



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**SUZANY MARQUES DA SILVA CHAVES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DE INIBIDORES  
DE CORROSÃO EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO**

Recife - PE  
2016



**UNIVERSIDADE DE PERNAMBUCO**  
**ESCOLA POLITÉCNICA DE PERNAMBUCO**  
**Departamento de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

**SUZANY MARQUES DA SILVA CHAVES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DE INIBIDORES  
DE CORROSÃO EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Civil

Orientadora:  
Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Eliana Cristina Barreto Monteiro

Recife - PE  
2016

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Universidade de Pernambuco – Recife

C512a Chaves, Suzany Marques da Silva  
Análise comparativa da eficiência do uso de inibidores de corrosão em corpos de prova de concreto armado./Suzany Marques da Silva Chaves. – Recife: UPE, Escola Politécnica, 2016.  
83 f.: il

Orientador: Profa. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro  
Dissertação (Mestrado - Construção Civil) Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2016.

1. Inibidores de corrosão 2. Corrosão de armaduras 3. Eficiência de inibidores. - Dissertação I. Monteiro, Eliana Cristina Barreto (orient.) II. Universidade de Pernambuco, Escola Politécnica, Mestrado em Construção Civil. III. Título.

CDD: 620.11223

**SUZANY MARQUES DA SILVA CHAVES**

**ANÁLISE COMPARATIVA DA EFICIÊNCIA DO USO DE INIBIDORES DE  
CORROSÃO EM CORPOS DE PROVA DE CONCRETO ARMADO**

BANCA EXAMINADORA:

**Orientadora:**

*Eliana Monteiro*

\_\_\_\_\_  
Prof. Dra. Eliana Cristina Barreto Monteiro  
Universidade de Pernambuco

**Examinadores:**

*Willames de Albuquerque Soares*

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Willames de Albuquerque Soares  
Universidade de Pernambuco

*Romilde Almeida de Oliveira*

\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Romilde Almeida de Oliveira  
Universidade Católica de Pernambuco

Recife, PE  
2016

## DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Ricardo e Marluce, a  
minha saudosa avó Adélia, e a Deus,  
por todas as coisas.*

## AGRADECIMENTOS

Ao meu querido pai Ricardo Chaves, grande incentivador, que me fez acreditar que todo esforço vale a pena, principalmente quando se faz o que gosta.

A minha querida mãe Marluce Chaves, pela determinação de sempre, a qual me apresentou a realidade, os caminhos difíceis e necessários que devemos atravessar, sem perder a força e coragem, e por toda dedicação transmitida.

A Suellen e Suenen, irmãs a quem amo incondicionalmente e a Edgar Almeida, pelo carinho, compreensão e amor de sempre.

Aos meus amigos, colegas de turma, em especial a Camila Siqueira e Demócrito Neto, que me ajudaram e acompanharam de perto minha caminhada, obrigada pelas boas risadas, pelo companheirismo e momentos de descontração.

A minha querida orientadora, professora Eliana Cristina Barreto Monteiro, por toda atenção dedicada, comprometimento, conhecimentos transmitidos e pela crença em meu potencial.

À CAPES, pelo financiamento da bolsa de estudo para o desenvolvimento desta pesquisa.

E a todos os professores e funcionários da Escola Politécnica de Pernambuco, pela assistência prestada durante minha trajetória acadêmica.

“Há pessoas que desejam saber só por saber, e isso é curiosidade; outras, para alcançarem fama, e isso é vaidade; outras, para enriquecerem com a sua ciência, e isso é um negócio torpe; outras para serem edificadas, e isso é prudência; outras, para edificarem os outros, e isso é amor.”

*São Tomás de Aquino*

## RESUMO

A corrosão é um tipo de manifestação patológica bastante frequente nas estruturas de concreto armado, capaz de reduzir a vida útil das peças armadas até causar insegurança aos usuários. Na intenção de oferecer durabilidade às estruturas, foram desenvolvidos produtos químicos com o objetivo de retardar esse processo degradante, são os chamados inibidores de corrosão. Este trabalho apresenta análises da eficiência de três tipos de inibidores disponíveis no mercado. Para tal, foram moldados corpos de prova com diferentes relações água/cimento, produzidos com e sem os inibidores de corrosão, submetidos a um processo acelerado de corrosão através de imersão parcial (solução contendo cloretos) e secagem em estufa. Para avaliação dos resultados, foram realizados os ensaios de resistividade elétrica, absorção por imersão e absorção capilar. Desse modo, os inibidores foram avaliados em termos de suas respectivas eficiências frente às variáveis impostas. Observou-se que os corpos de prova sob ação do inibidor misturado à água de amassamento foram os que apresentaram menor probabilidade de ocorrência de corrosão, uma vez que foi reduzida a penetração de água e agentes externos no interior das amostras estudadas.

**Palavras-chaves:** concreto; corrosão; inibidores.



## ABSTRACT

Corrosion is a type of pathological manifestation quite frequent in reinforced concrete structures, capable of reducing the lifespan of the armed parts to cause insecurity to users. In order to provide durability to structures, chemical products have been developed with the aim of slowing down this process. Demeaning, are so-called corrosion inhibitors. This paper presents analysis of three types of inhibitors efficiency available on the market. To this end, were shaped specimens with different water/cement ratios, produced with and without corrosion inhibitors, subjected to an accelerated process of corrosion through partial immersion (solution containing chlorides) and kiln drying. For evaluation of the results, the testing of electrical resistivity, absorption by immersion and capillary absorption. Thereby, the inhibitors were evaluated in terms of their respective front efficiencies to the variables imposed. It was observed that the specimens under mixed inhibitor to water action of kneading were the ones who showed lower probability of occurrence, since it has been reduced to water penetration and external agents within the studied samples.

**Keywords:** concrete; corrosion; inhibitors.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Lei de evolução de custos de manutenção das estruturas .....	18
Figura 2 - Macroestrutura do concreto .....	22
Figura 3 - Relação entre desempenho e durabilidade .....	28
Figura 4 - Modelo de representação da duração da vida útil.....	32
Figura 5 - Esquema da morfologia da corrosão: (a) corrosão generalizada; (b) corrosão localizada por pite; (c) corrosão localizada sob tensão. ....	34
Figura 6 - Mecanismo de funcionamento da difusão iônica por diferença de concentração de cloretos.....	41
Figura 7 - Mecanismo de funcionamento da migração por diferença de potencial .....	42
Figura 8 - Ensaio granulométrico do agregado miúdo.....	52
Figura 9 - Resultado do Ensaio granulométrico do agregado miúdo .....	53
Figura 10 - Imersão das barras de aço em solução de ácido clorídrico .....	55
Figura 11 - Escovação das barras de aço .....	55
Figura 12 - Imersão em solução de acetona .....	56
Figura 13 - Secagem das barras de aço e armazenamento em depósito com sílica.....	56
Figura 14 - Corpos-de-prova do tipo cilíndrico, moldados e identificados. ....	59
Figura 15 - Cura úmida (imersão total) dos corpos de prova .....	59
Figura 16 - Aplicação do inibidor químico do tipo impregnante por pintura. .....	60
Figura 17 - Representação esquemática do processo acelerado de corrosão em laboratório.....	62
Figura 18 - Princípio de funcionamento – Método Wenner .....	63
Figura 19 - Corpos de prova com relação a/c = 0,45 .....	67
Figura 20 - Corpos de prova com relação a/c = 0,65 .....	67
Figura 21 - Corpos de prova de referência com relação a/c = 0,45 e a/c = 0,65 .....	68
Figura 22 - corpos de prova P1 com relação a/c = 0,45 e a/c = 0,65.....	69
Figura 23 - corpos de prova P2 com relação a/c = 0,45 e a/c = 0,65.....	70
Figura 24 - corpos de prova AA com relação a/c = 0,45 e a/c = 0,65 .....	71

Figura 25 - Resultado da absorção de água por imersão dos corpos de prova com relação $a/c = 0,45$ .....	72
Figura 26 - Resultado da absorção de água por imersão dos corpos de prova com relação $a/c = 0,65$ .....	73
Figura 27 - Resultado da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com relação $a/c = 0,45$ .....	74
Figura 28 - Resultado da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com relação $a/c = 0,65$ .....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Risco de corrosão em função da resistividade.....	44
Tabela 2 - Fatores a serem considerados na seleção do sistema de proteção superficial .....	49
Tabela 3 - Resultado da análise química do cimento CII Z-32 .....	51
Tabela 4 - Resultado das propriedades físicas do cimento CII Z-32.....	52
Tabela 5 - Características do aço CA-60.....	54

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental.....	30
Quadro 2 - Distribuição dos corpos-de-prova por tipo de inibidores.....	57
Quadro 3 - Propriedades dos inibidores de corrosão .....	61

## SUMÁRIO

### CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO .....	16
1.1 Justificativa .....	17
1.2 Objetivos.....	19
1.2.1 Objetivo geral.....	19
1.2.2 Objetivos específicos.....	19
1.3 Estrutura do Trabalho .....	20

### CAPÍTULO 2

REFERENCIAL TEÓRICO .....	21
2.1 Concreto armado .....	21
2.1.1 Macroestrutura do concreto .....	22
2.1.2 Componentes do concreto armado.....	22
2.2 Durabilidade das Estruturas.....	27
2.2.1 Conceito de durabilidade.....	27
2.2.2 Influência do meio ambiente nas estruturas armadas.....	29
2.2.3 Vida útil .....	31
2.3 Corrosão .....	33
2.3.1 Carbonatação .....	35
2.3.2 Íons cloreto.....	37
2.4 Transporte de Massa no Concreto.....	37
2.4.1 Permeabilidade.....	38
2.4.2 Absorção capilar.....	39
2.4.3 Difusão iônica.....	40
2.4.4 Migração.....	41
2.5 Métodos de avaliação do processo corrosivo .....	43
2.5.1 Resistividade elétrica .....	43
2.5.2 Absorção por imersão e por capilaridade .....	44
2.6 Inibidores de corrosão.....	45
2.6.1 Inibidores anódicos.....	47
2.6.2 Inibidores catódicos.....	47
2.6.3 Inibidores mistos .....	48
2.6.4 Requisitos e procedimentos de seleção dos inibidores.....	48

### CAPÍTULO 3

METODOLOGIA.....	51
3.1 Definição dos materiais .....	51
3.1.1 Cimento.....	51
3.1.2 Agregado miúdo .....	52
3.1.3 Agregado graúdo.....	53
3.1.4 Aço .....	53
3.1.5 Água.....	54

3.2	Procedimento experimental.....	54
3.2.1	Etapas preliminares.....	54
3.2.2	Confecção dos corpos de prova.....	57
3.2.3	Cura dos corpos-de-prova .....	59
3.2.4	Inibidores utilizados.....	60
3.2.5	Ciclo acelerado de corrosão em laboratório .....	61
3.3	Ensaio utilizados nas amostras .....	62
3.3.1	Ensaio de Resistividade Elétrica .....	63
3.3.2	Ensaio de absorção de água por capilaridade e por imersão.....	64

## CAPÍTULO 4

	APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	66
4.1	Resistividade elétrica.....	66
4.1.1	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,45 .....	66
4.1.2	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,65 .....	67
4.1.3	Corpos-de-prova de referência com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65 .....	68
4.1.4	Corpos-de-prova P1 com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65 .....	69
4.1.5	Corpos-de-prova P2 com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65 .....	69
4.1.6	Corpos-de-prova AA1 com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65 .....	70
4.2	Absorção de água por imersão .....	71
4.2.1	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,45 .....	72
4.2.2	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,65 .....	73
4.3	Absorção de água por capilaridade.....	73
4.3.1	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,45 .....	74
4.3.2	Corpos-de-prova com relação a/c = 0,65 .....	74

## CAPÍTULO 5

	CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	76
5.1	Conclusões.....	76
5.2	Sugestões para trabalhos futuros .....	77
	REFERÊNCIAS.....	78

## CAPÍTULO 1

### INTRODUÇÃO

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado é uma das manifestações patológicas que mais agride a estrutura e contribui para redução da sua vida útil.

Os principais fatores apontados por El Hassan *et al.* (2010) como responsáveis pela ocorrência da corrosão, são: deficiências de projeto, espessura de cobrimento insuficiente, especificações e características inadequadas do concreto e de seus materiais constituintes, falhas de execução e manutenção, além da ação agressiva do meio ambiente na qual a estrutura está inserida.

Diante da situação, pesquisas estão sendo realizadas para compreender os aspectos envolvidos e buscam com vigor, experiências e técnicas que consigam ser utilizadas na prevenção contra o mecanismo da corrosão. Além de precauções adequadas com relação à qualidade do concreto e as especificações dos projetos, atualmente estão sendo utilizados aditivos químicos com a função de reduzir a ocorrência da corrosão.

Os aditivos químicos, também conhecidos como inibidores de corrosão, são adicionados durante a preparação do concreto (inseridos na água de amassamento) ou introduzidos através de pintura (impregnação) nas superfícies do concreto, já na sua fase endurecida.

A principal razão pelo crescimento do interesse na utilização dos inibidores de corrosão está nas vantagens oferecidas por este tipo de proteção.

Para Fornazaki *et al.* (2006), além de possuírem baixo custo e facilidade na aplicação, são substâncias propícias ecologicamente e não constituem uma ameaça ao meio ambiente.

No entanto, quando aplicada em dosagens aleatórias e desprovida de estudo, a substância inserida no concreto poderá facilitar à entrada de elementos agressivos ao invés de bloqueá-los, favorecendo dessa maneira, a ocorrência de reações que contribuem para o desencadeamento do processo corrosivo.



Diante do exposto, o trabalho tem o propósito de expandir os conhecimentos acerca dos inibidores, esclarecer os fenômenos que ocorrem no processo de corrosão e, sobretudo, avaliar a eficiência dessas substâncias quando adicionadas ao concreto.

## 1.1 Justificativa

Ultimamente, tem-se observado grande ocorrência de manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado, chamando à atenção do meio técnico por se tratar de defeitos construtivos que surgem, muitas vezes, em intervalos de tempo reduzidos.

Ambientes agressivos, mão de obra desqualificada na construção civil, uso de materiais inapropriados são alguns dos fatores que contribuem diretamente para o aparecimento precoce da corrosão das armaduras.

Resultados de avaliações técnicas realizadas em países ibero-americanos mostraram que o dano devido à corrosão das armaduras está entre as três primeiras causas de deterioração das estruturas de concreto (RINCÓN, 2006).

Em questão de segurança, as estruturas em estado avançado de deterioração decorrente do processo corrosivo podem desmoronar caso não seja realizada a recuperação necessária.

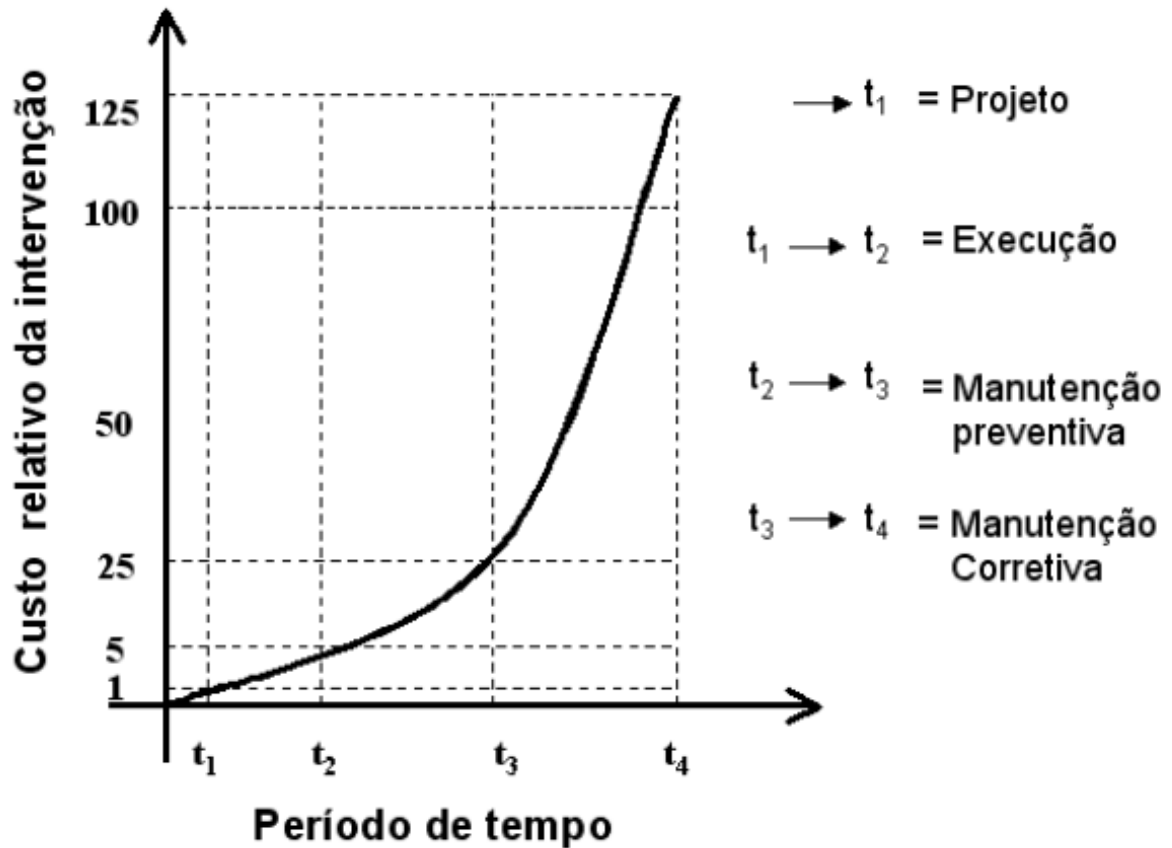
Isso se dá, porque o fenômeno da corrosão reduz a seção das barras de aço, causa a fissuração e o destacamento do cobrimento. Ou seja, a armadura fica exposta, suscetível à formação de produtos de ferrugem e apresenta menor resistência.

No Brasil, é evidente a cultura de só recuperar o que está visivelmente destruído. A grande maioria dos usuários só reflete sobre a necessidade de recuperar a estrutura quando o problema já está instalado, porém, a demora em dar início à manutenção resulta em reparos mais trabalhosos e principalmente, com custo muito elevado.

Tal fato foi representado graficamente por Sitter (1984), na conhecida “Lei da Evolução dos Custos” (Figura 1).

Pelo gráfico, o autor demonstra que os custos com correção crescem segundo uma progressão geométrica de razão cinco, podendo ser, inclusive, superior ao de uma construção nova.

