na cultura da engenharia habitacional, passando pelas etapas de criação, edificação e manutenção. De acordo com 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).

2.2 Durabilidade e vida útil das estruturas

Em virtude dos inúmeros problemas de degradação precoce analisados nas estruturas, das necessidades de tecnologias mais competitivas e das exigências de sustentabilidade no setor da Construção Civil, fica claro, nos últimos anos, uma preocupação atenuada em privilegiar aspectos de projeto voltados à durabilidade e ao aumento de vida útil das estruturas de concreto armado e protendido (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Atualmente existem vários documentos internacionais, artigos de especialistas no tema e documentos clássicos que têm colaborado para inserir e consolidar novos conceitos em prol da durabilidade e da extensão da vida útil das estruturas de concreto, pode-se citar: o CEB-FIP Model Code 90, fib Model Code 2010, fib (CEB-FIP) Model Code 2006 for Service Life Design, ACI 201.1R-08, ACI 365.1R 00, a norma europeia EN-206, a ABNT NBR 12655:2006, artigos de especialistas tais como Helene (1983), Andrade & Gonzalez (1988), Rostam (1993), e documentos clássicos como a norma CETESB L1 007 (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Por meio de tantas normas e trabalhos, fica claro a evolução dos conceitos que envolvem a durabilidade e a vida útil das estruturas nas últimas décadas. Insta salientar, que nas primeiras construções em concreto armado, até a década de 80, apenas o bom senso e a experiência profissional eram levados em conta, sendo a durabilidade tratada de forma subjetiva e assegurada apenas por exigências prescritivas (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Ainda de acordo com Medeiros, Andrade e Helene (2011), o avanço dos estudos da durabilidade vem sendo assegurado graças ao maior conhecimento e domínio dos mecanismos de transporte de líquidos e gases agressivos nos meios porosos, o que viabiliza a associação do tempo aos modelos matemáticos que dissertam quantitativamente esses mecanismos. Dessa forma, tornou-se viável a avaliação da vida útil por meio de números de anos, substituindo os critérios qualitativos de adequação da estrutura a certo grau de exposição.

A fim de se obter uma melhor compreensão sobre durabilidade e vida útil das estruturas, é necessário o conhecimento de algumas definições e conceitos importantes sobre o tema. Para Neville e Brooks (2011), a durabilidade está ligada à capacidade de um material se manter em certo estado por um tempo determinado. Assim, os parâmetros mínimos de qualidade do

material, a serem atendidos, devem ser especificados através de ensaios de desempenho da durabilidade da estrutura, frente ao tipo e nível de agressividade ambiental previstos em projeto.

De acordo com Helene (2001), a durabilidade é o resultado da interação entre a estrutura de concreto, o ambiente e as condições de uso, de operação e de manutenção. Logo, não é uma propriedade inerente ou intrínseca à estrutura, à armadura ou ao concreto. Deve-se destacar, que uma mesma estrutura pode ter vários comportamentos, ou seja, diferentes funções de durabilidade no tempo, devido as suas diversas partes, ou até mesmo a forma como é utilizada.

De maneira mais específica, Helene (2001) evidencia que a durabilidade da estrutura de concreto é determinada por quatro fatores (regra dos 4C):

- 1) Composição ou traço do concreto;
- 2) Compactação ou adensamento efetivo do concreto na estrutura;
- 3) Cura efetiva do concreto na estrutura;
- 4) Cobrimento ou espessura do concreto de cobrimento das armaduras.

Já para a NBR 6118:2014, durabilidade “consiste na capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e o contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto”. No Item 6.1 preceitua que “as estruturas de concreto devem ser projetadas e construídas de modo que sob as condições ambientais previstas na época do projeto e quando utilizadas conforme preconizado em projeto, conservem sua segurança, estabilidade e aptidão em serviço durante o período correspondente à sua vida útil”.

Conforme a ISO 13823:2008, vida útil é “o período efetivo de tempo durante o qual uma estrutura ou qualquer de seus componentes satisfazem os requisitos de desempenho do projeto, sem ações imprevistas de manutenção ou reparo”. Nota-se que essa definição incorpora o conceito de desempenho, elaborado na década de 80 pela ISO 6241:1984, e que apenas recentemente, foi adotado na normalização brasileira pela NBR 15575:2013.

A vida útil deverá sempre ser avaliada de um ponto de vista global que abrange o projeto, a execução, os materiais, o uso, operação e a manutenção sob uma perspectiva de desempenho, qualidade e sustentabilidade (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Apesar das suas diversas definições, a aplicação prática da vida útil ainda enfrenta limitações substanciais na normalização brasileira em vigor. Como mencionado previamente,

vida útil é um conceito quantitativo concatenado a um período de tempo, não definido nas normas brasileiras, exceto recentemente na NBR 15575:2013, que especifica a vida útil de no mínimo 50 anos para as edificações (MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011).

Comparando a aplicação prática dos conceitos de durabilidade e de vida útil no Brasil, inseridos há mais de 35 anos na construção civil, em relação ao exterior, conclui-se que o cenário nacional atual ainda precisa vencer etapas importantes para se atingir um nivelamento desejável mínimo.

2.3 Patologia das estruturas

O termo “patologia” deriva do grego: pathos - doença e logia – ciência, estudo. De maneira geral, patologia é o “estudo da doença”. No que diz respeito a Engenharia Civil, essa expressão é atribuída aos estudos realizados referentes aos danos ocorridos nas construções. Tais patologias, manifestam-se de inúmeras formas, como: fissuras, manchas, trincas, entre outras. Por esse motivo, essas manifestações recebem a denominação de manifestações patológicas (ARIVABENE, 2015).

Segundo Helene (1992), "a patologia pode ser entendida como a parte da engenharia que estuda os sintomas, os mecanismos, as causas e origens dos defeitos das construções civis, ou seja, é o estudo das partes que compõem o diagnóstico do problema".

De acordo com Souza e Ripper (1998), a patologia das construções compreende uma esfera de análises pluridisciplinares para o estudo das origens do problema, com os seus inúmeros mecanismos de atuação e manifestação.

As manifestações patológicas podem ser causadas por uma infinidade de motivos. Frequentemente essas manifestações apresentam sintomas semelhantes, mesmo possuindo origens diversas. A Patologia das Construções é uma área de extrema complexidade na Engenharia Civil, devido a vasta diversidade e possibilidades de danos às estruturas (ROCHA, 2015).

Afim de se obter o correto diagnóstico das manifestações patológicas, é necessário o amplo conhecimento envolvendo as possíveis origens, sintomas, mecanismos e causas. Os quais serão discutidos a seguir.

2.3.1 Origens

A fim de se obter um correto diagnóstico de uma manifestação patológica, é necessário que se conheça em que etapa da vida da estrutura teve origem o problema. De acordo com Monteiro (2017), as origens das manifestações patológicas podem ser: congênitas, construtivas, adquiridas ou acidentais.

- Congênitas: fase de projeto;
- Construtivas: Fase de execução;
- Adquiridas: Agressividade do meio e/ou má uso;
- Acidentais: Fenômenos atípicos.

De acordo com Helene (1992), determinar a origem das manifestações patológicas, é de extrema importância para fins judiciais. Pois, essa determinação viabiliza a identificação do responsável pelo problema. Em sua maioria, as origens dos problemas patológicos ocorrem nos primeiros momentos da execução da obra, nas fases de projeto e planejamento (HELENE; PEREIRA, 2007). A Figura 4 a seguir, quantifica a incidência das principais origens das manifestações patológicas.

Figura 4 - Origem dos problemas patológicos.



Fonte: HELENE; PEREIRA, (2007).

A fim de minimizar ou eliminar os problemas patológicos em uma estrutura, faz-se necessário a elaboração de um controle de qualidade mais eficaz, durante todas as etapas de seu desenvolvimento. É necessário também, a realização de um programa de manutenção eficiente (OLIVEIRA, 2013).

2.3.2 *Sintomas*

Quando a integridade de uma edificação está comprometida, alguns sinais externos podem surgir, os sintomas, sinalizando uma não conformidade no sistema. Em alguns casos, esses sintomas aparecem tardiamente e em outros podem ser imperceptíveis à maioria dos leigos. A sintomatologia se atenta em estudar estes sinais com o objetivo de diagnosticar aquela manifestação ou problema patológico (TUTIKIAN; PACHECO, 2013).

Para Andrade e Silva (2005), “um sintoma para ser considerado patológico deve comprometer algumas das exigências de construção, quer seja de capacidade mecânica, funcional ou estética.”

Existem três principais sintomas que podem aparecer nas estruturas isoladamente, ou ao mesmo tempo, são eles: a fissuração, a desagregação do concreto e a segregação (LAPA, 2008). Além desses, pode-se citar também as manchas e as flechas excessivas.

2.3.3 *Mecanismos*

Os mecanismos das manifestações patológicas, podem ser entendidos como os processos responsáveis pelo seu surgimento.

De acordo com Gonçalves (2015), a degradação do concreto é iniciada, frequentemente, por processos químicos. Entretanto, princípios físicos e mecânicos também podem ser responsáveis por tal degradação, associados ou não, aos processos químicos. Pode-se citar ainda, outros fatores de degradação. São eles: os que são desencadeados por processos biológicos e os que são desencadeados por processos eletroquímicos, como no caso da corrosão das armaduras.

A NBR 6118: 2014, relata como mecanismos importantes de deterioração do concreto:

- A lixiviação por ação de águas puras, carbônicas agressivas ou ácidas, que dissolvem e carregam os compostos hidratados de pasta de cimento;
- A expansão por ação de águas e solos que estejam contaminados com sulfatos, dando origem a reações expansivas e deletérias;
- A expansão por ação das reações entre os álcalis do cimento e certos agregados reativos;
- E as reações deletérias superficiais de certos agregados, decorrentes de transformações de produtos ferruginosos presentes na sua constituição mineralógica.

Quanto aos mecanismos importantes de degradação referentes à armadura, destacam-se: a despassivação por carbonatação e a despassivação por elevado teor de cloreto.

Na Tabela 1, apresenta-se uma visão geral dos principais mecanismos físico-químicos de deterioração das estruturas de concreto armado e protendido.

Tabela 1 - Principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto armado.

AGRESSIVIDADE DO AMBIENTE		CONSEQUÊNCIAS SOBRE A ESTRUTURA	
Natureza do processo	Condições particulares	Alterações iniciais na superfície do concreto	Efeitos a longo prazo
Carbonatação	UR 60% a 85%	Imperceptível	Redução do pH corrosão de armaduras fissuração superficial
Lixiviação	Atmosfera ácida, águas puras	Eflorescências, manchas brancas	Redução do pH corrosão de armaduras desagregação superficial
Retração	Umedecimento e secagem, ausência de cura, UR baixa (< 50%)	Fissuras	Fissuração corrosão de armaduras
Fuligem	Partículas em suspensão na atmosfera urbana e industrial	manchas escuras	Redução do pH corrosão de armaduras
Fungos e mofo	Temperaturas altas (> 20 °C e < 50 °C) com UR > 75%	manchas escuras e esverdeadas	Redução do pH desagregação superficial corrosão de armaduras
Concentração salina Cl ⁻	Atmosfera marinha e industrial	Imperceptível	despassivação e corrosão de armaduras
Sulfatos	Esgoto e águas servidas	Fissuras	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras
Álcali-agregado	Composição do concreto, umidade, UR > 95%	Fissuras gel ao redor do agregado gráudo	Expansão → fissuras desagregação do concreto corrosão de armaduras

Fonte: MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011.

2.3.4 Causas

Por definição, as causas das manifestações patológicas devem ser compreendidas, como os agentes responsáveis por desencadear os seus mecanismos.

Andrade e Silva (2005) relatam, que inúmeros agentes naturais interagem sob o concreto armado ocasionando seu envelhecimento, ou melhor, a perda gradativa de seu desempenho estético, funcional e estrutural. As causas de degradação podem se originar de diversas ações, como por exemplo, as mecânicas, físicas, químicas e biológicas. Essas ações podem ocorrer

isoladamente ou simultaneamente, dependendo da velocidade de propagação e, principalmente, do tipo de ambiente que a estrutura está inserida.

a) Ações mecânicas

Segundo Andrade (2013), “destacam-se como ações mecânicas de deterioração do concreto: a ação de cargas excessivas e a erosão. A carga excessiva pode provocar fissuração abrindo caminhos para que outras formas de deterioração se instalem”. A autora acrescenta, “é importante que os projetistas aprovelem as cargas consideradas no dimensionamento da estrutura e que os usuários obedeçam às condições especificadas no projeto”.

O processo de erosão do concreto, ocorrerá devido ao desgaste de sua superfície por meio de processos de atrito, arranhões ou pela ação de águas em alta velocidade, tendo como principais causas a abrasão (ANDRADE, 2013).

Souza e Ripper (1998), também mencionam algumas causas desenvolvidas por ações mecânicas de deterioração, são elas:

- Choques e impactos (por veículos automotores, por exemplo);
- Recalque diferencial das fundações;
- Acidentes imprevisíveis (inundações, grandes tempestades, explosões e abalos sísmicos).

As ações mecânicas de degradação do concreto, comprometem a sua capacidade resistente e facilitam a entrada de agentes agressivos através da estrutura danificada (SANTOS, 2012).

b) Ações físicas

Souza e Ripper (1998), apontam que as causas físicas, interligadas ao processo de degradação da estrutura, são desenvolvidas através da variação extrema da temperatura, da ação do vento, da água (sob a forma de chuva, gelo e umidade) e do fogo.

c) Ações químicas

As ações químicas são uma das principais causas de degradação do concreto armado. O processo ocorre de duas maneiras. Na primeira, os agentes agressivos encontrados no meio ambiente, penetram os poros do concreto e, sob condições favoráveis de temperatura e umidade, desenvolvem reações químicas nocivas a estrutura (ANDRADE, 2013). Na segunda, os agentes agressivos encontram-se presentes no próprio concreto e, tendo todas as condições necessárias, desenvolverão as reações químicas de caráter deletério. São consideradas ações de deterioração química: Reação álcali-agregado, ataque por cloretos, carbonatação, entre outras.

d) Ações biológicas

São consideradas ações de deterioração biológicas: O crescimento de vegetação indesejável nas edificações e o desenvolvimento de organismos e micro-organismos em certas partes da estrutura (ANDRADE, 2013).

2.4 Manifestações patológicas em estruturas de concreto armado

A medida que uma estrutura de concreto armado envelhece, torna-se mais comum o surgimento de manifestações patológicas, uma vez que, quando em contato com o meio ambiente, esse material sofre certas alterações (ADAMATTI, 2016).

Os imóveis nacionais possuem um alto nível de deterioração. Isso ocorre, principalmente, pela ineficiência no controle dos processos executivos, o que influencia diretamente no desempenho das estruturas de concreto armado (HELENE; TERZIAN, 1993).

Como mencionado anteriormente, vários problemas patológicos se desenvolvem no período da execução das estruturas de concreto armado. De acordo com Takata (2009), isso acontece devido à baixa qualificação da mão de obra, que na maioria dos casos, não segue as orientações do projeto.

Levando em conta que o aparecimento das manifestações patológicas é algo inevitável, devido as ações impostas pelo meio ambiente, é necessário, no mínimo, a tentativa de retardar

o seu surgimento. Dessa forma, a realização correta da manutenção estrutural é primordial, para se obter resultados favoráveis, quanto a vida útil desejada (ADAMATTI, 2016).

Atualmente, existe a ocorrência de inúmeras manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado, como por exemplo, fissuras, eflorescências, reação álcali-agregado, formação de etringita tardia e corrosão de armaduras.

Como a corrosão de armaduras é a manifestação patológica base do presente trabalho, será tratada em um capítulo à parte, de maneira mais detalhada.

2.5 Corrosão de armaduras no concreto

2.5.1 Aspectos gerais

Normalmente, os metais são encontrados na natureza formando compostos óxidos, além de outros elementos. A fim de utilizá-los em sua forma elementar, é necessário a extração do metal através de um processo de redução, o qual demanda um elevado nível de energia. O processo contrário, onde o metal regressa ao seu estado natural, perdendo energia, ocorre por meio de uma reação espontânea. Esse processo, denominado de oxidação, é conhecido por corrosão e pode representar a destruição gradativa do metal (MONTEIRO, 2002).

Gentil (2003) define corrosão como “a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente aliada ou não a esforços mecânicos”. Essa perspectiva vai de encontro com a de Huerta (1997), que conceitua corrosão como “a reação química e eletroquímica de um metal e a interação dele com o meio que o envolve e a deterioração de suas propriedades”.

De acordo com Cascudo (1997), Gentil (2012) e Liberati (2014), quando o metal passa pelo processo de corrosão, é convertido a um estado não metálico, perdendo as suas propriedades essenciais (resistência mecânica, elasticidade e ductibilidade).

A corrosão é um processo físico-químico que produz óxidos e hidróxidos de ferros (produtos da corrosão). Os produtos da corrosão ocupam um grande volume, superior, inclusive, ao volume inicial do metal. O mecanismo da corrosão se desenvolve basicamente de duas maneiras: a primeira através da oxidação, onde acontece uma reação gás-sólido na superfície do material; a segunda denominada de corrosão eletroquímica, onde o metal se

comporta como uma pilha e uma diferença de potencial é gerada. As corrosões eletroquímicas podem ser encontradas frequentemente nas estruturas de concreto armado (ADAMATTI, 2016).

A seguir serão tratadas algumas considerações, para se entender o processo corrosivo nas estruturas de concreto armado.

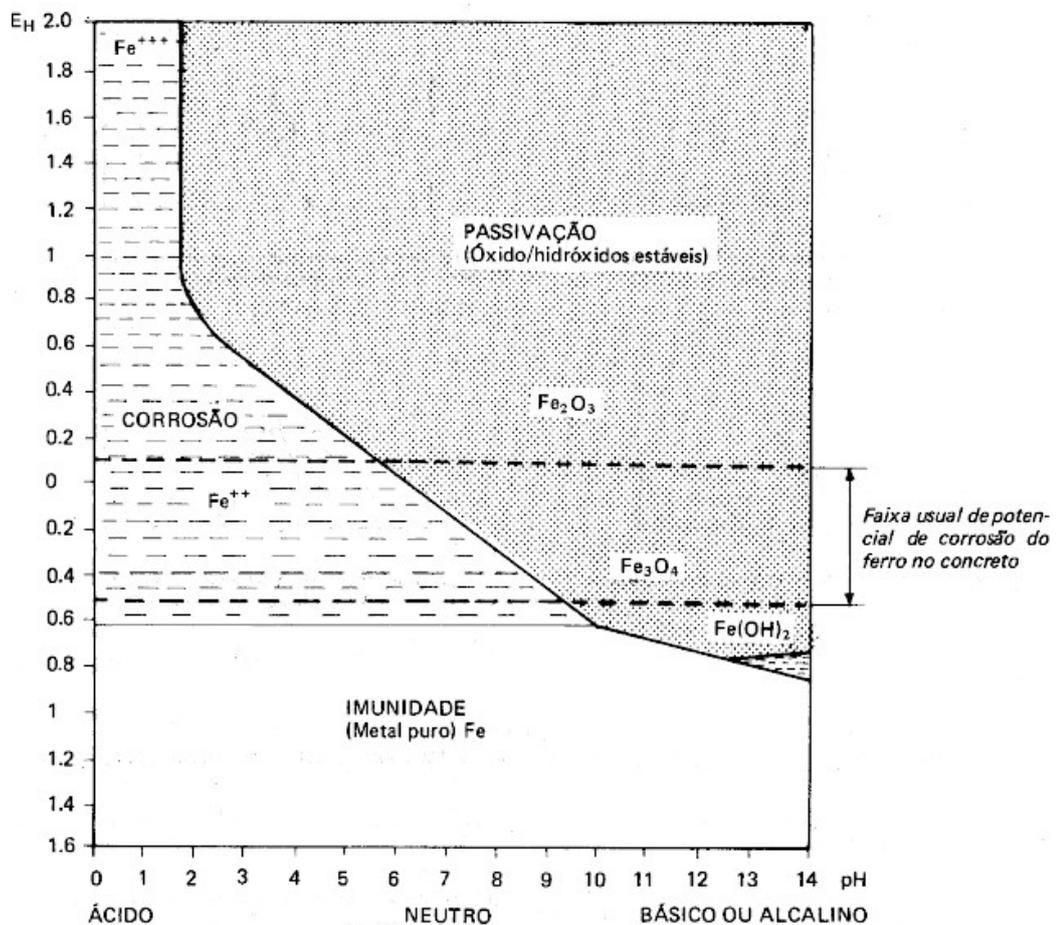
2.5.2 *Passivação*

A corrosão eletroquímica gera íons em dissolução, que podem participar de reações de equilíbrio com outros íons do meio, inclusive os da própria água. Dessa forma, a corrosão dependerá de diversas reações, na qual envolvem-se, direta ou indiretamente, os íons da água, e, conseqüentemente, o pH do meio aquoso (MONTEIRO, 2002).

A alcalinidade do concreto, onde as armaduras encontram-se, é conferida graças as reações de hidratação do cimento que formam compostos de portlandita (Ca(OH)_2). Alguns álcalis provenientes da pasta também contribuem para essa condição (CARMONA, 2005; CASCUDO, 1997).

Segundo Monteiro (2002), o potencial do processo de corrosão depende do equilíbrio das reações de corrosão, as quais dependem do pH do meio. Assim, é possível estabelecer uma relação em função do pH, representado graficamente como diagrama de Pourbaix (POURBAIX, 1961), também conhecido por diagrama de equilíbrio termodinâmico. Na Figura 5 a seguir, visualiza-se o diagrama de Poubaix.

Figura 5 - Diagrama de equilíbrio termodinâmico. Potencial x pH para o sistema Fe – H₂O a 25°



Fonte: POURBAIX (1961).

O diagrama consiste em 3 (três) zonas: a primeira imunidade, a segunda passivação e a terceira corrosão. Na primeira, o metal não se corrói, permanecendo estável para qualquer valor de pH. Na segunda, são formados os estados passivantes, que se comportam como uma barreira impedindo uma posterior oxidação. Por fim, na terceira, o pH e o potencial eletroquímico estabelecem condições termodinâmicas para que os óxidos da cobertura passiva se tornem instáveis (MONTEIRO, 2002).

