

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA – UNIPAMPA

ANDRESSA FERRAZZA HECK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BENZOATO E MOLIBDATO COMO
INIBIDORES DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Alegrete-RS

2018

ANDRESSA FERRAZZA HECK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BENZOATO E MOLIBDATO COMO
INIBIDORES DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade Federal do Pampa como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil

Orientadora: Dra. Silvia Tamborim

Alegrete-RS

2018

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos pelo(a) autor(a) através do Módulo de Biblioteca do Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

H448a Heck, Andressa

Análise da viabilidade do uso de Benzoato e Molibdato como inibidores de corrosão em Estruturas em Concreto Armado / Andressa Heck.

99 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do Pampa, MESTRADO EM ENGENHARIAS, 2018.

"Orientação: Silvia Tamborim".

1. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado. 2. Inibidores de Corrosão Benzoato e Molibdato. I. Título.

ANDRESSA FERRAZZA HECK

ANÁLISE DA VIABILIDADE DO USO DE BENZOATO E MOLIBDATO COMO
INIBIDORES DE CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação Stricto Sensu da Universidade Federal do Pampa como requisito para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Tecnologia de Materiais

Dissertação de mestrado defendida e aprovada em: 10 de dezembro de 2018.

Banca examinadora:



Prof. Dr. Sílvia Tamborini

Orientadora

(UFRS)



Prof. Dr. Luiz Eduardo Kosteski

(UNIPAMPA)


Prof. Dr. Tiago Falcade

(UFRGS)

RESUMO

Com o intuito de proporcionar melhorias na vida útil das estruturas de concreto armado, muitas pesquisas têm buscado soluções que mitiguem as patologias na armadura, oriundas de processos corrosivos. Neste trabalho foi avaliado o efeito da inclusão de benzoato de sódio ($\text{NaC}_6\text{H}_5\text{CO}_2$) e molibdato de sódio (Na_2MoO_4) na matriz de concreto. Neste sentido a técnica não destrutiva de espectroscopia de impedância eletroquímica propicia um bom monitoramento das interfaces concreto/poros saturados de eletrólito e armadura/concreto. Observa-se nitidamente um aumento nos valores de resistência na interface armadura/concreto quando as estruturas de concreto armado se encontram imersas em solução de NaCl 3,5% em presença dos inibidores benzoato e molibdato de sódio. Este aumento de resistência é atribuído possivelmente a adsorção dos ânions benzoato ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-$) e molibdato (MoO_4^{2-}) sobre a barra de aço CA 50. O processo de adsorção dos inibidores sobre a barra de aço CA 50 proporciona não somente um efeito barreira contra processos corrosivos como também aumenta a vida útil da armadura.

Palavras-chave: Patologia, Aço, Corrosão.

ABSTRACT

In order to provide improvements in the useful life of reinforced concrete structures, many researches have sought solutions that mitigate the pathologies in the reinforcement, originating from corrosive processes. In this work the effect of the inclusion of sodium benzoate ($\text{NaC}_6\text{H}_5\text{CO}_2$) and sodium molybdate (Na_2MoO_4) on the concrete matrix was evaluated. In this sense, the non-destructive electrochemical impedance spectroscopy technique provides a good monitoring of the concrete / saturated electrolyte and reinforced concrete / concrete interfaces. An increase in strength values at the reinforcement / concrete interface is clearly observed when the reinforced concrete structures are immersed in 3.5% NaCl solution in the presence of the benzoate and sodium molybdate inhibitors. This increase in strength is possibly attributed to the adsorption of the benzoate ($\text{C}_6\text{H}_5\text{CO}_2^-$) and molybdate (MoO_4^{2-}) anions on the AC 50 steel bar. The adsorption process of the inhibitors on the AC 50 steel bar provides not only a barrier effect against corrosive processes as well as increases the life of the armature.

Key words: Pathology, Steel, Corrosion.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Vigas e pilares em concreto armado.	11
Figura 2- Concretagem de um piso industrial armado.	12
Figura 3- Concreto em seu estado fresco sendo colocado dentro dos moldes.	13
Figura 4- Classe de agressividade segundo NBR 6118/2014.	25
Figura 5- Cobrimento de acordo com classe de agressividade do meio.	25
Figura 6- Esquema da corrosão de armadura no concreto.	27
Figura 7- Valores críticos de íons cloreto.	30
Figura 8- Diagrama de equilíbrio E_H versus $\text{Log} [\text{Cl}^-]$ para o ferro em $\text{pH} \sim 12$, a 20°C	31
Figura 9- Diagrama de Pourbaix simplificado do sistema $\text{Fe}-\text{H}_2\text{O}$	32
Figura 10- Medida de Potencial de Corrosão.	37
Figura 11- Diagramas de Nyquist e Bode genérico para um sistema metal/eletrolito.	39
Figura 12- Barra de aço CA 50 de 6,3mm.	45
Figura 13- Molibdato de Sódio.	46
Figura 14- Benzoato de Sódio.	47
Figura 15- Moldagem dos corpos de prova.	49
Figura 16- Corpos de prova moldados com a introdução das barras de aço e grafite.	49
Figura 17- Ensaio tronco de cone (Slump Test).	50
Figura 18- Indicador de pH do concreto.	51
Figura 19- Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.	52
Figura 20- Ensaio de Resistência a Compressão.	53
Figura 21- Amostras Imersas em Tanque com Temperatura Controlada.	54
Figura 22- Amostras ensaiadas em recipiente para processo de ebulição.	55
Figura 23- Amostras em recipiente em ebulição.	55
Figura 24- Pesagem em Balança Hidrostática.	56
Figura 25- Amostras Envoltas por Fita Durex.	57
Figura 26- Amostras em Recipiente de Ensaio de Capilaridade.	58
Figura 27- Temperatura de Ensaio de Capilaridade.	58
Figura 28- Altura de Ascensão Capilar e Distribuição de Água Amostra 1.	59
Figura 29- Altura de Ascensão Capilar e Distribuição de Água Amostra 2.	59
Figura 30- Imersão dos Corpos-de- Prova em Solução 3,5% de NaCl.	60
Figura 31- Procedimento do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica.	62
Figura 32- Solução de Nitrato de Prata.	63

Figura 33- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto Convencional.....	81
Figura 34- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Benzoato.	82
Figura 35- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Molibdato.	82
Figura 36- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Benzoato e Molibdato...	83

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Critério de avaliação através da medida de potencial de corrosão.	37
Tabela 2- Granulometria agregado miúdo.....	42
Tabela 3- Massa Especifica do Agregado Miúdo.....	43
Tabela 4- Resultados ensaio de granulometria do agregado graúdo.	44
Tabela 5- Quantidades de materiais necessários.	48
Tabela 6- Quantidade de CPs para cada mistura:	48
Tabela 7- Períodos em meses dos ciclos de Imersão e Secagem.....	61
Tabela 8- Resultados de Resistência à Tração aos 7 dias.....	64
Tabela 9- Resultados de Resistência à Tração aos 28 dias.....	64
Tabela 10- Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 7 dias.	66
Tabela 11- Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias.	66
Tabela 12- Resultados dos ensaios de Absorção de Água por imersão.....	69
Tabela 13- Absorção por Capilaridade Concreto Referência.....	70
Tabela 14- Absorção por Capilaridade Concreto com Benzoato.	70
Tabela 15- Absorção por Capilaridade Concreto com Molibdato.....	71
Tabela 16- Absorção por Capilaridade Concreto com Benzoato e Molibdato.....	71