Figura 1 - Lei de evolução de custos de manutenção das estruturas



Fonte: (Sitter, 1984)

Para Villanueva (2015), a maior contribuição da “Lei de Sitter” não está nos valores em si, mas sim na conscientização da cadeia produtiva. Apontando ainda, que o foco do usuário não deve se limitar apenas às fases de projeto e construção, mas também à manutenção preventiva. Só assim, será possível obter uma boa durabilidade do sistema estrutural.

O comércio mundial de reparo e proteção de estruturas de concreto armado vem crescendo, exigindo, segundo Ribeiro (2014), a criação de novas soluções para minimização dos problemas e diminuição nos custos de reparo.

Dessa maneira, o uso de inibidores de corrosão se enquadra como uma opção de potencial melhoria para minimizar a ação do processo corrosivo, contribuindo para o aumento da vida útil das peças armadas.

No entanto, estudos voltados a esse tema ainda são escassos, constituindo um campo que precisa de investigação, de forma a se entender a eficiência desses produtos, que tendem a aumentar a vida útil das estruturas quando bem aplicados.

## 1.2 Objetivos

### *1.2.1 Objetivo geral*

Avaliar a capacidade de proteção dos inibidores de pintura e inibidores adicionados à água de amassamento, quando sujeitos à corrosão das armaduras sob a ação de íons cloreto para corpos de prova com relação água cimento = 0,45 e 0,65.

### *1.2.2 Objetivos específicos*

Para atender ao objetivo proposto, serão desenvolvidos os seguintes objetivos específicos:

- Acelerar o processo de corrosão através de semi-ciclos de secagem e imersão parcial;
- Avaliar a capacidade de proteção dos inibidores através dos ensaios de resistividade, absorção capilar, absorção por imersão;
- Verificar a influência da relação água/cimento nas amostras.

### 1.3 Estrutura do Trabalho

A partir do conhecimento teórico adquirido da revisão bibliográfica e na delimitação do problema de pesquisa, o presente trabalho foi organizado em 5 Capítulos, apresentados a seguir:

O Capítulo 2 refere-se à revisão bibliográfica, contendo considerações acerca do concreto armado, durabilidade da estrutura, agressividade do ambiente, corrosão das armaduras, além da conceituação e tipos de inibidores.

O Capítulo 3 aborda a metodologia do estudo, descrição da escolha dos materiais utilizados e detalhamento do procedimento experimental.

O Capítulo 4 expõe os resultados e discussões pertinentes.

Por fim, as conclusões e sugestões para trabalhos futuros estarão expostas no Capítulo 5

## CAPÍTULO 2

### REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1 Concreto armado

Nas primeiras construções, a pedra natural e a madeira foram os primeiros materiais a serem empregados, sendo o aço e o ferro utilizados séculos depois.

Segundo Carvalho (2008), as primeiras experiências práticas de introduzir ferragens numa massa de concreto, conhecido como “cimento armado”, presume-se ser do francês Joseph Louis Lambot, em 1850.

No Brasil, de acordo com Vieira (2003), a mais antiga publicação sobre o uso de concreto armado, data de 1904.

A combinação de se utilizar o concreto e o aço é interessante e desde então muito utilizada devido às características que os componentes possuem, destacando-se principalmente, a similaridade do coeficiente de expansão térmica desses dois elementos. Além disso, o concreto oferece ao aço, proteção química (pH acima de 12) e física (cobrimento da armadura), para dificultar o ingresso de agentes nocivos e limitar o acesso de água e oxigênio.

Em contrapartida, segundo Vieira *et al.* (2010) o problema é que ao imergir o aço no concreto, se tem todas as condições necessárias a formação de uma pilha eletroquímica: ânodo, cátodo, eletrólito e circuito metálico, fazendo com que os processos corrosivos ocorram se não evitados ou controlados adequadamente.

Em sua fase final já endurecida, a estrutura de concreto armado apresenta-se de forma sólida e robusta, transmitindo a ideia errônea de ser um produto altamente durável e resistente, dessa forma, negligencia-se sua inspeção, manutenção, intervenções (preventivas e corretivas) ou qualquer forma de cuidado, até que ocorra alguma degradação visível e preocupante na estrutura, comprometendo a estabilidade até causar insegurança.

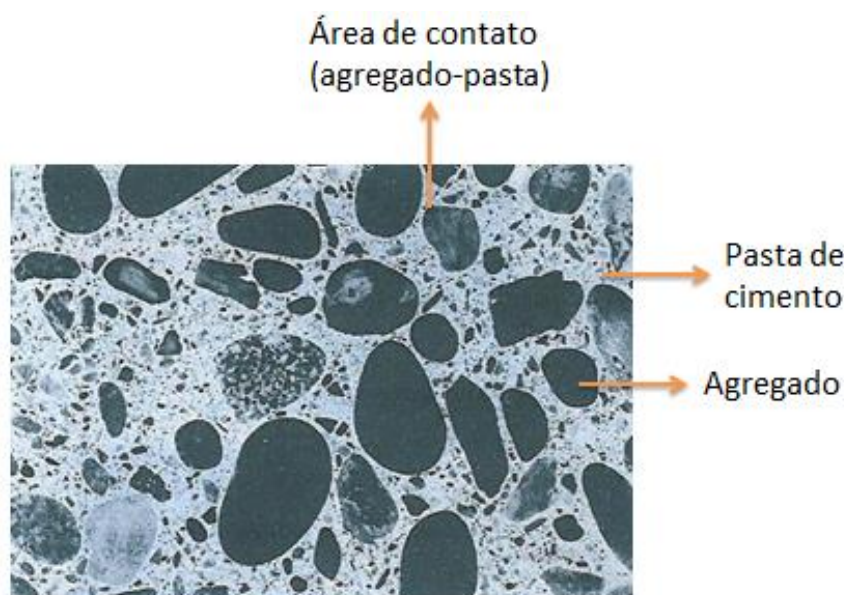
### ***2.1.1 Macroestrutura do concreto***

O concreto é um material que apresenta uma estrutura bastante diversificada e complexa. Sua composição básica é dada pelo cimento, água, agregado miúdo (areia), agregado graúdo (brita) e ar. Podendo também, conter adições (cinza volante, pozolana, sílica ativa, etc.) e aditivos químicos com a finalidade de aprimorar ou modificar suas propriedades.

Observando a macroestrutura do concreto (Figura 2), identificam-se dois componentes principais: a pasta de cimento e o agregado graúdo.

Entretanto, analisando sua microestrutura, distingue-se que a área da pasta de cimento em contato com o agregado graúdo possui características diferentes do restante da pasta, podendo ser considerada como mais um componente do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Figura 2 - Macroestrutura do concreto



Fonte: Mehta e Monteiro, 2014.

### ***2.1.2 Componentes do concreto armado***

#### ***Água***

A água é o componente do concreto responsável pelo desencadeamento das reações químicas do cimento (reações de hidratação) que irão

caracterizar as propriedades de resistência e durabilidade do concreto, além de homogeneizar as demais partículas para proporcionar o manuseio da mistura.

Segundo Freire (2005), a água a ser utilizada no concreto deve ser tratada, não deve apresentar elevada concentração de sais ou resíduos industriais. Do contrário, poderá prejudicar a integridade do concreto. Normalmente, a água aceitável é aquela que apresenta como teores máximos os mesmos que definem as águas potáveis.

De acordo com a NBR 6118 (2014), a água utilizada na confecção do concreto deverá atender aos seguintes limites:

- $5,8 \leq \text{pH} \leq 8,0$
- Resíduo sólido  $\leq 5000 \text{ mg/l}$
- Cloretos ( $\text{Cl}^-$ )  $\leq 500 \text{ mg/l}$
- Matéria orgânica  $\leq 3 \text{ mg/l}$
- Sulfatos  $\leq 300 \text{ mg/l}$
- Açúcar  $\leq 5 \text{ mg/l}$

### *Agregado*

Nas primeiras considerações acerca do agregado, acreditava-se que sua função era unicamente preencher a maior parte da composição do concreto, barateando assim o seu custo dentre os demais componentes constituintes.

No entanto, como bem cita Amorim (2010), muitas propriedades do concreto são influenciadas diretamente pelas características dos agregados, como: porosidade, composição granulométrica, absorção d'água, estabilidade, forma, textura, resistência mecânica e módulo de deformação.

De acordo com Neville e Brooks (2013), os agregados podem ser diferenciados entre naturais e artificiais. Onde, os naturais são aqueles encontrados diretamente na natureza, como: diatomita, pedra-pomes, escória, cinzas vulcânicas e tufos; e os artificiais, aqueles que passam por

algum processo para adquirir características específicas, como as britas obtidas pela trituração de rochas.

Usualmente, os agregados são classificados de acordo com o tamanho dos seus grãos. Conforme conceituação proposta pela NBR 7211 (ABNT, 2009), agregado graúdo refere-se a partículas maiores que 4,8 mm e o termo agregado miúdo às partículas de agregados menores que 4,8mm.

### *Cimento Portland*

O cimento, principal componente do concreto, é um material finamente pulverizado que, sozinho não é um aglomerante, mas desenvolve propriedades ligantes quando hidratado. Um cimento é dito hidráulico quando seus produtos de hidratação são estáveis em meio aquoso.

O Cimento Portland é o cimento hidráulico mais utilizado na fabricação do concreto, consistindo essencialmente de mistura de óxidos de cálcio, silício, alumínio e ferro (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Atualmente, existem vários tipos de cimentos disponíveis no mercado, diferenciando-se pela composição e indicação de uso, são eles:

#### Cimento Portland Comum (CP I)

Segundo conceito proposto pela NBR 5732 (ABNT, 1991), é o aglomerante hidráulico obtido pela moagem do clínquer ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de uma ou mais formas de sulfato de cálcio. São indicados quando não são exigidas características especiais do cimento, possuindo como restrição de uso, locais contendo águas subterrâneas ou sulfatos.

#### Cimento Portland Comum com Adição (CP I - S)

Segundo a NBR 5732 (ABNT, 1991), esse tipo de cimento tem a mesma composição do CP I (clínquer + sulfato de cálcio), porém, com adição reduzida (1% a 5% em massa) de material pozolânico. Assim, tem-se um cimento ligeiramente menos permeável que o comum.



### Cimento Portland Composto com Pozolana (CP II - Z)

A norma brasileira que trata deste tipo de cimento é a NBR 11578 (ABNT, 1991) que o conceitua como o cimento que contém adição de material pozolânico variando de 6% a 14% em massa, que corresponde a um cimento com menor permeabilidade.

São indicados para construções de obras subterrâneas, principalmente com presença de água, inclusive marítima.

Ainda de acordo com a norma, o cimento CP II-Z também pode conter adição de material carbonático (fíler) no limite máximo de 10% em massa.

### Cimento Portland Composto com Escória (CP II-E)

Igualmente com definição prevista na NBR 11578 (ABNT, 1991), o CP II-E é aquele que contém adição de escória granulada de alto-forno, o que lhe confere a propriedade de baixo calor de hidratação. Sua composição corresponde a 94% à 56% (clínquer + sulfato de cálcio) e 6% à 34% de escória, podendo ou não ter adição de material carbonático no limite máximo de 10% em massa.

Sua aplicação é recomendada para estruturas que exijam um desprendimento de calor moderadamente lento ou que possam ser atacadas por sulfatos.

### Cimento Portland Composto com Fíler (CP II-F)

Como estabelece a NBR 11578 (ABNT, 1991), o CP II-F é composto de 90% à 94% (clínquer + sulfato de cálcio) e com adição de 6% a 10% de material carbonático (fíler) em massa, recomendado desde estruturas em concreto armado até argamassas de assentamento e revestimento, porém não é indicado para aplicação em meios agressivos.

### Cimento Portland de Alto-forno (CP III)

O cimento portland de alto-forno, segundo a NBR 5735 (ABNT, 1991) contém adição de escória no teor de 35% a 70% em massa, que lhe confere propriedades como: baixo calor de hidratação, maior impermeabilidade e durabilidade, sendo recomendado tanto para obras de

grande porte e agressividade como também para aplicação geral em argamassas de assentamento e revestimento, estruturas de concreto simples, armado ou protendido.

#### Cimento Portland Pozolânico (CP IV)

A norma que trata desse tipo de cimento é a NBR 5736 (ABNT, 1999) definindo-o como aquele que contém adição de pozolana no teor que varia de 15% a 50% em massa, conferindo ao cimento uma alta impermeabilidade e durabilidade. O concreto confeccionado com o CP IV apresenta resistência mecânica à compressão maior (a longo prazo) quando comparado ao concreto de Cimento Portland Comum. É especialmente indicado para obras expostas à ação de água corrente ou ambientes agressivos, como: barragens, esgotos, peças de grandes dimensões, pilares de pontos, efluentes industriais, dentre outras.

#### Cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V-ARI)

O CP V-ARI assim como o CP-I não contém adições. O que o diferencia deste último, de acordo com a NBR 5733 (ABNT, 1991) é processo de dosagem e produção do clínquer. O CP V-ARI é produzido com um clínquer de dosagem diferenciada de calcário e argila se comparado aos demais tipos de cimento e com moagem mais fina. Esta diferença de produção confere a este tipo de cimento uma alta resistência inicial do concreto em suas primeiras idades. Assim, é o cimento indicado quando se pretende realizar uma desforma rápida de peças de concreto armado.

#### *Aço*

O aço quando introduzido ao concreto, possui a característica de resistir aos esforços de tração.

A NBR 7480 (ABNT, 2007), de acordo com a resistência, classifica os aços em CA-25, CA-50 e CA-60, onde CA significa "Concreto Armado" e a numeração refere-se à sua resistência de escoamento característica em kgf/mm<sup>2</sup>.

## 2.2 Durabilidade das Estruturas

### 2.2.1 *Conceito de durabilidade*

Antigamente, achava-se que a durabilidade era uma propriedade inerente ao concreto, então, não existia ou era mínima a preocupação com as condições de produção, execução e meio ambiente ao qual a obra estaria exposta.

De acordo com Torres (2011), apenas na década de 1970 surgiu a preocupação com o desgaste das estruturas e o questionamento sobre a sua funcionalidade e durabilidade.

As técnicas de projetos e modelos matemáticos para o cálculo de estruturas em concreto armado encontram-se atualmente bem desenvolvidos e consolidados no contexto da engenharia moderna.

No entanto, além dos requisitos de segurança, economia e funcionalidade das estruturas de um modo geral, a durabilidade exerce papel tão importante quanto os demais e precisa, portanto, ser considerada e avaliada já na fase de projeto e concepção (LIBERATI; LEONEL; NOGUEIRA, 2014).

Para a recente norma de desempenho para edificações habitacionais (NBR 15575, ABNT 2013), a durabilidade é conceituada como sendo: “A capacidade da edificação ou de seus sistemas de desempenhar suas funções, ao longo do tempo e sob condições de uso e manutenções específicas no manual de uso, operação e manutenção.”.

Já segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), durabilidade consiste “na capacidade da estrutura resistir às influências ambientais previstas”, ou seja, um material é considerado durável quando consegue resistir aos processos de deterioração (intempéries, ataques químicos, abrasão, etc.) sem, no entanto, perder suas características fundamentais.

Assim, o concreto deverá preservar sua forma, qualidade e capacidade quando exposto ao ambiente ao qual foi projetado.

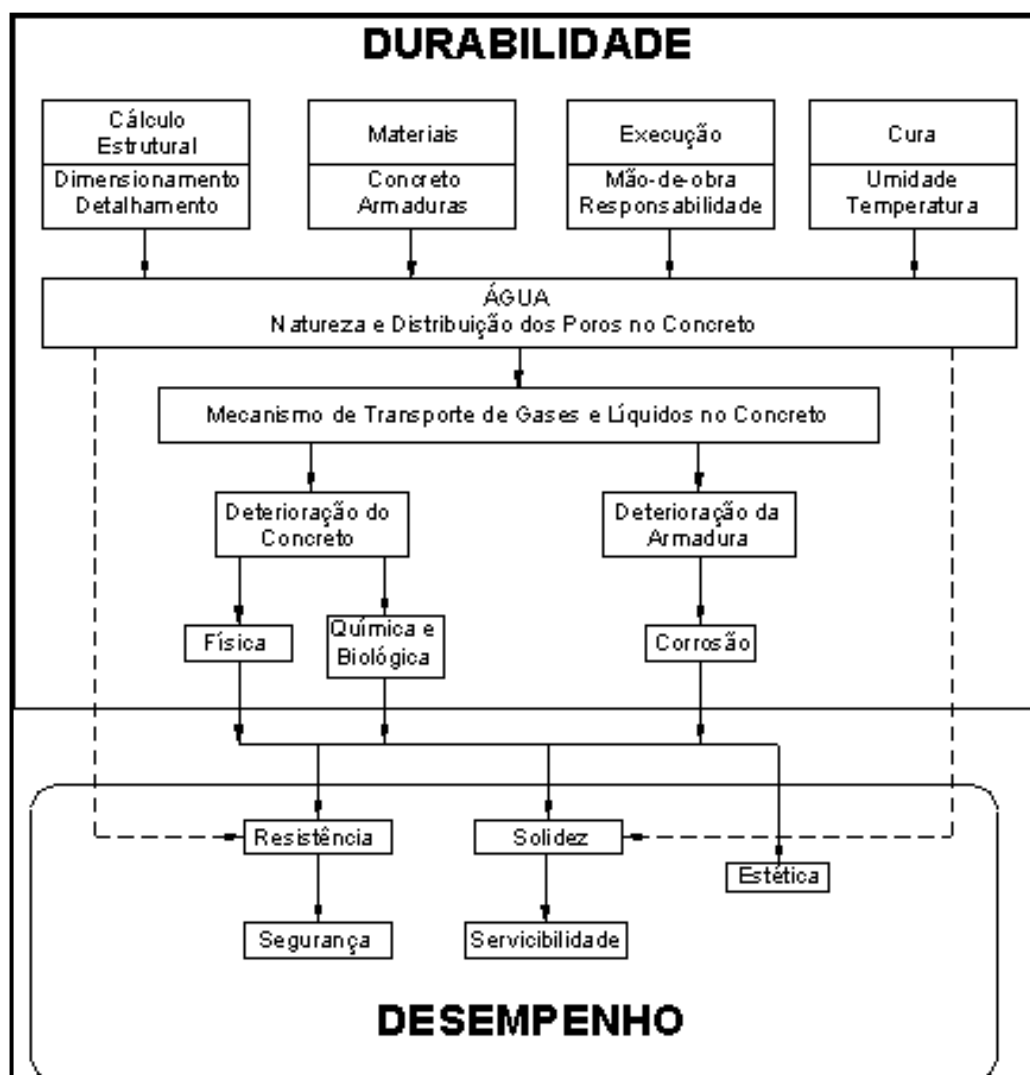
Em complemento, Fusco (2008) afirma que a boa durabilidade do concreto depende de sua fabricação com materiais não expansivos.