Ainda de acordo com o diagrama de Pourbaix (1961), nas condições normais do concreto alcalino, cujo pH está entre 12,5 e 13,5 e o potencial de corrosão, em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, encontra-se na ordem de +0,1 a -0,4, as reações de eletrodo verificada no ferro são de passivação (CASCUDO, 1997; POURBAIX, 1961; MONTEIRO, 2002).

Assim, a armadura localizada no interior do concreto, em meio alcalino, é protegida do processo da corrosão através de uma película passivadora. Essa película protetora é compacta, composta por óxidos de ferro estáveis (Fe_2O_3) e possui grande aderência à superfície do aço (ANDRADE, 1992; MEHTA e MONTEIRO, 2008; LIBERATI, 2014).

Insta salientar, que o concreto protege a armadura de duas formas: a primeira através da passivação do aço (proteção química) e a segunda por meio do cobrimento do próprio concreto (proteção física), que se comporta como uma barreira, dificultando a penetração de agentes agressivos desencadeadores da corrosão (LIBERATI, 2014).

Quando o concreto não é capaz de operar a sua função protetora, ocorre a corrosão de armaduras. Por meio de uma série de fatores, combinados a ação de agentes agressivos (presentes no próprio concreto ou adquiridos por fontes externas), a armadura poderá perder sua condição de passivação. Quando isso acontece, a película passivadora é rompida e armadura passa a ser despassivada. Cloretos e a carbonatação do concreto são os principais iniciadores da corrosão (LIBERATI, 2014).

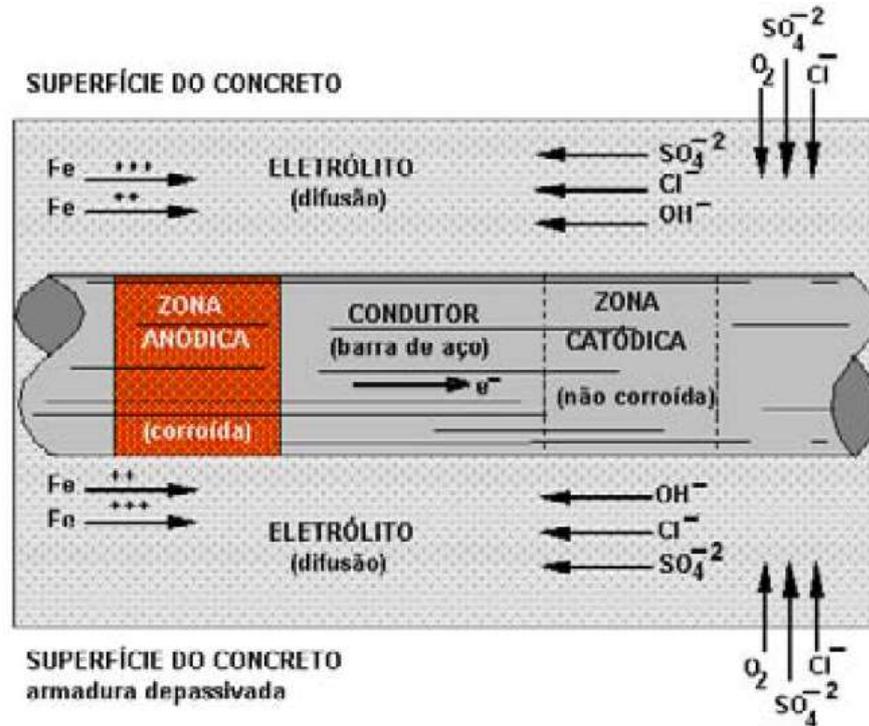
2.5.3 *Processo corrosivo*

Quando a corrosão metálica ocorre em um meio aquoso, desenvolve-se um fenômeno de caráter eletroquímico, ou seja, supõe-se uma reação de oxidação, uma de redução, deslocamento de elétrons pelo metal, e a movimentação de íons por meio do eletrólito, pressupondo a formação de um circuito fechado (MONTEIRO, 2002).

A Figura 6 (HELENE, 1993) demonstra, de forma ilustrativa, o processo de formação de uma célula eletroquímica. Na célula há um ânodo, um cátodo, um condutor metálico e um eletrólito. Existindo uma diferença de potencial (DDP), entre as zonas anódicas e catódicas, desenvolve-se uma corrente elétrica. Conforme a amplitude dessa corrente e do acesso de oxigênio, poderá ou não haver a corrosão (SILVA, 2006).

A ocorrência da corrosão é permitida nas seguintes condições:

Figura 6 - Célula de corrosão eletroquímica em concreto armado.



Fonte: HELENE (1993).

Segundo Cascudo (1997), Gentil (2012) e Liberati (2014), essas células são formadas por: uma zona anódica, onde desenvolvem-se as reações de oxidação do ferro, com perda de elétrons e redução de massa, verificar a Equação 1; e por uma zona catódica, onde ocorre a redução (ganho de elétrons) do oxigênio, não existindo perda de massa no trecho, verificar Equação 2 e 3.



Em seguida, os íons movimentam-se pelo eletrólito para o cátodo e os íons hidroxila, movimentam-se para o ânodo. Em certo ponto intermediário, eles se encontram e precipita-se o hidróxido ferroso, como mostra a Equação 4 a seguir.



Inicialmente, tem-se como produto da corrosão o hidróxido de ferro (Equação 4), o qual em meio não aerado, torna-se o Fe_3O_4 (magnetita). Para o meio aerado, o hidróxido de ferro se transforma em $Fe(OH)_3$ (GENTIL, 2012).

Entretanto, as reações descritas anteriormente não ocorrem de forma tão simples. É válido mencionar, que essas reações são bem mais complexas, e nem sempre será o produto final da corrosão. Na realidade, há uma combinação de diferentes tipos de óxidos e hidróxidos de ferro originários dos processos de oxidação e redução (HELENE, 1986).

Para que a célula de corrosão se desenvolva, é fundamental a presença de meios transportadores (eletrólito), que promovam a movimentação dos íons e elétrons, provenientes desse processo, entre as regiões anódicas e catódicas. Os elétrons deslocam-se através do contato direto metal-metal, e os íons, por meio de dissolução e deslocamento via solução. A combinação desses produtos de reações anódicas e catódicas gera os produtos de corrosão (ADAMATTI, 2016).

Atuam como eletrólito, no concreto, a água e certos produtos da hidratação do cimento. Pode-se citar: o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), o hidróxido de potássio ($K(OH)$) e o hidróxido de sódio ($Na(OH)$). Esses compostos, encontram-se geralmente nos poros e capilares do concreto (HELENE, 1993).

Quando o aço é submergido em certa solução, uma parcela dos átomos de ferro tende a pertencer a mesma solução, modificando-se em cátions de ferro (Fe^{2+}), com a carga elétrica positiva, enquanto a armadura adquire carga elétrica negativa. Conseqüentemente, desenvolve-se um potencial de equilíbrio ou reversível. Qualquer DDP (diferença de potencial) produzido entre dois pontos da barra, seja por umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, tem a capacidade de formar pilhas ou cadeias de pilhas conectadas em série, desenvolvendo uma corrente elétrica (LIBERATI, 2014).

De acordo com Monteiro (2002), os parâmetros que regulam a velocidade ou taxa de corrosão, são, dentre outros, a resistividade elétrica do meio e a disponibilidade de oxigênio, bem como a temperatura, a umidade relativa e o grau de contaminação do meio ambiente.

Em resumo, para que ocorra o processo corrosivo é necessário que (BOHNI, 2005):

- Exista uma diferença de potencial entre dois pontos da armadura, possibilitando o fluxo de elétrons;
- O concreto esteja úmido garantindo a existência de um eletrólito;
- O oxigênio esteja presente, possibilitando a reação catódica;
- Ocorra o rompimento da camada passivadora da armadura, podendo ser pela ação de agentes agressivos (íons de cloreto, carbonatação).

2.5.4 *Formas de corrosão*

De acordo com Ribeiro e Cunha (2014), as armaduras podem ser atingidas pelos seguintes tipos de corrosão eletroquímica:

- 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.

2.5.4.1 Corrosão generalizada

A corrosão generalizada, é desenvolvida no concreto armado, através da redução da sua alcalinidade. Essa redução pode ocorrer pela movimentação de águas puras ou ligeiramente ácidas (lixiviação), ou ainda, pela reação dos compostos de caráter básico (Na(OH), K(OH) e CA(OH)₂), presentes na pasta do concreto, com alguns componentes ácidos da atmosfera. Pode-se citar, o dióxido de carbono (CO₂), dióxido de enxofre (SO₂), trióxido de enxofre (SO₃) e gás sulfídrico (H₂S). Devido as maiores incidências de CO₂ na atmosfera, esse processo é denominado de carbonatação. (LIBERATI, 2014; SILVA, 2006).

No ataque da corrosão generalizada, a deterioração do material ocorre de forma mais ou menos uniforme, atingindo extensas áreas do metal. Dessa forma, a perda de seção pode ser uniforme ou irregular (MEIRA, 2017).

A alcalinidade do concreto é consideravelmente alta, com pH entre 12,6 e 13,5, graças a presença dos íons Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e OH^- , na fase aquosa. Além da presença dos álcalis, a pasta hidratada do concreto é composta por cerca de 20% de cálcio sólido, o que já é suficiente para manter o pH do sistema acima de 12 (COSTA, 2012).

Na presença de umidade, o CO₂ existente na atmosfera, penetra os poros do concreto e reage com os produtos de hidratação do cimento. Esse processo dá origem a produtos de menor alcalinidade, baixando o pH do concreto e desencadeando o fenômeno conhecido como frente de carbonatação (COSTA, 2012).

De acordo com Poglialli (2009), o processo de carbonatação tem início na superfície do concreto, formando uma frente de carbonatação, separando duas zonas distintas de pH. A primeira com valores na faixa de 12 e a segunda na faixa de 8. Essa frente avança paulatinamente para o interior do material e, ao atingir a armadura, promove sua despassivação, dando início a um processo de corrosão generalizada.

O processo do avanço da frente de carbonatação, pode ser verificado na Figura 7 abaixo.

Figura 7 - Representação esquemática do avanço da frente de carbonatação.



Fonte: BAZAN (2014).

As reações que são formadas no fenômeno da carbonatação são descritas a seguir (COSTA, 2012).

- A Equação 5 demonstra a dissolução do hidróxido de cálcio.
- A Equação 6 mostra a reação de dissolução do CO_2 , na água dos poros do concreto, ocorrendo a formação e ionização do ácido carbônico, que libera o íon carbonato na segunda etapa.
- A Equação 7 apresenta a formação do carbonato de cálcio;
- O processo de descalcificação do C-S-H é demonstrado pelas Equações 5 a 10.



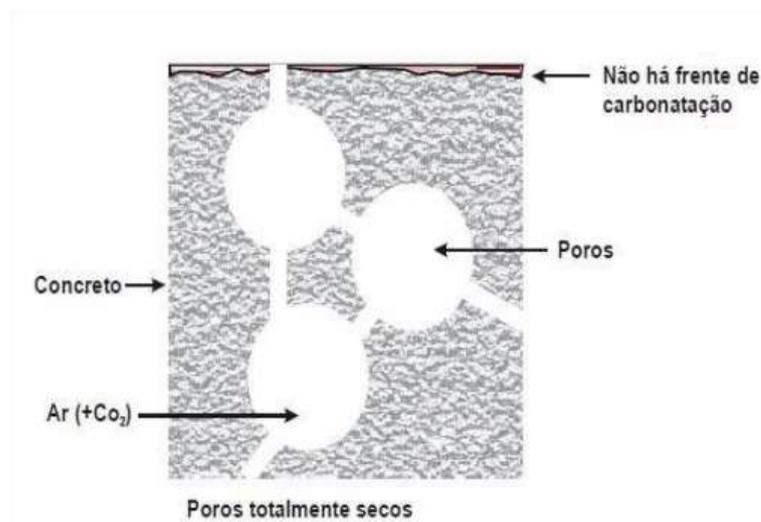


O resultado dessas reações é a redução da alcalinidade do concreto. Como pode ser verificado nas equações anteriores, os produtos da carbonatação apresentam caráter ácido, com pH em torno de 9,4 quando submetido à temperatura ambiente. Essa redução no pH provoca uma instabilidade química na película passivadora da armadura (SILVA, 2006).

A carbonatação dos concretos está intimamente ligada à porosidade e a sua permeabilidade. Pois, a penetração do CO₂ ocorre através do mecanismo de difusão (SILVA, 2006). Uma baixa relação água/cimento minimiza a difusão do CO₂ no concreto, devido a modificação na dimensão dos poros e capilares. Levando em consideração as condições ambientais e a cura constante, são parâmetros que influenciam a carbonatação: a relação água/cimento e a quantidade de Ca(OH)₂ na solução intersticial (COSTA, 2012).

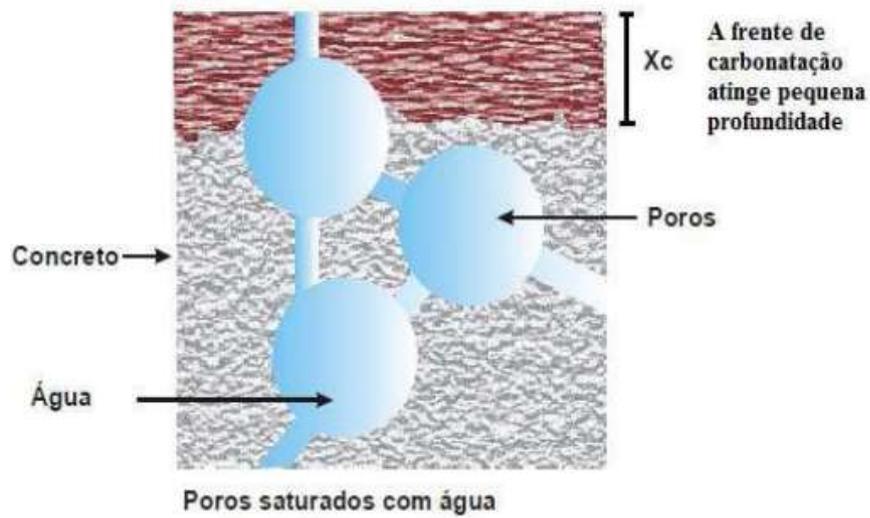
Conforme Cascudo (1997), a taxa de difusão do CO₂ na água é 10⁴ vezes mais baixa que no ar. Como o concreto é um material poroso, a taxa de difusão do CO₂ no seu interior dependerá da estruturação e do grau de saturação dos seus poros. As Figuras 8, 9 e 10 a seguir, demonstram três situações possíveis de saturação dos poros com água, e seus prováveis estados de carbonatação.

Figura 8 - Representação esquemática da carbonatação em poros totalmente vazios.



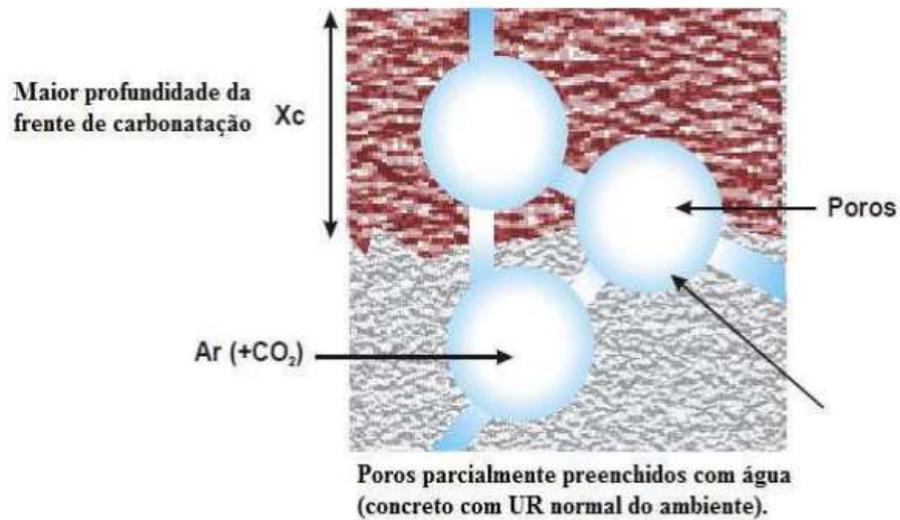
Fonte: POLITO (2006).

Figura 9 - Representação esquemática de carbonatação em poros totalmente cheios.



Fonte: POLITO (2006).

Figura 10 - Representação esquemática de carbonatação em poros parcialmente preenchidos.



Fonte: POLITO (2006).

Na Figura 8, apresenta-se a situação de poros secos. Para essa condição, a taxa de difusão do CO₂ é alta. Entretanto, a frente de carbonatação não avança, devido ao processo de carbonatação depender da presença de água nos poros. Na Figura 9, apresenta-se a situação de poros totalmente saturados, impedindo a penetração do CO₂. Como resultado tem-se a baixa

velocidade de carbonatação. Por fim, na Figura 10, observa-se a situação de poros parcialmente saturados. Essa condição é favorável para ocorrência do fenômeno de carbonatação. Pois, existe a presença significativa e simultânea de água e CO₂ (SILVA, 2006).

2.5.4.2 *Corrosão localizada por íons cloreto (Cl⁻)*

De acordo com Carvalho (2014), “os íons cloreto são um dos agentes mais problemáticos para a corrosão de armaduras, pois são capazes de despassivar o aço mesmo em pH extremamente elevado”.

A corrosão localizada (ou puntiforme), é um processo de degradação típico em estruturas de concreto armado, expostas a íons agressivos, na presença de umidade e oxigênio. Esse processo não deve ser negligenciado, uma vez que, pode levar a elevada perda da área da seção transversal em regiões ao longo da armadura (LIBERATI, 2014).

A ocorrência da corrosão por íons cloreto, dá-se através penetração desses íons nos poros do concreto, em conjunto com a água e o oxigênio, até atingir a armadura, despassivando-a. Quando isso ocorre, desenvolve um processo de acidificações localizadas que conduzem a desestabilizações pontuais da camada de óxidos passivos. A despassivação por íons cloreto ocorre de maneira pontual, o que faz a corrosão por cloretos ser tipicamente por pites, diferentemente da ocorrida devido à carbonatação (corrosão generalizada) (CARVALHO, 2014).

Os ataques mais agressivos nas estruturas ocorrem em zonas de respingo de maré. Pois, há uma variação de molhagem e secagem, além de uma aeração diferenciada (TAVARES, 2006).

De acordo com Cascudo (1997), na corrosão puntiforme há o desgaste localizado da armadura, sob a configuração de pites ou alvéolos. Esses alvéolos progridem aprofundando-se, podendo causar a ruptura pontual da barra. Ele acrescenta, que na maioria dos casos, ao invés de pontos de pequenos diâmetros e grande profundidade (pites clássicos), os pites da corrosão localizada, apresentam-se sob a forma de depressões mais rasas e de maior diâmetro.

A corrosão de armaduras, desencadeada por íons cloreto, é caracterizada por um ataque pontual. Esse ataque é responsável pela formação de regiões ativas e passivas. A presença

simultânea dessas duas regiões na mesma armadura, desenvolve a formação de um curto-circuito galvânico, com uma alta corrente de corrosão (I_{corr}) na área ativa (TAVARES, 2006).

Segundo Arteaga (2010), as edificações de concreto armado são, no geral, projetadas para uma vida útil entre 50 a 100 anos. Porém, em ambientes agredidos pela presença de cloretos, elas começam a deteriorar-se após 20 ou 30 anos, afetando significativamente a vida operacional dessas estruturas.

Os íons cloreto podem atingir o interior da massa do concreto em duas situações: a primeira, no ato do amassamento, através da utilização de aditivos que contenham cloro em sua composição, ou ainda, pelo uso de agregados ou águas contaminadas. A segunda, os cloretos provêm do meio em que a estrutura está inserida, como por exemplo, as regiões marinhas e industriais. Os cloretos cuja presença no concreto tem origem na mistura dos materiais são denominados de incorporados (SILVA, 2006).

A Tabela 2 a seguir, apresenta as possíveis fontes de íons cloreto no concreto.

Tabela 2 - Fontes de íons cloreto em concreto.

Incorporados à massa de concreto	Fontes externas
Aditivos aceleradores de pega e endurecimento	Maresia ou névoa de ambiente marinho
	Água do mar (zonas de respingo e variação da maré)
Água de amassamento contaminada	Sais de degelo
	Processos industriais
Agregados contaminados	Solos contaminados
	Lavagens com ácido muriático

Fonte: CASCUDO, 1997; HELENE, 1993.

A penetração dos íons cloreto não é algo visível, não reduz a resistência do concreto e não modifica a sua aparência superficial. Portanto, para identificar a profundidade de um teor crítico de cloreto são necessários ensaios específicos (CASCUDO, 1997).

Ainda de acordo com Cascudo (1997), os mecanismos de transporte que levam ao movimento e à concentração iônica dos cloretos no concreto são: absorção capilar, difusão iônica, permeabilidade e migração iônica. Porém, quando não ocorrem fenômenos de retração, os mecanismos principais de transporte de cloretos no concreto são difusão e absorção. O

processo de absorção ocorre nas camadas superficiais do concreto, que são submetidas a ciclos de molhagem e secagem pela ação das intempéries. Para zonas mais profundas de absorção, ocorre, essencialmente, o processo de difusão (LIBERATI, 2014).

Geralmente, o primeiro mecanismo de transporte da penetração de íons cloreto, na superfície do concreto, é a absorção capilar. Pode-se citar como exemplo, uma névoa salina em contato com a estrutura. Para esse caso, quanto menor forem os poros do concreto, maior será a ação capilar, devido a ação da tensão superficial das substâncias líquidas contaminadas. Esse processo é otimizado pela afinidade dos poros do concreto com a água. Na difusão ocorre a procura pelo equilíbrio, por meio da diferença de concentração de cloretos (entre o exterior e interior do concreto), promovendo o deslocamento dos íons. O interior do concreto tende a ser mais úmido, fazendo os íons migrarem em sua direção. No caso da permeabilidade, deverá ser levado em conta a qualidade e a dimensão dos poros, ou seja, esse parâmetro depende de maneira intrínseca da relação água/cimento utilizada na mistura do concreto. A migração de íons é um outro parâmetro, que se desenvolve por afinidade dos íons (carga negativa) a campos elétricos, como o processo de corrosão eletroquímico da armadura (TAVARES, 2006).