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1- Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.	42
Gráfico 2- Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.	44
Gráfico 3- Resultado de resistência à Tração por Compressão Diametral aos 7 dias.	65
Gráfico 4- Resultado de Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias.	65
Gráfico 5- Resultados de Resistência à Compressão aos 7 dias.	67
Gráfico 6- Resultados Resistência à Compressão aos 28 dias.	67
Gráfico 7- Absorção de Água por Imersão NBR 9778.	69
Gráfico 8- Absorção de Água por Capilaridade.	72
Gráfico 9- Potencial de Corrosão Corpos-de- Prova após 7 meses de ciclos de imersão e secagem em solução que simula água do mar (3,5% NaCl).	73
Gráfico 10- Diagramas de Bode, Log Z versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 4 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	75
Gráfico 11- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 4 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	76
Gráfico 12- Diagramas de Bode, Log Z versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 7 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	77
Gráfico 13- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 7 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	78
Gráfico 14- Diagramas de Bode, - Log Z versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 28 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	78
Gráfico 15- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase versus Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 28 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.	79
Gráfico 16- Curvas de polarização anódica do aço CA50 em solução que simula o eletrólito dos poros do concreto na presença e ausência de diferentes concentrações de benzoato de sódio.	80

Gráfico 17- Curvas de polarização anódica do aço CA50 em solução que simula o eletrólito dos poros do concreto na presença e ausência de um dos dois inibidores benzoato e molibdato de sódio nas concentrações de 0,07M. 81

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Classificação dos aditivos.	16
--	----

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
1.1 Objetivos	10
1.1.1 Objetivo geral	10
1.1.2 Objetivos específicos	10
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	11
1.2 Estruturas de concreto armado	11
1.3 Materiais constituintes de estruturas de concreto armado	12
1.3.1 Aço	12
1.3.2 Concreto	12
1.3.3 Adições e Aditivos	15
1.4 Estudo da dosagem do concreto	17
1.5 Propriedades do concreto convencional	17
1.6 Patologias em Estruturas de Concreto Armado	19
1.6.1 Mecanismos de Transportes de Agentes Agressivos em Estruturas de Concreto Armado	20
1.6.2 Corrosão em Estruturas de Concreto Armado	24
1.6.3 Corrosão no concreto armado por ataque de íons cloreto	28
1.6.4 Utilização de Inibidores de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado	32
1.6.4.1 Ação dos Inibidores de Corrosão Benzoato e Molibdato de Sódio	35
1.6.5 Monitoramento do Potencial de Corrosão- ASTM 876	36
1.6.6 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica para Análise de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado	38
3 METODOLOGIA	41
1.7 Materiais	41
1.7.1 Areia (Agregado miúdo)	41
1.7.1.1 Granulometria	41
1.7.1.2 Massa específica	43
1.7.2 Brita (Agregado graúdo)	43
1.7.2.1 Granulometria	43
1.7.3 Cimento Portland CP IV	44
1.7.4 Água de emassamento	45
1.7.5 Aço	45

1.7.6 Inibidores de Corrosão	46
1.8 Confeção dos corpos de prova	47
1.9 Ensaio Mecânicos, Físicos e Químicos	50
1.9.1 Slump Test	50
1.9.2 Análise do pH nas Misturas de Concreto.....	51
1.9.3 Ensaio Mecânico de Resistencia à Tração por Compressão Diametral	51
1.9.4 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão com o Auxílio de Extensômetros..	52
1.9.5 Ensaio Físico de Absorção de Água por Imersão	53
1.9.6 Ensaio Físico de Absorção de Água por Capilaridade	56
1.9.7 Monitoramento de Potencial de Corrosão- ASTM 876	60
1.9.8 Ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	61
1.9.9 Curvas de Polarização	62
1.9.10 Ensaio de Penetração de Íons Cloretos por Imersão.....	63
4 RESULTADOS	64
1.10Ensaio Mecânico de Resistencia à Tração por Compressão Diametral	64
1.11Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão com o Auxílio de Extensômetros	66
1.12Ensaio Físico de Absorção de Água por Imersão	68
1.13Ensaio Físico de Absorção de Água por Capilaridade	70
1.14Monitoramento do Potencial de Corrosão	72
1.15Ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	74
1.16Curvas de Polarização.....	79
1.17Ensaio de Penetração de Íons Cloretos por Aspersão.....	81
5 CONCLUSÕES.....	84
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	87
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui uma extensa costa marítima com 7.367 km desta forma o ataque por íons cloreto que causam corrosão em estruturas de concreto armado é bem relevante. A consequência disso é a deterioração nas estruturas que geralmente necessitam de reparos e manutenção periódicos para poder seguir em serviço. Além do aspecto econômico, acidentes envolvendo estruturas deterioradas pela corrosão da armadura constituem-se em fatos lamentáveis, pois causam perdas humanas e materiais, transtornos aos que utilizam a obra pela sua interdição e implica em onerosa reparação.

Na última década inúmeros estudos foram realizados no sentido de estudar novos inibidores de corrosão ou novas misturas de inibidores contra a corrosão quando inseridos na mistura do concreto a fim de proporcionar melhorias na vida útil das estruturas de concreto armado.

ORMELLESE (2009) testou o uso de 80 inibidores orgânicos com o grupamento carboxilato (-COOH) como por exemplo, os mono-carboxilatos (acetato, trifluoracetato, tricloroacetato, ciclohexano carboxilato, benzoato) e os poli-carboxilatos (succinato, citrato, fumarato e tartarato) além de aminoácidos de cadeia curta, como cisteína, glutamato, aminocisteína, e aminoácidos de cadeia longa como ácido glutâmico. As aminas mostraram as piores propriedades inibidoras quando comparadas aos inibidores com o grupamento carboxilato quando imersas em solução sintética que simula o eletrólito nos poros do concreto. Entretanto o autor prediz a necessidade de que mais testes sejam realizados afim de analisar a compatibilidade destes produtos com o concreto bem como a vida útil das estruturas com estas substâncias.

FENG (2017) propõe a substituição dos comumente utilizados nitratos como inibidor de corrosão no concreto pelo tri-polifosfato de alumínio $\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$. O referido autor verificou que a resistência contra a corrosão aumenta com o aumento da concentração deste inibidor tanto nos ensaios da barra de aço imersa em solução que simula o eletrólito nos poros do concreto quanto em protótipos de concreto armado para até 45 dias de imersão em solução de 3,5% de NaCl.

Neste sentido o presente trabalho propôs o uso da mistura de dois inibidores o benzoato de sódio ($\text{NaC}_6\text{H}_5\text{CO}_2$) e o molibdato de sódio (Na_2MoO_4) a fim de mitigar o efeito deletério da corrosão em corpos de prova de concreto armado quando imersos em solução de NaCl 3,5%.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Monitorar a propriedade inibidora da corrosão dos ânions benzoato e molibdato quando inseridos em corpos-de-prova de concreto armado através da técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar as propriedades físicas e mecânicas dos corpos-de-prova de concreto na ausência e na presença dos inibidores de corrosão de molibdato e/ou benzoato de sódio, através de ensaios mecânicos de resistência à compressão e à tração, e ensaios físicos de absorção capilar e ensaios de imersão.
- Monitorar o comportamento eletroquímico dos corpos-de-prova de concreto armado na ausência e na presença dos inibidores de corrosão de molibdato e/ou benzoato de sódio através do ensaio químico utilizando a técnica de espectroscopia de impedância eletroquímica.
- Simular circuitos equivalentes a partir das curvas de espectroscopia de impedância eletroquímica em diferentes tempos de imersão a fim de propor um mecanismo de atuação dos inibidores.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1.2 Estruturas de concreto armado

Pode-se dizer que o concreto na sua composição mais simples, nada mais é que a mistura de água, pedra, areia e material cimentício, uma inventividade construtiva do homem, que em seu estado plástico possibilita qualquer moldagem e em seu estado endurecido possui resistência similar às das rochas (LIMA et.al, 2014).

No que se refere ao aço em concreto armado, o mesmo é definido como sendo todo e qualquer aço que possa ser utilizado como armadura em estruturas de concreto armado. Como principal propriedade é válido salientar a sua excelente resistência à compressão, porém para que a mistura (aço e concreto) resulte em uma estrutura de elevada resistência e seja durável, é necessário que o aço desenvolva aderência perfeita e total com o concreto. Pode-se dizer ainda, que o concreto armado empregado por Lambot e posteriormente difundido por Monier, na França, devido a sua boa resistência mecânica, alta durabilidade, boa resistência ao fogo e possibilidade de distintas formas de moldagens, tornou-se o material mais utilizado em obras civis (FREITAS Jr., 2007).