A quase totalidade dos mecanismos de agressão ao concreto depende do transporte dos elementos externos de agressão (através de poros e fissuras do concreto) e da existência de dois fatores essenciais: disponibilidade de água no interior da massa de concreto e disponibilidade de oxigênio do ar.

De modo geral, as agressões usuais perigosas para a integridade do concreto estão associadas a fenômenos expansivos no interior da massa de concreto já endurecido, ou à dissolução dos produtos de hidratação do cimento.

Como podemos observar na Figura 3, a durabilidade da estrutura reflete diretamente no seu desempenho.

Figura 3 - Relação entre desempenho e durabilidade



Fonte: CEB,1992.

Observando a esquematização, podemos entender que a ausência de detalhes construtivos nos projetos, a utilização de materiais inadequados, mão de obra desqualificada e a não realização da cura são os principais fatores responsáveis pelo desencadeamento das manifestações patológicas nas estruturas de concreto armado.

Quando o concreto possui uma quantidade elevada de poros e fissuras, torna-se mais suscetível ao desgaste, uma vez que a entrada e o transporte da água e agentes externos no seu interior são facilitados.

O desgaste do concreto pode ser de ordem física (ruptura do revestimento), química (interações entre agentes agressivos e os constituintes da pasta de cimento) e biológica (ação de microrganismos provenientes da umidade e temperatura); já na armadura, o efeito da deterioração é caracterizado pelo processo corrosivo com formação de produtos de ferrugem.

Em síntese, esse conjunto de efeitos é capaz de provocar: diminuição na resistência da estrutura, comprometimento da utilidade para a qual a peça foi projetada, desconfiguração estética e principalmente, insegurança aos usuários.

Como verificado, o entendimento sobre a durabilidade das peças armadas implica diretamente em valorizar todo o ciclo do concreto armado (especificações, produção, aplicação, cura) além das manutenções, essencialmente responsáveis pela preservação e bom funcionamento das estruturas.

No entanto, falta mobilização e reconhecimento sobre a importância da realização de vistorias, inspeções rotineiras e intervenções técnicas.

### ***2.2.2 Influência do meio ambiente nas estruturas armadas***

Frequentemente, as pesquisas sobre durabilidade das estruturas costumam levar em consideração as condições físicas associadas ao concreto, como: composição (cimento, areia, brita), fatores relacionados (relação água/cimento, aditivos, adições), condições de transporte, lançamento e cura.

No entanto, estudar o meio ambiente em que a estrutura está inserida também é um critério de grande importância. Pois, mesmo se o concreto for bem executado e especificado, ainda assim poderá ter sua vida útil comprometida devido à entrada de agentes agressivos provenientes do meio externo.

A interação das estruturas de concreto com o meio ambiente decorre das características físicas do concreto, como: porosidade, permeabilidade, e absorção; além da composição química do cimento e uso de adições. Tais características permitem uma maior ou menor capacidade de interação entre os agentes agressivos presentes no meio ambiente e a peça estrutural.

De acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), a avaliação da agressividade do meio ambiente sobre uma determinada estrutura pode ser feita de modo simplificado, em função apenas das condições de exposição de suas peças estruturais.

Para essa finalidade, a agressividade ambiental pode ser classificada em função das condições de exposição da estrutura ou de suas partes, conforme Quadro 1.

Quadro 1 - Classes de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	fraca	Rural	insignificante
		Submersa	
II	moderada	Urbana 1), 2)	pequeno
III	forte	Marinha 1)	grande
		Industrial 1), 2)	
IV	muito forte	Industrial 1), 3)	elevado
		Respingos de maré	
<p>1) Pode-se admitir um micro clima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).</p> <p>2) Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em: obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65%, partes de estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.</p> <p>3) Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.</p>			

Fonte: NBR 6118, 2014.

Para Soares, Vasconcelos e Nascimento (2015), estas condições, se agrupadas, podem ser classificadas em quatro tipos, do ambiente não agressivo ao altamente ameaçador. Para os autores, quando o concreto está em um ambiente seco, o risco de corrosão das armaduras é mínimo ou inexistente, pois se faz necessária a presença de água para o desencadeamento do processo. O mesmo ocorre em ambientes de total e permanente saturação do concreto, já que não há presença de oxigênio livre, também essencial ao processo. Neste contexto, têm-se como exemplo, as estruturas submersas e os ambientes fechados em ambientes rurais, com baixo teor de poluentes.

Pela indicação da NBR 6118 (2014), podemos verificar que o ambiente urbano é considerado como sendo de agressividade moderada, caracterizado como pequeno, o risco de deterioração da estrutura.

No entanto, essa é uma questão amplamente discutida pelos especialistas, uma vez que é grande a agressividade advinda da poluição atmosférica, sendo uma realidade presente e constante nas grandes Regiões Metropolitanas do nosso país.

Como bem expõe Soares, Vasconcelos e Nascimento (2015), em grandes centros urbanos este problema pode ainda ser agravado pela alta concentração de impurezas em forma de óxidos de enxofre (SO<sub>2</sub>), fuligem ácida e outros agentes agressivos.

### ***2.2.3 Vida útil***

Segundo a NBR 6118 (ABNT, 2014), vida útil é o “período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorridos de danos acidentais”.

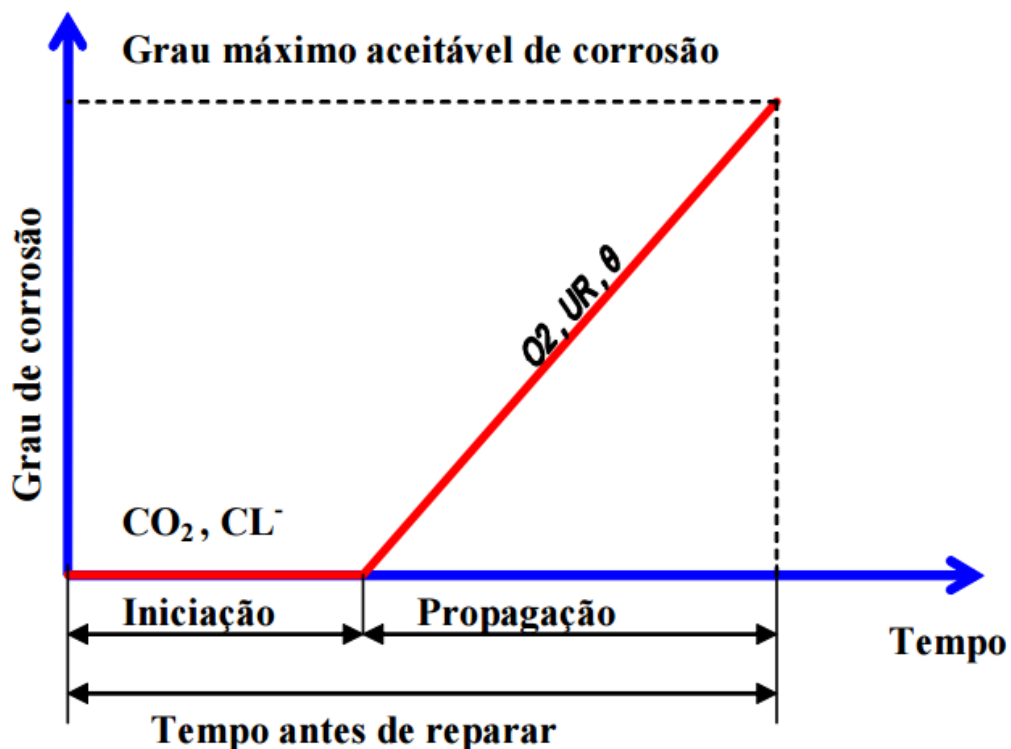
Em concordância com o conceito normativo, Figueiredo e Meira (2012) definem vida útil como o período de tempo no qual a estrutura é capaz de desempenhar as funções para as quais foi projetada, considerando no entanto, a realização de procedimentos de manutenção regular.

Morais Neto (2015) complementa que esse período deve ser analisado sob um ponto de vista amplo que envolva o projeto, os materiais, o uso e a manutenção, relacionando-os constantemente com o desempenho e a qualidade.

Tuutti (1982) apresenta através de esquematização (Figura 4), uma relação direta entre a corrosão das armaduras e a vida útil da estrutura. Para o autor, o processo corrosivo é constituído de duas fases distintas: iniciação e propagação.

A primeira etapa (iniciação) tem início na execução da estrutura em si e se prolonga até o agente agressivo atingir a armadura e despassiva-la; Já a fase de propagação é aquela correspondente ao desenvolvimento do processo corrosivo até o limite máximo aceitável de desgaste.

Figura 4 - Modelo de representação da duração da vida útil



Fonte– Tuutti (1982)

Tem-se em síntese, que o término da vida útil é observado quando a estrutura transmite insegurança ao usuário, atinge o grau máximo



aceitável de corrosão, sua utilização já é restrita e geralmente, sua recuperação é tão onerosa que se torna antieconômica.

### 2.3 Corrosão

Dentre as manifestações patológicas encontradas nas edificações, uma das mais recorrentes e preocupantes é a corrosão das armaduras nas estruturas de concreto armado.

Em muitos momentos, os especialistas encontram-se diante de um problema de corrosão e devido à complexidade do processo, sentem dificuldades em justificar o motivo da estrutura está corroída em determinado local, enquanto outras áreas (construídas pelo mesmo processo e componentes) encontram-se inalteradas.

Vários autores buscaram aperfeiçoar o conceito da “corrosão”. Ribeiro e Helene (2013) descrevem como “uma interação destrutiva de um material com o meio ambiente, seja por ação física, química, eletroquímica ou ainda, pela combinação destas”.

Para Andrade (2001), corrosão é o processo que se caracteriza por provocar a destruição do aço e, conseqüentemente danos estruturais como a diminuição da área de seção transversal, a perda de aderência entre o concreto e a armadura e a fissuração do concreto provocada pelo acúmulo de produtos de corrosão junto ao aço – que podem levar ao deslocamento do concreto nos estágios mais avançados.

Soares, Vasconcelos e Nascimento (2015) associam essa manifestação patológica ao aparecimento de manchas superficiais na estrutura, fissuras, destacamento do revestimento de concreto da ferragem e perda de massa das armaduras, resultando em redução na seção de seus componentes.

Complementam ainda, que a corrosão ocorre quando o concreto é permeável o suficiente para permitir que íons penetrem até a armadura.

Como sabemos, o concreto proporciona ao aço uma barreira física (cobrimento) contra a penetração de agentes externos e uma película protetora devido ao seu pH alcalino (acima de 12,5). No entanto, essa película é passível de instabilidade e rompimento.

Basicamente, a película protetora pode ter sua função comprometida por duas situações: devido à diminuição do pH na massa do concreto ou presença de íons cloreto.

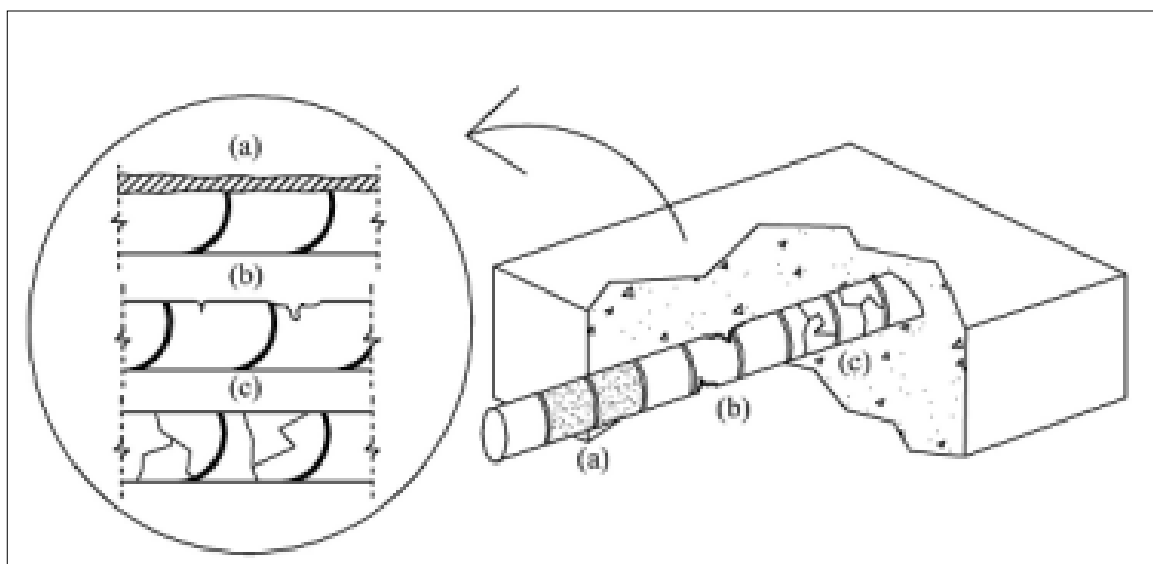
Os fatores mencionados acima originam a corrosão (Figura 5) que poderá ser classificada segundo Cascudo (2000), por:

- Corrosão generalizada: ocorrendo de forma generalizada por toda a superfície da armadura, podendo ser uniforme ou não.

- Corrosão localizada por pite: formando pontos de desgaste na superfície metálica, os quais evoluem profundamente até a ruptura pontual da barra.

- Corrosão localizada associada à solicitação mecânica: se dá acompanhada com uma tensão na armadura, a qual dá origem à programação de fissuras na estrutura do aço.

Figura 5 - Esquema da morfologia da corrosão: (a) corrosão generalizada; (b) corrosão localizada por pite; (c) corrosão localizada sob tensão.



Fonte: CASCUDO, 2000.

A corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado provoca três consequências importantes (HELENE e PACHECO, 2013):

- a) Perda de seção transversal da armadura e um decréscimo de sua resistência mecânica;
- b) Formação de óxidos e hidróxidos que incorporam muitas moléculas de água em sua composição, o que gera uma tendência à expansão, podendo resultar em fissuração e, em casos severos, deslocamento da camada de cobrimento;
- c) Perturbações na interface aço/concreto, decorrentes da degradação das camadas externas do aço e acúmulo de óxidos, prejudicando a transferência de tensões entre eles.

Como visto, as barras inseridas nos elementos estruturais são normalmente passivadas devido à alta alcalinidade proporcionada pelo concreto e cobrimento de proteção.

Contudo, esse filme protetor ou película passivadora que envolve o aço, poderá ser destruído e esse mecanismo decorre principalmente da carbonatação (redução do pH) e ação dos íons cloretos (ruptura pontual na barra), apresentados mais detalhadamente a seguir.

### ***2.3.1 Carbonatação***

De acordo com Amorim (2010), a carbonatação é um processo físico-químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados. Para o autor, o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), os óxidos de enxofre ( $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ ), e o gás sulfídrico ( $\text{H}_2\text{S}$ ) presentes na atmosfera, são os principais responsáveis pelo desencadeamento das reações químicas em contato com a estrutura. O processo recebe o nome de carbonatação devido à maior incidência de ( $\text{CO}_2$ ) nas reações de neutralização.

Com a interação desses elementos, a condição do aço passa de passivo para ativo, devido à perda de alcalinidade do concreto. Isso porque o dióxido de carbono presente na atmosfera entra em reação com a

umidade presente nos poros do concreto e transforma o hidróxido de cálcio (pH elevado) em carbonato de cálcio (pH neutro). Como o filme passivador da armadura é formado devido ao pH elevado do concreto, essa redução deixa a camada protetora vulnerável, facilitando as reações que provocam a corrosão.

Em poucas palavras, Rocha (2015) sintetiza e define carbonatação como sendo um processo químico de redução do pH de valores próximos de 12 para inferiores à 10.

As maiores incidências de carbonatação, conforme descrito por Figueiredo (2005), estão em locais onde a umidade relativa está em torno de 50% a 60%, em locais com umidades abaixo de 20% e maiores que 95% poderão desencadear uma carbonatação lenta ou até mesmo não desenvolverem este processo de degradação.

Segundo Amorim (2010), a velocidade e profundidade da carbonatação dependem do meio ambiente (concentração de  $\text{CO}_2$ , umidade relativa do ar, temperatura) e das características do concreto endurecido (composição química do cimento, traço do concreto, execução, qualidade da cura).

Dentre os métodos para medir a carbonatação, o mais utilizado é através de soluções corantes que indicam mudança de PH, como por exemplo, solução de fenolftaleína. Uma atenção especial deve-se ter com a obtenção da amostra, que deverá ser obtida por quebra e logo após deve-se aplicar à solução para não ocorrer alterações no resultado. Quando o teste for feito com fenolftaleína as regiões mais alcalinas apresentam cor violeta e as menos alcalinas ficam incolor ou pouco violeta. Outro material que pode ser usado para medir a profundidade de carbonatação é a timolftaleína, onde as regiões mais alcalinas apresentam cor azul e as menos alcalinas, incolores (HELENE, 1986).

Para Figueiredo (2005), outras formas descritas para medir a profundidade de carbonatação são por difração de raios X, análise térmica diferencial (ensaios qualitativos) e termografia (análise quantitativa), observações microscópicas que revelam se existe ou não cristais de  $\text{CaCO}_3$ .

### **2.3.2 Íons cloreto**

Quando as estruturas estão localizadas em ambientes agressivos, a corrosão é frequentemente originada devido à ação dos íons cloreto. No entanto, a presença desse elemento só oferece risco para o aço quando se apresenta na sua forma livre ( $\text{Cl}^-$ ).

Para Batis e Pantazopoulou (2000), o oxigênio tem o efeito mais prejudicial no processo, ficando o cloreto como sendo o catalisador da reação. Afirmam ainda, que sem o oxigênio o aço não corrói, mesmo com presença de água alcalina contendo cloretos.

Os cloretos danificam pontualmente o filme passivo (formado sobre o aço), provocando uma repartição pontual da película protetora, sendo sua ação, portanto, conhecida como degradação por pite ou puntiforme.

O ataque por cloretos é considerado grave porque a quebra localizada da película resulta em um acúmulo de produtos de corrosão na superfície do aço, proporcionando um volume muito maior que o ocupado pelo aço original. Consequentemente, surgem forças de tração não previstas, provocando fissuras, rachaduras e em casos mais preocupantes, a fragmentação do concreto, facilitando o ingresso de agentes agressivos que aceleram a corrosão.