Os íons cloreto estão presentes no concreto em três diferentes formas (LIBERATI, 2014):

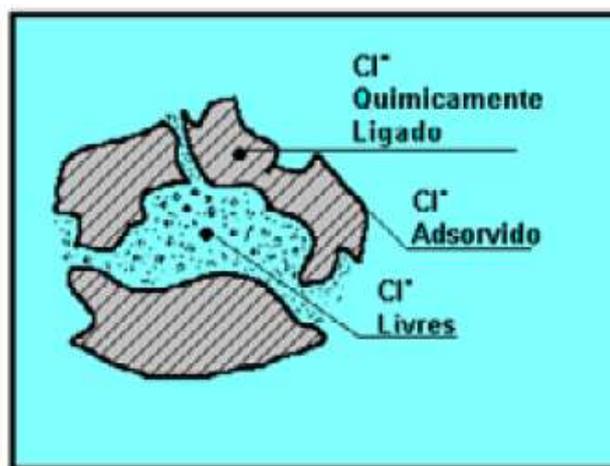
- Quimicamente ligados: os íons cloreto se ligam com o aluminato tricálcio (C_3A) e com o ferroaluminato tetracálcio (C_4AF) formando, respectivamente, cloroaluminato de cálcio ($C_3A.CaCl_2.10H_2O$), conhecido como sal de Friedel, e cloroferrato de cálcio ($3CaO.Fe_2O_3.CaCl_2.10H_2O$);
- Fisicamente adsorvidos: os íons cloreto são adsorvidos na superfície dos silicatos hidratados (C-S-H);
- Livres na solução dos poros: efetivamente capazes de influenciar no processo corrosivo, despassivando a armadura.

Deve-se levar em consideração, que cloretos combinados ou adsorvidos não oferecem perigo ao concreto. Dessa forma, quando esses íons se combinam com o aluminato tricálcico (C_3A), reduzem o teor de cloretos solúveis (livres), e, conseqüentemente, minimizam a acentuação do processo corrosivo. Os cimentos com teores elevados de aluminato tricálcico (C_3A) são mais indicados para resistirem aos cloretos (GENTIL, 2012).

Liberati (2014) salienta, “por maior que seja a capacidade de certo concreto de ligar-se quimicamente ou adsorver fisicamente íons cloreto, haverá sempre um estado de equilíbrio entre as três formas de ocorrência desses íons, de modo que sempre existirá a presença de certa quantidade de cloretos livres na solução dos poros”.

A Figura 11, ilustra as formas de apresentação dos íons cloreto nas estruturas de concreto.

Figura 11 - Formas de apresentação dos íons cloreto nas estruturas de concreto.



Fonte: FARIAS (1991).

Conforme Silva (2006), íons cloreto, em pequenas concentrações, podem ser tolerados sem que ocorra a iniciação da corrosão. Isso deve-se ao fato, que após esses íons reagirem com os aluminatos, perdem a condição de cloretos livres, e, conseqüentemente, não apresentam mais risco as armaduras. Entretanto, sabe-se que há uma concentração máxima limite permitida de cloretos livres na pasta do concreto.

A NBR 6118:2014, define que a quantidade máxima de Cl^- é 500 mg/l, em relação a água de amassamento. O comitê 222 R 96 do ACI permite um conteúdo máximo de cloretos, em relação a massa do cimento, de 0,15%. De acordo com o CEB 192 (1989), a quantidade máxima de cloretos que pode se ligar quimicamente com a matriz de cimento é de 0,4 % em relação a massa de cimento, nessa concentração não restará cloreto livre capaz de romper a camada de passivação das armaduras.

Incertezas e teorias ainda rodeiam o processo de despassivação das armaduras por íons cloreto. Entretanto, grande parte dessas teorias acreditam que a ruptura da película passivadora seja algo dinâmico, alternando despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva da armadura (CARVALHO, 2014).

O ACI 222 (1991), apresenta três teorias para explicar o efeito dos cloretos na corrosão do aço, são elas:

- Teoria do filme de óxido: Nessa teoria, os íons cloreto penetram nos defeitos do filme óxido passivante muito mais facilmente que outros íons agressivos, podendo dispersar coloidalmente este filme, permitindo o ataque do aço;
- Teoria da absorção: Conforme essa teoria, os íons cloreto são adsorvidos na superfície do aço com os íons hidroxilas ou com o oxigênio dissolvido, promovendo a hidratação do ferro e viabilizando sua dissolução em cátions;
- Teoria do complexo transitório: segundo essa teoria, os íons cloreto (Cl^-) competem com os ânions hidroxila (OH^-) para a produção de compostos ferrosos de corrosão, denominados complexos transitórios, os quais se difundem a partir do ânodo em direção ao cátodo permitindo que a corrosão continue.

2.5.5 Efeitos da corrosão de armaduras no concreto armado

Quando uma estrutura de concreto é executada com a espessura do revestimento abaixo da considerada em projeto, a corrosão de armaduras tende a ocorrer de forma mais rápida e intensa. A consequência desse processo, é a formação de óxidos e hidróxidos de ferro, que ocupam considerável volume, de 3 a 10 vezes maior que o original do aço da armadura. Essa expansão causa pressões superiores a 15 MPa (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

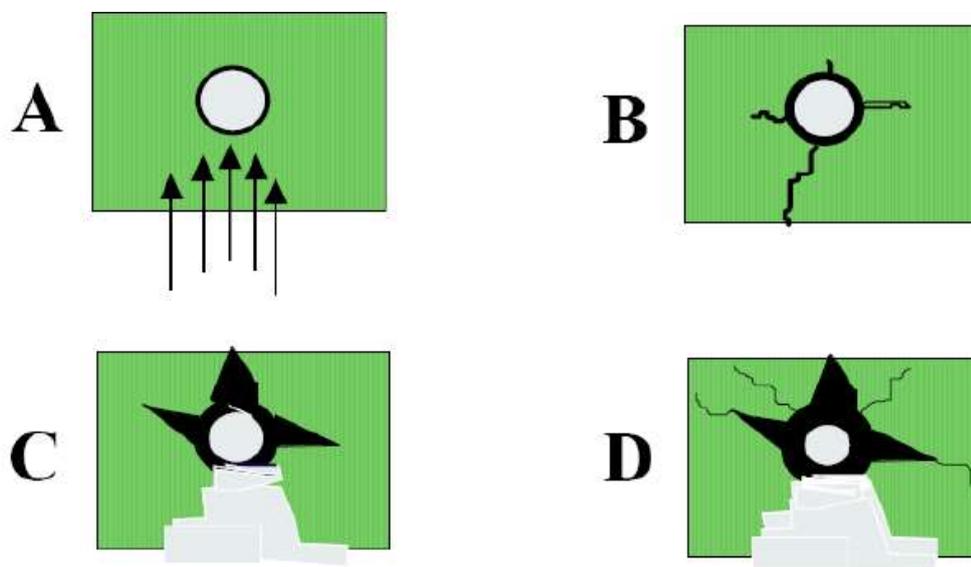
A princípio, essas tensões desenvolvem a fissuração do concreto em direção paralela à armadura corroída, o que favorece a penetração de agentes agressivos, como o CO_2 e os íons Cl^- (ADAMATTI, 2016).

Segundo Andrade (1992), os efeitos da corrosão de armaduras se manifestam de três maneiras distintas:

- Sobre o aço, provocando uma perda de seção e uma diminuição de sua capacidade mecânica;
- Sobre o concreto, provocando o aparecimento de manchas de corrosão, fissuração e até o seu lascamento total;
- Sobre a aderência aço-concreto, inabilitando a transferência de tensões entre eles.

Conforme Andrade (1992) apud Liberati (2014), “a perda de seção das barras e seus efeitos, bem como o comportamento mecânico de fissuração do concreto, ocorrendo sem que haja uma intervenção, fatalmente implicarão o colapso dessa estrutura”. Na Figura 12 a seguir, tem-se o processo de fissuração do concreto causado pela corrosão das armaduras.

Figura 12 - 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).

2.6 Espaçadores

Os espaçadores, também conhecido por distanciadores, são responsáveis por garantir a espessura do cobrimento solicitada em projeto. Podem ser industrializados, ou confeccionados de forma artesanal na própria obra. Durante a fase de execução da edificação, os espaçadores são posicionados entre as armaduras e as fôrmas, assegurando que as barras de aço permaneçam fixas durante toda a concretagem (MARAN, 2015).

Conforme Takata (2009), os espaçadores devem manter a armadura distanciada da fôrma durante a montagem, o lançamento e o adensamento do concreto. Insta salientar, que o procedimento de execução desde a montagem das fôrmas, até a desfôrma é, muitas vezes, negligenciado. Assim, para se alcançar o cobrimento desejado, todas as etapas do processo construtivo devem ser respeitadas e executadas corretamente.

O modo de utilização dos espaçadores está especificado na NBR 14931:2004. Porém, ainda é possível encontrar falhas em algumas obras, como por exemplo, a falta de uso dos espaçadores em um elemento estrutural, o uso de modelo inadequado e, até mesmo, a falta de fiscalização precedente a concretagem (MARAN, 2015).

De acordo com a NBR 14931:2004, o Item 8.1.5.5 descreve: “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 devem ser 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”.

Segundo Adamatti (2016), não existe uma norma nacional específica para espaçadores, apenas normas referentes a sua utilização nas estruturas de concreto. Não há, também, nenhuma menção sobre controle de qualidade, ou ensaios para testes desses materiais. Entretanto, esses problemas ocorrem em outros países.

Vaquero (2007) menciona, que na Espanha não existe um corpo normativo, responsável por avaliar os diferentes espaçadores disponíveis no mercado. Por conseguinte, não há um padrão de desempenho desse material para os projetos. Em virtude disso, os engenheiros

seguem as recomendações do Comitê Euro-Internacional do Concreto (CEB, 1990). Há também, uma instrução espanhola EHE (2008), a qual indica que os espaçadores em uso devem resistir à alcalinidade do concreto, não incitando a corrosão das armaduras. A mesma instrução proíbe a substituição dos espaçadores por resíduos de tijolo, concreto, madeira, bem como qualquer outro material residual. E acrescenta, espaçadores de argamassa devem ter a mesma qualidade dos materiais utilizados na execução.

Dentre os países, o Reino Unido é o mais avançado nessa temática, possuindo a Norma Britânica BS 7973-2:2001. A norma apresenta definições importantes, como: requisitos de desempenho e métodos de avaliação dos espaçadores. Além disso, existem também instituições de certificação para a realização de testes e inspeções (ADAMATTI, 2016).

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

- Solicitação leve: Para proporcionar cobertura 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;
- Solicitação normal: Para proporcionar cobertura em armaduras com barras de 20 mm ou menos;
- Solicitação pesada: Para proporcionar cobertura em armaduras com barras maiores que 20 mm;
- Cadeira: Para apoiar a parte superior da armadura em lajes, de modo a garantir o cobertura do topo ou separar as camadas de armaduras.

Para Vaquero (2007), alguns aspectos devem ser considerados para se escolher o tipo de espaçador, são eles:

- Valor do cobertura nominal estabelecido em projeto;
- Cargas que o espaçador terá que suportar devido ao peso da armadura, ao procedimento de colocação, à movimentação de trabalhadores sobre a armadura e às cargas produzidas durante a concretagem da peça;
- Diâmetro e posição da armadura (parede, laje, viga ou pilar);
- Tipo de armadura: barras ou telas soldadas;
- Tipo de fixação mais adequado: sem fixação, com arame ou grampo;

- Circunstâncias externas que podem afetar o concreto tais como pressão, temperatura, possíveis ataques químicos, alternância de ciclos de umidade, fogo ou corrosão;
- Possíveis marcas ou traços que o espaçador possa deixar sobre a superfície do concreto, sobretudo se esta ficar visível;
- Tipo de acabamento da superfície do concreto;
- Facilidade de colocação dos espaçadores, desempenho e custo.

2.7 Classificação dos espaçadores

Os espaçadores podem ser classificados de diferentes formas:

2.7.1 Quanto à Função

A função dos espaçadores pode ser dividida em três grandes segmentos (BÉRGAMO, 2013 apud BARRETO, 2014):

- Afastar armadura da fôrma: utilizados para garantir o cobrimento adequado do aço;
- Separar armaduras entre si: proporciona um posicionamento adequado da armadura;
- Separar uma fôrma da outra: geralmente utilizado em paredes para impedir a movimentação relativa das fôrmas; são os chamados espaçadores de fôrma ou tensos.

2.7.2 Quanto o formato

Os espaçadores possuem formatos diversos adaptados à sua utilização, pode-se citar: (BARRETO, 2014).

- Circulares raiados: produtos que podem ser utilizados em laterais de vigas, pilares, paredes, postes, estacas, entre outros. Esses espaçadores plásticos proporcionam

fixação em bitolas variáveis de aço. Na colocação, a peça deve ser posicionada com raio de abertura paralelo à fôrma (Figura 13);

- Cadeirinhas: este modelo apoia armaduras horizontais. Indicado para fundo de vigas, lajes e pré-moldados (Figura 14);
- Multiapoio: sustentam armaduras horizontais tais como lajes, fundo de vigas, sapatas e pré-moldados (Figura 15);
- Primas quadrangular ou circular: espaçadores de argamassa, industrializados ou fabricados no próprio canteiro, que sustentam armaduras horizontais, podendo ser utilizados nas laterais dos elementos estruturais (Figura 16).

Figura 13 – Espaçador circular raiado.



Fonte: <<http://www.jeruelplast.com.br>>
Acesso em: 20/05/2018.

Figura 14 - Espaçador cadeirinha.



Fonte: <<http://www.jeruelplast.com.br>>
Acesso em: 20/05/2018.

Figura 15 - Espaçador multiapoio.



Fonte: <<http://www.torri.com.br>>
Acesso em: 20/05/2018.

Figura 16 - Espaçador prisma circular.



Fonte: <<http://www.dreamstime.com>>
Acesso em: 20/05/2018.

2.7.3 Quanto o material utilizado em sua fabricação

De acordo com a BS 7973-1:2001, os espaçadores são geralmente fabricados a partir de três materiais básicos: metálicos, materiais cimentícios e plásticos.

2.7.3.1 Metálicos

Os espaçadores metálicos são confeccionados, normalmente, em barras de 10 mm CA-50 ou CA-25. Podem ser adquiridos de maneira industrializada, ou serem fabricados no próprio canteiro da obra. As Figuras 17 e 18, mostram exemplos de espaçadores metálicos fabricados em obra e industrializados.

Figura 13 – Espaçador metálico fabricado em obra.



Fonte: DENARDI et al, (2011 apud BARRETO, 2014).

Figura 14 – Espaçador metálico industrializado.



Fonte: < <https://www.aecweb.com.br> > Acesso em: 20/05/2018.

Como mencionado anteriormente, espaçadores metálicos só podem ser utilizados se as partes em contato com a fôrma estiverem revestidas por material plástico ou outros, não podendo nenhuma parte ficar exposta (NBR 14931:2004).

2.7.3.2 Cimentícios

Os espaçadores cimentícios são amplamente utilizados nas obras nacionais, podendo ser fabricados em argamassa ou concreto. De acordo com a NBR 14931:2004, esses espaçadores são industrializados ou fabricados na própria obra, e sua relação água/cimento não deve ser maior que 0,5.

Para que o uso desses espaçadores ocorra de maneira satisfatória, é necessário que esse material apresente algumas características compatíveis as do concreto utilizado na construção dos elementos estruturais, são elas: resistência, permeabilidade, higroscopicidade, dilatação térmica, entre outros (VAQUERO, 2007). As Figuras 19 e 20 a seguir, mostram exemplos de espaçadores de argamassa industrializados e rodados em obra.

Figura 15 – Espaçador de argamassa industrializado.



Fonte: < <https://www.jacp.com.br> >.
Acesso em: 20/05/2018

Figura 16 – Espaçador de argamassa produzido em obra.



Fonte: <https://www.pedreiro.com.br>.
Acesso em: 20/05/2018.

De acordo com Adamatti (2016), espaçadores de argamassa confeccionados no próprio canteiro de obras, quando comparados aos outros tipos de espaçadores, apresentam um custo inferior. Porém, é comum apresentar uma qualidade inferior. Além disso, demandam mais tempo para serem produzidos.

Para Maran (2015), a principal vantagem dos espaçadores de argamassa, é sua possível produção no próprio local de execução da obra, possibilitando a personalização desejada; em contrapartida, a uniformidade dimensional não é garantida. Pois, são confeccionados sem maior precisão.

2.7.3.3 Plásticos

Os espaçadores plásticos possuem em sua composição polímeros como polipropileno, polietileno de alta densidade e poliestireno. Materiais que podem ser reciclados, sem perder a confiabilidade e qualidade dimensional. O processo de fabricação compreende na transformação termoplástica de moldagem por injeção (PEIXOTO e GOMES, 2007 apud BARRETO, 2014).

Atualmente, existem inúmeros modelos e formatos dos espaçadores plásticos disponíveis no mercado, podendo variar a partir do elemento estrutural em que são utilizados e do espaçamento desejado. Os modelos mais utilizados são: multiapoio plástico, espaçador

cavalete e o espaçador torre (SILVA, 2012 apud ADAMATTI, 2016). As principais vantagens desses espaçadores são a uniformidade dimensional, a variedade de modelos e a facilidade no manuseio (MARAN, 2015)

Segundo Maran (2015), “os dispositivos plásticos não possuem especificação vigente quanto às características de desempenho no Brasil, sendo assim, a produção não precisa atender nenhuma exigência”.

Um dos maiores problemas de utilização dos espaçadores plásticos, é a sua aderência com o concreto. Devido a isso, sua forma deve proporcionar uma ligação entre esses dois materiais, de maneira que as diferenças nos coeficientes de dilatação sejam compensadas. Para que isso ocorra, é necessária a presença de cavidades na configuração do espaçador (VAQUERO, 2007).

A Figura 21 a seguir, apresenta os espaçadores plásticos industrializados mais utilizados.

Figura 17 - Espaçadores plásticos industrializados.



Fonte: <[http:// http://www.periplasticos.com.br](http://www.periplasticos.com.br)>
Acesso em: 20/05/2018.

2.8 Distribuição e posicionamento dos espaçadores

Atualmente, o processo de distribuição e posicionamento dos espaçadores ainda enfrenta algumas dificuldades. É raro a existência de um procedimento padrão, por parte das empresas da construção civil, para esse serviço. Em decorrência disso, há uma considerável variação no valor do cobrimento nos elementos estruturais das obras (OLIVEIRA, 2014).

Segundo Takata (2009), as etapas de execução de um elemento estrutural de concreto armado, muitas vezes, são negligenciadas pelas empresas. Visto que, existe uma maior atenção para o fluxo de materiais, deixando em segundo plano os cuidados com o fluxo de pessoas sobre as armaduras, e/ou o momento da concretagem. Entretanto, esses cuidados são de extrema importância. Pois, o peso dos trabalhadores pode deslocar a posição dos espaçadores e das armaduras. A criação de um caminho específico para tráfego de pessoas e materiais, minimizaria consideravelmente os problemas citados.

Oliveira (2014) menciona, a importância dos cuidados no processo de execução das estruturas de concreto armado, em especial na garantia do cobrimento especificado em projeto. Cuidados esses, que podem levar a uma relevante economia nos custos com reparos futuros e manutenções, além de possibilitar uma maior vida útil à estrutura.

A falta dos cuidados, mencionados anteriormente, pode ser comprovada através de um estudo desenvolvido por Weber (2014). Com base em uma coleta de dados, chegou-se a conclusão, que os valores de cobrimentos de armadura, em 66% das medições, não atendiam o valor estabelecido no projeto estrutural.

A fim de se distribuir corretamente os espaçadores, e, conseqüentemente, atingir o cobrimento especificado em projeto, deve-se levar em consideração que distâncias excessivas entre eles, podem causar deformação das barras por flexão. Isso ocorre, principalmente, no momento da concretagem. Assim, é necessário o estabelecimento de um planejamento para a distribuição e colocação dos espaçadores, minimizando a variação dos valores de cobrimento (MARAN,2015).

Em conformidade com a NBR 14931:2004, a montagem das armaduras deve ser realizada através de amarração, utilizando arames. A norma especifica ainda, que a amarração

das barras das lajes deve ter distanciamento máximo de 35 cm. Entretanto, não há menção sobre a distribuição dos espaçadores.

O CEB (1990) e a BS 7973-2 (2001), prescrevem recomendações a serem aplicadas para as barras individuais e malhas soldadas. São elas:

- Para lajes: cada interseção entre as barras no perímetro deve ser amarrada. Para barras de diâmetro até 20 mm, deve-se amarrar as interseções alternadamente. Para as barras com diâmetro de 25 mm ou superior, deve-se amarrar as interseções a cada 50 diâmetros da barra.
- Para vigas e pilares: é aconselhável amarrar cada interseção nos cantos entre as barras principais e estribos.
- Para malhas soldadas utilizadas como estribos: deve-se amarrar o centro a cada 50 diâmetros da barra, na barra principal. Múltiplos estribos devem ser amarrados juntos.

A Instrução de Concreto Estrutural espanhola EHE (2008), especifica a distribuição dos espaçadores conforme a Tabela 3 (MARAN, 2015).

Tabela 3 - Distância recomendada entre espaçadores.

Elementos		Distância máxima
Elementos de superfície horizontal (placas, lajes, alicerces e lajes de fundação, etc.)	Armadura inferior	$50 \varnothing \leq 100 \text{ cm}$
	Armadura superior	$50 \varnothing \leq 50 \text{ cm}$
Paredes	Cada malha	$50 \varnothing \leq 50 \text{ cm}$
	Separação entre malhas	100 cm
Vigas ¹	-	100 cm
Pilares ¹	-	$100 \leq 200 \text{ cm}$

¹ Ser disposto, pelo menos, três planos de espaçadores por vão, no caso das vigas, e pela seção, no caso de pilares, acoplados aos aros ou estribos.