A Figura 1 apresenta vigas e pilares em concreto armado, e a Figura 2 a concretagem de um piso industrial armado, ambas as obras na cidade de Alegrete-RS.

Figura 1- Vigas e pilares em concreto armado.



Fonte: Autora.

Figura 2- Concretagem de um piso industrial armado.



Fonte: Autora.

1.3 Materiais constituintes de estruturas de concreto armado

Utilizadas mundialmente, estruturas de concreto são comuns em todos os tipos de obras isto pela disponibilidade de materiais que compõem o concreto e a facilidade de aplicação do aço. Como exemplo obras civis podemos citar, edifícios, pontes, barragens, viadutos, pisos industriais e pavimentos.

1.3.1 Aço

Quanto ao aço destinado a construção civil, a norma NBR 7480/2007 classifica como sendo barras os produtos de diâmetro nominal $\phi 6,3\text{mm}$ ou superior, estes quando obtidos por laminação a quente, sem que ocorra deformação mecânica. Agora para produtos com diâmetro nominal de $\phi 10\text{mm}$ ou inferior são classificados como fios e são obtidos por fio-máquina pelo processo de trefilação ou laminação a frio. A norma ainda enfatiza que as barras ou fios destinados à construção civil devem ser isentas de defeitos, tais como, esfoliação, corrosão, redução de seção, marcas de óleo e fissuras transversais.

1.3.2 Concreto

O concreto é composto basicamente de agregados graúdos (brita) e miúdos (areia) espalhados dentro de uma matriz constituída por reações químicas durante a hidratação do cimento pela água adicionada à mistura. O composto formado se caracteriza por um material heterogêneo, de alta alcalinidade e possui boa resistência à compressão (SILVA, 2006).

O cimento Portland quando misturado com água forma uma pasta que envolve os agregados e deste modo constituem a matriz de concreto. Os agregados representam três quartos do volume do concreto, dentro da matriz formada o cimento Portland possui a propriedade de ligante e deste modo os agregados podem ser considerados inertes por não apresentar esta característica, porém não menos importantes, pois a utilização de agregados contaminados ou com características mineralógicas inadequadas podem ocasionar patologias e danos à estrutural. No que se refere ao cimento, são diversos os tipos e todos normatizados, a escolha do mesmo é governada pela especificação da obra, pois cada composição apresenta propriedades e característica específica (JUNIOR, 2015).

A Figura 3 a seguir apresenta o concreto em seu estado fresco sendo colocado dentro de moldes cilíndricos para posteriormente ser realizados ensaios desta pesquisa.

Figura 3- Concreto em seu estado fresco sendo colocado dentro dos moldes.



Fonte: Autora.

Com relação aos diversos tipos de cimento no Brasil, a descrição segundo ABCP (2002, pg 9):

“Existem no Brasil vários tipos de cimento Portland, diferentes entre si, principalmente em função de sua composição. Os principais tipos oferecidos no mercado, ou seja, os mais empregados nas diversas obras de construção civil são: cimento Portland comum; cimento Portland composto; cimento Portland de alto-forno; cimento Portland pozolânico. Em menor escala são consumidos, seja pela

menor oferta, seja pelas características especiais de aplicação os seguintes tipos de cimento: cimento Portland de alta resistência inicial; cimento Portland resistente aos sulfatos; cimento Portland branco; cimento Portland de baixo calor de hidratação; cimento para poços petrolíferos. Todos os tipos de cimento mencionados são regidos por normas da ABNT. ”

É de essencial importância ter conhecimento das propriedades e características dos diversos cimentos fabricados, pois assim é possível elaborar um concreto adequado para as necessidades de determinada obra (JUNIOR, 2015).

Ainda no que diz respeito a constituição do concreto, os agregados utilizados devem ser compostos por grãos mineiras duros, que sejam estáveis, com boa durabilidade, não devem conter impurezas que possam influenciar na hidratação do cimento ou na proteção de armaduras contra a corrosão. De acordo com a norma NBR 7211/2009, a definição dos agregados é dada:

“**Agregado miúdo:** Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310- 1. **Agregado graúdo:** Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1”

Para MARTINS (2008) quando os agregados são associados com os aglomerados, especificamente o cimento, forma-se o principal material de construção; o concreto. Ainda pode-se dizer que os agregados exercem boa influência em algumas características, como: diminui o processo de retração e possibilitam aumento da resistência ao desgaste, etc., com a capacidade de não prejudicar a resistência aos esforços mecânicos, pois quando utilizado agregados de boa qualidade, estes possuem resistência superior à da pasta do aglomerante.

Na dosagem de concreto a areia é o agregado miúdo utilizado, esta pode apresentar-se em forma de sedimento ou sofrer processo de litificação que origina rochas areníticas. A areia sem coesão encontrada em leito de rios, várzeas, depósitos lacustres. No Brasil 70% da produção é de leito de rios, ela abrange um conjunto de materiais granulares composto principalmente por quartzo os quais apresentam diferentes especificações de uso, tais como, agregados para a construção civil, fabricação de vidros, cerâmicas, tratamentos de esgotos e águas, dentre outros. Sua produção na indústria da construção civil possui um faturamento relevante dentro da economia, além do que gera direta e indiretamente cerca de 200 mil empregos. No que se refere ao valor comercial da mesma, o transporte representa 2/3 do custo final do produto, deste modo, tem-se a necessidade de produzi-la o mais próximo do local comercializado (QUARESMA, 2009).

Comumente o consumo de água em concreto varia de 0,4 a 0,7 m³/m², ou seja, para o consumo de 1m³ de concreto utiliza-se em torno de 160 à 200litros de água. No que se trata de resistência mecânica, quanto maior a quantidade de água, maior será o número de vazios e isso acarretará numa resistência mecânica menor. Esse excesso no volume de vazios também causa a diminuição na durabilidade e vida útil de estruturas, portanto, quando não for possível reduzir o consumo de água, recomenda-se que utilize aditivos para melhorar a trabalhabilidade. Em síntese, observa-se a importância que a água tem dentro da mistura, é ela a reemposável pela hidratação do cimento o qual age como ligante dentro da matriz formando o concreto, porém é ela também quando não usada controladamente que acarreta na diminuição da resistência, torna o concreto mais poroso permitindo a penetração de agentes agressivos que podem trazer consequências irreversíveis às estruturas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

1.3.3 Adições e Aditivos

Adições minerais são materiais inorgânicos compostos por silico-aluminosos, que podem substituir parte do cimento, sendo as mais utilizadas as pozolanas que reagem com a cal proveniente da hidratação e a escória granulada de alto-forno por ter alto teor de cálcio, possui propriedades pozolânicas e cimentícias. Atualmente, muitos estudos vêm sendo realizados com a introdução de adições minerais com matérias prima tradicionais na massa de concreto, inclusive alguns trabalhos publicados onde altos teores de substituição foram realizados (>50% de substituição em massa) de adições minerais ao cimento ou concreto, e pode-se observar a viabilidade da diminuição do teor de clínquer e aumento das adições. É válido ressaltar que a seleção das adições minerais adequada depende do seu tipo, além da composição química do clínquer e do desempenho esperado para o cimento. Como exemplo pode citar a escória de alto forno e as cinzas volantes que quando introduzidas proporcionam a redução no tempo de pega do concreto e auxiliam no ganho de resistência nas primeiras idades, sem contar que no ponto de vista ambiental, a reutilização desses resíduos reduz a poluição e também o custo quando substituem o cimento (ALBUQUERQUE, 2014).