Denomina-se como “teor crítico de cloretos”, aquele presente no concreto, junto às armaduras capaz de desencadear o fenômeno da corrosão. Não há um consenso na comunidade científica mundial sobre o teor de cloretos que podem provocar a despassivação da armadura, iniciando o processo corrosivo. Há duas formas para expressar o teor de cloretos necessário para que ocorra a despassivação da armadura: a relação  $\text{Cl}/\text{OH}$  da solução dos poros e a quantidade de cloretos por unidade de cimento ou concreto. (CASCUDO, 2005).

## **2.4 Transporte de Massa no Concreto**

Como é sabido, o concreto é um material naturalmente poroso. Rocha (2015) afirma que esses poros contidos no concreto, dependem

essencialmente da porcentagem de água ou da incorporação de ar na massa de concreto. Para o autor, esses vazios formam uma espécie de rede e é através dela que se estabelece uma conexão com o meio exterior, acarretando o transporte de gases, água e substâncias para o interior do concreto.

Para registrar a interação que ocorre entre o concreto, a armadura e os inibidores de corrosão, é de suma importância abordar as características relacionadas aos mecanismos de transporte de líquidos, gases e íons no concreto (MORAIS NETO, 2015).

Segundo Medeiros (2008), diferentes mecanismos podem ocorrer no transporte de massa por um meio poroso como o concreto, tais como: absorção por sucção capilar, permeabilidade e difusão. Na prática, estes mecanismos podem ocorrer de forma individual ou em conjunto. Quando o segundo caso vem a ocorrer, é comum adotar um dos mecanismos predominantes de modo a simplificar o entendimento do processo de transporte e intervir no mesmo para aumentar a durabilidade do material. No entanto, de acordo com Kropp (1995), em condições não saturadas, geralmente a absorção capilar é o mecanismo que predomina.

#### ***2.4.1 Permeabilidade***

De acordo com Kropp (1995), a permeabilidade é a propriedade que governa o transporte do fluido para dentro de um material sólido, através de seus poros, pela ação da pressão.

O concreto apresenta poros de ar que geralmente são ocasionados por falhas de execução e são de dimensões maiores, já os poros na pasta de cimento podem ser de gel e capilares, sendo, portanto, de menores dimensões. No primeiro caso, estão os que mais afetam a durabilidade do concreto, favorecendo o transporte de substâncias nocivas para o interior do concreto. Já na pasta de cimento, o aumento da permeabilidade é devido à retração, ocasionando as fissuras, igualmente facilitadoras da ingressão de agentes nocivos (AMORIM, 2010).

Usualmente, o fluxo de água pode ser determinado pela Lei de Darcy, através da Equação 1.

$$K_w = K_w^* \left( \frac{\eta_a}{\rho \times g} \right) \quad \text{Equação 1}$$

Onde são definidos:

$K_w^*$  = coeficiente de permeabilidade a água, em  $m/s$ ;

$\eta_a$  = viscosidade da água, em  $Ns/m^2$ ;

$\rho$  = densidade de água;

$g$  = gravidade, em  $m/s^2$ .

Por observância à equação, Morais Neto (2015) conclui que o coeficiente de permeabilidade da água não está atrelado a uma característica do material, mas sim a um coeficiente proporcional à permeabilidade a água do material. Afirmando ainda, que a permeabilidade é o mecanismo predominante em estruturas de concreto quer estejam submersas quer parcialmente submersas, acelerando a penetração de agentes agressivos.

#### ***2.4.2 Absorção capilar***

Absorção capilar é o transporte de líquido nos poros do concreto devido à tensão superficial agindo nos capilares. Ela está relacionada não só com a estrutura dos poros, mas também com as características do líquido, tais como viscosidade, densidade e tensão superficial, dependendo também, das características do meio poroso, como raio, tortuosidade e a continuidade dos poros, além da energia superficial (LARA, 2003).

Para Cascudo (1997), quanto mais elevada for a tensão superficial no interior dos poros maior será a ascensão capilar, e quando os líquidos são altamente viscosos torna-se mais difícil a penetração destes nos poros do concreto. Dentro de um poro capilar a pressão de vapor sobre o líquido é

menor que a pressão de saturação, causando então a evaporação da água no interior do poro e, devido à diferença de pressão, surge o menisco. Contudo, é importante salientar que a absorção capilar só ocorre em concretos não saturados e, por isso, é o principal mecanismo de penetração de cloretos no concreto quando a estrutura está submetida a ciclos de molhagem e secagem. No período de molhagem, a superfície absorve a solução de cloreto rapidamente e no período de secagem, a água evapora e o sal se mantém no concreto. Com os ciclos subsequentes, há o aumento da concentração de cloretos na solução dos poros do concreto e, conforme a umidade relativa do ambiente, o sal reduz a evaporação, aumentando a umidade no interior do concreto. (KROPP, 1995)

Conforme Ribeiro e Helene (2013), a absorção capilar pode ser formulada pela Lei de Jurin, conforme a Equação 2.

$$h = \frac{2v}{r\gamma} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

$h$  = altura ou penetração da água no capilar, em  $m$ ;

$v$  = tensão superficial da água, onde  $v \approx 75 \times 10^{-4} \text{ Kg/m}$ ;

$r$  = raio do capilar, em  $m$ ;

$\gamma$  = massa específica da água, onde  $\gamma \approx 1 \text{ Kg/m}^3$ .

Podemos concluir então que, de acordo com a equação apresentada, quanto maior for o raio do capilar, menor será a altura da penetração da água.

### ***2.4.3 Difusão iônica***

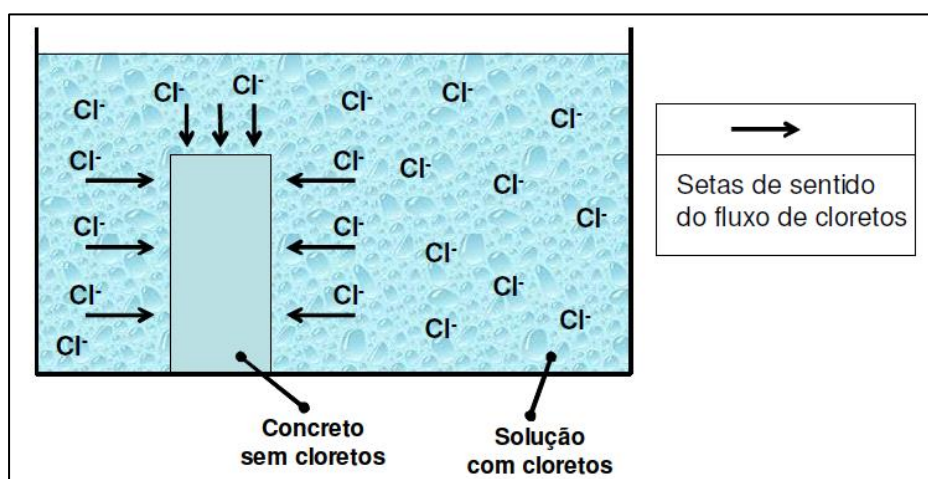
Ao contrário do que ocorre nos mecanismos de permeabilidade e de absorção capilar, a difusão não depende do fluxo de água para a penetração de cloretos e sim da existência de eletrólito e um gradiente de concentração. Resumidamente, é caracterizado pelo transporte de íons pelos poros do concreto causado por uma diferença de concentração do



referido íon em regiões distintas. Assim, resulta-se em um fluxo de íons partindo de regiões de alta concentração para regiões de baixa concentração (MEDEIROS e HELENE, 2008).

Podemos verificar o mecanismo de funcionamento da difusão iônica na Figura 6.

Figura 6 - Mecanismo de funcionamento da difusão iônica por diferença de concentração de cloretos



Fonte: MEDEIROS, 2008.

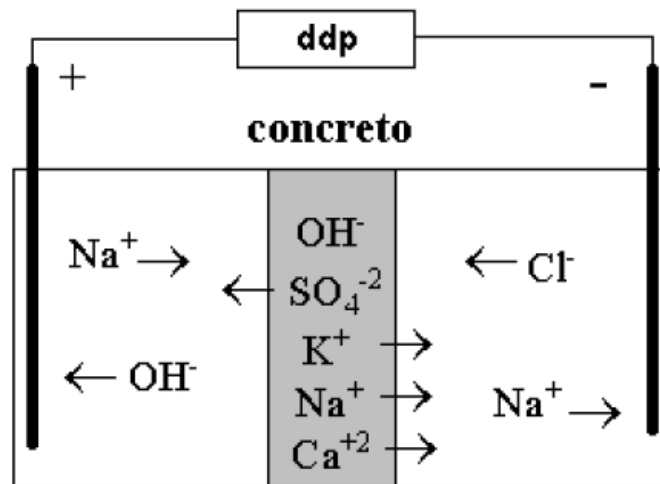
De acordo com Helene (1993), os cloretos do ambiente podem penetrar na estrutura através dos mecanismos clássicos de penetração de água contaminada e por difusão de íons. Desse modo, para que ocorra a contaminação do concreto armado por cloretos, este íon precisa estar dissolvido em água. Como cristal sólido, o cloreto não oferece risco elevado para as estruturas, pois não penetra nos poros do concreto que tem dimensões mais reduzidas que a dos cristais usuais. Apesar disso, no estado sólido, o íon cloreto pode depositar-se na superfície do concreto e aí permanecer até que uma chuva o dissolva e o transporte para o interior da estrutura através de mecanismos como absorção capilar ou difusão.

#### 2.4.4 Migração

A migração caracteriza-se pelo fluxo de íons devido a uma diferença de voltagem, semelhantemente ao transporte por difusão iônica. Geralmente é utilizado em ensaios acelerados de resistência à penetração de íons.

Podemos verificar o mecanismo de funcionamento do transporte por migração, a seguir, na Figura

Figura 7 - Mecanismo de funcionamento da migração por diferença de potencial



Fonte: MEDEIROS, 2008.

Segundo Medeiros (2008), o ensaio de migração é utilizado para produzir uma informação qualitativa sobre a difusão de cloretos no concreto, evitando assim a necessidade de execução do ensaio de difusão que é muito mais prolongado.

Então, quando existe a condição representada na figura acima, podemos observar além do processo de migração, a atuação da difusão iônica, ou seja, os dois tipos de transporte acontecendo ao mesmo tempo.

A seguir, na Equação 3, é dada a expressão que representa o processo de transporte por migração:

$$J = -D_c \frac{zF}{RT} \frac{\partial V}{\partial x} \quad \text{Equação 3}$$

Onde se tem:

$J$  = fluxo de massa, em g/m<sup>2</sup>;

$D_c$  = coeficiente de difusão;

$z$  = valência do íon;

$F$  = constante de Faraday;

$R$  = constante dos gases;

$T$  = temperatura absoluta;

$\mathcal{V}$  = voltagem aplicada no ensaio;

$x$  = profundidade onde se mede o fluxo.

## 2.5 Métodos de avaliação do processo corrosivo

### 2.5.1 Resistividade elétrica

A resistividade elétrica é uma importante propriedade do concreto que caracteriza a sua capacidade de resistir à passagem de corrente elétrica. Esta propriedade está fundamentalmente relacionada à permeabilidade de fluidos e à difusividade de íons através dos poros do material e, no caso do concreto, está intimamente relacionada à velocidade do processo de corrosão das armaduras (SANTOS, 2006).

Fatores relacionados às características do concreto, como: estruturação interna, composição, concentração da água livre presente nos poros e características ambientais em que o concreto está inserido, apresentam reflexos diretos na resistividade elétrica.

Além disso, deve-se levar em consideração a temperatura e a umidade do ambiente, já que alteram a mobilidade iônica e sua interação com as fases sólidas.

Se o concreto foi produzido com adições minerais (cinza volante, sílica, escória, fílers, etc.), terá sua microestrutura alterada, já que haverá refinamento nos poros da matriz. Assim, a utilização desses materiais propicia um aumento da resistividade em relação a um concreto convencional.

Santos (2006), explica que a densificação da matriz e o aumento da quantidade de poros de menores diâmetros, provavelmente mais tortuosos e descontínuos, dificultam a condução da corrente através do concreto e, portanto, aumentam a resistividade elétrica.

Para Torres (2011), as medidas de resistividade do concreto podem ser utilizadas tanto para investigações de propriedades do concreto em laboratório como para monitoramento *in loco* das estruturas.

Em geral, de acordo com Araújo *et al.* (2014), admite-se que a corrosão da armadura é certa e deve apresentar taxa elevada, quando a resistividade elétrica do concreto está baixa e a medida do potencial indica a sua despassivação.

O princípio do ensaio de resistividade consiste em induzir uma passagem de corrente elétrica entre os eletrodos, com auxílio de uma fonte de alimentação alternada. Mede-se, então, a diferença de potencial entre os eletrodos (MORAIS NETO, 2015). Assim, é possível interpretar os resultados capturados, de acordo com os intervalos indicados por Polder (2001), mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Risco de corrosão em função da resistividade

Resistividade do concreto (kΩ.cm)	Probabilidade de corrosão
> 20	desprezível
entre 10 e 20	baixa
entre 5 e 10	alta
< 5	muito alta

Fonte: Polder, 2001

### ***2.5.2 Absorção por imersão e por capilaridade***

Os ensaios de absorção por imersão e por capilaridade estão intimamente relacionados com a intensidade de penetração da água através dos poros do concreto, associados à tensão atuante nos capilares e vazios do material.

Segundo Bolina (2008), quanto menor for o diâmetro dos poros capilares, maior a pressão e, por conseguinte, maior será a profundidade de penetração da água no concreto. Já para o inverso, considera-se que quanto maior o diâmetro dos poros capilares, menor será a profundidade do concreto atingida pela água absorvida, contudo, maior será a quantidade total de água incorporada.

## 2.6 Inibidores de corrosão

De maneira geral, as alternativas de proteção de estrutura de concreto armado estão associadas a quatro formas clássicas de controle: substituição do material por outro mais resistente, modificação do meio de exposição, fornecimento de energia ao sistema e interposição de barreiras entre o meio e o metal (MOREIRA, VIEIRA e CASCUDO, 2015).

Baseando-se na classificação proposta pelos autores, os inibidores de proteção estão enquadrados na última alternativa, ou seja, funcionam como barreiras entre o concreto e a armadura.

Inibidores são definidos como substâncias químicas que, em certa quantidade, conseguem reduzir a taxa de corrosão da armadura, sem modificar a concentração de qualquer outro agente de corrosão, controlando assim a deterioração das estruturas de concreto.

Coelho *et al.* (2015) explica que essa inibição é feita pelo retardo da atividade da reação anódica (inibidores anódicos), catódica (inibidores catódicos), ou ambas (inibidores mistos).

Sabe-se que a corrosão das armaduras é dependente da disponibilidade de umidade e oxigênio, portanto qualquer metodologia que reduza a sua penetração no concreto vai acabar diminuindo a sua deterioração. Logo, um dos objetivos mais importantes de um sistema de proteção superficial é a redução da absorção de água do concreto (MEDEIROS, 2008).

O encorajamento para o uso dos inibidores está fundamentado nas vantagens facultadas por estas substâncias, tais como o seu uso relativamente fácil, sejam dissolvidas na água de amassamento ou aplicadas na superfície do concreto, além da não necessidade de

manutenção ou, em alguns casos, a manutenção ínfima, quando comparadas com outras técnicas de reparo (FREIRE, 2005).

Já por observação de Alamoudi *et al.* (2003), a principal vantagem dos inibidores de corrosão é a sua eficiência de distribuição, já que são espalhados uniformemente em toda a pasta de cimento, de modo que protegem a superfície do aço inteira.

Existem vários sistemas de classificação de inibidores de corrosão, com base na maneira como eles são adicionados, mecanismo de atuação, composição, dentre outros.

No concreto, os inibidores podem ser divididos basicamente em dois grupos: os inibidores misturados, que são adicionados ao concreto fresco (água de amassamento), durante a concretagem das estruturas, e os inibidores de migração, que podem penetrar no concreto já endurecido, geralmente indicado como sistema de reparação (ORMELLESE *et al.* 2006). Ainda sobre a classificação dos inibidores, Bolina (2008) completa que os inibidores também podem ser diferenciados segundo a sua natureza, em orgânica e inorgânica.

A maioria dos inibidores foi desenvolvida empiricamente e muitos são fabricados sob patente, não sendo conhecida sua composição química (BOLINA, 2008). Os de natureza orgânica têm sido utilizados nas indústrias de óleo e gás, mas eles não foram desenvolvidos para uso em concreto armado até o começo da década de 90 (NMAI, 1994). Como exemplos desses tipos de produtos tem-se as aminas, os ésteres solúveis em água, o benzoato de sódio, o benzotriazol e os ácidos carboxólicos solúveis em água (NMAI, 2004). Já entre os inorgânicos, os mais conhecidos e estudados são os nitritos (ARAÚJO, 2014). Para exemplificar, pode-se citar o nitrito de sódio e cálcio, o cloreto estanhoso, o cromato de potássio e o molibdato de sódio.

Há também uma classificação proposta por Söylev e Richardson (2008) que diferenciam os inibidores de acordo com sua ação específica em inibidores anódicos e catódicos, detalhados a seguir.

### ***2.6.1 Inibidores anódicos***

Os inibidores anódicos atuam reprimindo reações anódicas, ou seja, retardam ou impedem a reação do ânodo. Funcionam geralmente, reagindo com o produto de corrosão inicialmente formado, gerando um filme aderente e extremamente insolúvel na superfície do metal, causando polarização anódica (FREIRE, 2005).

Ainda segundo o autor, os inibidores anódicos podem ser classificados em oxidantes e não oxidantes, conforme dispensem ou não a presença de oxigênio dissolvido na solução para a formação e manutenção deste filme de passivação. Os nitritos e os cromatos são exemplos de inibidores anódicos oxidantes, enquanto que benzoatos, molibdatos, carbonatos, silicatos e fosfatos podem ser enquadrados como inibidores anódicos não oxidantes.

Para se conseguir uma proteção ideal do metal, é necessário que a substância usada seja adicionada ao meio corrosivo em quantidade adequada, além da necessidade de manter a concentração do meio corrosivo uniforme. Se a quantidade do inibidor adicionada ao meio não for ideal e uniforme sobre toda a extensão da superfície metálica, o filme formador possibilitará a corrosão nas regiões não protegidas. Logo, poderá ocorrer processo de corrosão por pite (GUEDES, 1996).

### ***2.6.2 Inibidores catódicos***

Atuam reprimindo reações catódicas. São substâncias que fornecem íons metálicos capazes de reagir com a alcalinidade catódica, produzindo compostos insolúveis. Esses compostos insolúveis envolvem a área catódica, impedindo a difusão do oxigênio e a condução de elétrons, inibindo assim o processo catódico (FREIRE, 2005).