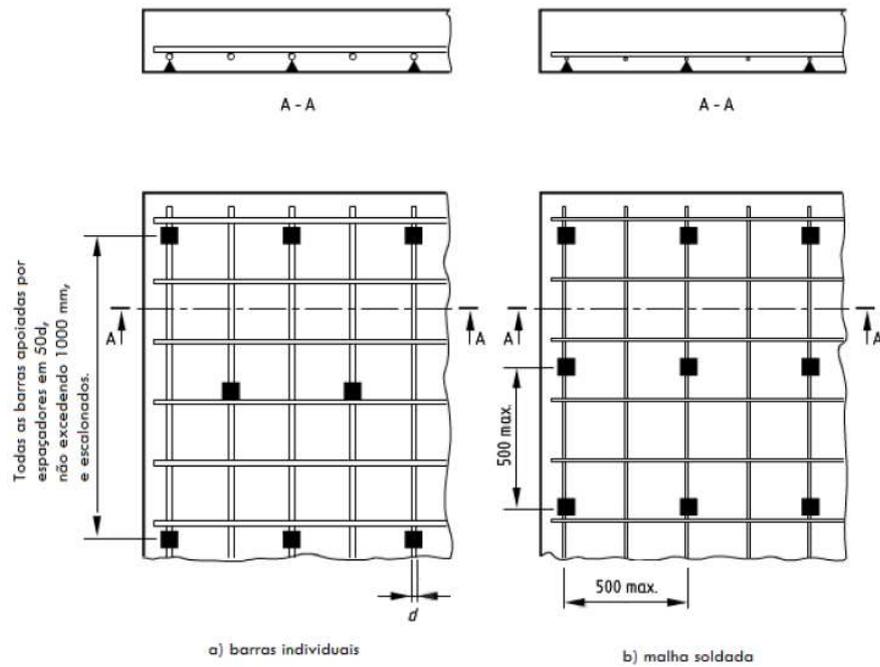
\varnothing Diâmetro da armadura em que o espaçador será acoplado.

Fonte: EHE, 2008 tradução livre.

O CEB (1990) e a BS 7973-2 (2001), apresentam o detalhamento da distribuição de espaçadores para a armadura inferior de lajes. A distância prescrita é a mesma verificada na

Tabela 3. A Figura 22 a seguir, demonstra a distribuição de espaçadores normatizada para armadura positiva em lajes.

Figura 18 - Distribuição de espaçadores normatizada para armadura positiva em lajes.



Fonte: BS 7973-2 (2001).

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

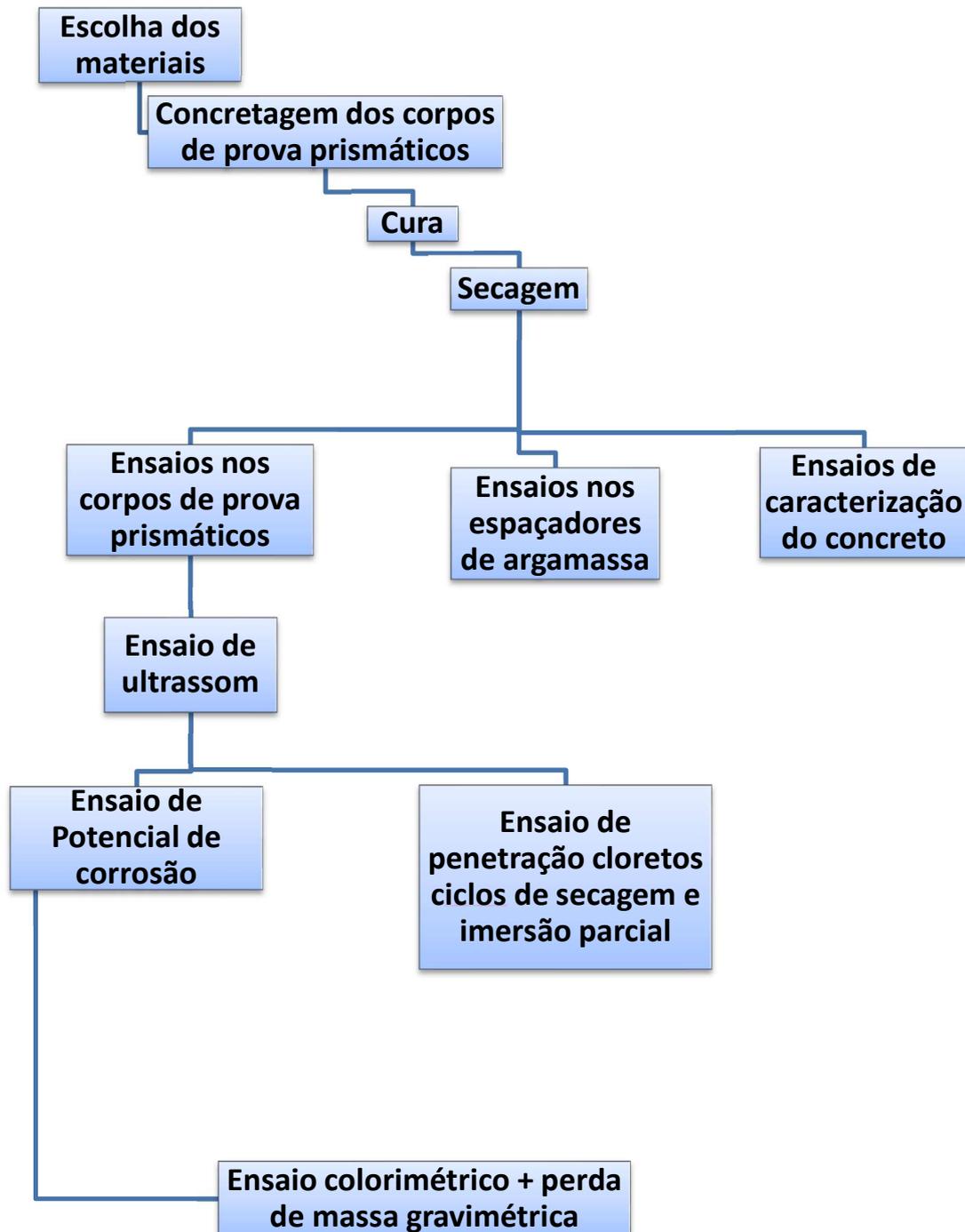
Nesse capítulo é descrito como foi realizado todo o programa experimental. São apresentados os métodos adotados, os equipamentos e os materiais utilizados para a realização dos ensaios. O planejamento da pesquisa foi baseado na bibliografia pesquisada, em informações trocadas com o orientador, em ideias trocadas com pesquisadores da área e pesquisas anteriormente realizadas.

O presente trabalho traçou uma estratégia que se divide nas seguintes análises:

- Foi utilizado o método de indução da penetração de íons cloreto por meio de ciclos de secagem e imersão parcial, em corpos de prova prismáticos de concreto com armaduras, contendo ou não espaçadores de argamassa em seu interior, a fim de avaliar os efeitos da penetração de íons cloreto no concreto;
- Foi utilizado o método de ultrassom, avaliando a homogeneidade do concreto dos corpos de prova prismáticos na presença e ausência dos espaçadores de argamassa;
- Foi utilizado o método de potencial de corrosão, a fim de aferir e avaliar o grau da corrosão das armaduras, nos corpos de prova prismáticos de concreto armado, ao longo dos ciclos de secagem e imersão parcial;
- Foram realizados ensaios e análises complementares em cada espaçador de argamassa, são eles: análise da variação dimensional, ensaio de resistência à compressão, ensaio de absorção por capilaridade e ensaio de absorção por imersão;
- Foram realizados ensaios complementares no concreto utilizado para confecção dos corpos de prova prismáticos, são eles: ensaio de resistência à compressão, ensaio de absorção por capilaridade e ensaio de absorção por imersão;
- Por fim, foram realizados o ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata, nos corpos de prova prismáticos, e uma análise da perda de massa gravimétrica das barras de aço.

Para melhor compreensão do trabalho, é apresentado na Figura 23 um fluxograma detalhado das análises realizadas nos corpos de prova e espaçadores, explanadas detalhadamente no decorrer desse capítulo.

Figura 19 - Fluxograma das análises da pesquisa.



3.1 Materiais utilizados

Nesse tópico, são apresentados os materiais empregados para confecção dos corpos de prova, utilizados no procedimento experimental. Encontra-se também, informações sobre os espaçadores, o traço do concreto e as propriedades de seus componentes (cimento, areia e brita), bem como das armaduras inseridas nele.

3.1.1 Cimento

O cimento utilizado no trabalho foi o cimento Portland composto com pozolana (CPII Z - 32). Essa escolha ocorreu, por esse cimento ser um dos mais consumidos no mercado nacional. A análise química para o cimento utilizado, de acordo com informações do fabricante, pode ser visualizada na Tabela 4. A caracterização física está apresentada na Tabela 5.

Tabela 4 – Análise química do aglomerante.

ANÁLISE QUÍMICA DO AGLOMERANTE				
Ensaio	NBR	Unidade	Resultado	Exigência
Perda ao fogo	ABNT NM 18/12	%	4,83	≤ 6,5
Resíduo insolúvel	ABNT NM 16/12	%	11,56	≤ 16,0
Trióxido de enxofre (SO ₃)	ABNT NM 16/12	%	2,34	≤ 4,0
Óxido de magnésio (MgO)	ABNT NM 21/12	%	2,67	≤ 6,5
Anidrido carbônico (CO ₂)	ABNT NM 20/12	%	4,12	≤ 5,0

Fonte: Dados do fabricante.

Tabela 5 – Propriedades físicas do aglomerante.

PROPRIEDADES FÍSICAS DO AGLOMERANTE				
Ensaio	NBR	Unidade	Resultado	Exigência
Área Específica (Blaine)	ABNT NM 76/98	cm ² /g	3853	≥ 3000
Massa Específica	ABNT NM 23/01	g/cm ³	3,13	Não aplicável
Início de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	192	≥ 60
Fim de Pega	ABNT NM 65/03	minutos	242	≤ 600
Resistência à compressão (3 dias)	ABNT NBR 7215/97	Mpa	22,2	≥ 10
Resistência à compressão (7 dias)	ABNT NBR 7215/97	Mpa	29,6	≤ 20

Fonte: Dados do fabricante

3.1.2 Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi uma areia média, oriunda de rio, cujas propriedades físicas e análise granulométrica se encontram a seguir, na Tabela 6 e Figura 24, respectivamente.

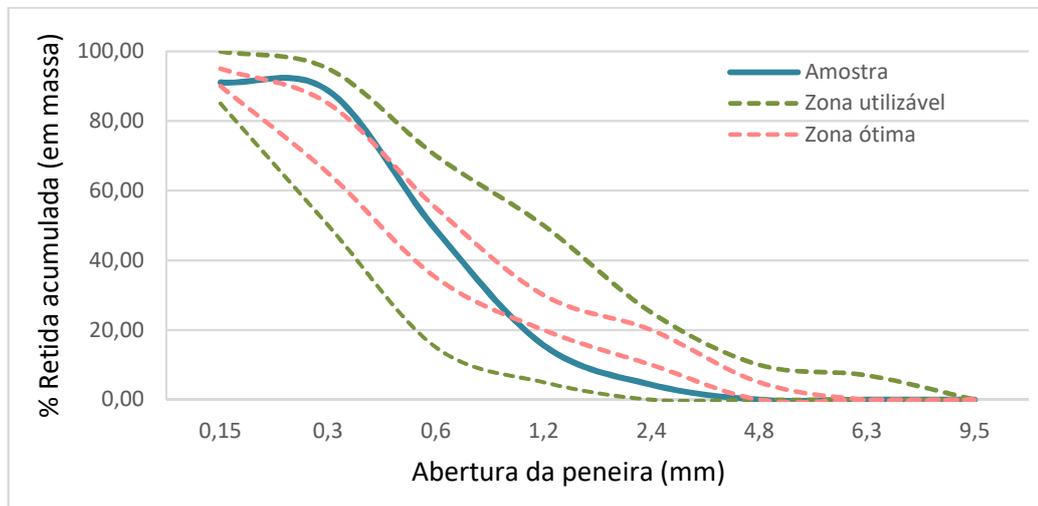
Tabela 6 – Características físicas do agregado miúdo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO MIÚDO				
Característica		Método de ensaio	Areia natural média	
Massa específica (g/cm ³)		NBR NM 52 (ABNT, 2009)	2,62	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,40	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	2,48	
Abertura da peneira (mm)		ABNT NM 65/03	Porcentagem retida (%)	
Distribuição granulométrica	4,80		0,30	Porcentagem acumulada (%)
	2,40		4,30	0,00
	1,20		11,30	4,30
	0,60		33,09	15,60
	0,30		40,01	48,69
	0,15		2,40	88,70
			91,10	

Fonte: Acervo da pesquisa.

A Figura 24 apresenta a composição granulométrica do agregado miúdo utilizado no presente trabalho. Essa composição enquadra-se na Zona 3, considerada uma areia média, segundo a norma brasileira NBR 7211:2009.

Figura 20 - Composição granulométrica do agregado miúdo.



3.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi a Brita 0, granítica, cujas propriedades físicas e análise granulométrica se encontram a seguir, na Tabela 7 e Figura 25, respectivamente.

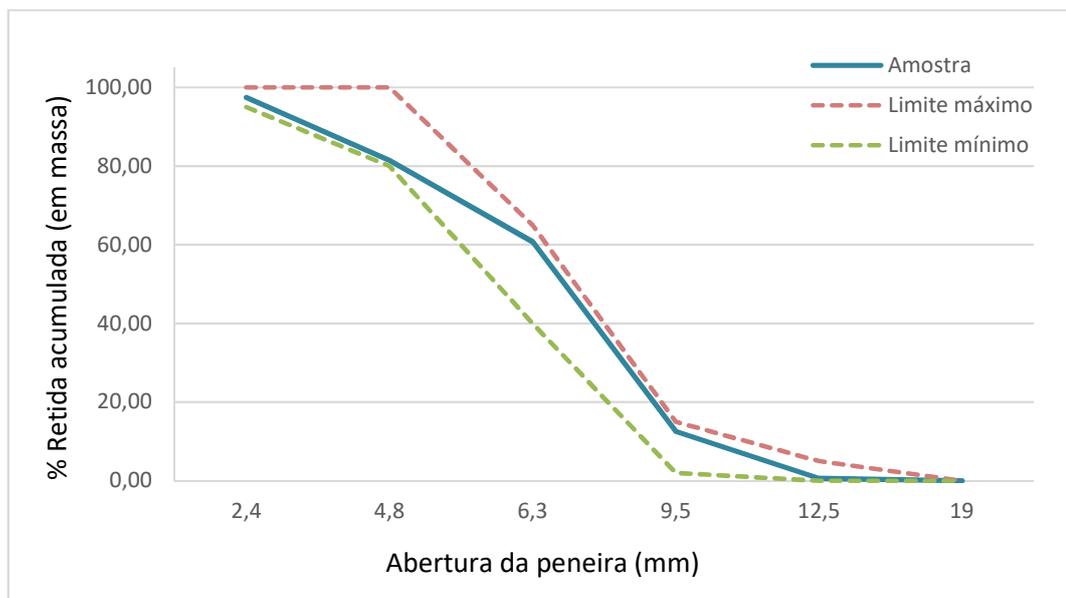
Tabela 7 - Propriedades físicas do agregado graúdo.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO AGREGADO GRAÚDO				
Característica		Método de ensaio	Brita 0	
Massa específica (g/cm ³)		NBR NM 53 (ABNT, 2009)	2,64	
Dimensão máxima característica (mm)		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	12,5	
Módulo de finura		NBR NM 248 (ABNT, 2003)	6,48	
Abertura da peneira (mm)		ABNT NM 65/03	Porcentagem retida (%)	Porcentagem acumulada (%)
Distribuição granulométrica	19		0	0
	12,5		0,58	0,58
	9,5		11,96	12,54
	6,3		48,23	60,77
	4,8		20,66	81,43
	2,4		16,01	97,44

Fonte: Acervo da pesquisa.

As composições granulométricas estão apresentadas graficamente na Figura 25, na qual os valores obtidos são comparados com os limites da NBR 7211:2009.

Figura 21 - Composição granulométrica do agregado graúdo.



3.1.4 Armadura

As armaduras utilizadas nos ensaios são barras de aço carbono nervuradas, cujas características estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 – Características das armaduras.

CARACTERÍSTICAS DAS ARMADURAS	
Diâmetro nominal (mm)	6,30
Resistência característica de escoamento (MPa)	500,00
Limite de resistência (MPa)	550,00
Classe NBR 7480:2007	CA-50

Fonte: Dados do fabricante.

3.1.5 Água

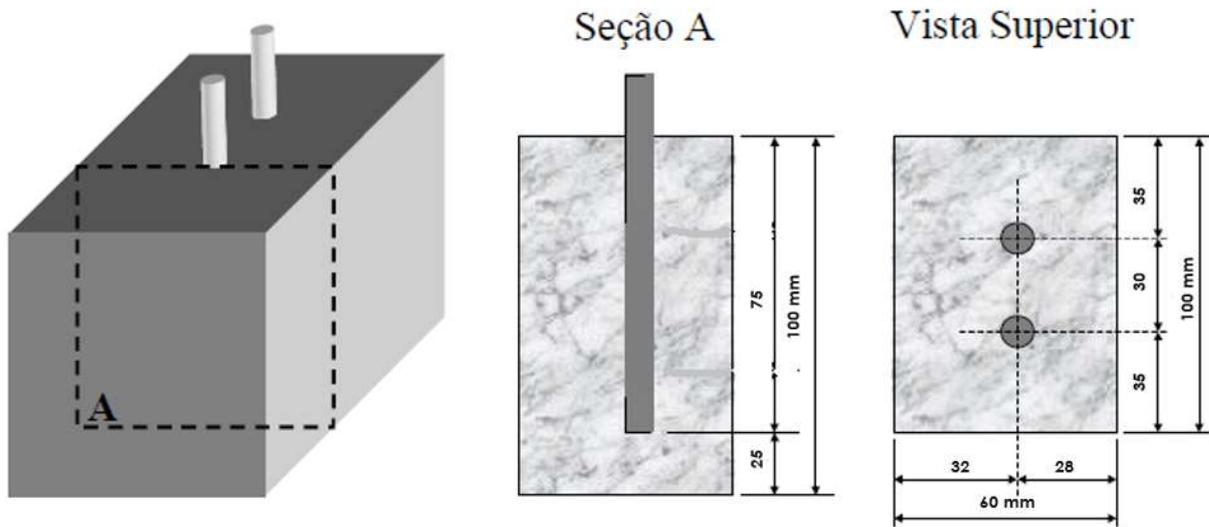
Em toda a pesquisa, foi utilizada água potável, proveniente da rede pública de distribuição do Recife.

3.1.6 Corpos de prova

A concepção dos corpos de prova para os ensaios de indução da penetração de íons cloreto, segue em linhas gerais, o modelo empregado por Monteiro (2002). A concepção consiste em utilizar forma prismática com dimensões reduzidas, empregando-se 2 (duas) armaduras dispostas com cobrimentos de 2,5 cm, variando o tipo de espaçador em seu interior. Foram utilizados espaçadores industrializados de argamassa e espaçadores de argamassa produzidos em obra.

Os corpos de prova, do presente trabalho, são corpos de prova de seção retangular com dimensões fixas, conforme mostrado na Figura 26. Também foram moldados corpos de prova sem espaçador, como um modelo de referência. Para esse corpo de prova, as armaduras foram inseridas no concreto com auxílio de um suporte, a fim de que atendesse o cobrimento estabelecido (2,5 cm).

Figura 22 - Detalhes dos corpos de prova com cobrimento de 2,5 cm.



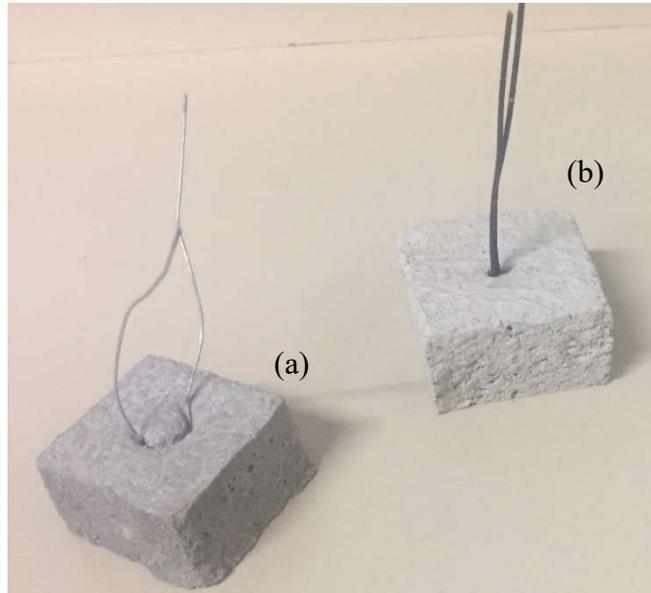
3.1.6.1 Espaçadores

Para a confecção dos corpos de prova foram utilizados espaçadores de argamassa produzidos em obra e espaçadores industrializados de argamassa, com cobrimentos nominais de 2,5 cm. Os espaçadores industrializados de argamassa foram adquiridos através de um fornecedor local, com resistência à compressão, informada pelo fabricante, de 25 MPa. Já os espaçadores de argamassa produzidos em obra, foram cedidos por uma obra da cidade do Recife, sendo respeitados o procedimento de fabricação da empresa, idealizando uma situação cotidiana nas obras da região.

Na Figura 27, observa-se os espaçadores utilizados.

Figura 23 - Espaçadores utilizados para confecção dos corpos de prova.

- (a) Espaçador industrializado de argamassa.
 (b) Espaçador de argamassa produzido em obra.



3.1.6.2 Dosagem do concreto

O traço do concreto utilizado, para confecção dos corpos de prova, está descrito na Tabela 9 a seguir.

Tabela 9 – Traço do concreto.

TRAÇO DO CONCRETO			
Cimento	Areia	Brita	Relação a/c
1,00	1,75	2,75	0,55

A determinação do traço empregado foi orientada no sentido de ser um traço usual das obras locais, com a finalidade de se obter os resultados mais próximos da realidade. Para essa relação água/cimento a resistência à compressão estimada é de ≤ 30 MPa.