Outros materiais muito utilizados na produção de concreto são os aditivos. Estes de acordo com a norma ASTM C 125 (1992) são definidos como sendo uma substância adicionada ao concreto ou argamassa imediatamente, antes ou até mesmo depois do emassamento e tem como propósito melhorar as propriedades da mistura, seja no estado fresco ou endurecido.

A utilização de certos aditivos permite a modificação de propriedades do concreto tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, isso impulsionou nos últimos 40 anos um

significante crescimento na indústria de aditivos. Atualmente, cerca de 80% de todo concreto utilizado em obras possui um ou mais aditivos incorporados à mistura (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A razão principal para o uso cada vez maior de aditivos se dá pela capacidade destes em proporcionar ao concreto melhorias físicas e econômicas, estas melhorias incluem o uso dos aditivos em situações que seria difícil ou até mesmo improvável conseguir utilizar concreto sem aditivos (NEVILLE, 1997).

O Quadro 1 a seguir refere-se à classificação feita pela NBR 11768/1992 dos aditivos encontrados.

Quadro 1- Classificação dos aditivos.

TIPO	Finalidade
P	Plastificante ou redutor de água (mínimo 6% de redução)
A	Acelerador do tempo de pega;
R	Retardador do tempo de pega;
PR	Plastificante e Retardador do tempo de pega;
PA	Plastificante e Acelerador do tempo de pega;
IAR	Incorporador de Ar;
SP	Superplastificante (mínimo 12% de redução de água);
SPR	Superplastificante Retardador;
SPA	Superplastificante Acelerador.

Fonte: Autora.

No que se refere aos aditivos, pode-se dizer que um aditivo é capaz de reduzir a relação de água no concreto normalmente influencia positivamente sobre a taxa de hidratação do cimento e no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades, porém de modo geral, os aditivos não são capazes de afetar a resistência em idades mais avançadas, a menos que o aditivo haja fazendo com que a velocidade no desenvolvimento da resistência nas primeiras idades seja reduzida (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Já no que se referem às adições minerais, estas normalmente provenientes de resíduos de outras indústrias, são adicionadas a matriz na busca por melhorias nas propriedades. A escória de alto-forno, por exemplo, é um material proveniente do processo de fabricação do ferro gusa (composto principalmente por silicatos e silico-alumintos de cálcio amorfos), e é obtida pela combinação de impurezas dos minérios dos metais com fundentes apropriado e cinza do carvão usado. Dentre os efeitos benéficos no concreto em seu estado fresco, vale ressaltar a melhoria na trabalhabilidade e um menor desprendimento de calor, já que o valor da

temperatura de pico da mistura é menor. Já no estado endurecido, ela proporciona a formação de uma microestrutura mais densa da pasta de cimento, e com isso no decorrer do tempo melhora a resistência do material. Outra vantagem bem relevante é o aumento na durabilidade do concreto, pois ela elimina o risco de ocorrer a reação álcali-agregado (NEVILLE, 1997).

1.4 Estudo da dosagem do concreto

Como no Brasil não há um consenso nacional para o estudo de dosagem do concreto, vários pesquisadores propuseram seus próprios métodos de dosagem. Deste modo criou-se o método do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), o método de dosagem do INT (Instituto Nacional de Tecnologia), o método do ITERS (Instituto Tecnológico do Estado do Rio Grande do Sul), ainda o método da ABCP que atualmente é uma adaptação do método americano ACI, além de outros métodos conhecidos e utilizados no Brasil. Mesmo que existam distintos métodos, certas atividades são comuns a todos, como exemplo vale citar, o cálculo da resistência média de dosagem, a correlação da resistência à compressão com a relação água/cimento para determinado tipo e classe de cimento, sempre que um estudo de dosagem tiver por objetivo a obter uma resistência específica, sem deixar de lado a economia e a sustentabilidade, pois, um estudo de dosagem deve visar sempre obter uma mistura ideal e mais econômica num determinado local e com materiais disponíveis para atender os requisitos necessários (TUTIKIAN, 2011).

Quanto a influência da cura no concreto, NEVILLE (1997) ressalta que devem ser tomadas medidas de controle na perda de água (água necessária para o processo de hidratação do cimento), mantendo o concreto saturado à uma temperatura adequada, com tempo de duração e umidade controlados, pois para se obter um bom concreto, além de uma mistura apropriada, a cura em ambiente certo durante as primeiras idades do endurecimento são cruciais para conseguir os resultados esperados. Vale lembrar que esse processo de cura só fornece melhorias quando esta realizada em ambiente úmido, pois curas intermitentes podem resultar em capilares descontínuos fazendo com que a água não consiga penetrar mais no interior da mistura intervindo assim no processo da hidratação.

1.5 Propriedades do concreto convencional

Quando em seu estado fresco, no que diz respeito aos fatores que afetam diretamente na reologia do concreto, existem vários que devem ser considerados, dentre estes, a relação

água/cimento, a composição química da mistura, o tempo de hidratação do cimento, a granulometria dos agregados, propriedades dos aditivos químicos quando utilizados, a temperatura e a umidade do ambiente onde a mistura é preparada ou aplicada, dentre outros. Como estudo de características físicas, a distribuição granulométrica e a área superficial são as mais relevantes quando analisado a fluidez da mistura, porém quando analisado quimicamente, a perda ao fogo, o teor de álcalis na mistura e o tipo de sulfato de cálcio adicionado ao clínquer são os fatores mais importantes. Já no caso de concretos de alto desempenho, a reologia é ditada pela compatibilidade entre o cimento e os aditivos utilizados (CASTRO, et. al. 2011).

Quando em seu estado endurecido, o processo de cura térmica é um mecanismo muito utilizado quando se deseja acelerar o ganho de resistência, os valores de temperatura e tempo de cura nesse caso variam conforme o cimento e o traço utilizado para o concreto. É possível também modificar as características e desenvolvimento de resistência apenas alterando as proporções dos componentes do cimento, ou seja, no caso do cimento Portland as resistências iniciais (3, 7 e 28 dias) serão elevadas se o cimento utilizado contiver grandes quantidades de C3S (silicato tricálcico, responsável pelas propriedades hidráulicas, tendo reação rápida com a água) e C3A (aluminato tricálcico, reage instantaneamente com a água e elevada liberação de calor de hidratação) porém serão baixas se o cimento for composto por uma proporção elevada de C2 S (silicato dicálcico, reage lentamente com a água, apresentando pouca resistência mecânica inicial que tende a aumentar significativamente com o decorrer da hidratação.). Além da composição do cimento, a sua área superficial também controla a taxa de elevação de resistência, pois para uma determinada relação água/cimento, uma redução no tamanho médio das partículas geralmente resulta em uma maior taxa de hidratação, conseqüentemente, resulta em melhores propriedades e maiores resistências nas primeiras idades. Outra propriedade importante no caso de material à base de cimento é a porosidade, está por sua vez, além do teor de hidratação do cimento depende também da densidade de empacotamento das partículas. Durante o processo de cura, a hidratação do cimento resultará na diminuição e redistribuição de poros ativos os quais são determinados pela relação água/cimento da mistura, deste modo a forma e o tamanho destes poros que permitirão a entrada e saída de umidade no interior do concreto. A resistência mecânica e o módulo de elasticidade são reduzidos proporcionalmente com o volume de poros inativos e são influenciados pelo volume de poros ativos e pela umidade dentro deles (CASTRO, et. al.2011).

1.6 Patologias em Estruturas de Concreto Armado

Em virtude do acelerado desenvolvimento tecnológico na área da construção civil, inúmeras estruturas têm apresentando desempenho insatisfatório devido a erros de projetos, utilização inadequada de materiais, envelhecimento natural, deterioração, dentre outros. Devido a isso, as patologias encontradas em edificações são os principais problemas que ocasionam a diminuição da vida útil destas construções, e em decorrência da necessidade de estudar as origens, formas de manifestação, consequências e o mecanismo de ocorrência das falhas e dos sistemas de degradação surgiu o termo Patologia das Estruturas, este é um campo de estudo que abrange todos os tipos e formas de patologias encontradas em obras civis (ARIVABENE, 2015).