Sulfatos de zinco, de magnésio e de níquel são usados como inibidores catódicos. No entanto, ainda segundo o autor, uma das dificuldades do uso destes inibidores em concreto está no fato de que os sulfatos

favorecem a formação de sais expansivos que geram tensões e trincas internas no concreto.

A eficiência dos inibidores catódicos em concreto, principalmente quando comparados aos anódicos, é razoavelmente baixa, e por isso as pesquisas correlatas e o seu uso prático são relegados a um segundo plano, muito embora ofereçam vantagens como o fato de não provocarem corrosão quando utilizados em teores adequados.

### ***2.6.3 Inibidores mistos***

Os inibidores mistos são aqueles que interferem tanto nas reações anódicas como nas reações catódicas, provocando o deslocamento do potencial de corrosão nas duas direções. Também chamados de inibidores de adsorção, funcionam como películas protetoras. Esses inibidores podem ser adsorvidos tanto na superfície do metal quanto na película passivadora, formando assim uma camada contínua, capaz de proteger tanto as áreas anódicas quanto as áreas catódicas. Com isso, tem-se, potencialmente um efeito maior do que a soma dos seus efeitos individuais (das substâncias anódicas e catódicas) (FREIRE, 2005).

### ***2.6.4 Requisitos e procedimentos de seleção dos inibidores***

A escolha do tipo adequado do inibidor a ser utilizado na estrutura (nova ou deteriorada) envolve vários fatores passíveis de análise prévia e detalhada.

Para Lima (2000), deve-se estudar o problema como um todo e determinar exatamente quais características serão exigidas do inibidor, isto é, que parâmetros serão testados e que fatores poderão afetar os resultados. Essas questões e suas respostas auxiliarão na obtenção de dados significativos, que serão utilizados na seleção do inibidor mais eficiente para o meio ambiente de interesse.



Os autores Shields *et al.* (1992) apud Basheer *et al.* (1997) desenvolveram alguns desses critérios, apresentados a seguir na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores a serem considerados na seleção do sistema de proteção superficial

Aspecto	Consideração
Substrato original	Material de construção Construção nova ou trabalho de reabilitação Presença de pintura Contaminação da superfície
Ambiente	Atmosfera (marinha, urbana, rural, etc) Presença de umidade Presença de agentes químicos
Durabilidade do sistema de proteção	Aderência Resistência à radiação UV Resistência ao ingresso de água Resistência química Resistência ao impacto Elasticidade
Condições de aplicação	Por pincel ou projeção Preparo da superfície Tolerância da umidade do substrato Temperatura Condições de acesso
Custo	Custo unitário do material Número de demãos necessárias Espessura do filme Custo com laboratório Custo de manutenção

Fonte: SHIELDS *et al.*, 1992 apud BASHEER *et al.*, 1997.

Portanto, a escolha adequada dos inibidores de corrosão é uma fase importante e exige um estudo prévio, já que será uma medida preventiva contra o ataque corrosivo.

Para que a sua aplicação seja satisfatória, devem ser considerados, além das causas que originou a corrosão, os mecanismos de ação dos inibidores, sua durabilidade, o meio ambiente em que a estrutura está inserida, condições de aplicação e os custos inseridos na sua utilização.

Além disso, é importante destacar que na escolha de um sistema de proteção superficial não se deve ter como base somente a sua eficiência isoladamente. É de extrema importância levar em consideração a capacidade do inibidor em manter esta propriedade ao longo do tempo. Como bem exemplifica Freire (2005), um sistema pode ser muito eficaz

em barrar o ingresso de água e de cloretos, contudo, não apresentar boa resistência à radiação UV.

Num caso como este, por exemplo, um sistema um pouco menos eficiente quanto à capacidade de barrar a água e cloretos que tenha uma maior resistência a esse tipo de radiação pode ser mais interessante.

Assim, é fundamental analisar a eficiência em conjunto com a durabilidade do sistema de proteção superficial.

## CAPÍTULO 3

### METODOLOGIA

Para a pesquisa, foram moldados corpos de prova reforçados com barras de aço, simulando estruturas de concreto armado.

Os corpos de prova foram expostos à degradação artificial, submetidos a semi ciclos de imersão parcial em água contendo NaCl e secagem em estufa. Situação esta, caracterizada como um ambiente de agressividade muito forte (Classe IV) de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014).

A seguir, será apresentada a definição dos materiais, a descrição do procedimento experimental, bem como os ensaios utilizados.

#### 3.1 Definição dos materiais

##### 3.1.1 Cimento

O aglomerante hidráulico utilizado na produção dos corpos de prova foi o CPlI Z-32. Esse cimento contém em sua composição, cerca de 6 a 14% de pozolana, podendo ter até 10% de material carbonático. Foi escolhido previamente por ser o cimento mais utilizado na região de Pernambuco.

A seguir, na Tabela 3 são apresentados os resultados da análise química do aglomerante.

Tabela 3 - Composição da análise química do cimento CPlI Z-32

Análise química do aglomerante CP II Z-32 (%)	
Perda ao fogo	≤6,5
Resíduo insolúvel	≤16
Trióxido de enxofre (SO <sub>3</sub> )	<4,0
Óxido de magnésio (MgO)	≤6,5

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante do produto.

Na Tabela 4, encontram-se as principais propriedades físicas do cimento CII Z 32.

Tabela 4 - Composição das propriedades físicas do cimento CII Z-32

Ensaio Físico		Norma	Resultados
Finura (%)	P#200	NBR 7215 (1997)	$\leq 12$
	P#325		—
	Blaine cm <sup>2</sup> /g	NBR 7224 (1996)	$\leq 2600$
Tempo de pega (h:min)	Inicial	NBR NM 65 (2003)	$\geq 1$
	Final		$\leq 10$
Resistência à compressão (MPa)	1 dia	NBR 7215 (1997)	—
	3 dias		$\geq 10$
	7 dias		$\geq 20$
	28 dias		$\geq 32$

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante do produto.

### 3.1.2 Agregado miúdo

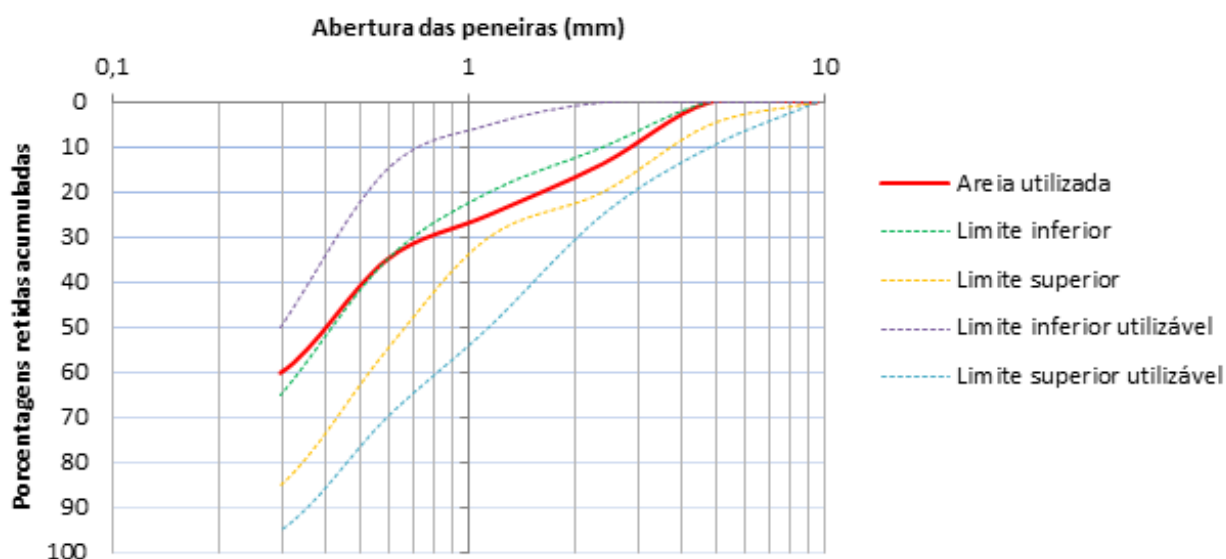
O agregado miúdo utilizado foi uma areia grossa, disponível no mercado local em sacos de 20 kg. Para caracterizar a composição do material, foi realizado o ensaio granulométrico seguindo as diretrizes da NBR NM 248 (ABNT, 2003), conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Ensaio granulométrico do agregado miúdo



A partir do resultado gráfico da curva granulométrica (Figura 9), observa-se que a amostra da areia utilizada possui grãos com dimensões que variam de 0,3 a 4,8mm, ou seja, valores aceitáveis segundo o intervalo de limites utilizáveis determinados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Figura 9 - Resultado do Ensaio granulométrico do agregado miúdo



### 3.1.3 Agregado graúdo

A brita 1, com dimensão de 9,5 mm a 19 mm, também foi adquirida em mercado local, igualmente disponível em sacos de 20 kg. Foi dada a preferência por adquiri-la da maneira ensacada, pela melhor uniformidade apresentada entre os agregados.

### 3.1.4 Aço

O aço utilizado em todos os corpos de prova foi o CA-60, obtido por trefilação de fio e produzido segundo as especificações da NBR 7480 (ABNT, 2007).

Seu diâmetro corresponde a 5 mm, e, para ser incorporado aos corpos-de-prova, o aço foi cortado em pedaços de 100 mm.

O aço em questão foi escolhido devido às suas propriedades, que, advindas do tratamento a frio, provocam diminuição da resistência à corrosão quando comparados aos aços CA-25 e CA-50, tratados a quente.

Assim, o sistema torna-se mais instável e suscetível ao ataque corrosivo, favorecendo nosso objeto de estudo.

A seguir, na Tabela 5 são apresentadas as características do aço CA-60.

Tabela 5 - Características do aço CA-60

Parâmetros do Aço	
Diâmetro Nominal (mm)	5
Massa Nominal (kg/m)	0,154
Tolerância massa linear (%)	± 6
Resistência característica de escoamento (MPa)	600
Limite de resistência (MPa)	660
Alongamento mínimo em %	5%

Fonte: Informações fornecidas pelo fabricante do produto.

### ***3.1.5 Água***

No procedimento experimental, utilizou-se a água potável fornecida pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA.

De acordo com a norma NBR 15900 (ABNT, 2009), a água de abastecimento público é adequada para uso em concreto e não necessita ser ensaiada.

## **3.2 Procedimento experimental**

### ***3.2.1 Etapas preliminares***

Antes de serem introduzidas aos corpos de prova, as barras de aço passaram por um processo de limpeza, conforme orientações da ASTM C 1152 (1999), com o intuito de remover os óxidos presentes e possíveis

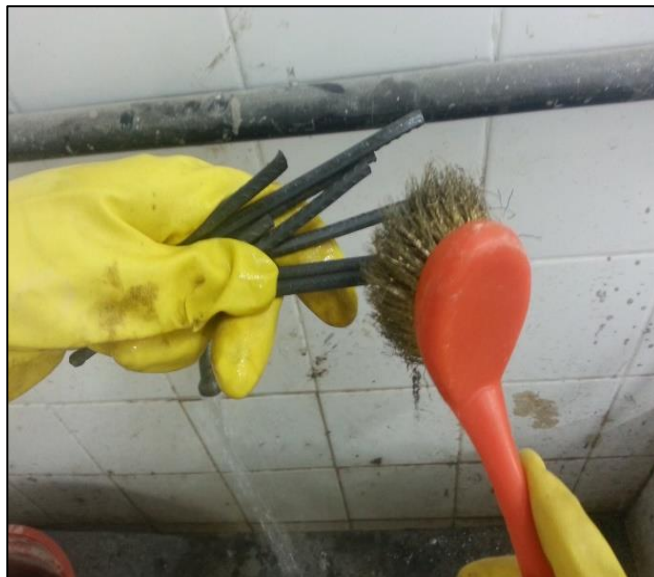
impurezas. Assim, foram imersas em solução de ácido clorídrico e água, na proporção de 1:1 durante 15 minutos (Figura 10).

Figura 10 - Imersão das barras de aço em solução de ácido clorídrico 1:1



Após esse procedimento, foi realizada uma escovação das barras em água corrente (Figura 11),

Figura 11 - Escovação das barras de aço



Em seguida, foram imersas em solução de acetona por 2 minutos para a remoção de gorduras (Figura 12).

Figura 12 - Imersão em solução de acetona



Na sequência, as barras de aço passaram por um processo de secagem com auxílio de secador com jato de ar quente (Figura 13).

Para reter a umidade, inserimos as barras secas em um depósito contendo sílica em gel até o momento de sua utilização (imersão nos corpos de prova).

Figura 13 - Secagem das barras de aço e armazenamento em depósito com sílica





### 3.2.2 Confeção dos corpos de prova

Após a definição dos materiais e preparação das barras, seguiu-se para etapa da produção do concreto.

Foram moldados 32 corpos de prova do tipo cilíndrico (10 cm x 20 cm), que permaneceram durante toda a pesquisa em ambiente laboratorial.

A seguir, no Quadro 2, está apresentada a esquematização da distribuição dos corpos de prova:

Quadro 2 - Distribuição dos corpos-de-prova por tipo de inibidores

Corpos de prova cilíndricos (10 cm x 20 cm)			Quantidade por relação a/c		Ensaio
			0,45	0,65	
Inibidores	Pintura (P)	P1	4	4	Resistividade, Absorção Capilar e Absorção por imersão.
		P2	4	4	
	Água de amassamento (AA)	AA	4	4	
Sem aditivos		Referência	4	4	

O traço do concreto utilizado foi de 1 : 1,15 : 2,15 (ou seja, 1 volume de cimento para 1,15 volume de areia e 2,15 de brita) definido previamente por empresa pernambucana especializada em tecnologias dos materiais.

Já a definição da relação água/cimento (a/c) de 0,45 e 0,65, foi baseada nos extremos impostos pela NBR 6118 (ABNT, 2014), ou seja, será avaliada a atuação dos inibidores em duas situações extremas: concreto pouco poroso, que corresponde a um concreto de melhor qualidade e muito poroso, de qualidade inferior.

Com o intuito de acelerar o processo corrosivo nas amostras, foi adicionado à água de amassamento, 1% de cloreto de sódio (NaCl) durante a confecção de todos os corpos de prova.

Essa porcentagem inserida foi baseada em experimentos semelhantes desenvolvidos por Silva e Nóbrega (2002) e Moraes Neto (2015).

Os materiais foram adicionados à betoneira seguindo as diretrizes da NBR 5738 (ABNT, 2008), que orienta o processo de mistura do concreto da seguinte maneira:

*1º passo:* adição do agregado graúdo;

*2º passo:* adição de 1/3 da água;

*3º passo:* adição do cimento;

*4º passo:* adição de mais 1/3 da água;

*5º passo:* adição da areia, e por fim, os últimos 1/3 da água.

É interessante destacar que do total das amostras, reservou-se corpos de prova sem receber em sua composição, adição de inibidores.

Assim, foi possível reservar amostras de referência, com o intuito de avaliar e comparar as modificações ocasionadas pela adição dos produtos nos demais corpos de prova.

Antes da confecção do concreto, os moldes dos corpos de prova foram preparados, assim, toda sujeira da superfície interna foi removida. Logo após, utilizou-se um desmoldante para facilitar no processo da desforma, no entanto, seu uso foi mínimo para evitar excesso e interferência nos resultados.

Após a moldagem, foram inseridas duas barras de aço de 100 mm de comprimento em cada corpo de prova cilíndrico, atentando para deixar um cobrimento de aproximadamente 1 cm.

Na Figura 14, estão dispostos os 32 corpos de prova cilíndricos após o processo de moldagem.

Os 4 primeiros corpos de prova de cada relação a/c estão identificados (fita branca) para representar que receberam em sua composição o acréscimo do aditivo na água de amassamento.

Figura 14 - Corpos-de-prova do tipo cilíndrico, moldados e identificados.



### *3.2.3 Cura dos corpos-de-prova*

Decorridas 24 horas da moldagem dos corpos de prova realizou-se a desmoldagem. Em seguida, as amostras foram colocadas em cura úmida (imersão total em água) por 14 dias, conforme Figura 15.

Na sequência, os corpos de prova foram retirados da água e permaneceram por mais 7 dias em ambiente de laboratório, com o intuito de estabilizar o sistema.

Figura 15 - Cura úmida (imersão total) dos corpos de prova



### 3.2.4 Inibidores utilizados

Foram estudados 03 tipos de inibidores de corrosão, disponíveis no mercado nacional. Os inibidores foram denominados de inibidor P1, inibidor P2 e inibidor AA para referenciar seu método de aplicação: impregnantes por pintura (P) e acrescentados à água de amassamento (AA).

A quantidade de inibidor utilizada nos corpos de prova foi a indicada pelo fabricante nas embalagens dos produtos.

O inibidor AA foi introduzido durante a fabricação do concreto e os inibidores químicos do tipo pintura foram aplicados em toda a superfície do corpo de prova já na fase endurecida.

Para tal, utilizou-se um rolo de espuma para aplicação do produto, instrumento de aplicação também indicado pelo fabricante.

Na Figura 16, é demonstrada a etapa da aplicação do impregnante por pintura.

Figura 16 - Aplicação do inibidor químico do tipo impregnante por pintura.



A composição básica de cada produto avaliado, bem como seu campo e forma de aplicação, estão apresentadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Propriedades dos inibidores de corrosão

	Inibidores	P1	P2	AA
PROPRIEDADES	Composição Básica	carboxilato de amina	compostos orgânicos e inorgânicos	carboxilato de amina
	Campo de Aplicação	estruturas armadas em ambientes agressivos (estacionamentos, garagens, pontes, viadutos)		
	Forma de Aplicação	impregnante (líquido por pintura)		adicionado diretamente à água de amassamento

Sejam introduzidos na água de amassamento ou por impregnação, os inibidores de corrosão analisados se integram na superfície do aço, protegendo-o contra ataques de agentes agressivos, como cloretos e sulfatos.

De acordo com as informações dos fabricantes, essa reação química com a proteção natural do aço proporciona uma barreira contra a penetração de cloretos que, apesar de lenta, mantém os níveis de corrosão abaixo dos valores permitidos.

De acordo com os valores de medição do ensaio de resistividade, a probabilidade de corrosão é insignificante ou baixa para valores compreendidos entre 10 e 20 k $\Omega$ .cm.

### ***3.2.5 Ciclo acelerado de corrosão em laboratório***

Após a conclusão de todas as etapas descritas acima, os corpos de prova cilíndricos foram submetidos a um processo acelerado de corrosão com o objetivo de induzir a penetração dos íons cloretos nas amostras.