3.1.6.3 Preparação das barras

As armaduras utilizadas nos corpos de prova sofreram um procedimento de limpeza específico, de modo a conferir a todas as barras as mesmas condições de superfície, já que são utilizadas como sensores de corrosão nos ensaios.

O procedimento de limpeza empregado se baseia na norma ASTM G1-03 (2003), onde uma solução de ácido clorídrico 1:1 com 3,5 g/l de hexametenotetramina é empregada. Essa solução remove os óxidos presentes não ocorrendo ataque ao metal. O procedimento de limpeza é iniciado, pela imersão da barra na solução de ácido clorídrico e hexametenotetramina por 15 minutos. Em seguida, as barras são lavadas em água corrente e passam por um processo de escovação (escova de cerdas metálicas) para remoção final dos óxidos. Após a limpeza, cada barra foi pesada em balança analítica. Na Figura 28, observa-se a comparação entre barras antes e depois do procedimento de limpeza.

Figura 24 - Comparação entre as barras antes e depois da limpeza.



3.1.7 Moldagem e cura

A moldagem dos corpos de prova foi planejada para se ter o maior grau possível de homogeneidade e principalmente precisão de forma, dimensões e posicionamento da barra. A fôrma utilizada foi feita de madeira, adaptada para a introdução das armaduras, conforme a Figura 29.

Figura 25 - Fôrma utilizada para moldagem dos corpos de prova.



Para o procedimento de mistura do concreto, foi utilizada uma betoneira. A pesquisa consistiu em três concretagens: concretagem 1- moldagem dos corpos de prova de referência (sem espaçador), concretagem 2- moldagem dos corpos de prova com espaçadores de argamassa produzidos em obra e concretagem 3- moldagem dos corpos de prova com espaçadores industrializados de argamassa. Em cada concretagem, foram moldados paralelamente, corpos de prova cilíndricos para os ensaios de caracterização do concreto, descritos anteriormente.

A preparação das fôrmas, precedente ao lançamento do concreto, consistiu na colocação das barras (limpas e pesadas) e dos espaçadores, conforme a Figuras 30. Nos corpos de prova de referência, foram utilizadas apenas as barras.

Figura 26 – (a) Preparação da forma com espaçador de argamassa produzido em obra. (b) Preparação da fôrma com espaçador industrializado de argamassa.



O concreto foi lançado por uma das faces paralelas às barras de aço, em duas camadas, com auxílio de uma colher de pedreiro, conforme a Figura 31. Cada camada foi adensada por vibrador mecânico. A Figura 32 apresenta o acabamento da superfície do corpo de prova, após o adensamento.

Figura 27 - Lançamento do concreto nas fôrmas dos corpos de prova.



Figura 28 - Acabamento superficial dos corpos de prova após o adensamento.



Os corpos de prova foram desmoldados após 24h. A fim de garantir a integridade das armaduras à mostra, as mesmas foram isoladas por fita isolante (Figura 33). Em seguida, os corpos de prova foram mantidos em cura úmida por 28 dias.

Figura 29 - Corpo de prova com armadura protegida por fita isolante.



Na Tabela 10, encontram-se os detalhes das famílias dos corpos de prova moldados para posteriores análises.

Tabela 10 – Famílias dos corpos de prova moldados.

FAMÍLIAS DOS CORPOS DE PROVA				
Tipo	Sigla	Quantidade (und)	Cobrimento (cm)	Armadura (Ø mm)
Referência (sem espaçador)	REF	20,00	2,50	6,30
Espaçador de argamassa produzido em obra	EAPO	20,00	2,50	6,30
Espaçador industrializado de argamassa	EIA	20,00	2,50	6,30

3.1.8 Preparação dos corpos de prova

Após a cura e o ensaio de ultrassom, que será descrito posteriormente, 5 (cinco) faces dos corpos de prova foram protegidas por uma tinta impermeabilizante, deixando apenas uma das faces à mostra (Figura 34). Essa pintura tende a garantir, que a penetração dos íons cloreto ocorra apenas por uma das faces, a qual contém a interface espaçador/concreto.

Figura 30 - Pintura dos corpos de prova.



Findando o período de secagem da tinta, foram conectados fios flexíveis à extremidade livre das armaduras, para as medidas dos futuros potenciais de corrosão. Essa conexão foi protegida com fita isolante, conforme a Figura 35.

Transcorridos os 28 dias de cura, os corpos de prova iniciaram um procedimento de secagem em ambiente de laboratório por 30 dias.

Figura 31 - Corpo de prova com fios flexíveis.



3.2 Ensaios e Análises

3.2.1 Caracterização dos espaçadores

Apesar de não existir nenhuma normatização nacional envolvendo ensaios diretamente em espaçadores, algumas análises foram realizadas nos espaçadores utilizados no procedimento experimental, com o auxílio das normas de concreto NBR 5739:2007, NBR 9778:2005 e NBR 9779:2012. Foram realizados os ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e absorção por capilaridade. Seguiu-se ao máximo os parâmetros estabelecidos pelas normas para realização dos ensaios.

Para o ensaio de resistência à compressão (NBR 5739:2007), foram rompidos em prensa hidráulica 10 (dez) espaçadores no total, sendo 5 (cinco) de argamassa produzido em obra e 5 (cinco) industrializado de argamassa, escolhidos aleatoriamente. As Figuras 36 e 37 a seguir, ilustram a realização do ensaio de resistência à compressão nos espaçadores de argamassa produzidos em obra e nos espaçadores industrializados de argamassa, respectivamente.

Figura 32 - Ensaio de resistência à compressão nos espaçadores de argamassa produzidos em obra.



Figura 33 - Ensaio de resistência à compressão nos espaçadores industrializados de argamassa.



A fim de se caracterizar os espaçadores, também foram realizados ensaios de absorção de água, dos índices de vazios, massa específica e absorção por capilaridade. Os parâmetros utilizados foram os da NBR 9978:2005 e NBR 9779:2012. Com os resultados dos ensaios de absorção, é possível avaliar a relação da porosidade com a quantidade de água absorvida. Foram utilizados 3 (três) espaçadores de cada tipo, escolhidos aleatoriamente, para realização desses ensaios.

A Figura 38 apresenta a realização do ensaio de absorção de capilaridade nos espaçadores de argamassa. Os espaçadores foram dispostos sobre um suporte, onde sua base ficou em contato com uma fina película de água de $5 \text{ mm} \pm 1$ de altura. Foram determinadas as massas de cada amostra, no decorrer de 3h, 6h, 24h, 48h e 72h de ensaio.

Figura 34 - Realização do ensaio de absorção por capilaridade.



A Equação 11 a seguir, foi utilizada para definir a absorção por capilaridade, em cada pesagem das amostras.

$$C = \frac{msat - ms}{S} \times 100 \quad \text{Equação (11).}$$

Onde:

$msat$ = massa do corpo de prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em g.

ms = massa do corpo de prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2) ^\circ\text{C}$, em g.

S = área da seção transversal, em cm^2 .

Com a finalidade de realizar o ensaio de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, as amostras dos dois tipos de espaçadores passaram 3 (três) dias na estufa, a uma temperatura de $105 \pm 5 ^\circ\text{C}$. Em seguida, as amostras foram pesadas em balança analítica e foi obtida sua massa seca. Após a determinação da massa seca, as amostras foram imersas em água por 3 (três) dias. Findando o período de imersão, as amostras foram depositadas em um recipiente metálico, ficando novamente submersas em água, onde o sistema foi levado a ebulição. As amostras permaneceram no processo de fervura por 5h e o volume da água foi mantido constante, conforme a Figura 39. Em seguida, todos os espaçadores foram pesados e

tiveram a massa saturada definida. Por fim, com o auxílio de uma balança hidrostática, definiu-se a massa imersa em água de cada amostra.

Figura 35 - Fervura dos corpos de prova.



As equações utilizadas para compor os resultados encontram-se descritas a seguir:

- Absorção:

$$A = \frac{msat - ms}{ms} \times 100$$

Equação (12).

- Índice de vazios:

$$Iv = \frac{msat - ms}{msat - mi} \times 100$$

Equação (13).

- Massa específica da amostra seca:

$$\rho_s = \frac{ms}{msat - mi}$$

Equação (14).

- Massa específica da amostra saturada:

$$\rho_{sat} = \frac{msat}{msat - mi} \quad \text{Equação (15).}$$

- Massa específica real:

$$\rho_r = \frac{ms}{ms - mi} \quad \text{Equação (16).}$$

Onde:

ms = massa, em g, da amostra seca em estufa.

msat = massa, em g, da amostra após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C, e fervura em água em ebulição durante 5 h.

mi = massa, em g, da amostra imersa em água após saturação em água à temperatura de (23 ± 2) °C, e fervura em água em ebulição durante 5 h.

Além dos ensaios de resistência à compressão e absorção, também foi realizada uma análise na variação dimensional dos dois tipos de espaçadores. Para realização dessa análise, foram coletadas, com o auxílio de um paquímetro, as medidas de comprimento, largura e espessura de 50 (cinquenta) espaçadores de cada tipo, escolhidos aleatoriamente.

3.2.2 Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos

Para caracterizar o concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos, foram realizados ensaios de resistência à compressão, em corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm), moldados paralelamente aos corpos de prova prismáticos, aos 7 e 28 dias de idade. Um total de 12 (doze) corpos de prova foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão. Os corpos de prova cilíndricos foram moldados, adensados (Figura 40), retificados, e rompidos em prensa hidráulica (Figura 41) de acordo com os procedimentos da NBR 5738:2015 e NBR 5739:2007.

Figura 36 – Moldagem e adensamento dos corpos de prova cilíndricos.



Figura 37 – Realização do ensaio de resistência à compressão nos corpos de prova cilíndricos.



Além do ensaio de resistência à compressão, também foram realizados ensaios de absorção de água, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade do concreto, em corpos de prova cilíndricos (10cm x 20cm), moldados paralelamente aos corpos de prova prismáticos. Os parâmetros utilizados foram os das normas NBR 9778:2005 e NBR 9779:2012. Em cada ensaio, foram utilizados 3 (três) corpos de prova cilíndricos. Os procedimentos seguidos para realização desses ensaios, foram os mesmos descritos no tópico anterior.

Após o ensaio de absorção por capilaridade, os corpos de prova foram rompidos e a ascensão capilar foi verificada (Figura 42).

Figura 38 - Ascensão capilar nos corpos de prova cilíndricos.



3.2.3 *Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica*

Esse ensaio tem por objetivo estabelecer a medida da velocidade de transporte das ondas ultrassônicas longitudinais, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de uma peça de concreto. As principais aplicações desse método são: verificar a homogeneidade de concreto; detectar eventuais falhas internas de concretagem; profundidade de fissuras e outras imperfeições.

A velocidade de transporte das ondas mecânicas em um material, é função das características elásticas do meio e da sua densidade. A presença de descontinuidade, sobretudo vazios, altera consideravelmente essa velocidade (NBR 8802:2013).

A Tabela 11 relaciona a velocidade de propagação da onda ultrassônica com as condições do concreto.

Tabela 11 - Classificação da qualidade do concreto conforme a velocidade do pulso ultrassônico.

Velocidade de propagação linear (m/s)	Qualidade do concreto armado
> 4500	Excelente
3600 – 4500	Boa
3000 – 3600	Aceitável
2100 – 3000	Pobre
< 2100	Muito pobre

Fonte: CÁNOVAS, 1988, p. 474.

Optou-se por realizar esse ensaio nos corpos de prova, após o período de cura e antes da pintura, a fim de verificar o quanto a presença dos espaçadores afetariam na homogeneidade do elemento. Os 20 (vinte) corpos de prova de cada família (referência, com espaçador de argamassa produzido em obra e espaçador industrializado de argamassa) foram submetidos à determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica.

A realização do ensaio de propagação das ondas ultrassônicas ocorreu por meio do equipamento PUNDIT (Portable Ultrasonic Non-Destructive Digital Indicating Tester) da C.N.S Electronics, Ltd, com transdutores de frequência de 54 kHz e cabos de 3 m de comprimento.

O ensaio foi executado seguindo o estipulado na NBR 8802:2013. O método utilizado para a transmissão das ondas ultrassônicas foi o direto. As leituras foram realizadas nos corpos de prova prismáticos, no centro das faces laterais, conforme a Figura 43. Para cada ensaio registou-se o tempo de percurso das ondas (em μs) e mediu-se o comprimento do corpo de prova.

Figura 39 – Realização do ensaio de propagação de ondas ultrassônicas.



3.2.4 Indução da penetração de íons cloreto nos corpos de prova por meio de ciclos de secagem e imersão parcial

A condição de imersão parcial em NaCl com ciclos de secagem e imersão parcial possui a vantagem de, além do transporte dos agressivos por absorção capilar, o ingresso de íons cloreto por difusão. As metodologias que abrangem os ciclos de secagem e umedecimento, ou contato com solução de NaCl, correspondem ao regime mais rigoroso de penetração de íons cloreto (MOREIRA; PANOSSIAN, 1999). Os ciclos de molhagem e secagem atuam aumentando a velocidade de transporte do gás oxigênio (O₂), até as imediações das áreas catódicas das armaduras. Com o desenrolar dos ciclos, há um aumento considerável na concentração de íons cloreto nos poros do concreto (MONTEIRO, 2002).

A indução da penetração de íons cloreto, por meio da condição de imersão parcial em NaCl com ciclos de secagem e imersão parcial, aproxima-se mais da realidade. Entretanto, não é recomendável estabelecer um “fator de aceleração” (tantas horas de exposição em laboratório correspondem a tantos anos de exposição natural) (MONTEIRO, 2002). Esse mesmo autor acrescenta, que os ensaios cíclicos de corrosão devem possuir análise comparativa do desempenho de diferentes materiais, ensaiados ao mesmo tempo e nas mesmas condições.

Silva et al. (2015), realizou um procedimento de indução de penetração de íons cloreto, através de ciclos de secagem e imersão parcial, da mesma maneira do presente trabalho. Nesse procedimento, a etapa de imersão parcial com 5% NaCl tinha duração de 2 (dias) dias e a etapa de secagem, duração de 5 (cinco) dias em estufa ventilada. Monteiro (2002), também realizou esse mesmo método de indução de penetração de íons cloreto.

Após a secagem dos corpos de prova, em ambiente de laboratório por 30 dias, iniciou-se o procedimento de indução da penetração de íons cloreto com ciclos de secagem e imersão parcial em solução de 5% de NaCl. Os ciclos ocorreram conforme a Tabela 12.

Tabela 12 - Etapas do procedimento de indução da penetração de cloretos.

Ciclo	Condição	Duração
Secagem	Estufa	5 dias
Umedecimento	Parcialmente submerso	2 dias

A secagem consiste em dispor os corpos de prova em estufa ventilada, mantendo-se a temperatura em 50 °C. A etapa da secagem do concreto representa um desafio muito maior do que o seu umedecimento. Pois, o concreto retém e perde umidade para o ambiente em velocidade significativamente inferior àquela que ele absorve. Dessa forma, é necessária maior intensificação no procedimento de secagem, por meio do emprego de uma estufa ventilada de controle de temperatura.

Na Figura 44, observa-se a etapa de secagem do procedimento de indução da penetração de íons cloreto.

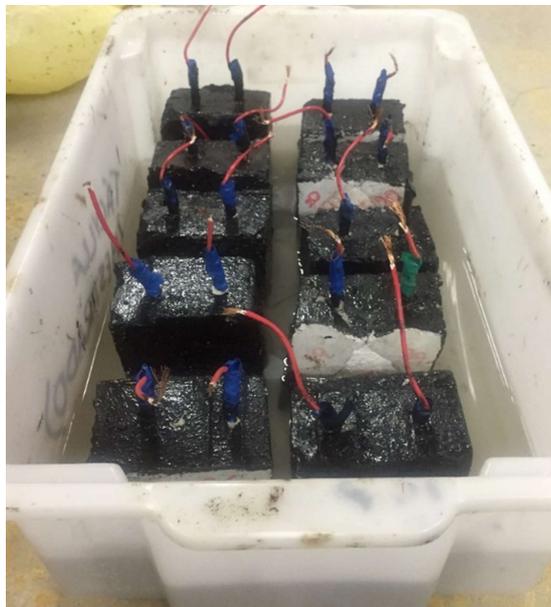
Figura 40 - Etapa de secagem no procedimento de indução da penetração de íons cloreto.



Na etapa de umedecimento, foi utilizada uma solução contendo cloreto de sódio diluído a 5%. Esse teor foi escolhido, por ser próximo ao valor mencionado pela literatura técnica, para a concentração de NaCl encontrada na água do mar, 3,5% aproximadamente (CASCUDO, 2000). O nível da solução do recipiente, foi mantido em uma posição que corresponde à metade da altura da área de exposição da barra. Assim, tem-se absorção por capilaridade e, uma vez que ocorra a saturação, tem-se o processo de difusão.

Na Figura 45, apresenta-se a etapa de umedecimento.

Figura 41 - Etapa de umedecimento no procedimento de indução da penetração de íons cloreto.



No total, cada corpo de prova foi submetido a 4 (quatro) ciclos de secagem e umedecimento. Pois, foi o suficiente para atingir a despassivação das armaduras.

3.2.5 *Potencial de Corrosão*

A medida do potencial de corrosão consiste na obtenção do potencial por meio de um eletrodo de referência, colocado em contato com a superfície do concreto, o qual indica, aproximadamente, a situação de corrosão ou passividade da armadura. Esse ensaio permite identificar, antes que o dano se torne aparente, as zonas onde as armaduras estão despassivadas. Os resultados fornecidos são qualitativos e devem ser utilizados como complemento de outros ensaios, nunca de forma isolada e absoluta (PINTAN et al. 2015).

Os potenciais eletroquímicos, quando utilizado o mapeamento de potenciais, possuem a capacidade de identificar as zonas mais corroídas (anódicas), e as menos ou nada corroídas (catódicas). Uma das vantagens desse ensaio, é a facilidade de sua medição tanto em laboratório, quanto em campo. A medição do potencial de corrosão não avalia o progresso do

processo corrosivo ou a velocidade da corrosão, mas sim, a probabilidade de ocorrência da corrosão (RIBEIRO, 2014).

Segundo a norma ASTM C 876 (1999), o método de ensaio para obtenção de potenciais de corrosão em concreto, tem seu uso permitido em ensaios laboratoriais, ou em análises de campo. Os critérios para interpretação dos resultados obtidos, nas medidas de potencial de corrosão, estão descritos na Tabela 13 e indicam a probabilidade de ocorrência da corrosão na região ensaiada.

Tabela 13 - Critérios de avaliação dos resultados das medidas de potenciais.

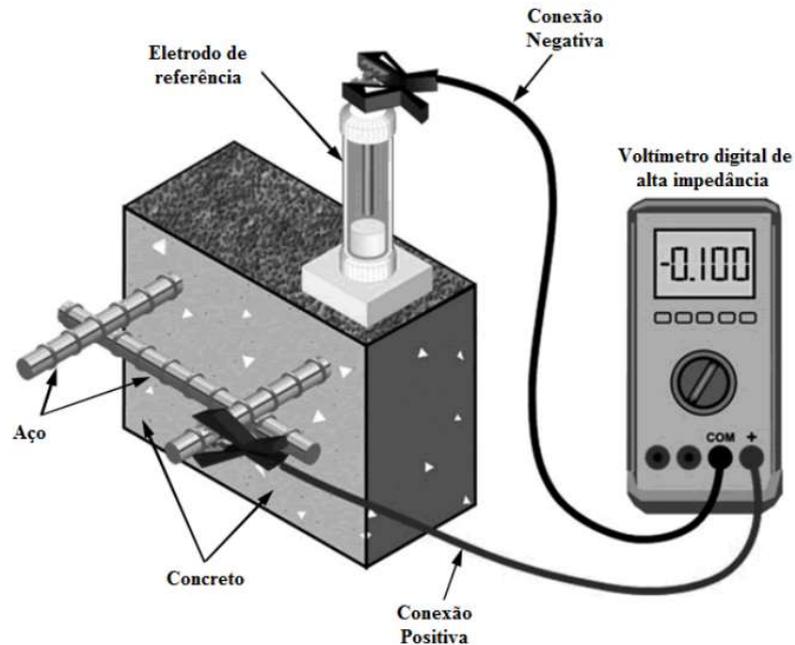
Potencial de corrosão relativo ao eletrodo de referência de cobre-sulfato de cobre – ESC (mV)	Probabilidade de corrosão (%)
Mais negativo que -350 mV	90,00
Mais positivo que -200 mV	10,00
De -200 a -350 mV	Incerteza

Fonte: ASTM C 876 (2015).

A realização do ensaio de potencial de corrosão ocorreu por meio do equipamento CANIN+ da Proceq. O seu eletrodo de referência é uma meia célula de cobre/sulfato (Cu/CuSO₄), disposto de uma vareta de cobre imersa em uma solução saturada de sulfato de cobre, que mantém um potencial constante de 10 MΩ. O eletrodo de referência, conectado por meio de um voltímetro de alta impedância ao reforço de aço, deve ser movimentado em uma grade, estabelecida de acordo com a estrutura analisada, sob a superfície de concreto.

A Figura 46 apresenta um desenho esquemático do sistema para medição do potencial de corrosão de meia célula.

Figura 42 - Desenho esquemático do sistema para medição do potencial de corrosão de meia célula.



Fonte: MORESI; BELLAGUARDA (2016).

As medições dos potenciais de corrosão, foram realizadas nos corpos de prova antes de iniciar a indução da penetração de íons cloreto, entre os ciclos de secagem e umedecimento, e ao término dessa indução. No total, os 20 (vinte) corpos de prova de cada família foram submetidos a 9 (nove) medições, pois passaram por 4 (quatro) ciclos de secagem e umedecimento. Dessa forma, cada corpo de prova forneceu 6 (seis) resultados de potencial de corrosão em cada medição.

A Tabela 14, mostra os intervalos de medições para cada corpo de prova.

Tabela 14 - Medições do potencial de corrosão (mV) nos corpos de prova.