Pode-se dizer que manifestações patológicas em estruturas de concreto armado podem ocorrer em três fases distintas, ou seja, a origem pode ser causada durante a concepção do projeto que provem de um mau planejamento do mesmo ou falhas técnicas, sejam por desconhecimento ou negligência dos profissionais. Outra fase que pode originar patologias é durante a execução do projeto, pois assim que é iniciada a construção ela já está suscetível à ocorrência de falhas seja pela falta de mão de obra qualificada, por não haver controle dos materiais utilizados muitas vezes materiais de segunda linha com qualidade péssima, irresponsabilidade técnica dos responsáveis por não conferir ferragens, resistência do concreto utilizado e dentre outras causas. Como exemplos de patologias geradas por erros na execução de estruturas de concreto armado, fissuras em vigas devidas à falta de barras de aço, trincas de elementos estruturais devido ao mau escoramento das formas, falhas no concreto devido a má vibração do concreto. Por fim, as patologias também podem surgir na fase de utilização da estrutura, por exemplo, quando a mesma passa a ser habitada por usuários desinformados ou negligentes que muitas vezes fazem modificações na estrutura sem o consentimento e acompanhamento de algum profissional e causam assim trincas devido à retirada de alguma estrutura, como por exemplo, para abrir vãos (TRINDADE, 2015).

Dentre as patologias existentes, às que podem causar falhas estruturais são as mais preocupantes e devido a isso se destacam sobre as outras. Apesar de o concreto armado ser uma mistura brilhante de materiais que proporcionam a obtenção de estruturas duráveis, há vários tipos de deterioração que podem ocorrer e causar danos à estrutura, dentre estas a corrosão das armaduras é a de maior ocorrência e a que causa maiores prejuízos econômicos (SANTOS, 2015).

Para prever a vida útil tendo em vista que a corrosão está ligada diretamente com o modo de penetração dos fluidos no concreto, as propriedades relacionadas ao transporte de agentes agressivos são um fator chave responsável pela durabilidade das estruturas de concreto armado (REGATTIERI, 1999).

Portanto, devido ao processo de corrosão ser atualmente a patologia mais recorrente e a que causa maiores danos estruturais e econômicos em estruturas de concreto armado, inúmeros estudos veem sendo realizados a fim de minimizar a ocorrência deste tipo de patologia. Com isso, tendo em vista que todas as patologias, inclusive a corrosão, têm início devido aos mecanismos de transporte de agentes externos às estruturas é de suma importância inicialmente compreender os principais mecanismos de transporte para que posteriormente sejam estudadas e analisadas propostas para prevenir o surgimento destas patologias em estruturas.

1.6.1 Mecanismos de Transportes de Agentes Agressivos em Estruturas de Concreto Armado

A partir do momento que uma estrutura apresenta fissuras, trincas, ou até mesmo pouco cobrimento de concreto, dentre outros problemas, ela fica susceptível a entrada de agentes agressivos à estrutura que com o passar do tempo passam a causar danos estruturais.

Permeabilidade, migração iônica, difusão de íons e absorção capilar são os principais meios de penetração e transporte de agentes agressivos em estruturas de concreto armado (MEDEIROS, 2005).

No que se refere à permeabilidade esta é definida como sendo um fluido que escoar através de um sólido sob um gradiente de pressão externa, sendo determinada pela continuidade e tamanho dos poros na estrutura do sólido (METHA e MONTEIRO, 1994).

Neville (1997) apresenta a equação modelada pela lei de Darcy que descreve a permeabilidade de água no concreto em regime laminar, não turbulento e estacionário.

$$V = K \frac{H}{X} = \frac{Q}{S} \quad \dots (1)$$

Onde:

V = velocidade de percolação da água, em m/s;

K = coeficiente de permeabilidade da água no concreto, em m/s;

H = gradiente de pressão da água, em m.c.a;

X = espessura de concreto percolado pela água, em m;

Q = vazão de água percolada, em m³/c;

S = área da superfície confinada por onde a água percola, em m².

Vale ainda lembrar que o coeficiente de permeabilidade pode variar seis ordens de grandeza durante o tempo de cura (1 a 28 dias), conforme se processa a hidratação do cimento, isto acontece em decorrência da mudança na estrutura de poros do concreto durante este período (HELENE, 1993).

Bertolini (2010) caracteriza a absorção capilar como sendo um mecanismo de transporte de líquidos que ocorre através de poros capilares devido a tensões superficiais do próprio líquido, onde a entrada depende da viscosidade, densidade e tensão superficial do líquido, porém também depende da estrutura da rede de poros do concreto e das condições de umidade.

Através da Lei de Jurim a absorção capilar pode ser modelada, sendo esta relacionada com a altura de ascensão capilar ao tempo de contato com a água (HELENE, 1993). Segue a equação:

$$x = 0,5 \frac{\sqrt{v \cdot r \cdot t}}{\eta} \quad \dots(2)$$

Onde:

x = altura ou penetração da água no capilar, em m

v = tensão superficial da água, em kg/m ($\approx 75 \times 10^{-4}$)

r = raio do capilar, em m

η = viscosidade de água, em kg.s/m²

t = período de tempo para atingir a penetração h, em s.

Neville (1997) lembra que para concretos de boa qualidade a absorção capilar deve ser inferior a 10% mesmo que esta não seja usada para medir a qualidade do concreto.

Quando concreto é exposto a ciclos de molhagem e secagem, condições estas similares aos reais, a penetração de íons cloreto quando este dissolvido em água ocorre pelo mecanismo de absorção capilar (SANTOS, 2006).

Outro mecanismo de transporte é a difusão de íons, este no concreto ocorre em decorrência do contato entre a solução presente nos poros e o meio ambiente, sendo que este fenômeno pode ser dito mais severo quanto maior for a concentração na solução externa (MONTEIRO, 1996).

Bertolini (2010) através da primeira e segunda lei de Fick apresentou equações capazes de modelar como ocorre a difusão iônica dentro do concreto, assim ele mostra que se consideram o fluxo em função do gradiente de concentração, coeficiente efetivo de difusão, a vida útil da estrutura e parâmetros de concentração. Abaixo segue a equação:

$$J = - D_{eff} \frac{\partial c}{\partial x} \quad \dots (3)$$

Onde:

J = fluxo da substância, em mol/(cm².s);

D_{eff} = coeficiente efetivo de difusão, em cm²/s;

$\partial c/\partial x$ = gradiente de concentração na direção do fluxo, em mol/cm³.

A equação possui um sinal negativo que indica que o fluxo acontece no sentido contrário ao aumento da concentração, esta é a primeira lei de Fick e se aplica a processos de difusão em estado estacionário para o cálculo do coeficiente efetivo de difusão (D_{eff}). Porém, quando esta condição não é satisfeita, ou seja, para o estado não estacionário, que contempla o fluxo variável com o tempo e a profundidade de penetração, recorre-se à segunda lei de Fick, conforme equação 4:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = Da * \frac{\partial c^2}{\partial x^2} \quad \dots (4)$$

A solução para a equação 4 é dada pela equação 5

$$\frac{C-C_0}{C_s-C_0} = 1 - erf \left(\frac{x}{2\sqrt{Da*t}} \right) \quad \dots (5)$$

Onde:

C = concentração na profundidade considerada

C_0 = concentração inicial do agente agressivo que penetrou no interior do concreto

C_s = concentração do agente agressivo na superfície do concreto, admitida constante

erf = função do erro de Gauss

x = profundidade considerada, geralmente em m

Da = coeficiente aparente de difusão, geralmente em m²/s

t = tempo considerado, geralmente em s.

Em estruturas de concreto armado, com a determinação de C, C₀, C_s e Deff é possível estimar em quanto tempo (t), os agentes agressivos alcançarão a armadura, sendo assim, é possível prever a vida útil de uma estrutura. Ainda também pode-se obter o tempo (t) necessário para que a concentração de cloretos (C) alcance a concentração limite para que haja corrosão (ANDRADE, 2000).