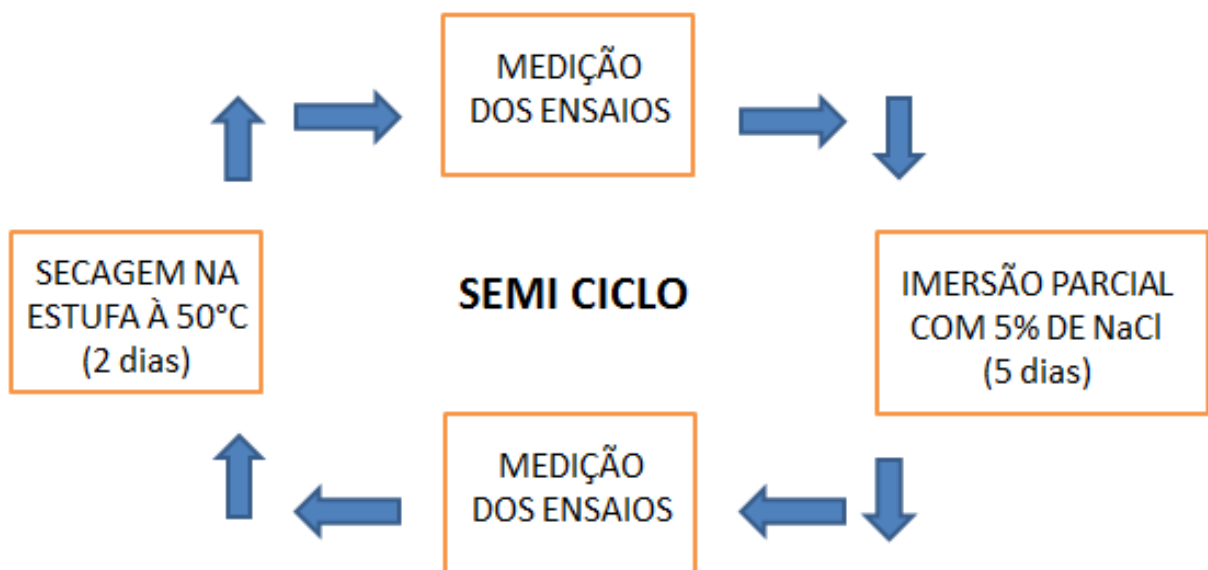
Para Liguó *et al.* (2005), o ciclo de umedecimento e secagem é o principal meio para aceleração da corrosão, já que proporciona o aumento da corrosão através da diferença de potencial entre o ânodo e o cátodo de barra de aço e a diminuição da resistência do concreto.

Então, os corpos de prova passaram por semiciclos de secagem (estufa à 50°C) e molhagem (imersão parcial) em solução de água acrescida de 5% de NaCl, simulando um ambiente agressivo, com altas temperaturas.

Os dados foram obtidos através do ensaio de resistividade realizado ao final de cada processo de secagem e imersão parcial, conforme esquematização apresentada na Figura 17.

Esse processo experimental de indução de íons cloretos deu-se por 47 dias de degradação artificial.

Figura 17 - Representação esquemática do processo acelerado de corrosão em laboratório



### 3.3 Ensaio utilizados nas amostras

Para avaliar a penetração dos íons cloretos e o processo corrosivo nas amostras, foram realizados os ensaios de resistividade, absorção de água por imersão e absorção capilar. Os procedimentos dos ensaios serão discutidos a seguir.

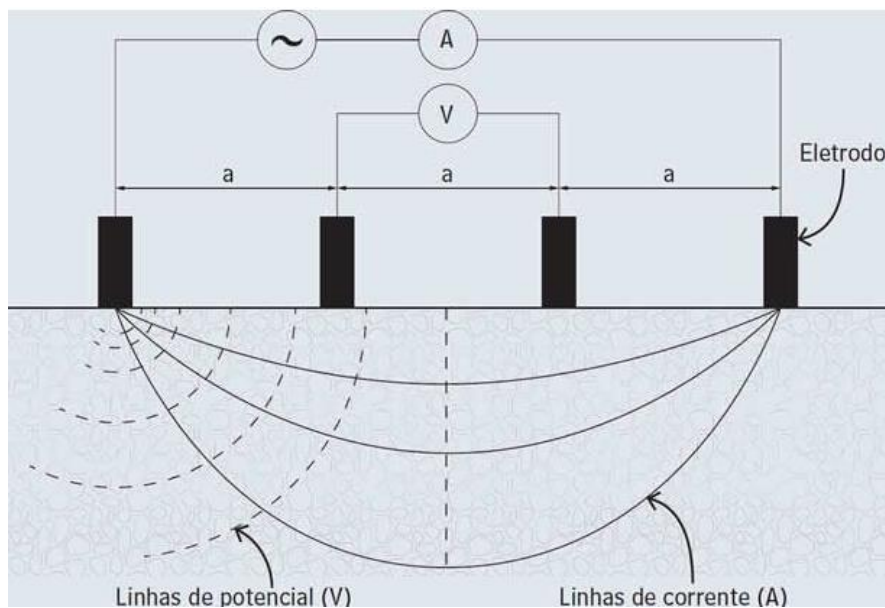
### 3.3.1 Ensaio de Resistividade Elétrica

Para o ensaio de resistividade, foi utilizada a conhecida “Técnica dos Quatro Eletrodos” ou Método Wenner.

Esse ensaio é utilizado para estimar a probabilidade de corrosão em estruturas armadas. Em síntese, quando a resistividade elétrica do concreto é baixa, a probabilidade de corrosão aumenta.

Como bem explica Araújo *et al.* (2014), esse método consiste basicamente no posicionamento de quatro eletrodos, alinhados e equidistantes um do outro, na superfície do concreto. Então, uma corrente elétrica é aplicada entre os dois eletrodos externos, sendo medida a diferença de potencial estabelecida entre os dois eletrodos internos, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 - Princípio de funcionamento – Método Wenner



Fonte: Araújo *et al.* (2014)

A partir daí, é determinada a resistência elétrica da porção do concreto contido dentro de uma semiesfera de raio igual ao espaçamento entre os eletrodos, centrada no ponto médio entre os dois eletrodos internos.

No entanto, Polde (2001) ressalva que essa técnica, poderá transmitir erros de até 25%, resultantes, por exemplo, de possíveis problemas de

contato entre os eletrodos e a superfície, além da própria heterogeneidade do concreto.

Já Bueno (2006) aponta que a umidade também é um fator que poderá alterar a resistividade do concreto, uma vez que zonas secas e úmidas em uma mesma estrutura podem produzir diferenças de potencial.

Dessa forma, durante os ensaios (antes das leituras medidas), realizou-se um pré-umedecimento dos corpos de prova.

Para avaliação numérica dos dados obtidos no método Wenner, utilizou-se a Tabela 1 já apresentada.

### *3.3.2 Ensaio de absorção de água por capilaridade e por imersão*

Ambos os ensaios tem por objetivo, conduzir a água para o interior do concreto através dos poros permeáveis existentes.

O procedimento desses ensaios é basicamente o mesmo, sendo a diferença, a quantidade de água que entra em contato com a superfície do corpo de prova.

O ensaio de absorção por imersão é regido pela NBR 9778 (ABNT, 2009), já o ensaio de capilaridade tem suas diretrizes expostas na NBR 9779 (ABNT, 2012).

Para cada procedimento, foram utilizados 2 corpos de prova de cada variável: AA1, P1, P2, REF.

Os equipamentos necessários foram:

- Estufa com capacidade para manter a temperatura de  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$ ;
- Recipiente nivelado para garantir o nível constante da água que entrará em contato com os corpos de prova durante o ensaio;
- Balança de resolução mínima igual a 0,025% da massa do corpo de prova.

Os ensaios consistiram inicialmente em determinar o peso dos corpos de prova após secá-los em estufa  $(105 \pm 5) ^\circ\text{C}$  até constância de massa.



*Para o Ensaio de Capilaridade:*

A partir desse peso inicial, os corpos de prova foram inseridos em um recipiente preenchido com água, de modo que o nível de contato ficasse limitado à face inferior do corpo de prova, excedendo em 5 ( $\pm 1$ )mm da superfície de contato.

*Para o Ensaio de Imersão:*

A partir do mesmo peso inicial, no primeiro dia, cada corpo de prova foi mantido em 2/3 do seu volume imerso em água, e nos 3 dias consecutivos, completamente imersos em água.

Assim, a penetração da água nos corpos de prova dos dois ensaios, foi acompanhada durante 4 dias consecutivos.

Os resultados foram tratados de acordo com as respectivas normas, utilizando-se a média obtida com as duas amostras de ensaio.

## CAPÍTULO 4

### APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

As análises apresentadas a seguir, buscaram estabelecer uma correlação entre as variáveis impostas e os corpos de prova de referência. Após a realização dos ensaios, os dados foram tratados considerando as normas vigentes referentes a cada estudo específico.

Destaca-se que os resultados individuais apresentados nos gráficos são resultantes das médias dos dados obtidos nas amostras.

Na sequência, serão apresentados graficamente os resultados dos ensaios de resistividade elétrica, absorção de água por imersão e absorção de água por capilaridade.

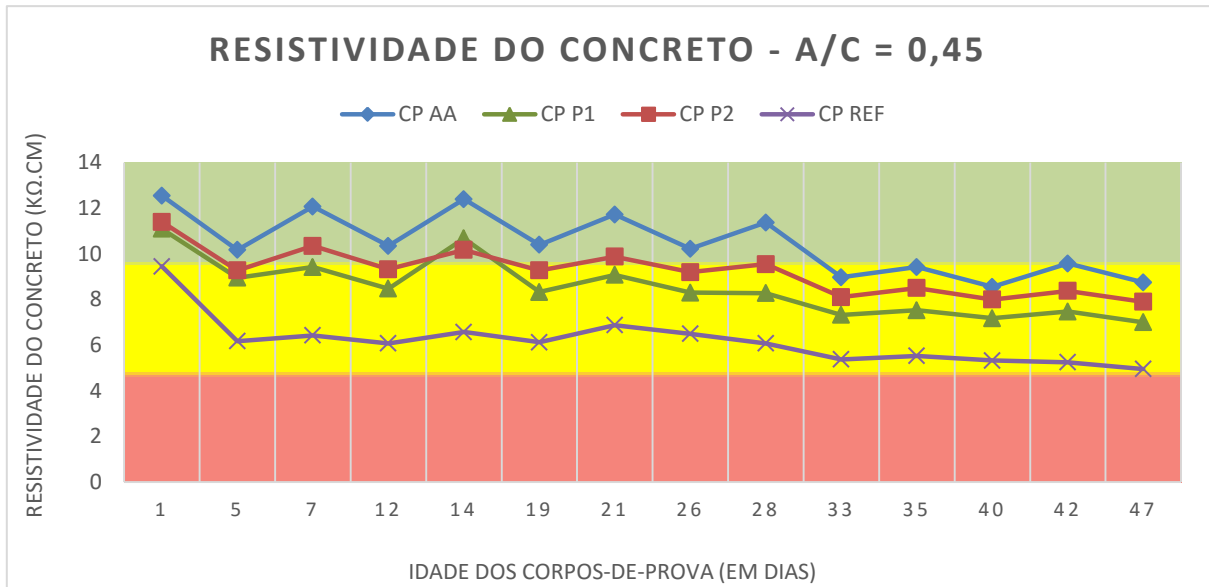
#### 4.1 Resistividade elétrica

##### 4.1.1 Corpos de prova com relação a/c = 0,45

Na Figura 19, pode-se verificar que os corpos de prova de referência foram os que obtiveram resultados mais baixos no ensaio de resistividade, com valores predominantes na faixa indicada em amarelo, ou seja, valores que representam alta probabilidade de corrosão.

Já os inibidores P1 e P2 (adicionados como forma de pintura) apresentaram comportamento semelhante, sendo o P2 ligeiramente mais eficiente, atingindo ainda valores com baixa probabilidade de corrosão.

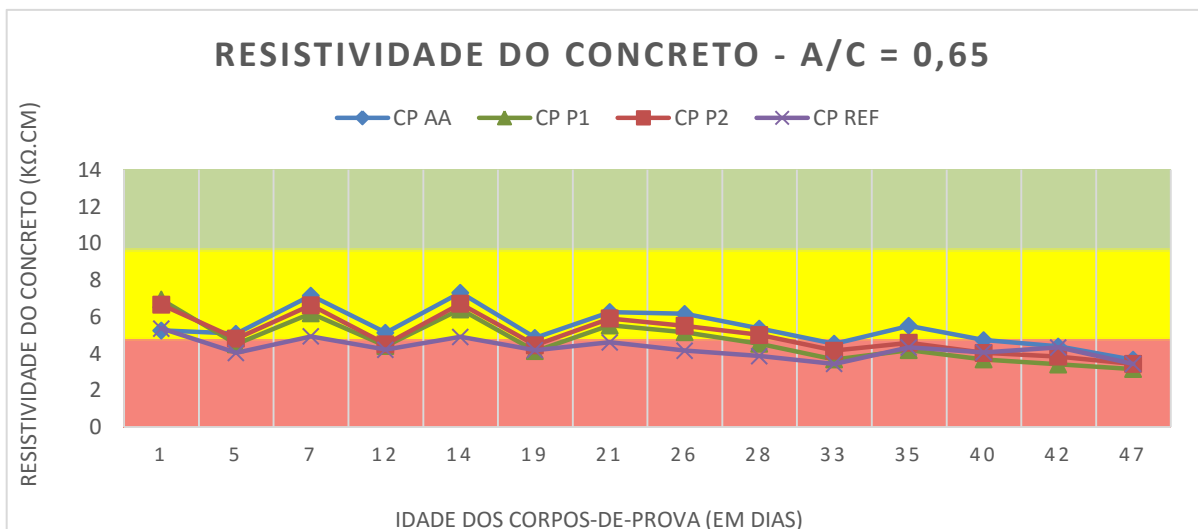
Por fim, o inibidor AA (adicionado à água de amassamento) foi o que mais se destacou positivamente, mantendo o concreto com baixa probabilidade de corrosão até o vigésimo oitavo dia de ensaio, decaindo para a faixa mais propícia a corrosão somente no trigésimo terceiro dia. De forma geral, ficou visto que os inibidores químicos possuem uma resistência maior à corrosão quando comparados a concretos sem o acréscimo desses componentes.

Figura 19 - Corpos de prova com relação  $a/c = 0,45$ 

#### 4.1.2 Corpos de prova com relação $a/c = 0,65$

Na Figura 20, temos o comportamento geral dos corpos de prova de referência e dos corpos de prova com adição de inibidores.

Para o concreto produzido com uma maior relação  $a/c = 0,65$ , ou seja, em uma condição mais porosa, ficou evidente que o sistema tornou-se mais instável e suscetível ao processo corrosivo. Isso é dado basicamente pela maior quantidade de poros na estrutura do concreto, proporcionando o ingresso de agentes externos à rede de vazios do concreto.

Figura 20 - Corpos de prova com relação  $a/c = 0,65$ 

Analisando ainda a Figura 20, é notável que todos os corpos de prova ficaram suscetíveis à corrosão. No entanto, ainda assim, os corpos de prova com efeito dos inibidores retardaram a queda nos valores de resistividade.

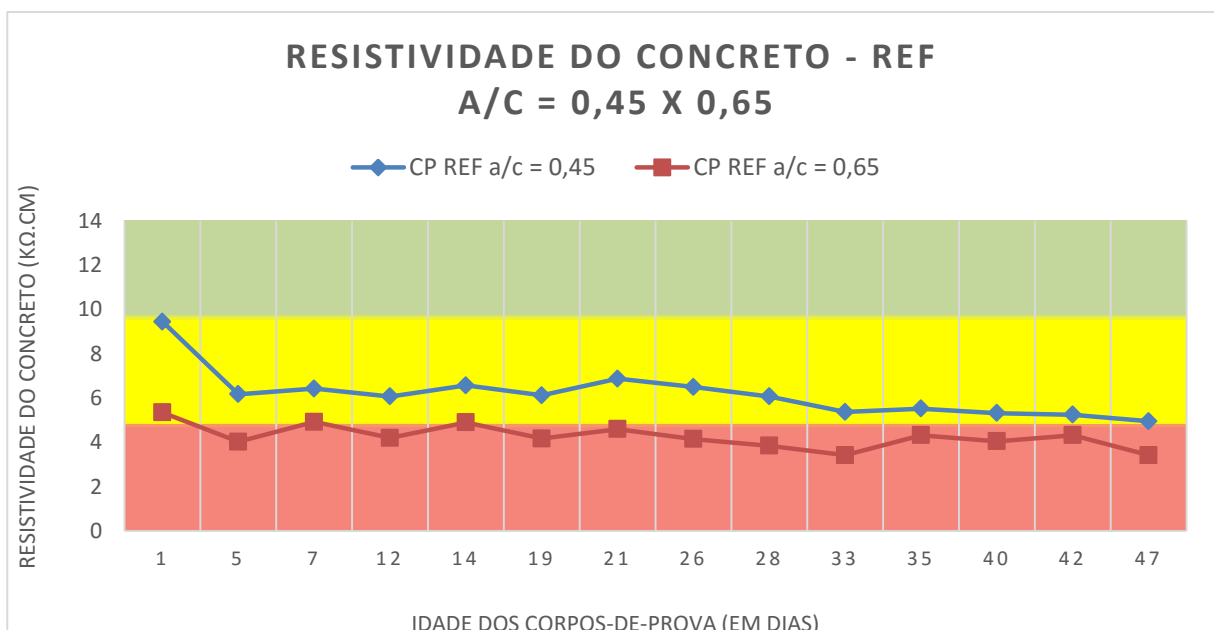
#### 4.1.3 Corpos de prova de referência com relação $a/c = 0,45$ e relação $a/c = 0,65$

Na Figura 21, tem-se a comparação dos corpos de prova de referência com variação somente da relação  $a/c$ , ou seja, temos apenas a influência dessa variável nos resultados do ensaio de resistividade.

Como exaustivamente apresentado na literatura, o concreto com mais quantidade de água na sua composição é menos resistente e possui maior quantidade de vazios. Assim, os corpos de prova com relação  $a/c = 0,65$  foram os que apresentaram resultados mais baixos, indicando uma probabilidade altíssima de corrosão.

Embora os corpos de prova com relação  $a/c = 0,45$  estejam situados em zona de alta probabilidade de corrosão, possuem qualidade superior se comparados aos de  $a/c = 0,65$ .