MEDIÇÕES DO POTENCIAL DE CORROSÃO (MV) NOS CORPOS DE PROVA								
Ciclo 1			Ciclo 2		Ciclo 3		Ciclo 4	
Antes de iniciar a 1ª secagem (M0 - inicial)	Após secagem (M1)	Após umedecimento (M2)	Após secagem (M3)	Após umedecimento (M4)	Após secagem (M5)	Após umedecimento (M6)	Após secagem (M7)	Após umedecimento (M8 - final)

3.2.5.1 Montagem do equipamento e realização do ensaio de potencial de corrosão

A fim de se iniciar as medições dos potenciais de corrosão, através do CANIN+, deve-se seguir uma série de etapas, orientadas pelo manual do equipamento. A primeira delas, é a preparação do eletrodo. O eletrodo deverá ter sua tampa, que contém um plugue de madeira, removida. Esse plugue, deverá ser imerso em água durante aproximadamente uma hora, para que a madeira possa saturar e expandir, conforme a Figura 47.

Figura 43 - Preparação do eletrodo de barra.



Para preencher o eletrodo de barra, uma solução saturada de sulfato de cobre deve ser preparada. A solução deve ser misturada na proporção de 40 unidades por peso de sulfato de

cobre com 100 unidades por peso de água destilada. Para assegurar que a solução permaneça saturada, deve-se acrescentar no eletrodo uma colher de chá adicional com cristais de sulfato de cobre.

O eletrodo deve estar preenchido tão completamente quanto possível, com o mínimo de ar no compartimento (Figura 48). Isso assegura que a solução esteja em contato com o plugue de madeira, mesmo ao medir numa direção ascendente.

Figura 44 - Eletrodo de barra preenchido com solução saturada de sulfato de cobre.



Com o eletrodo de barra (conexão negativa) pronto, acopla-o no CANIN+ (voltímetro), fazendo o mesmo com o eletrodo de conexão positiva, conforme a Figura 49.

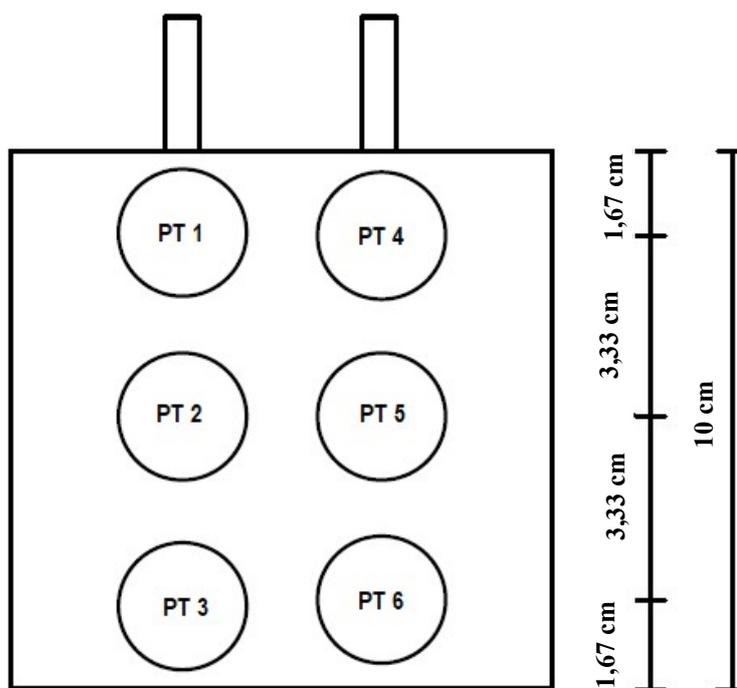
Figura 45 - Eletrodo de barra e conexão positiva acoplados no CANIN+.



No CANIN+ os dados de medição são armazenados em arquivos denominados “Objects”. Para tornar a avaliação mais simples, é recomendável, antes de começar o trabalho, mapear o local e atribuir diversas seções a “Objects” específicos. Dessa forma, cada corpo de prova corresponderá a um “Object”.

Com o equipamento pronto para uso, o próximo passo é preparar a superfície a ser ensaiada. Aconselha-se marcar uma grade na superfície, correspondente à grade que se deseja utilizar. Nos corpos de prova, a grade continha 6 (seis) pontos de medição (Figura 50). A face ensaiada estava ausente de pintura impermeabilizante. É recomendável, molhar a superfície a ser ensaiada, aproximadamente 10 a 20 minutos antes de realizar a medição.

Figura 46 - Esquema dos pontos de medição do potencial de corrosão nos corpos de prova.



Após seguir todas as etapas descritas anteriormente, as medições do potencial de corrosão foram iniciadas nos corpos de prova. A conexão positiva foi acoplada ao fio flexível da armadura que se desejava ensaiar, enquanto o eletrodo de barra foi posicionado no primeiro ponto da superfície do concreto (Figura 51). Cada corpo de prova resultou em 6 (seis) resultados de potencial de corrosão, sendo 3 (três) para uma barra e 3 (três) para outra. Todos os resultados coletados foram gravados no equipamento.

Figura 47 - Realização da medição do potencial de corrosão.



3.2.6 Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata

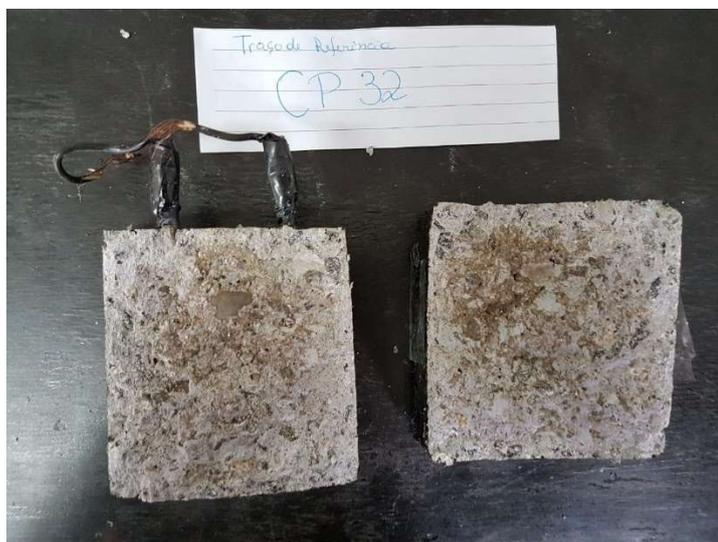
Após o processo de indução da penetração de íons cloreto e das medições dos potenciais de corrosão, os corpos de prova foram rompidos axialmente em prensa hidráulica. Em seguida, a zona fraturada, dos corpos de prova, foi submetida ao ensaio de aspersão de nitrato de prata.

O ensaio possui caráter qualitativo e tem como objetivo, a identificação visualmente, pela mudança de coloração do indicador químico, da existência ou não de íons de cloreto livres. Isso é permitido, através da aspersão de solução de nitrato de prata em uma estrutura de concreto recém exposta. A solução é preparada numa proporção de 2,5g de nitrato de prata diluído a 100 ml de água destilada.

A execução do ensaio é baseada na aspersão da solução de nitrato de prata (AgNO_3) na peça de concreto. Uma reação fotoquímica é realizada, que somente ocorre em presença de luz, ou é catalisada pela mesma. Onde há a presença de cloretos livres, ocorre a formação de um precipitado branco e floculento, denominado cloreto de prata (AgCl). Porém, quando os cloretos se encontram na forma combinada, há a formação de um precipitado marrom, denominado óxido de prata (PINTAN et al. 2015).

Para a execução do ensaio nos corpos de prova, a solução foi preparada em laboratório e aspergida nas suas regiões fraturadas. Após alguns minutos, eram feitas leituras da existência de cloretos, conforme a Figura 52.

Figura 48 - Corpo de prova após aspersão de solução de nitrato de prata.



A Tabela 15, relaciona a coloração da superfície de concreto com a presença ou ausência de cloretos livres. Essa tabela serviu como base para a análise dos resultados encontrados.

Tabela 15 - 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 apud ADAMATTI 2016.

3.2.7 Perda de massa gravimétrica

Antes da moldagem dos corpos de prova, todas as armaduras passaram por um procedimento de limpeza, descrito no tópico 3.1.7.1, e foram pesadas em balança analítica. Após a realização de todas as análises e ensaios, retirou-se as barras de aço do concreto, submetendo-as novamente ao mesmo procedimento de limpeza.

Após a limpeza, realizou-se a pesagem das barras, obtendo o valor de perda de massa devido ao processo corrosivo. Com os resultados da massa inicial (antes do processo corrosivo) e da massa final (após o processo corrosivo), é possível calcular a porcentagem de perda de massa de cada barra, conforme a Equação 17.

$$\text{Perda de massa (\%)} = \frac{\Delta m}{m_{inic}} \times 100 \quad \text{Equação (17).}$$

Onde:

Δm = variação de massa após o processo de corrosão (em miligramas).

m_{inic} = massa inicial da barra de armadura (em miligramas).

Cada corpo de prova prismático possuía 2 (duas) barras de aço em seu interior, denominadas B1 e B2. Todas as barras de aço, 120 (cento e vinte) no total, dos 60 (sessenta) corpos de prova prismáticos, passaram por todos os processos de limpeza e pesagem.

A Tabela 16, apresenta um quadro resumo de todos os ensaios realizados no procedimento experimental.

Tabela 16 – Quadro resumo dos ensaios realizados no procedimento experimental.

QUADRO RESUMO DOS ENSAIOS REALIZADOS NO PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL			
Ensaio	Objetivo	Nº de corpos de prova	Tipo do corpo de prova
Resistência à compressão	Caracterização dos espaçadores	5 5	Espaçador de argamassa produzido em obra Espaçador industrializado de argamassa
	Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos	12	Cilíndrico de concreto
Absorção de água por imersão, índice de vazios, massa específica	Caracterização dos espaçadores	3 3	Espaçador de argamassa produzido em obra Espaçador industrializado de argamassa
	Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos	3	Cilíndrico de concreto
Absorção de água por capilaridade	Caracterização dos espaçadores	3 3	Espaçador de argamassa produzido em obra Espaçador industrializado de argamassa
	Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos	3	Cilíndrico de concreto
Velocidade de propagação de onda ultrassônica	Analisar a homogeneidade dos corpos de prova prismáticos na presença dos espaçadores	20	Corpo de prova prismático REF
		20	Corpo de prova prismático EAPO
		20	Corpo de prova prismático EIA
Indução da penetração de íons cloreto	Desenvolver o processo corrosivo nos corpos de prova	20	Corpo de prova prismático REF
		20	Corpo de prova prismático EAPO
		20	Corpo de prova prismático EIA
Potencial de corrosão	Verificar a probabilidade de corrosão nos corpos de prova	20	Corpo de prova prismático REF
		20	Corpo de prova prismático EAPO
		20	Corpo de prova prismático EIA
Ensaio colorimétrico com nitrato de prata	Analisar a presença dos cloretos livres nos corpos de prova	20	Corpo de prova prismático REF
		20	Corpo de prova prismático EAPO
		20	Corpo de prova prismático EIA
Perda de massa gravimétrica	Analisar o grau de corrosão dos corpos de prova através da perda de massa gravimétrica	20	Corpo de prova prismático REF
		20	Corpo de prova prismático EAPO
		20	Corpo de prova prismático EIA

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Caracterização dos espaçadores

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão, índice de vazios, massa específica e absorção por capilaridade, encontram-se descritos a seguir.

Na Tabela 17, apresentam-se os resultados do ensaio de resistência à compressão para os espaçadores de argamassa produzidos em obra e os espaçadores industrializados de argamassa, utilizados na confecção dos corpos de prova prismáticos. A realização do ensaio foi baseada na NBR 5739:2007.

Tabela 17 – Resultados do ensaio de resistência à compressão realizado nos espaçadores.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO			
Espaçador	Amostra	Força (MPa)	Média (MPa)
Argamassa produzido em obra	1	22,50	25,32
	2	27,20	
	3	27,50	
	4	24,20	
	5	25,20	
Industrializado de argamassa	1	25,01	25,34
	2	25,20	
	3	26,12	
	4	25,30	
	5	25,05	

Nota-se, que os espaçadores industrializados de argamassa atingiram o valor mínimo de resistência garantido pelo fabricante (25 MPa). Os espaçadores de argamassa produzidos em obra, apesar de não possuírem confecção industrializada, também atingiram valores próximos à 25 MPa.

Também foram realizados ensaios de absorção de água, dos índices de vazios, massa específica e absorção por capilaridade. Os parâmetros utilizados foram os da NBR 9978:2005 e NBR 9779:2012.

Os resultados obtidos dos ensaios de absorção de água, dos índices de vazios e massa específica, para cada tipo de espaçador, encontram-se nas Tabelas 18 e 19.

Tabela 18 - Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do espaçador de argamassa produzido em obra.

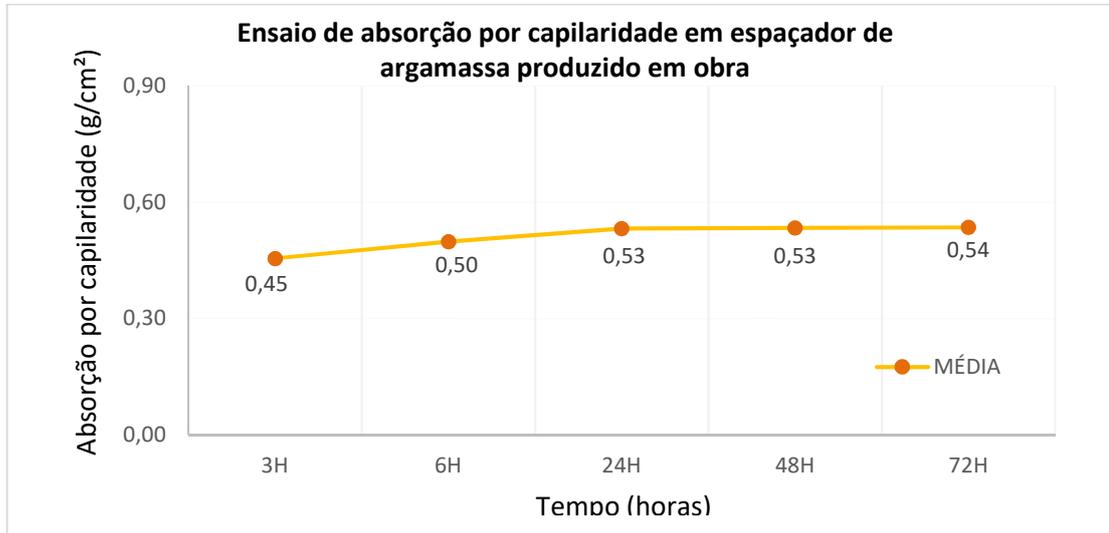
ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA EM ESPAÇADORES DE ARGAMASSA PRODUZIDOS EM OBRA	
Característica	Resultado
Absorção (%)	8,95
Índice de vazios (%)	17,37
Massa específica seca (g/l)	1,94
Massa específica saturada (g/l)	2,11
Massa específica real (g/l)	2,56

Tabela 19 - Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do espaçador industrializado de argamassa.

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA EM ESPAÇADORES INDUSTRIALIZADOS DE ARGAMASSA	
Característica	Resultado
Absorção (%)	8,04
Índice de vazios (%)	16,10
Massa específica seca (g/l)	2,00
Massa específica saturada (g/l)	2,16
Massa específica real (g/l)	2,58

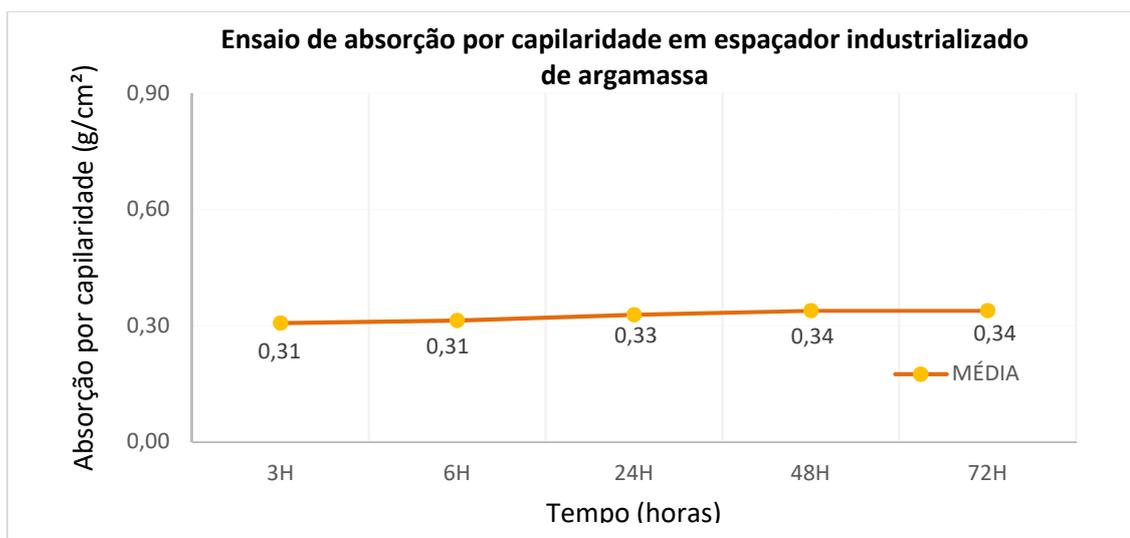
A média dos resultados, dos 3 (três) espaçadores de argamassa produzido em obra, para o ensaio de absorção por capilaridade, apresenta-se na Figura 53.

Figura 49 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do espaçador de argamassa produzido em obra.



A média dos resultados, dos 3 (três) espaçadores industrializados de argamassa, para o ensaio de absorção por capilaridade, apresenta-se na Figuras 54.

Figura 50 - Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do espaçador industrializado de argamassa.



Pode-se observar, que a absorção da água e a absorção por capilaridade, ocorreram de forma mais intensa nos espaçadores de argamassa produzidos em obra.

Além dos ensaios, também foi realizada uma análise na variação dimensional dos dois tipos de espaçadores. A média dos resultados, encontram-se descritas a seguir nas Tabelas 20 e 21.

Tabela 20 - Variação dimensional dos espaçadores de argamassa produzidos em obra.

ANÁLISE DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS ESPAÇADORES DE ARGAMASSA PRODUZIDOS EM OBRA			
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)
Média - 50 amostras	4,69	5,05	2,76

Tabela 21 - Variação dimensional dos espaçadores industrializados de argamassa.

ANÁLISE DE VARIAÇÃO DIMENSIONAL DOS ESPAÇADORES INDUSTRIALIZADOS DE ARGAMASSA			
	Largura (cm)	Comprimento (cm)	Espessura (cm)
Média - 50 amostras	3,93	3,99	2,38

Nota-se, que em sua maioria, os espaçadores industrializados de argamassa não atingiram a espessura de cobertura de 2,5 cm solicitada.

4.2 Caracterização do concreto utilizado na confecção dos corpos de prova prismáticos

Os resultados do ensaio de resistência à compressão, encontram-se na Tabela 22.

Tabela 22 – Resultados do ensaio de resistência à compressão do concreto.

ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO						
Idade	Traço	CP's	Carga (tf)	Força (MPa)	Média (MPa)	Média Total (MPa)
7 dias	Traço 1	1	20,10	24,22	24,83	23,69
		2	20,66	25,43		
	Traço 2	1	18,88	22,75	23,07	
		2	19,03	23,38		
	Traço 3	1	19,21	23,60	23,17	
		2	18,50	22,73		
28 dias	Traço 1	3	25,35	31,20	31,11	31,17
		4	24,38	31,01		
	Traço 2	3	27,06	32,61	32,37	
		4	26,66	32,12		
	Traço 3	3	24,08	29,02	30,04	
		4	25,78	31,06		

A relação água/cimento utilizada no traço foi 0,55, a qual estima-se uma resistência à compressão ≤ 30 MPa. A partir disso, pode-se concluir, que os resultados do ensaio de resistência à compressão foram satisfatórios.

Os resultados dos ensaios de absorção avaliam a relação da porosidade com a quantidade de água absorvida. Os resultados obtidos da absorção de água, dos índices de vazios e massa específica estão apresentados na Tabela 23. Os resultados da média, dos 3 (três) corpos de prova cilíndricos, do ensaio de absorção por capilaridade encontram-se nas Figuras 55 e 56.

Tabela 23 – Resultados dos ensaios de absorção de água, índice de vazios e massa específica do concreto.

ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA	
Característica	Resultado
Absorção (%)	3,77
Índice de vazios (%)	8,52
Massa específica seca (g/l)	2,26
Massa específica saturada (g/l)	2,35
Massa específica real (g/l)	2,57

Figura 51 – Resultados do ensaio de absorção por capilaridade do concreto.