Ambas as leis são validas para materiais homogêneos, com poros contínuos, que não reagem com íons em movimento e não alteram com o tempo (DHIR et al., 1998).

O concreto por ser um material poroso com poros complexos, a análise fica dificultada, por isso, estudos que envolvem difusão no concreto são simplificados, ou seja, para que possam ser analisados os poros são considerados capilares cilíndricos (FRANCINETE JR. e FIGUEIREDO, 1999).

Neville (1997) salienta que é necessário um teor mínimo de umidade no concreto para que ocorra difusão, pois em contato com uma região seca a difusão é interrompida. Quando os poros do cimento hidratado estão saturados, a difusão se torna mais intensa, e em decorrência de os poros do concreto mudar com o tempo, especialmente devido hidratação de o cimento variar, deve- se ressaltar que o coeficiente de difusão também varia com a idade do concreto.

Por fim, o outro importante mecanismo de transporte é a migração iônica. Missau (2004) caracteriza como sendo a migração de íons impulsionada por um campo elétrico formado à partir de pilhas de corrosão eletroquímica, em decorrência da presença dos íons no concreto, a resistividade elétrica diminui e a condutividade elétrica se eleva, fazendo com que o processo de corrosão aumente.

Neste caso, transporte de massa segue à Lei de Faraday:

$$m = \frac{i.t.a}{n.F} \quad \dots(6)$$

Onde:

m = massa do metal corroído, em g;

i = corente elétrica em A;

t = tempo em s;

a = massa atômica;

n = valência dos íons de metal;

$F =$ constante de Faraday (96.493C).

1.6.2 Corrosão em Estruturas de Concreto Armado

Para Gentil (2012), a corrosão é o processo de deterioração de um material comumente metálico, este fenômeno ocorre por ação química ou eletroquímica do meio em que o material está exposto, a deterioração ainda se agrava se estiver aliada com esforços mecânicos. O contato entre o material e o meio originam indesejáveis e danosas alterações que acabam tornando o material impróprio para uso.

Barbosa et al (2012), define a corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado como sendo o fenômeno mais comum do que qualquer outro tipo de patologia capaz de comprometer a integridade da estrutura tanto do ponto de vista estético quanto no que diz respeito à segurança.

Segundo Cabral (2000) o processo de corrosão fica condicionado aos materiais utilizados, ao modo de execução e ao meio corrosivo. E é em virtude de diversos fatores que o processo de corrosão faz com que os riscos de danos estruturais sejam bem relevantes, dentre eles vale citar: baixa qualidade do concreto, erro no posicionamento da armadura e redução no cobrimento de concreto.

Em virtude dos fatores citados, pode-se dizer que para que o processo de corrosão possa ser evitado deve-se utilizar concreto de boa qualidade, ser mantido cobrimento mínimo exigido por normas e ainda em casos que exposição a meios agressivos, devem-se utilizar técnicas complementares para melhorar a qualidade dos materiais empregados (GENTIL, 2012).

Como onde há iniciação de corrosão o principal fator que causa deterioração é a interação delas com o meio, torna-se imprescindível que se tenha conhecimento do ambiente que a mesma está exposta para que ainda em fase de projeto seja definido as características do concreto, o cobrimento necessário, pois é nos poros do concreto que ocorre a grande maioria das reações químicas entre o cimento e os agentes agressivos oriundos por mecanismos de transportes (NEPOMUCENO, 1997).

No que diz respeito ao cobrimento, este é regulamentado pela NBR 6118/2014 em função com a classe de agressividade do meio que será exposta a estrutura. Abaixo segue as recomendações normatizadas. As Figuras 4 e 5 apresentam as recomendações da norma.

Figura 4- Classe de agressividade segundo NBR 6118/2014.

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	

Fonte: NBR 6118 (pg.16).

Figura 5- Cobrimento de acordo com classe de agressividade do meio.

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

Fonte: NBR 6118 (pg. 19).

A corrosão pode ocorrer por fatores tanto físicos, quanto químicos, biológicos ou até mesmo mecânicos. No que se referem aos mecânicos, estes através de vibrações podem ocasionar fissuras no concreto através das quais líquidos contendo partículas agressivas podem entrar em contato com a armadura, causando a chamada erosão-corrosão. Os fatores físicos estão relacionados a variação da temperatura, está por sua vez pode provocar choque térmico ocasionando microfissuras, as quais ficam suscetíveis a penetração de agentes agressivos. Fatores químicos estão relacionados aos ambientes de exposição que a estrutura se encontrará, como por exemplo, em alta alcalinidade, obtida através do hidróxido de cálcio, com a redução ao longo do tempo pela ação provocada pelo CO₂ do ar entre outros gases ácidos como SO₂ e H₂S, estes processo é dito carbonatação, o qual inicia-se lentamente e com o passar do tempo atenua-se. Por fim, os fatores biológicos estão associados a microrganismos que podem criar ambientes corrosivos como aqueles criados por bactérias oxidantes de enxofre ou de sulfetos (GENTIL, 2012).

Em concreto armado a corrosão é considerada eletroquímica, sua ocorrência é em meio aquoso onde se é necessário um eletrólito, uma diferença de potencial, oxigênio e agentes

agressivos. Quando envolto pelo concreto, o aço fica protegido por uma camada passivadora a qual é formada e mantida devido ao elevado pH existente na solução dos poros do concreto. O processo de corrosão irá ocorrer caso esta camada passivadora de concreto seja destruída, ocasionando deste modo a despassivação que é estimulada por agentes agressivos como íons cloretos e a carbonatação que conseqüentemente deixam o aço predisposto a sofrer corrosão. Ainda é válido ressaltar que o processo de corrosão influencia significativamente na diminuição da vida útil da estrutura (SANTOS, 2015).

Santos (2015) salienta que no processo de corrosão por agente agressivo carbonatação a reação físico-química que ocorre entre os componentes do cimento hidratado e o CO₂ provocam a despassivação, ou seja, a carbonatação é responsável pela diminuição do pH que fará com que a camada passivante se desestabilize podendo ocasionar um processo de corrosão generalizada (SANTOS, 2015).

Ainda pode-se dizer que o processo de carbonatação avança do exterior para o interior do concreto devido a concentração de dióxido de carbono, da estrutura dos poros existentes e as condições a que o material está exposto no que se refere a umidade. Vale ainda ressaltar que temperaturas elevadas estimula a movimentação das moléculas facilitando assim sua trajetória dentro da microestrutura do concreto e que altas concentrações de CO₂ no ambiente faz com que a velocidade do processo de carbonatação aumente principalmente em concretos com elevada relação de a/c (BAZAN, 2014).

Como principais efeitos da carbonatação vale citar a redução do pH, a redução da permeabilidade, o aumento da resistência superficial, e um grande aumento da resistividade elétrica como consequência da neutralização da solução nos poros do concreto. Resumidamente, os fatores que interferem diretamente no processo de carbonatação são: Umidade relativa do ambiente e saturação dos poros; Temperatura do ambiente; e Concentração de CO₂ (SANTOS 2015).

Como se pode observar é de suma importância o concreto obter um pH elevado para manter a armadura em condição de passivação. De acordo com SANTOS (2015), o concreto proporciona a armadura uma dupla proteção, onde primeiramente protege fisicamente impedindo o contato direto com o exterior e, segundo, uma proteção química, está conferida pelo elevado pH do concreto que tem por função promover a formação de uma película passivadora que envolve o aço.