Figura 21 - Corpos de prova de referência com relação  $a/c = 0,45$  e  $a/c = 0,65$

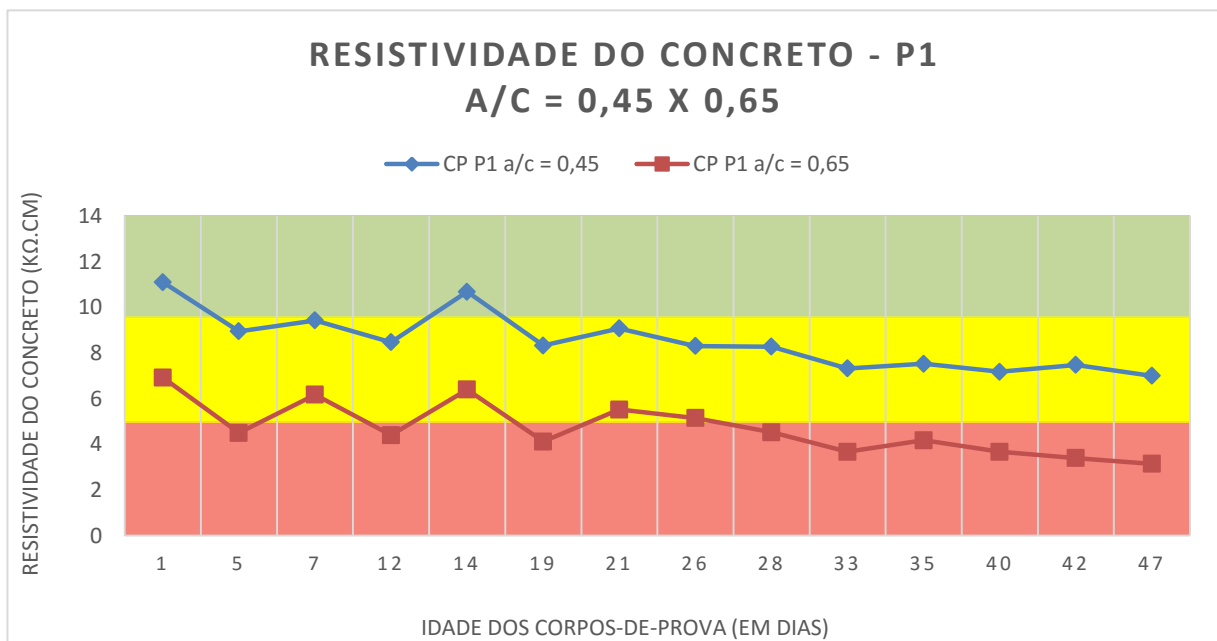


#### 4.1.4 Corpos de prova P1 com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65

Na Figura 22, comparando o comportamento do inibidor P1 frente às relações a/c (0,45 e 0,65), verifica-se seu melhor desempenho quando aplicado aos corpos de prova menos permeáveis.

Já os corpos de prova com relação a/c = 0,65, desde o início do experimento mostraram-se passíveis de corrosão, decaindo de vez para a faixa de altíssima probabilidade de corrosão a partir do vigésimo sexto dia do ensaio.

Figura 22 - corpos de prova P1 com relação a/c = 0,45 e a/c = 0,65

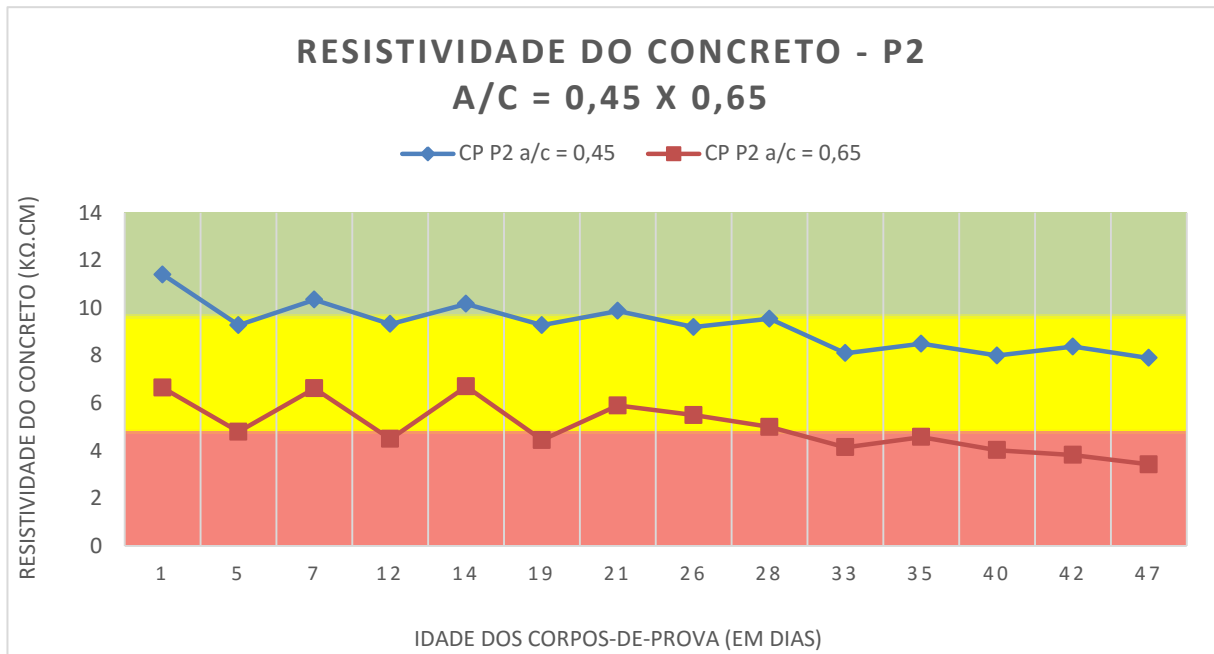


#### 4.1.5 Corpos de prova P2 com relação a/c = 0,45 e relação a/c = 0,65

Como podemos observar na Figura 23, o inibidor P2 mostrou-se mais eficiente em relação ao comportamento do inibidor P1 (Figura 21). Embora seja uma diferença pequena, podemos notar que o inibidor P2 (a/c = 0,45) retardou a probabilidade de corrosão quando comparado com o inibidor P1

para a mesma variável, acontecendo de forma semelhante quando comparamos P2 ( $a/c = 0,65$ ) e P1 ( $a/c = 0,65$ ).

Figura 23 - corpos de prova P2 com relação  $a/c = 0,45$  e  $a/c = 0,65$



#### ***4.1.6 Corpos de prova AA1 com relação $a/c = 0,45$ e relação $a/c = 0,65$***

Na Figura 24, tem-se a comparação dos corpos de prova que receberam o inibidor de corrosão na etapa de produção do concreto, ou seja, incorporados diretamente à água de amassamento.

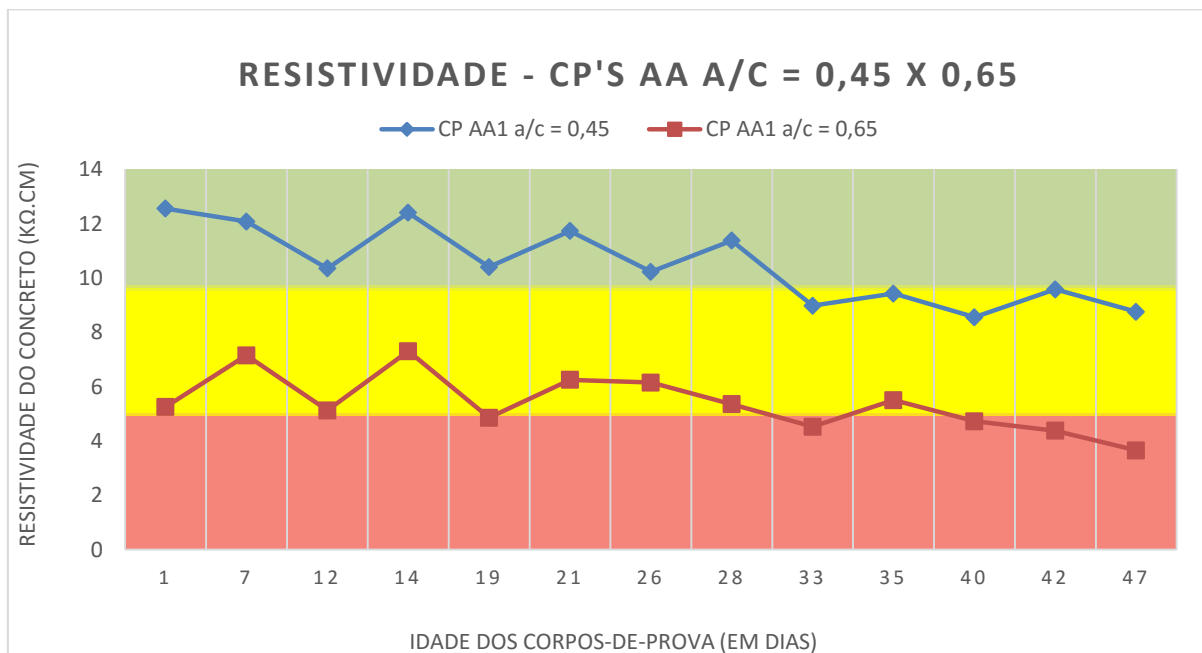
Como já era esperado, foram os inibidores que apresentam melhor desempenho quanto à inibição dos íons cloretos. Isso se deve porque sua ação bloqueadora é iniciada com o concreto ainda no seu estado fresco, diferentemente dos inibidores à base de pintura, que só começam a agir após o endurecimento da superfície do concreto.

Como já observado, os corpos de prova com relação  $a/c = 0,45$ , ou seja, os menos porosos, foram os que apresentaram melhor performance em todas as situações até aqui já vistas.

Pelo gráfico, é possível notar que a probabilidade de corrosão dos corpos de prova ( $a/c = 0,45$ ) ficou baixa até o vigésimo oitavo dia, decaindo para o intervalo de alta probabilidade de corrosão a partir do trigésimo terceiro dia.

Já os corpos de prova ( $a/c = 0,65$ ), tiveram valores iniciais já compreendidos na faixa de alta probabilidade de corrosão, decaindo para a faixa de altíssima probabilidade a partir do vigésimo oitavo dia de ensaio.

Figura 24 - corpos de prova AA com relação  $a/c = 0,45$  e  $a/c = 0,65$



## 4.2 Absorção de água por imersão

A seguir, serão expostos os resultados médios do ensaio de absorção de água por imersão para os corpos de prova de referência e os corpos de prova com adição dos inibidores P1, P2 e AA.

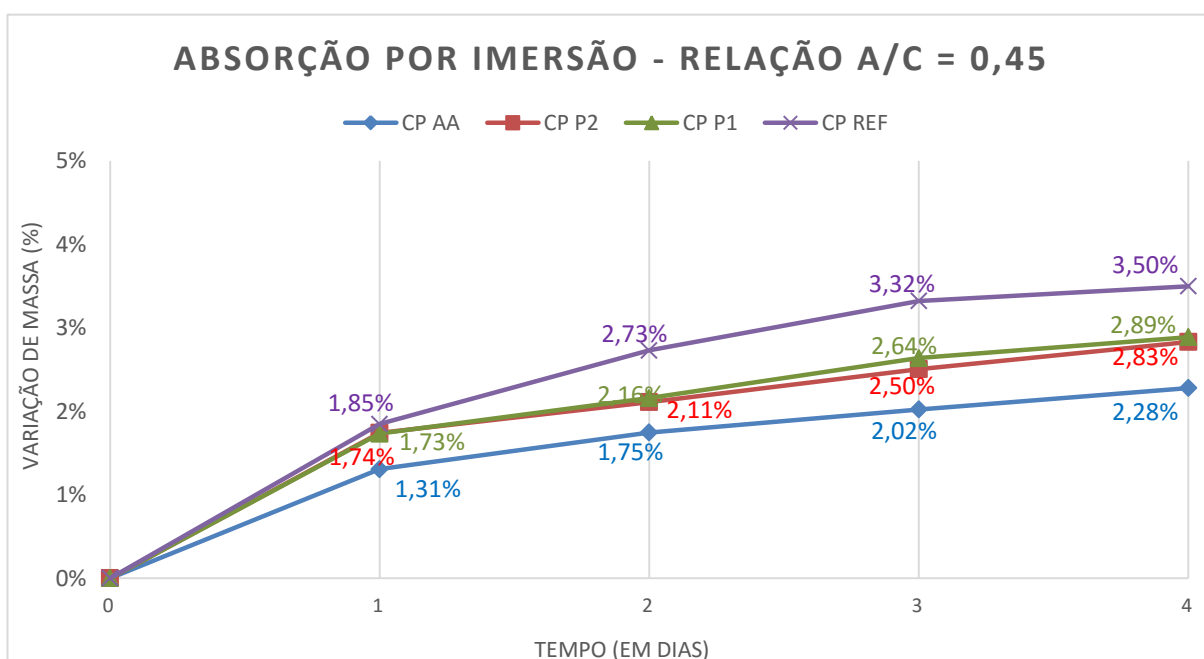
#### 4.2.1 Corpos de prova com relação a/c = 0,45

A partir da análise do gráfico referente aos corpos de prova com relação a/c = 0,45 (Figura 25), ficou claro que o tratamento a base de carboxilato de amina (AA) apresentou a maior influência em relação à absorção de água por imersão.

De forma geral, pode-se dizer que os outros dois tratamentos à base de pintura (P1 e P2) apresentaram efeito muito semelhante neste tipo de ensaio, mas, ainda assim, com menor percentual de absorção de água se comparados aos corpos de prova sem adição de qualquer produto inibidor. Observou-se também, que todas as amostras atingiram uma diminuição no ganho de massa devido à absorção de água entre o terceiro e quarto dia de ensaio.

A maior diferença de ganho de massa observada no último dia do ensaio foi de 2,28% (AA) para 3,50% (REF). Ou seja, a redução média da absorção de água pelo efeito da substância impregnada foi da ordem de 53,50%.

Figura 25 - Resultado da absorção de água por imersão dos corpos de prova com relação a/c = 0,45





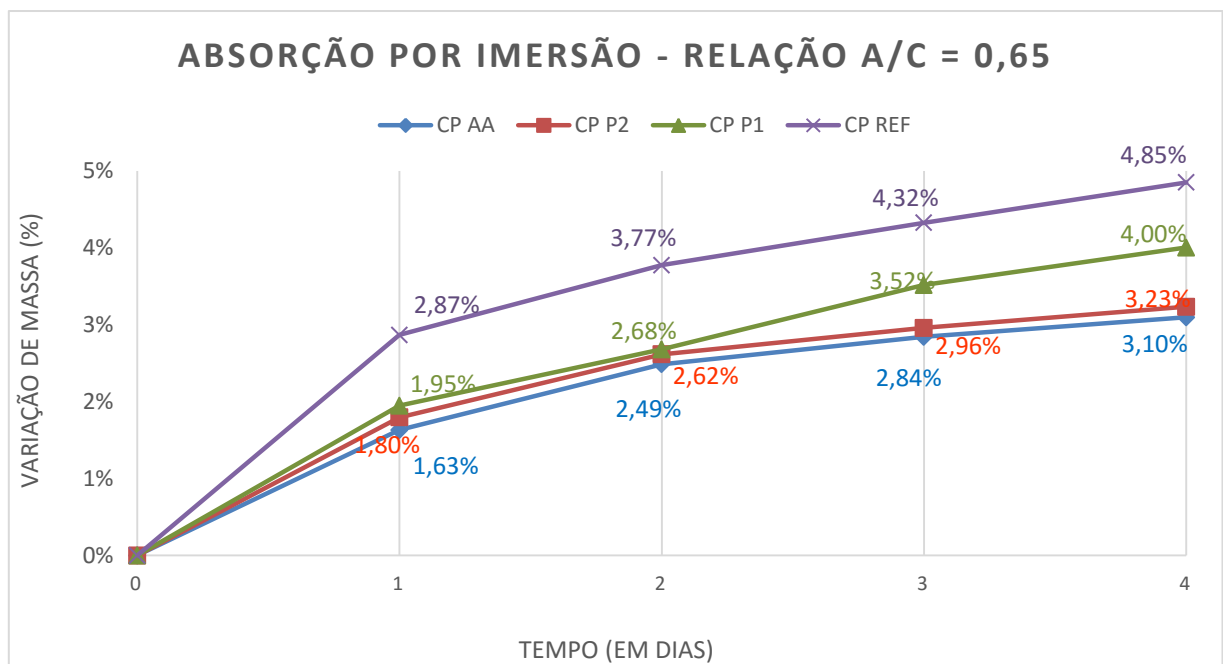
#### 4.2.2 Corpos de prova com relação a/c = 0,65

De antemão, já era esperado que o próximo gráfico apresentasse maiores porcentagens médias de ganho de massa, uma vez que a rede de poros do concreto (0,65) contém mais quantidade de vazios quando comparada à rede do concreto com menor quantidade de água em sua composição.

Nota-se que o percentual médio de ganho de massa dos corpos de prova de referência se sobressai em relação aos demais, ficando à frente dos CP's: P1, P2 e AA, respectivamente.

No início do ensaio (Figura 26), a maior diferença foi de 1,63% (AA) para 2,87% (REF), representando uma redução de 76% na absorção de água quando se utilizou o inibidor químico.

Figura 26 - Resultado da absorção de água por imersão dos corpos de prova com relação a/c = 0,65



#### 4.3 Absorção de água por capilaridade

A seguir, serão apresentados os resultados médios do ensaio de absorção de água por capilaridade para os corpos de prova de referência e os corpos de prova com adição dos inibidores P1, P2 e AA.

### 4.3.1 Corpos de prova com relação a/c = 0,45

A Figura 27 representa a média dos resultados obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade para os cp's com relação a/c = 0,45.