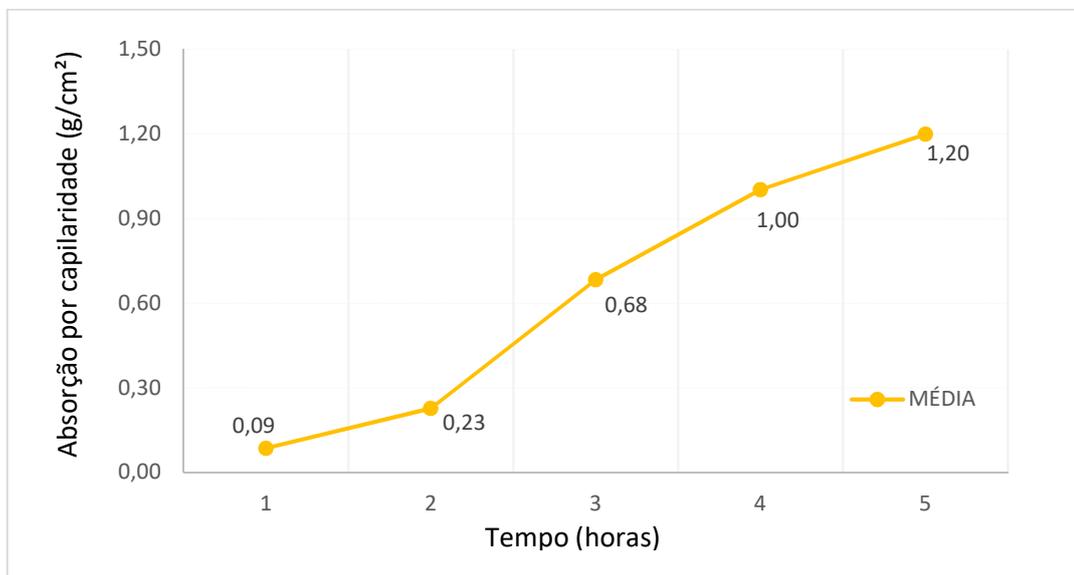
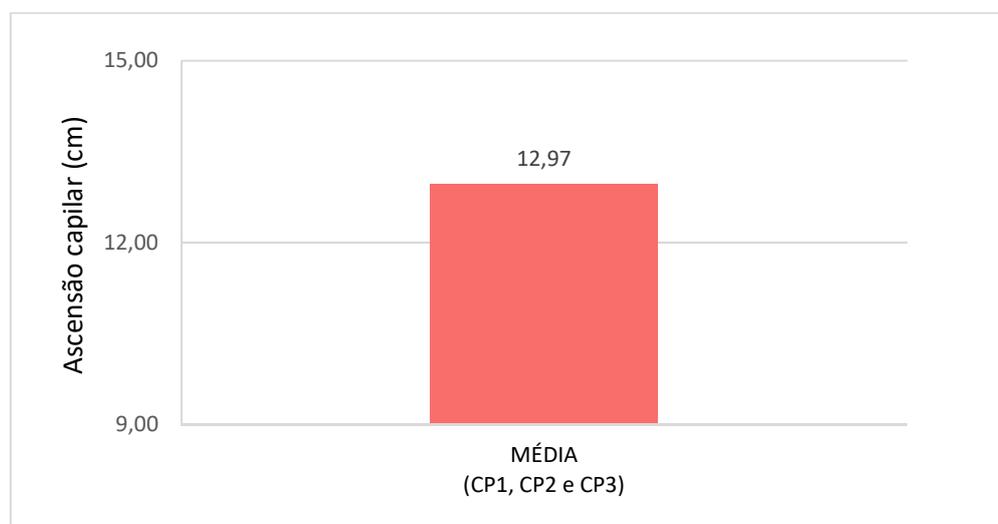


Figura 52 – Resultados da ascensão capilar após o ensaio de capilaridade do concreto.



Observa-se, que os ensaios de absorção do concreto apresentaram resultados coerentes.

4.3 Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica

Com os resultados desse ensaio é possível analisar qual espaçador comprometeu mais a homogeneidade do concreto. Os resultados de cada família dos corpos de prova prismáticos, apresentam-se nas Figuras 57, 58, e 59.

Figura 53- Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova REF.

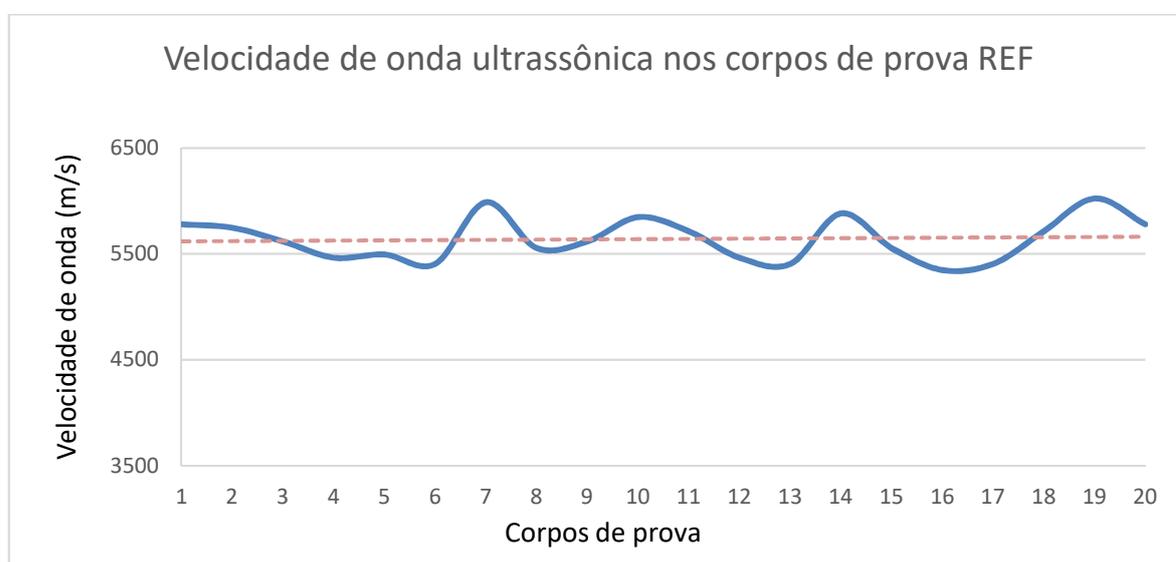


Figura 54 - Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova EAPO.

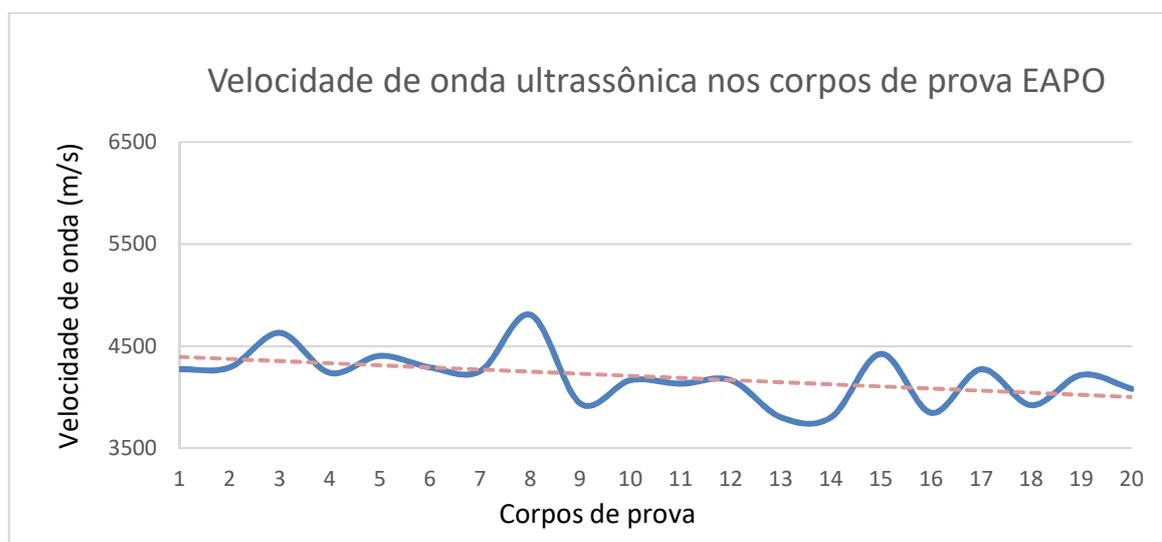
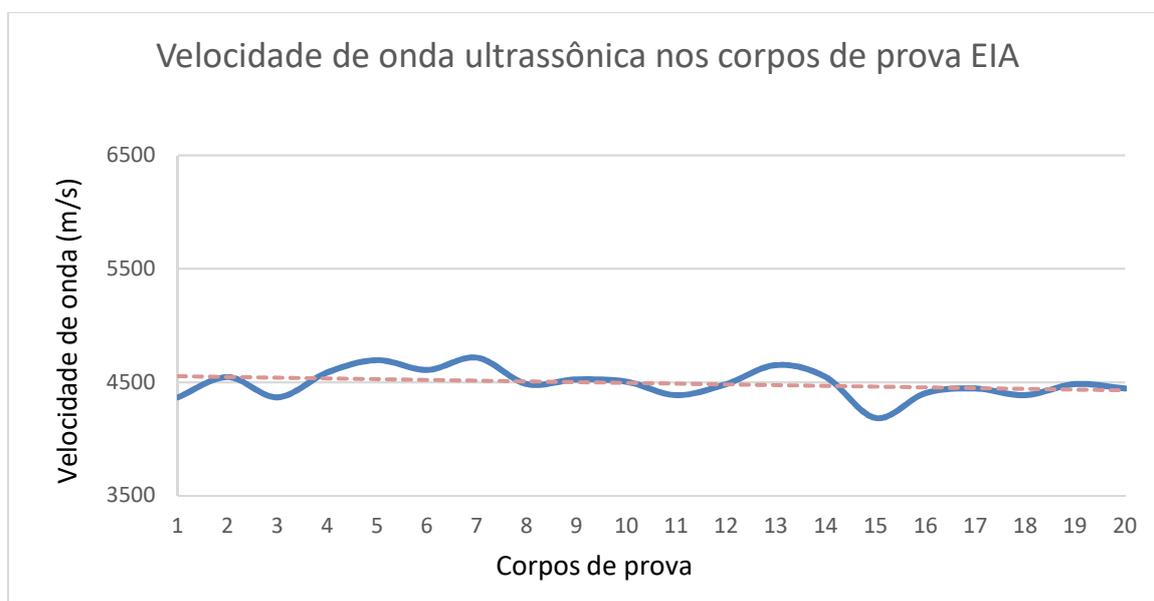


Figura 55 - Resultados da velocidade de onda ultrassônica nos corpos de prova EIA.



O desvio padrão dos resultados para os corpos de prova de referência foi de 202,76 m/s e seu coeficiente de variação foi 3,59%. Para os corpos de prova com espaçador de argamassa produzido em obra, o desvio padrão foi 260,37 m/s e o coeficiente de variação 6,20%. Por fim, os resultados dos corpos de prova com espaçador industrializado de argamassa, obtiveram um desvio padrão de 127,21 m/s e seu coeficiente de variação foi 2,83%.

Na Tabela 24, encontram-se os resultados das médias das velocidades de onda ultrassônica para cada família de corpo de prova.

Tabela 24 – Média das velocidades de onda ultrassônica para cada família.

MÉDIA DAS VELOCIDADES DE ONDA ULTRASSÔNICA (m/s)		
Corpo de prova de referência	Corpo de prova com espaçador de argamassa produzido em obra	Corpo de prova com espaçador industrializado de argamassa
5640,66	4198,33	4490,77

Como pode se observar, a qualidade do concreto dos corpos de prova, em relação a velocidade de propagação da onda ultrassônica, ficou entre a condição boa e excelente (Tabela 11). Apesar disso, os resultados menos favoráveis foram obtidos pelos corpos de prova que continham o espaçador de argamassa produzido em obra. Isso deve-se ao fato, da confecção dos espaçadores produzidos em obra não possuir uma maior precisão dimensional, sendo em todos os casos, maiores que os espaçadores industrializados de argamassa. Como o esperado, os melhores resultados foram obtidos dos corpos de prova de referência, pois em seu interior não havia nenhuma descontinuidade (espaçadores).

4.4 Potencial de corrosão

As medições dos potenciais de corrosão, foram realizadas nos corpos de prova antes de iniciar a indução da penetração de íons cloreto, entre cada ciclo de secagem e umedecimento, e ao término dessa indução.

Em cada corpo de prova, foram marcados 6 (seis) pontos de aferição (Figura 48), sendo 3 (três) pontos para cada barra de aço. A face ensaiada não possuía pintura impermeabilizante.

A média dos resultados, de cada família dos corpos de prova, para cada medição, apresentam-se nas Tabelas 25, 26 e 27 e nas Figuras 60, 61, 62 e 63.

Tabela 25 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova REF.

MÉDIA DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA REF			
Medição	Potencial de corrosão (mV)	Desvio padrão (mV)	Coef. de variação (%)
M0 (inicial)	-169,09	42,85	25,34
M1	-141,38	14,72	10,41
M2	-271,40	110,37	40,67
M3	-289,82	73,54	25,38
M4	-494,43	132,38	26,77
M5	-373,57	96,51	25,84
M6	-512,28	119,84	23,39
M7	-472,69	56,13	11,88
M8 (final)	-572,77	76,79	13,41
		Média	22,56

Figura 56 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova REF.

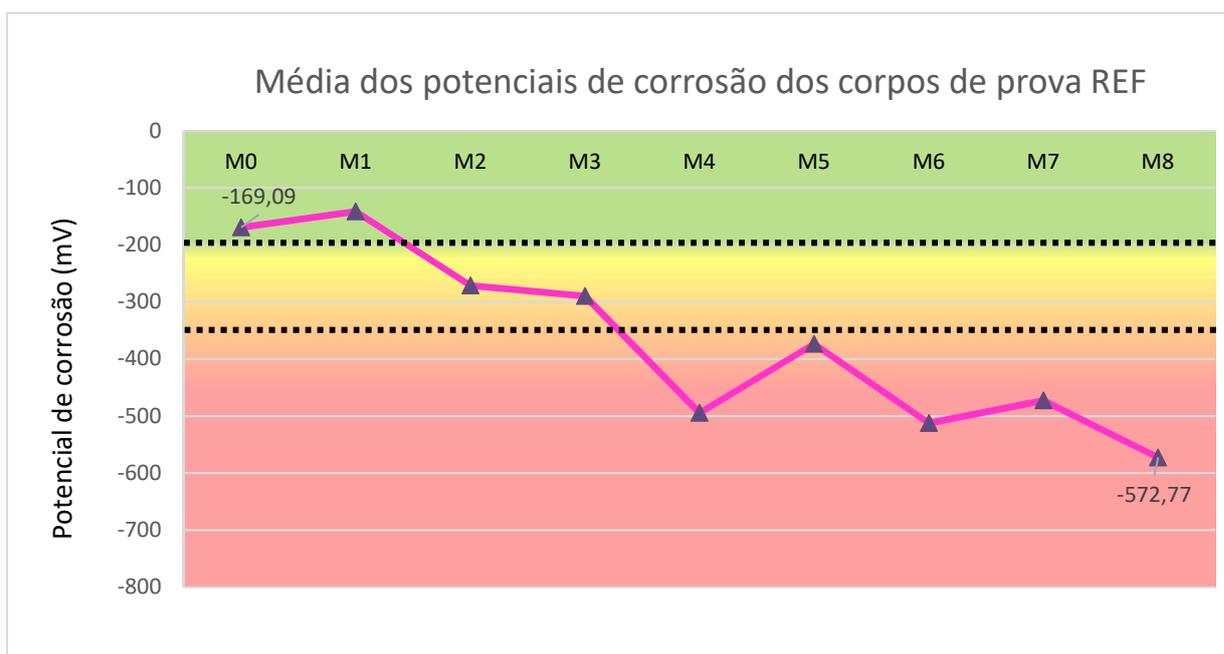


Tabela 26 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EAPO.

MÉDIA DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA EAPO			
Medição	Potencial de corrosão (mV)	Desvio padrão (mV)	Coef. de variação (%)
M0 (inicial)	-170,83	30,22	17,69
M1	-184,13	71,31	38,73
M2	-582,63	40,84	7,01
M3	-321,58	44,61	13,87
M4	-549,11	62,33	11,35
M5	-366,21	133,08	36,34
M6	-584,68	36,08	6,17
M7	-368,68	99,22	26,91
M8 (final)	-631,40	51,52	8,16
Média			18,47

Figura 57 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EAPO.

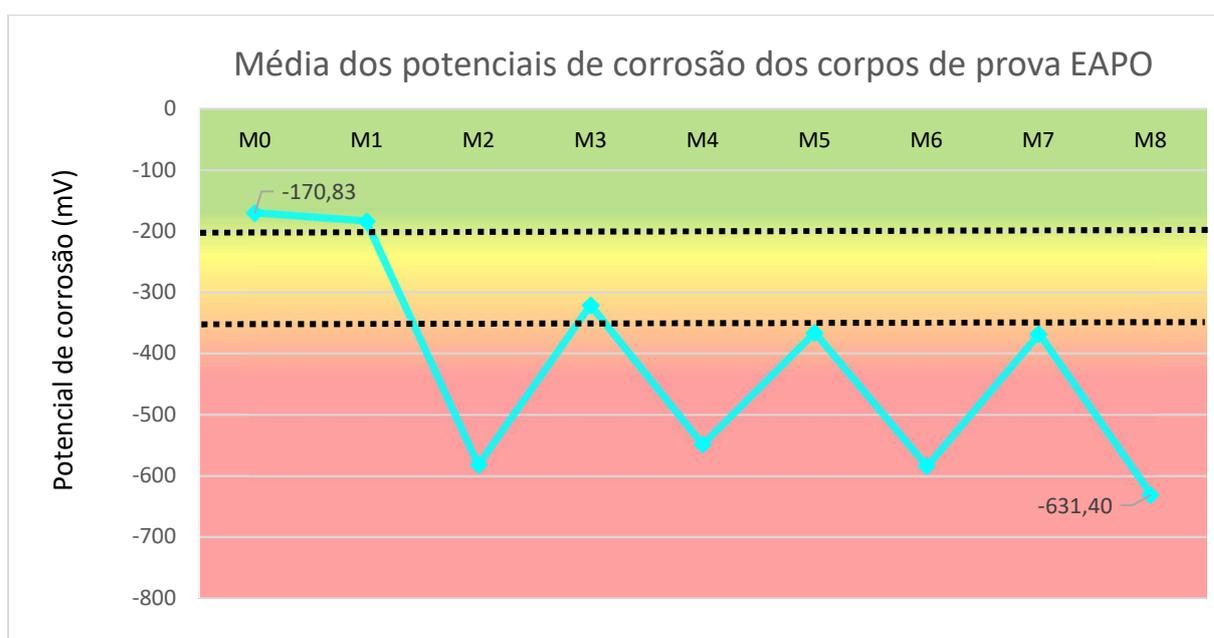


Tabela 27 - Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova com espaçadores industrializados de argamassa.

MÉDIA DO POTENCIAL DE CORROSÃO DOS CORPOS DE PROVA COM EIA			
Medição	Potencial de corrosão (mV)	Desvio padrão (mV)	Coef. de variação (%)
M0 (inicial)	-101,38	27,75	27,37
M1	-435,85	163,48	37,51
M2	-525,27	89,06	16,96
M3	-353,68	139,09	39,33
M4	-617,23	62,31	10,09
M5	-519,08	75,80	14,60
M6	-662,13	79,25	11,97
M7	-568,29	43,84	7,71
M8 (final)	-718,27	58,63	8,16
		Média	19,30

Figura 58 – Resultados da média dos potenciais de corrosão dos corpos de prova EIA.

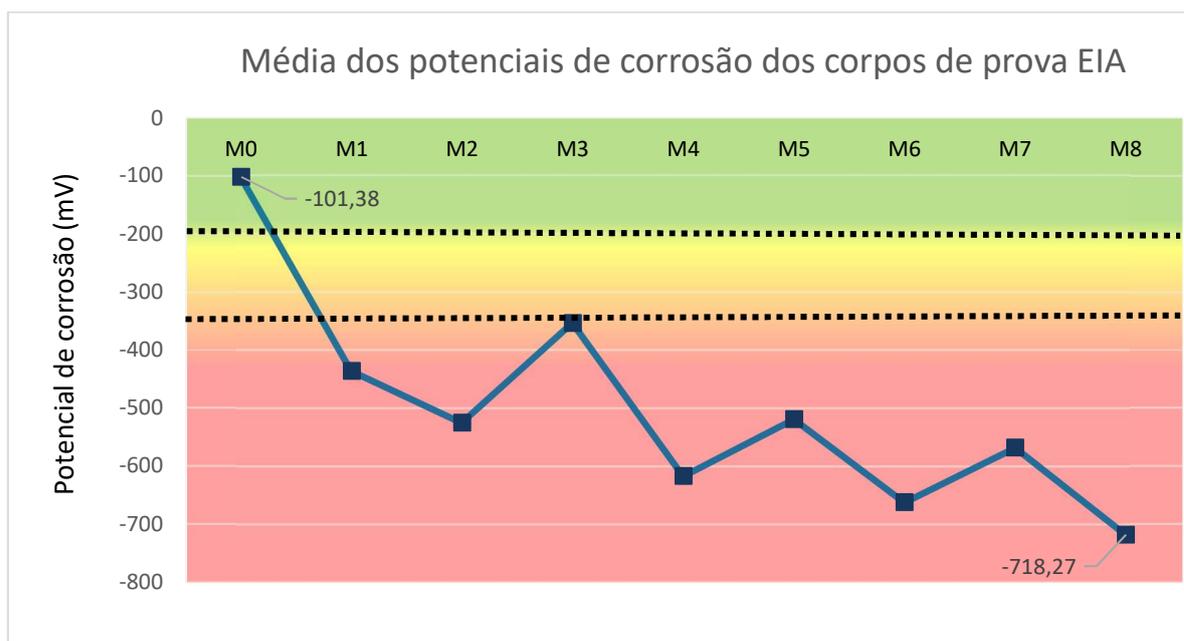
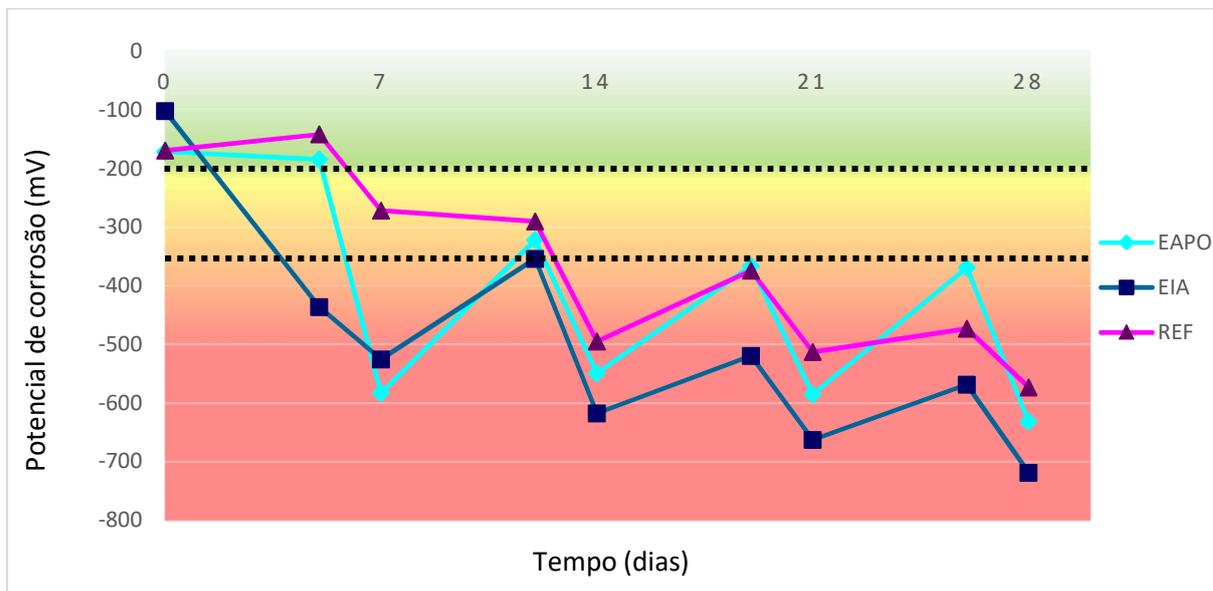


Figura 59 – Resultados da média dos potenciais de corrosão em relação ao tempo dos corpos de prova REF, EAPO e EIA.