Para Dotto (2006), durante o processo de corrosão de uma barra de aço ocorre pelo menos uma reação de oxidação e uma de redução. Nos sítios anódicos ocorre a reação de oxidação, e o metal se dissolve de acordo com a reação: $Fe^{\circ} \rightarrow Fe^{+2} + 2e^{-}$

No caso de meios alcalinos, ou neutros, o oxigênio dissolvido e a água são as espécies que se reduzem:

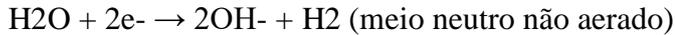
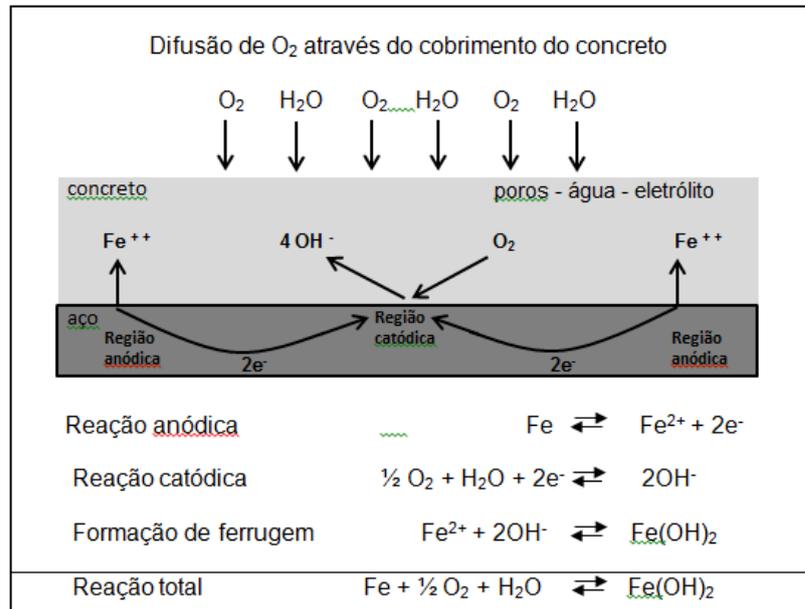


Figura 6- Esquema da corrosão de armadura no concreto.



Fonte: (RATTMANN, 2005, p.36).

De acordo com a Figura 6, de modo simples o processo de corrosão aquosa ocorre onde íons metálicos de Fe²⁺ migram em direção ao catodo da barra de ferro e os íons hidroxilas, OH⁻, migram em direção ao anodo. Sendo que em uma determinada região estes íons se encontram formando o Fe (OH)₂, hidróxido de ferro II ou hidróxido ferroso.

Gentil (2012) ainda no que se refere à corrosão eletroquímica de armaduras, são cinco os tipos de ocorrência. Primeiramente vale citar a corrosão uniforme, esta ocorre em toda extensão da armadura e não deixa consequências graves, já a corrosão puntiforme se caracteriza por desgastes localizados na armadura sob forma de pites ou alvéolos, no caso da corrosão intragranular, esta ocorre entre os grãos da rede cristalina do material metálico e quadro combinada com solicitações mecânicas pode gerar fratura frágil do material. Ainda se tem a fratura transgranular que ocorre intragrãos da rede cristalina e também pode ocasionar a fratura do material diante de solicitações mecânicas. Por fim tem-se a fragilização pelo hidrogênio que é ocasionada por hidrogênio atômico que quando se difunde para o interior da armadura torna-a frágil fazendo com que a mesma perda ductilidade e possivelmente ocasionando a fratura posteriormente. O que se pode observar é que algumas das formas de ocorrência de corrosão

quando combinadas com solicitações mecânicas comprometem a integridade de estruturas de concreto armado.

1.6.3 Corrosão no concreto armado por ataque de íons cloreto

Várias pesquisas na área da corrosão comprovam que o mecanismo de ataque por íons cloreto é o principal modo de deterioração das estruturas de concreto armado. A penetração destes na estrutura culmina na corrosão da armadura de modo pontual e destrutivo, pois os íons não são consumidos no processo químico e segue despassivando a camada que protege as barras de aço (DOTTO, 2006).

Helene (1993) afirma que ao penetrarem nos poros do concreto os íons cloreto fazem com que a condutividade do eletrólito aumente e conseqüentemente a resistividade elétrica diminua e assim se torne mais severa a corrosão.

De modo simplificado, as reações por ataque de íons cloreto ocorrem do seguinte modo: com perda de elétrons e redução de massa, na zona anódica ocorrem as reações de oxidação do ferro; enquanto isso na zona catódica ocorre a redução do oxigênio sem que ocorra perda de massa do aço e deposição do óxido de ferro. Comumente os elétrons migram pelo contato entre metal-metal, e os íons por difusão ou migração através da solução. Para que a corrosão se instale é necessário a presença de um eletrólito (ex: água), de uma diferença de potencial (diferença de umidade, tensões no concreto ou no aço) e a que se tenha disponibilidade de oxigênio. É válido ressaltar que os íons cloreto não atacam o concreto, mas são responsáveis por destruírem a camada passivadora, e deste modo em presença de água, oxigênio, inicia-se o processo de corrosão (CUNHA, 2011).

A baixo são apresentadas as equações que regem a corrosão por íons cloretos:



Nesse caso, os íons cloreto atuam apenas como catalisador na formação do óxido expansivo, após o mesmo é liberado para novas reações e conseqüentemente com isto a corrosão é acelerada (FREIRE, 2005).

- Despassivação da armadura por ação dos íons cloretos

Para que ocorra despassivação da armadura é necessário a presença de uma certa quantidade de íons cloreto que ao atingirem a armadura por difusão culminam em iniciar o processo de corrosão, outro fator que causa a despassivação é a redução da alcalinidade (pH) do concreto (em decorrência de carbonatação ou devido a penetração de substâncias ácidas) (DOTTO, 2006).

De acordo Cascudo (1997) são três as teorias que explicam os efeitos dos íons cloreto sobre a corrosão do aço:

- Teoria do Filme Óxido: nesse caso os íons penetram no filme óxido passivante sobre o aço através dos poros do concreto movendo-se até a interface metal/óxido e reagindo com íon férrico. Os íons cloreto fazem com que a tensão superficial interfacial diminua ocorrendo a formação de rupturas e falhas deixando o filme passivo debilitado.

- Teoria da Adsorção: nessa situação os íons cloreto são adsorvidos na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila. Como resultado o cloreto hidrata dos íons metálicos, deste modo facilitando a sua dissolução.

- Teoria do Complexo Transitório: os íons hidroxilas e os íons cloreto produzem íons ferrosos pela corrosão, forma-se então um complexo solúvel de cloreto de ferro, o qual pode difundir-se a partir das áreas anódicas destruindo a camada protetora de $Fe(OH)_2$ e permitindo que o processo de corrosão continue.

Helene (1997) ainda ressalta que o processo de despassivação que resulta em corrosão, ocorre normalmente em ambientes com umidade entre 60% e 98%, ou então quando o concreto fica exposto a ciclos de molhagem e secagem respectivamente.

- Limite crítico de cloretos

Como citado já anteriormente, certa concentração de íons cloreto causam a despassivação da armadura, porém no que se refere ao valor crítico correspondente ao qual se daria início a despassivação, as normas estrangeiras utilizam como base os teores de cloretos relacionados com a massa de cimento. De acordo com a Figura 7 é possível observar:

Figura 7- Valores críticos de íons cloreto.