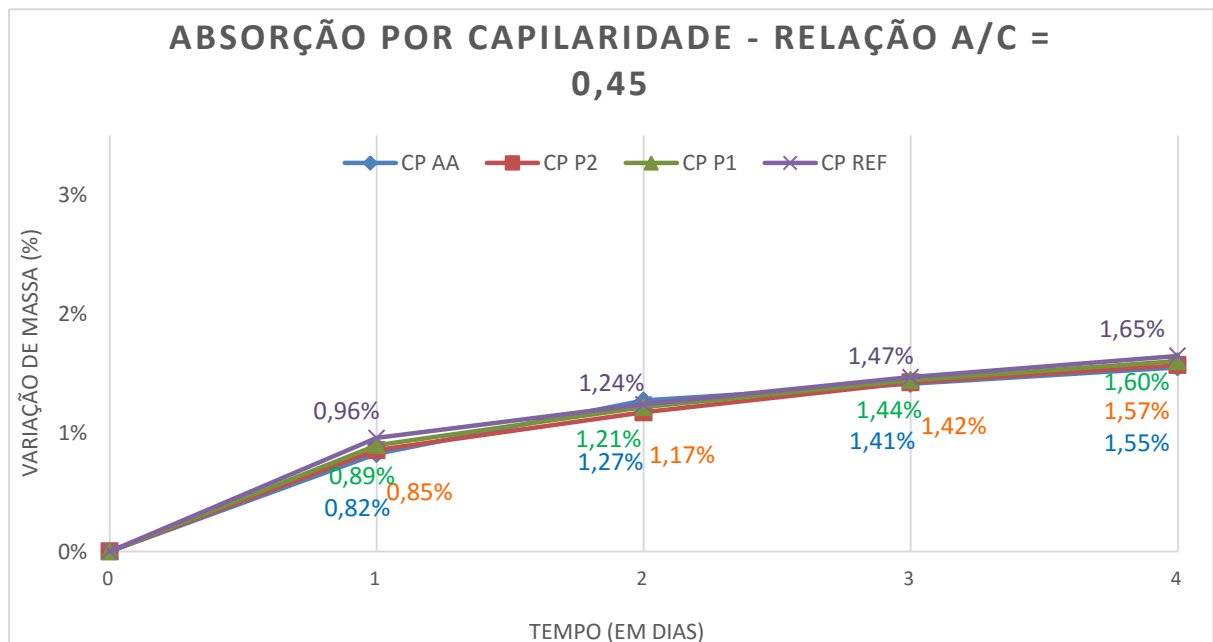
Neste caso, os inibidores também mostraram efeito, reduzindo a absorção de água pelo concreto, mas de forma menos acentuada.

Como esperado, os corpos de prova de referência apresentaram os valores mais elevados de absorção por capilaridade, isso porque não receberam adição de nenhum produto.

No último dia do ensaio, a média da maior diferença é dada pelo inibidor AA (1,55%) para (1,65%) do corpo de prova de referência, representando uma diminuição de 6,45% da absorção de água.

Em linhas gerais, pode-se concluir que o concreto não tratado apresenta maior capacidade de sucção de água para o interior da sua rede de poros.

Figura 27 - Resultado da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com relação a/c = 0,45



### 4.3.2 Corpos de prova com relação a/c = 0,65

Na Figura 28, têm-se os resultados médios dos corpos de prova com e sem adição de produtos químicos produzidos com relação a/c = 0,65.

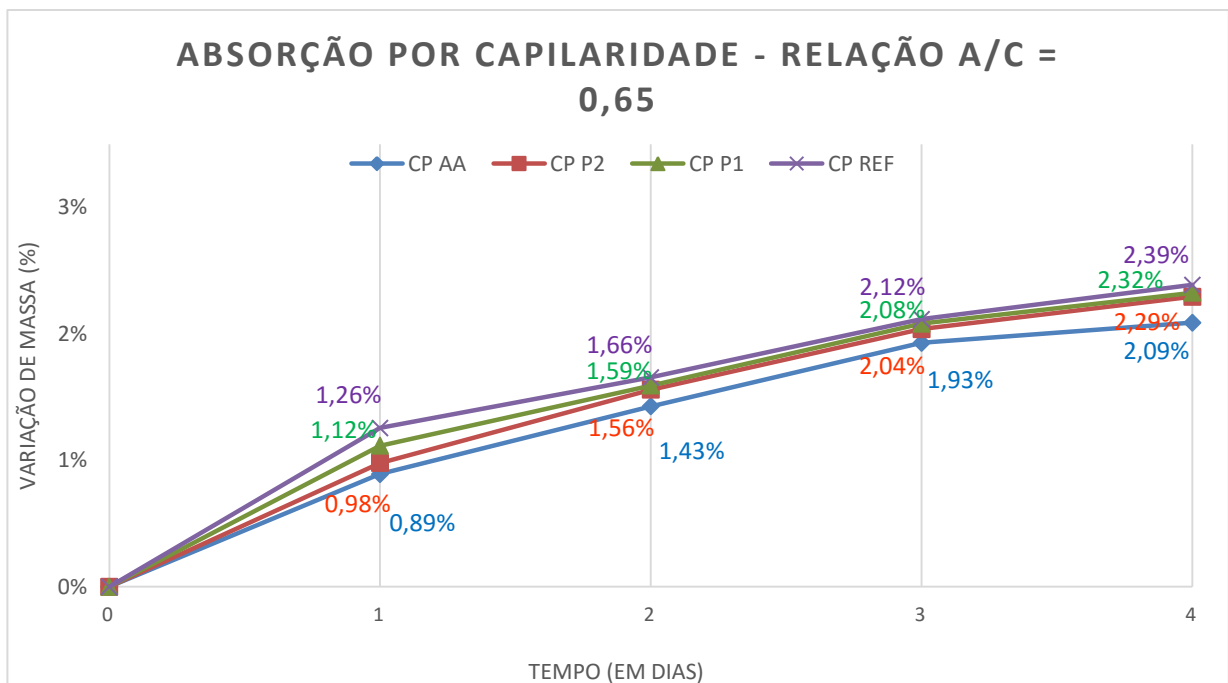
A princípio, percebe-se que todos os corpos de prova absorveram maior quantidade de água que as amostras anteriormente apresentadas (Figura 27), devido essencialmente à qualidade inferior do concreto.

Também em comparação, percebe-se que o desempenho dos inibidores se deu de forma mais significativa para um concreto mais poroso.

O inibidor AA, foi o que apresentou melhor inibição de água desde o início do ensaio, totalizando uma diminuição de absorção de 14,35% no quarto dia observado.

Como a absorção de água por capilaridade é a forma de ingresso de água mais recorrente em uma estrutura real, pode-se considerar que esta diminuição contribui diretamente para a durabilidade do concreto armado. Se o uso do inibidor não facilita a penetração de água, isso significa que também bloqueia o ingresso dos íons cloreto ou qualquer outro agente agressivo.

Figura 28 - Resultado da absorção de água por capilaridade dos corpos de prova com relação a/c = 0,65



## CAPÍTULO 5

### CONSIDERAÇÕES FINAIS

#### 5.1 Conclusões

A pesquisa avaliou, através dos ensaios de resistividade, absorção capilar e imersão, o efeito dos aditivos químicos inibidores de corrosão no concreto.

As conclusões são comparativas e baseadas em tendências, sendo necessárias, para melhor quantificar o processo de corrosão, análises complementares como, por exemplo, ensaio de potencial de corrosão e compressão dos corpos de prova.

Verificou-se, sobretudo, que a simulação em laboratório mostrou-se agressiva e eficiente para analisar os inibidores químicos no sistema concreto-aço.

Com relação aos inibidores AA, P1 e P2 estudados, concluiu-se que:

- Os corpos de prova com aditivo inibidor do tipo AA apresentaram um desempenho comparativamente melhor que os demais sistemas de proteção;
- Foi possível classificar os aditivos químicos em ordem decrescente de desempenho em:

Inibidor AA > Inibidor P2 > Inibidor P1

- A redução da relação água/cimento (0,45) melhorou o desempenho do concreto de referência e potencializou a performance dos três inibidores de corrosão utilizados.

Apesar dos inibidores de corrosão P1 e P2 mostrarem-se eficientes em relação aos corpos de prova de referência, foi o inibidor AA o que

apresentou ser mais resistente à corrosão no concreto, evidenciando uma possível modificação microestrutural da pasta de cimento formada.

Tal situação poderá conduzir ao desenvolvimento de concretos menos permeáveis e mais resistentes às intempéries.

Em síntese, os resultados evidenciam a importância do uso cauteloso desses aditivos, principalmente se considerarmos a grande quantidade de fabricantes e seus produtos em constante evolução.

## 5.2 Sugestões para trabalhos futuros

Como forma de estender e aprofundar o conhecimento acerca do tema proposto pode-se considerar como sugestões futuras, os seguintes tópicos:

- Confeccionar corpos de prova utilizando outros tipos de cimentos nacionais;
- Analisar os mesmos inibidores modificando as relações água/cimento;
- Estudar outros inibidores com composições diferentes de forma a ordená-los quanto seu desempenho;
- Estudar os inibidores de corrosão em uma estrutura real;
- Avaliar a capacidade de proteção dos inibidores se alterada a concentração indicada pelos fabricantes;
- Moldar corpos de prova para rompê-los nas primeiras idades e verificar se há influência dos inibidores nas resistências iniciais;
- Realizar ensaios de compressão para estabelecer uma correspondência entre o acréscimo da substância e a redução, aumento ou estabilização da capacidade de resistência da estrutura.

## REFERÊNCIAS

- ALAMOUDI, O. S. B., MASLEHUDDIN, M., LASHARI, A. N., ALMUSALLAM, A. A. Effectiveness of corrosion inhibitors in contaminated concrete. **Cement and Concrete Composites**, p. 439-449, 2003.
- ALMEIDA, K. S. **Análise comparativa da capacidade de proteção de adições minerais pozolânicas quanto à corrosão de armaduras por íons cloretos**. 176 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2012.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-876**: Standard test method for half-cell potentials for uncoated reinforcing steel in concrete. In: Annual book of ASTM Standards. West Conshohocken, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-1152**: Standard Practice for Preparing, Cleaning, and Evaluating Corrosion Test Specimens. In: Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, 1999.
- ANDRADE, J. J. O.; **Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- AMORIM, A.A. **Durabilidade das estruturas de concreto armado aparentes**. 74 p. Monografia (Especialização em Construção Civil) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.
- ARAÚJO, F.W.C. **Contribuição à viabilização da técnica de realcalinização do concreto carbonatado através da absorção/difusão de soluções alcalinas**. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2014.
- ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z.; OLIVEIRA, K. J.; FILHO, M. L. P.; Técnicas de medida da resistividade elétrica em estruturas atmosféricas de concreto convencional. **Revista Técnica Educação**. p. 45 – 49, Set, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5732**: Cimento Portland comum - Especificação. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5733**: Cimento Portland de alta resistência inicial. Rio de Janeiro, 1991.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5735**: Cimento Portland de alto-forno. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5736**: Cimento Portland pozolânico. Rio de Janeiro, 1999.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Moldagem e cura de corpos-de-prova – Procedimento. Rio de Janeiro, 2008.

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 - Especificações. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7224**: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da área específica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7480**: Barras e fios de aço destinados a armadura para concreto armado. Rio de Janeiro, 2007.

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, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11578**: Cimento Portland composto – Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações Habitacionais – Desempenho- parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15900**: Água para amassamento do concreto: Requisitos. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 65** : Cimento Portland – Determinação do tempo de pega Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 248** : Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

BASHEER, P. A. M.; BASHEER, L.; CLELAND, D. J.; LONG, A. E. Surface Treatments for Concrete: Assessment Methods and Reported Performance. **Construction and Building Materials**, v. 11, p. 413-429, 1997.

BATIS, G.; PANTAZOPOULOU, P. "Advantages of the simultaneous use of corrosion inhibitors and inorganic coating," **Cement and Concrete Technology**, Istanbul, p. 474-483, 2000.

BERTOLINI, L. **Materiais de construção: patologia, reabilitação e prevenção**. 1 edição, São Paulo: Oficina de Textos, 414 p., 2010.

BOLINA, C. C. **Inibidores de Corrosão: Avaliação do desempenho frente a corrosão do aço induzida por carbonatação e cloretos**. 175p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2008.

BUONO, L. P. S.; **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado – ensaios eletroquímicos**. Trabalho de Conclusão de Curso, 103p. Universidade Anhembi Morumbi, São Paulo, 2006.

CARVALHO, J. D. N. D.. Sobre as origens e desenvolvimento do concreto. Centro de Tecnologia da universidade de Maringá, **Revista Tecnológica**, v. 17, p. 19-28, 2008.

CASCUDO, O. M. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 234 p. São Paulo: PINI, 1997.

CASCUDO, O. M. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. PINI, São Paulo, 2000.

CASCUDO, O. M. Estrutura de Concreto com Problemas de Corrosão da Armadura. **IBRACON**, cap.35, v. 2, p. 1071-1108, 2005.

CEB, Comitê Euroanternational Du Beton. **Manual de Calculo: Fissuration et deformations**. Paris, 1992.

COELHO, S. F. L; NETO; A. C. S.; SILVA, J. S; MACHADO, S. S.; TONHOLO, J.; UCHOA, S. B. B.; Inibidores de corrosão do concreto: estudo prospectivo. **Cad. Prospec.**, v.8, n.3, p. 495-501, Salvador, 2015.

EL HASSAN, J.; BRESSOLETTE, P.; CHATEAUNEUF, A.; EL TAWIL, K. **Reliabilitybased assessment of the effect of climatic conditions on the corrosion of RC structures subject to chloride ingress**. **Engineering Structures**, v.32, p.3279-3287, 2010.

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com fibras. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**. vol. 2, p. 1195-1224, 2005.

FIGUEIREDO, E. J. P.; MEIRA, G. R.; **Corrosão das armaduras das estruturas de concreto**. **Revista Alconpat**, 2012.

FREIRE, K. R. R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. 192 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e



Ciência dos Materiais) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

FORNAZARI, M. G.; GONÇALVES, R. S.; SPINELLI, A. **Corrosão do cobre na presença de cafeína**. Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Química. XXIX. Florianópolis, 2006.

FUSCO, P.B. **Tecnologia do Concreto Estrutural**. São Paulo: Editora PINI, 2008.

GENTIL, V. **Corrosão**, 4 edição. Rio de Janeiro, RJ: Editora LTC – Livros Técnicos e Científicos Editores S.A., 2003.

GUEDES, I. C. **Eficiência dos inibidores de corrosão benzotriazol, n-feniltiouréia e cloreto de hexadeciltrimetil amônio quaternário para ferro puro, aço carbono e aço ARBL em meio de ácido sulfúrico**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.

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

HELENE, P.; PACHECO, J. M. Controle da Resistência do Concreto. **Concreto & Construção**, v. 69, p. 75-81, 2013.

KROPP, J. Chloride in concrete. **Performance Criteria for Concrete Durability**. Londres: E & FN Spon,., p.138-164, 1995.

LARA, P. L. O; **Análise da relação entre propriedades de transporte de água e os mecanismos de corrosão das armaduras**. 154p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2003.

LIBERATI, E. A. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade estrutural. **Revista Ibracon de estruturas e materiais**. vol. 7, p. 379-413, 2014.

LIGUO; Y. YING SHU; LI, FU-MIN, **Journal of China University of Mining and Technology**, v.215, p. 197-202, 2005.

MEDEIROS, M. H. F. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos com proteção superficial frente à ação de íons cloretos**. 156f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia, Universidade de São Paulo, 2008.

MEDEIROS, M.; HELENE, P. Efficacy of Surface Hydrophobic Agents in Reducing Water and Chloride Ion Penetration in Concrete. **Materials and Structures**, v. 41,n.1, p. 59-71, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto – Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2ª edição., Ibracon, SãoPaulo, 2014.

MORAIS NETO, D. P. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em estruturas de concreto armado**. 71f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade de Pernambuco, Recife, 2015.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J. J.. **Tecnologia do Concreto**. 2ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2013.

NMAI, C. K. **Corrosion-inhibiting admixtures: passive, passive-active versus active systems**. *Durability of concrete - Third international conference*. Nice, France. Ed. 154 V. M. Malhotra, p. 565-585, 1994.

NMAI, C. K. **Multi-functional organic corrosion inhibitor**. *Cement and Concrete Composites*. Vol. 26, p. 199-207, 2004.

ORMELLESE, M.; BERRA, M.; BOLZONI, F.; PASTORE, T.. **Corrosion inhibitors for chlorides induced corrosion in reinforced concrete structures**. *Cement and Concrete Research*, p. 536-547, 2006.

POLDER, R. B. **Test methods for on site measurement of resistivity of concrete – a RILEMTC-154 technical recommendation**. *Construction and Building Materials*. v.15, No.2-3, p.125-131, 2001.

RIBEIRO D. V.; HELENE, P. R. L. **Corrosão em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. Elsevier, 240 p. 2013.

RIBEIRO, D. V. **Corrosão em Eestruturas de concreto armado: teoria, controle e métodos de análise**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

RINCÓN, O. T. **Durability of concrete structures: DURACON, an Iberoamerican project. Preliminary results** *Building and Environment*. v. 41, p. 952–962, 2006.

ROCHA, I. **Corrosão em estruturas de concreto armado**. *Revista Especialize IPOG*. v.1, edição n.10, 2015.

SADOVSKI, A. **Teor crítico de cloretos para iniciação da corrosão do aço no betão: Influência do estado de superfície da armadura**. 182 p. Dissertação. Área Departamental de Engenharia Química. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, 2014.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto**. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

SANTOS, A.V.S.; **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação**. 21 f. MBA (Projeto, Execução e Controle de Estruturas e Fundações) – Instituto de Pós-Graduação, Salvador, Bahia, 2015.

SHIELDS, M. A.; LEEK, D. S.; LAMBERT, P. Coatings for the protection of structural materials. **Construction Maintenance and Repair**, p. 2-9, 1992.

SILVA, D. R; NÓBREGA, A. C. V; **Estudo de inibidores recomendados para concreto**. 22° CONBRASCORR - Congresso Brasileiro de Corrosão, Salvador, Bahia, 2002.

SITTER, W. R. Costs for service life optimization. The "Law of fives". In: Durability of concrete structures, 1984, Copenhagen. **Anais...** Copenhagen: CEB-RILEM, 1984.

SOARES, A. P. F.; VASCONCELOS, L.T.; NASCIMENTO, F. B. C.; Corrosão em armaduras de concreto. **Revista Cadernos de Graduação: ciências exatas e tecnológicas**. v.3, n.1, p. 177-188. nov., 2015.

SÖYLEV, T. A.; RICHARDSON M. G.; Corrosion inhibitors for steel in concrete: state-of-the-art report. **Construction and Building Materials**, Elsevier Ltd, n. 22, p. 609-622, 2008.

TORRES, A. **Corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado: uma meta análise**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. 468 p. Sweden: CBI, 1982.

VIEIRA, F.M.P. **Contribuição ao estudo da corrosão de armaduras em concretos com adição de sílica ativa**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

VIEIRA, D. V.; PELISSER, F.; PAULA, M. M. S.; NÓBREGA, A. C. V. Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado. **Revista Matéria [online]**, Rio de Janeiro, RJ, n.3, p. 431-444, 2010.

VILLANUEVA, M. M.; **A importância da manutenção preventiva para o bom desempenho da edificação**. Trabalho de conclusão de curso (Departamento de Construção Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

WINSLOW, D.; LIU, D. The pore structure of paste in concrete. **Cement and Concrete Research**, n.20, p. 227-235, 1990.