Levando em consideração que: no intervalo de 0 à -200 mV a probabilidade de corrosão é igual a 10%, abaixo de -200 mV até -350mV a probabilidade de corrosão é incerta e abaixo de -350 mV a probabilidade de corrosão é igual a 90%, pode-se concluir que os corpos de prova REF apresentaram resultados mais satisfatórios. Essa família, obteve a primeira medida do potencial de corrosão, com probabilidade de 90% de corrosão, na medição M4, aos 14 (quatorze) dias, sendo a que mais retardou o início da despassivação das armaduras. O resultado de sua última medição (M8), foi o menos agressivo, apresentando um valor de -572,77 mV.

Os resultados menos favoráveis foram obtidos pelos corpos de prova EIA. A primeira medida do potencial de corrosão, com probabilidade de 90% de corrosão, ocorreu logo na segunda medição (M1), aos 5 (cinco) dias de ensaio. Essa família foi a que menos retardou o início da corrosão, obtendo o valor final (medição M8) mais agressivo, -718,27 mV, quando comparado aos das demais famílias de corpos de prova. Acredita-se, que isso ocorreu devido a média da variação dimensional, dos espaçadores utilizados nessa família, não atingirem o cobrimento de 2,5 cm (Tabela 12). Enquanto que a média dos espaçadores de argamassa produzidos em obra, ultrapassaram esse valor.

Apesar dos corpos de prova EAPO não possuírem os potenciais de corrosão mais agressivos, os resultados coletados são de grande relevância. Essa família, apresentou a condição de despassivação das armaduras, a partir da terceira medição (M2), aos 7 (sete) dias,

e obteve um valor final (medição M8) de -631,40 mV. Evidenciando, que a presença de espaçadores no concreto armado influencia diretamente na corrosão de armaduras.

Os dados coletados enfatizam a necessidade de um maior rigor e controle de qualidade na produção dos espaçadores.

4.5 Ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata

Após o rompimento axial dos corpos de prova, foi realizado o ensaio colorimétrico, na superfície de suas fraturas, aspergindo uma solução de nitrato de prata. Aproximadamente 100% das amostras, não apresentaram manchas amarronzadas bem definidas (Figura 52). Concluindo, que ao final da indução da corrosão, os corpos de prova já estavam impregnados pelos os íons cloreto livres.

4.6 Perda de massa gravimétrica

Após todas as pesagens das armaduras, foi possível analisar qual família de corpo de prova apresentou a maior perda de massa gravimétrica, após o processo da corrosão. A média da porcentagem da perda de massa, para cada barra de aço, de cada família, encontra-se na Tabela 28 a seguir.

Tabela 28 – Perda de massa gravimétrica média dos corpos de prova prismáticos.

PERDA DE MASSA GRAVIMÉTRICA			
Corpo de prova	Barra	Perda de massa média (%)	Média das barras
REF	B1	0,44	0,57
	B2	0,70	
EAPO	B1	0,57	0,65
	B2	0,73	
EIA	B1	0,75	0,83
	B2	0,90	

Nota-se que a perda de massa gravimétrica vai de encontro com os resultados dos potenciais de corrosão, onde a maior perda de massa ocorreu nos corpos de prova EIA. Os valores mais baixos foram dos corpos de prova REF.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho em questão, desenvolveu uma avaliação do efeito da utilização de dois tipos de espaçadores nas estruturas de concreto armado, analisando sua interferência na corrosão de armaduras, frente ao ataque de íons cloreto.

Esse trabalho evidenciou a importância de uma maior análise e estudo dos espaçadores. Apesar de serem itens de uso comum e fundamentais para qualquer projeto de engenharia civil, ainda há uma deficiência na literatura atual, tanto nacional, quanto internacional. Também não há uma norma nacional, que regule a qualidade desses produtos encontrados facilmente no mercado.

- Os ensaios de caracterização dos corpos de prova auxiliaram na interpretação dos resultados finais dos ensaios;
- A análise da variação dimensional dos espaçadores, comprovou que os espaçadores industrializados de argamassa, em sua maioria, não atingiram o cobrimento solicitado de 2,5 cm;
- A análise da variação dimensional dos espaçadores, comprovou que os espaçadores de argamassa produzidos em obra, em sua maioria, ultrapassaram o cobrimento solicitado de 2,5 cm;
- A utilização do ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica, foi constatado que a presença dos espaçadores gera uma descontinuidade considerável no interior do concreto;
- Os resultados do ensaio de determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica apontaram, que a família dos corpos de prova menos homogêneos, foi a EAPO. Isso pode ser explicado, por suas dimensões ultrapassarem as dimensões dos espaçadores industrializados de argamassa;
- O método da indução da penetração íons cloreto, por meio de ciclos de secagem e imersão parcial mostrou importante eficiência. Tendo em vista, que todas as barras de aço passaram da condição de passividade para a condição de corrosão de armaduras;
- Sobre o ensaio do potencial de corrosão, através do equipamento CANIN+, mostrou-se satisfatório, possuindo facilidade, precisão e agilidade na realização;

- Após as leituras dos potenciais de corrosão, os corpos de prova REF apresentaram resultados mais satisfatórios. Essa família, obteve a primeira medida do potencial de corrosão, com probabilidade de 90% de corrosão, na medição M4, aos 14 dias, sendo a que mais retardou o início da despassivação das armaduras. O resultado de sua última medição (M8), foi o menos agressivo, apresentando um valor de -572,77 mV;
- Ainda tratando das leituras dos potenciais de corrosão, foram obtidos pelos corpos de prova EIA. A primeira medida do potencial de corrosão, com probabilidade de 90% de corrosão, ocorreu logo na segunda medição (M1) aos 5 dias de ensaio. Essa família foi a que menos retardou o início da corrosão, obtendo o valor final (medição M8) mais agressivo, -718,27 mV. Acredita-se, que isso ocorreu, devido a maioria desses espaçadores não atingirem o cobrimento de 2,5 cm. Enquanto que a maioria dos espaçadores de argamassa produzidos em obra, ultrapassaram esse valor;
- Apesar dos corpos de prova EAPO não possuírem os potenciais de corrosão mais agressivos, essa família apresentou a condição de despassivação das armaduras, a partir da terceira medição (M2) aos 7 dias de ensaio, obtendo um valor final (medição M8) de -631,40 mV;
- Analisando todos os resultados das leituras dos potenciais de corrosão, conclui-se que a presença de espaçadores no concreto armado influencia diretamente na corrosão de armaduras;
- O ensaio de presença de cloretos pelo método colorimétrico com nitrato de prata evidenciou a presença dos íons cloreto livres nas amostras. Onde, aproximadamente 100% das amostras, não apresentaram manchas amarronzadas bem definidas. Concluindo, que ao final da indução da corrosão, os corpos de prova já estavam impregnados pelos os íons cloreto livres.
- A perda de massa gravimétrica vai de encontro com os resultados dos potenciais de corrosão, onde a maior perda de massa ocorreu nos corpos de prova EIA e a menor perda foram dos corpos de prova REF.

A análise da influência dos espaçadores como facilitadores e aceleradores da corrosão de armaduras, ainda é uma abordagem muito superficial e escassa.

Após realização de todos os estudos e ensaios nesse trabalho, pode-se concluir que os espaçadores influenciam diretamente na entrada de íons cloreto no concreto, intensificando a velocidade da corrosão. E, que os espaçadores industrializados de argamassa apresentaram um desempenho inferior em relação àqueles de argamassa produzidos em obra.

Por fim, é preciso que os estudos futuros de corrosão levem em conta a presença dos espaçadores nas estruturas de concreto, a fim de que seja possível projetar com mais segurança e com uma vida útil mais elevada.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Criar e/ou adequar um modelo de espaçador que minimize os efeitos da entrada de íons cloreto na estrutura;
- Fazer uma análise com outros modelos de espaçadores e diferentes espessuras de cobrimento;
- Utilizar outros métodos de indução da penetração íons cloreto;
Analisar a aderência entre o espaçador e o concreto, verificando a sua influência na corrosão de armaduras.

REFERÊNCIAS

- ACI 201.2R **Guide to Durable Concrete: reported by ACI Committee 201**. 2008. p. 1-53.
- ACI COMMITTEE 222 R-96. **Corrosion of metals in concrete**. ACI 222R-96. Manual of Concrete Practice 2000 on CD-ROM. American Concrete Institute.
- ACI 365 **Service-Life Prediction – State-of-the-Art Report**. ACI Committee 365. ACI 365.2R-00. 2000.
- ADAMATTI, Deise Santos. **Análise da eficiência de espaçadores no concreto armado: Impacto da corrosão por íons cloreto em diferentes condições de exposição**. 2016. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.
- 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**, [s.l.], v. 87, p.31-44, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.006>.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM C 876 (2015). **“Standard test method for half cell potential of uncoated reinforcing steel in concrete”**. Annual Book of ASTM Standards, Philadelphia, 2015.
- ANDRADE, C.; GONZALEZ, J. A. **Tendências Actuales en la Investigación sobre Corrosion de Armaduras**. Revista Informes de la Construcción, Madrid, v. 40, n. 398, p. 7-14, nov.-dic. 1988.
- ANDRADE, Caroline Bastos Furtado. **Manifestações patológicas das estruturas de concreto armado**. 2013. 42 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- ANDRADE, Tibério; SILVA, Angelo Just da Costa. **Considerações sobre durabilidade, patologia e manutenção das estruturas**. In: ISAIA, Geraldo. **Concreto – Ensino, Pesquisa e Realizações**. São Paulo: Ibracon, 2005.

ARIVABENE, Antonio Cesar. **Patologias em Estruturas de Concreto Armado Estudo de Caso**. 2015. 22 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Instituto de Pós-graduação – Ipog, Vitoria, 2015.

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. NBR 5738: **Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro: 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: **Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211: **Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8802: **Concreto endurecido - determinação da velocidade de propagação da onda ultrassônica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9778: **Argamassa e concreto endurecidos- Determinação da Absorção de Água, Índice de Vazios e Massa Específica**. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9779: **Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12655: **Concreto de cimento Portland. Preparo, controle e recebimento. Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15575: **Edificações Habitacionais – Desempenho Parte 1: Requisitos Gerais - Referências - Elaboração**. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15577-1: **Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto**. Rio de Janeiro, 2008.

ASTM G1-03. Standard practice for preparing, cleaning and evaluation corrosion test specimens. ASTM – **American Society for Testing and Materials**, 2003.

BARRETO, Maria Fernanda Fávero Menna. **Avaliação de desempenho de espaçadores plásticos: proposição e avanço de métodos de avaliação**. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BAZAN, G.C.G. **Análise do cobrimento e carbonatação em obras de arte especiais no estado de São Paulo**. Trabalho de Conclusão de curso. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo: 2014, 151 p.

BOHNI, H. **Corrosion in reinforced concrete structures**. Cambridge = Woodhead, 248 p. 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 7973: **Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification – Part 1: Product performance requirements**. UK, 2001.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI). BS 7973: **Spacers and chairs for steel reinforcement and their specification – Part 2: Fixing and application of spacers and chairs and tying of reinforcement**. UK, 2001.

CÁNOVAS, M. F., **Patologia e terapia do concreto armado**. Ed. Pini, São Paulo, 1988.

CARMONA, T.G. **Modelos de previsão da despassivação das armaduras em estruturas de concreto sujeitas à carbonatação**. 2005. 103f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

CARVALHO, Leonardo Gomes de Sá. **Resistência à corrosão dos aços ca-24 e ca-50 frente à ação dos cloretos**. 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.

CASCUDO, O. **Influência das características do aço carbono destinado ao uso como armaduras para concreto armado no comportamento frente à corrosão.** 2000. 310p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo.

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

CEB-FIP Bulletin 53 – **Model code for structural concrete: textbook on behaviour, design and performance.** Volume 3: Design of durable concrete structures. Lausanne, p. 390, 2009.

CEB-FIP Model Code 1990. **Design Code.** Lausanne: CEB, p. 437, 1993.

CEB-FIP Model Code 2006. **Model code for service life design.** Lausanne, CEB, Bulletin n. 34, p. 116, 2006.

COMITE EURO-INTERNATIONAL DU BETON – CEB. **Bulletin d'Information.** Paris, 1989. n.192.

COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BÉTON. CEB-FIP: **Model code for concrete structures.** Paris: Bulletin D'Information, n. 203-205, 1990, July.

COMISIÓN PERMANENTE DEL HORMIGÓN. Ministerio de Fomento. EHE: **Instrucción española de hormigón armado (EHE),** Madrid: Centro de Publicaciones, 2008;

COMPANHIA de TECNOLOGIA de SANEAMENTO AMBIENTAL do ESTADO de SÃO PAULO (CETESB). **Agressividade do Meio ao Concreto.** CETESB L1 007. São Paulo: CETESB, 1995.

COSTA, Valéria Conceição Mouro. **Influência da corrosão generalizada na aderência e comportamento estrutural de elementos de concreto armado.** 2012. 198 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

DIAMOND, S. **Delayed ettringite formation: processes and problems.** Cement and concrete composites, v. 18, p. 205-215, 1996.

EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION (CEN). **Betão: Parte 1 – Especificação, desempenho, produção e conformidade.** EN 206-1, Portugal, 2007.

FELIU, S.; GONZÁLEZ, J.A.; ANDRADE, C., FELIU, V. **The determination of the corrosion rate of steel in concrete by a non-stationary method.** Corrosion Science, v.30, n.10, p.989-998, 1990.

General principles on the design of structures for durability. ISO 13823. 2008.

GENTIL, V. **Corrosão.** Rio de Janeiro: LTC, 2003. 341 p.

GENTIL, V. **Corrosão.** 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GONÇALVES, Eduardo Albuquerque Buys. **Estudo de patologias e suas causas nas estruturas de concreto armado de obras de edificações.** 2015. 174 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** São Paulo, 1993. Tese (Livre Docente), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil.

HELENE, P.R.L. **Corrosão em armaduras para concreto armado.** São Paulo, SP: Pini: Instituto de Pesquisas Tecnológicas, 1986.

HELENE, P. R. L. **Introdução da vida útil no projeto das estruturas de concreto.** WORKSHOP SOBRE DURABILIDADE DAS CONSTRUÇÕES. São José dos Campos, 2001.

HELENE, P. **Manutenção para Reparo, Reforço e Proteção de Estruturas de Concreto.** Pini, 2ªed. São Paulo, 1992.

HELENE, Paulo Roberto Lago; PEREIRA, Fernanda. **Rehabilitación y mantenimiento de estructuras de concreto.** São Paulo, 2007.

HELENE, Paulo, R. do Lago. **Vida útil das estruturas de concreto.** In: High performance concrete: Performance and quality of concrete structures, 2., 1999, Gramado. Anais... Gramado: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, American Concrete Institute, 1999. (Keynote paper)

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

HOBBS, D.W. **Expansion and cracking in concrete associated with delayed Ettringite formation.** In: ERLIN, Bernard (editor). *Ettringite: the sometimes host of destruction.* Michigan, USA: American Concrete Institute, 1999, p. 159-182.

HUERTA, E. O. **Corrosión y degradación de materiales.** Spain/Madrid: SÍNTESIS, 1997. 366 p.

La Agressividad del Medio y la Durabilidad del Hormigón. Revista Hormigón, Barcelona, n. 10, p. 25-35, 1983.

LAPA, J. S. **Patologia, recuperação e reparação das estruturas de concreto armado.** 2008. 56f. Monografia (Construção civil). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

LIBERATI, Elyson Andrew Pozo. **Modelo de confiabilidade aplicados à análise de estruturas de concreto armado submetidas à penetração de cloretos.** 2014. 143 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

MARAN, Ana Paula. **Análise da influência da distribuição de espaçadores na garantia da espessura de cobertura especificada em lajes de concreto armado.** 2015. 123 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MARQUES, Camila de Souza. **Análise crítica da norma de desempenho, abnt nbr 15575: 2013 com ênfase em durabilidade e manutenibilidade.** 2015. 74 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. *Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto.* In: ISAIA, Geraldo Cechella. **Concreto: Ciência e Tecnologia.** São Paulo: Ibracon, 2011. Cap. 22. p. 1-37.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais.** 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, Diagnóstico e Prevenção.** João Pessoa: IFPB, 2017.

MELO, Sandra Kurotusch de. **Estudo da formação da etringita tardia em concreto por calor de hidratação do cimento.** 2010. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.

MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. **Avaliação do método de extração eletroquímica de cloretos para reabilitação de estruturas de concreto com problemas de corrosão de armaduras.** 2002. 229 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

MONTEIRO, Eliana Cristina Barreto. **Manifestações patológicas em estruturas de concreto.** Recife: Upe/poli, 2017. 66 slides, color.

MOREIRA, A.R; PANOSSIAN, Z. **Ensaio acelerado Cíclicos de Corrosão – Revisão Bibliográfica.**, In: Nace Brazil and colóquio nacional de corrosão, 3., 1999, São Paulo. Anais... / e / Tratamento de Superfície, São Paulo, v. 20, n. 98, p. 26-29, 32-38, nov./dez.1999.

MUSLIM, F. et al. **Effect of reinforcement spacers on mass transport properties of concrete containing supplementary cementitious materials.** In: Cement and concrete science conference, 36., 2016, Cardiff. **Conference paper.** Cardiff: Researchgate, 2016. p. 1 - 4.

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

OLIVEIRA, André Batista. **Cobrimento de armaduras de estruturas de concreto armado: levantamento de critérios adotados na utilização de espaçadores.** 2014. 89 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

OLIVEIRA, Daniel Ferreira. **Levantamento de causas de patologias na construção civil.** 2013. 107 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

OLIVEIRA, Marta. **Norma de Projeto de Estruturas de Concreto é reconhecida internacionalmente.** 2015. Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/cms/imprensa/banco-de-pautas/norma-de-projeto-de-estruturas-de-concreto-e-reconhecida-internacionalmente-2/>>. Acesso em: 29 maio 2018.

Performance standards in building – **Principles for their preparation and factors to be considered.** ISO 6241. 1984.

PINTAN, N. M.; BERENQUER, R. A.; SILVA, A. J. C. E.; LINS, C. M. M. S.; MONTEIRO, E. C. B. **Pathological manifestations and the study of corrosion present on bridges on the city of Recife.** The Electronic Journal of Geotechnical Engineering, v. 20, p. 11893-11907, 2015.

POGLIALLI, F.S.J. **Durabilidade de estruturas de concreto em usinas siderúrgicas.** Monografia. Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2009, 81 p.

POLITO, Giulliano. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, prevenção e recuperação.** Monografia (Aperfeiçoamento/Especialização), Especialização em Construção Civil – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

POURBAIX, M. **Curso sobre corrosão eletroquímica.** Lisboa: Instituto Nacional de Investigação Industrial. 1961. 90p.

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.

RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

ROCHA, Bruno dos Santos. **Manifestações patológicas e avaliação de estruturas de concreto armado.** 2015. 76 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais., Belo Horizonte, 2015.

ROSTAM, Steen. **Service Life Design - The European Approach.** USA, Revista Concrete International, v. 15, n. 7, p. 24-32, July 1993.

SANTOS, Aleílson Vilas Bôas dos. **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação.** 2015. 21 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Civil, Instituto de Pós-graduação - Ipog, Salvador, 2015.

SANTOS, M. R. G., **Deterioração das estruturas de concreto armado – estudo de caso.** 2012. 122f. Monografia (Curso de Especialização em Construção Civil) Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

SILVA, Djalma Ribeiro. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado, visando a melhoria de sua durabilidade.** 2006. 195 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, Otávio Saraiva Pinto da. **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. 84 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

SILVA, S. H. Lopes da et al. **Escolha do tipo de cimento capaz de proteger o concreto quanto à corrosão das armaduras sob ação de íons cloreto através de análise hierárquica.** Revista Latino-americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação da Construção, Mérida, v. 5, n. 3, p.174-189, dez. 2015.

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

STRØMME, Øyvind. **Influence of cracks and spacers on chloride penetration and reinforcement corrosion in concrete.** 2017. 118 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Civil and Environmental Engineering, Department of Structural Engineering, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, 2017.

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, Lisiane Morfeo. **Estudo do processo de corrosão por íons cloreto no concreto armado utilizando armaduras comuns e galvanizadas.** 2006. 151 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia e Tecnologia de Materiais, Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry.** London: Thomas Telford, 2nd edition, 1997.

TAYLOR, H.F.W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K.L. **Delayed ettringite formation.** Cement and concrete research, v. 31, p. 683-693, 2001.

TORRES, Ariela Silva. **Corrosão por cloretos em estrutura de concreto armado: uma meta-análise**. 2011. 186 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TRINDADE, D. S. **Patologia em estruturas de concreto armado**. 2015. 88f. TCC (Graduação) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2015.

TUTIKIAN, Bernardo; PACHECO, Marcelo. **Inspeção, Diagnóstico e Prognóstico na Construção Civil**. Boletín Técnico nº 1 – Asociación Latinoamericana de Control de Calidad, Patología e Recuperación de la Construcción – ALCONPAT Int. Março, 2013. 17p.

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

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.