País	Norma	Limite máx. de cloreto	Referido a
EUA	ACI-318	$\leq 0,15\%$ em ambiente de Cl	cimento
EUA	ACI-318	$\leq 0,30\%$ em ambiente normal	cimento
EUA	ACI-318	$\leq 1\%$ em ambiente seco	cimento
Inglaterra	CP-110	$\leq 0,35\%$ pelo menos em 95%	cimento
Austrália	AS 3600	$\leq 0,22\%$	cimento
Noruega	NS 3474	$\leq 0,60\%$	cimento
Espanha	EH 91	$\leq 0,40\%$	cimento
Europa	EUROCÓDIGO 2	$\leq 0,22\%$	cimento
Japão	JSCE-SP 2	$\leq 0,6 \text{ kg/m}^3$	concreto
Brasil	NBR 12655:2006	$\leq 0,05\%$ para concreto protendido	cimento
Brasil	NBR 12655:2006	$\leq 0,15\%$ para concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	cimento
Brasil	NBR 12655:2006	$\leq 0,40\%$ para concreto armado exposto a cloretos em condições não severas (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	cimento
Brasil	NBR 12655:2006	$\leq 0,30\%$ para outros tipos de construção com concreto armado	cimento

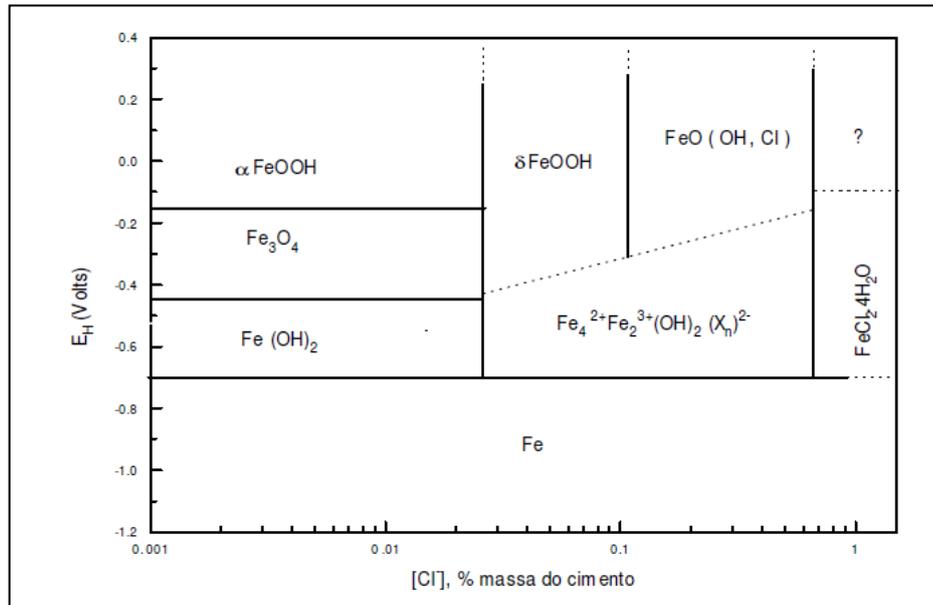
Fonte: GENTIL, 2006; Adaptado.

Pode-se dizer com base na literatura de Cascudo (1997) que o valor médio como teor limite para a despassivação das armaduras de 0,4% em relação à massa de cimento.

No entanto, Mehta (2003) salienta que concentrações na proporção de 0,6 e 0,9kg/m³ de cloretos no concreto, ou de 200 a 1200mg/l de cloretos na solução presente nos poros, são capazes de desencadear o início do processo de corrosão.

Através do Diagrama de equilíbrio do ferro em solução de pH =12 podemos prever qual será o produto de corrosão estável no sistema ferro-pasta de cimento, para um dado potencial de eletrodo, EH, e para um certo teor de íons cloreto adicionado, log [Cl⁻], conforme mostra a Figura 8. As linhas horizontais cheias são derivadas do Diagrama de Pourbaix padrão, para o Fe-H₂O, enquanto que as linhas tracejadas representam os prováveis óxidos formados, relacionados com o teor de íons cloretos, expresso por massa de cimento. As linhas verticais são tiradas de resultados experimentais. Na fórmula Fe₄+2Fe₂+3(OH)₂(X_n)₂⁻, o X substitui um íon bivalente variável, tal como CO₃⁻² ou SO₄⁻².

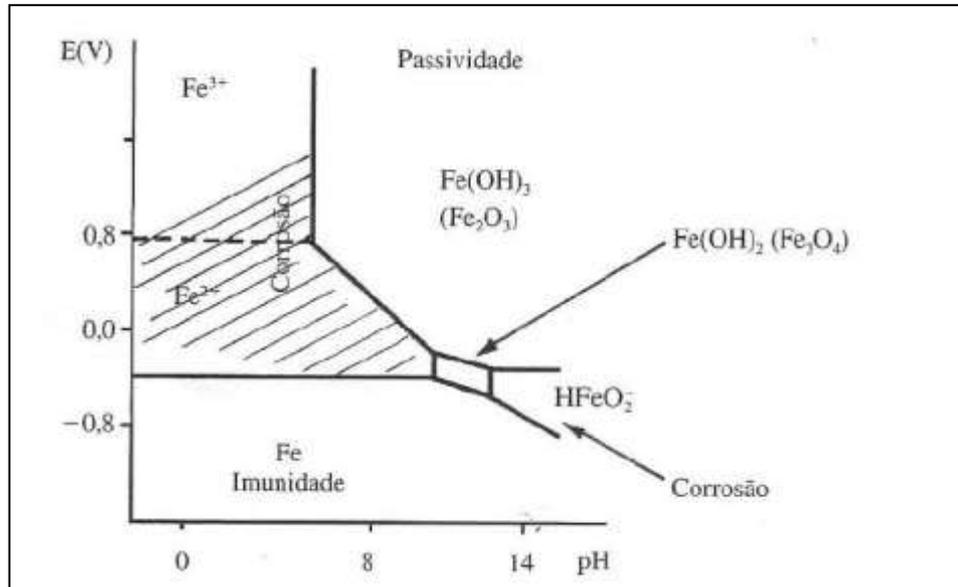
Figura 8- Diagrama de equilíbrio E_H versus $\text{Log} [\text{Cl}^-]$ para o ferro em $\text{pH} \sim 12$, a 20°C .



Fonte: Sagoe-Crentsil e Glasser, 1993.

Outros fatores como a composição do aço e as condições da armadura, isto é pH do meio, grau de umidade dos poros e a temperatura do ambiente também podem alterar a composição dos produtos de corrosão. Em relação a variações de pH e potencial (em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio: EPH) a armadura geralmente tenderá a estar em estado ativo (corrosão), passivo ou inerte conforme mostra o Diagrama de Pourbaix do ferro na Figura 9 a seguir:

Figura 9- Diagrama de Pourbaix simplificado do sistema Fe-H₂O.



Fonte: Gentil, 2012, pag. 25.

Para CUNHA (2001) um pH de 12,5 a 13,5 meio altamente alcalino do concreto fornece às armaduras um alto grau de proteção contra corrosão, e para uma faixa usual de potencial de corrosão no concreto da ordem de +100mV a -400mV em relação ao eletrodo padrão de hidrogênio, as reações do eletrodo verificadas no ferro são de passivação.

Por fim, ainda sobre o diagrama de Pourbaix (Figura 9) é válido ressaltar que enquanto o concreto se mantiver com alta alcalinidade, com valor de pH superior a 9, a armadura já estará protegida da corrosão (SANTOS, 2015).

1.6.4 Utilização de Inibidores de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado

São inúmeras as técnicas hoje estudadas na tentativa de retardar o processo de corrosão, mas todas estão fundamentadas em aumentar a resistência do concreto à penetração de agentes agressivos ou aumentar a resistência das armaduras à corrosão. Com isso, as técnicas utilizam aditivos químicos, inibidores de corrosão, adições minerais, proteção da superfície do concreto, entre outras.

Para Gentil (2012) inibidor é uma substância ou uma mistura de substâncias que quando utilizadas em concentração adequada tende a reduzir ou eliminar o processo de corrosão em meio corrosivo.

É cada vez maior o interesse na utilização de inibidores de corrosão, pois pode-se dizer que eles atuam como uma película protetora sobre áreas anódicas e catódicas, interferindo diretamente na ação eletroquímica (CASCUDO, 1997).

Com o intuito de proteger a armadura, a utilização de aditivos químicos inibidores consiste em empregar substâncias que atuam sobre a superfície fazendo com que as reações anódicas, catódicas, ou ambas, sejam anuladas ou retardadas. Deste modo, pode-se dizer que atualmente os inibidores que existem são os anódicos (inibem as ações anódicas), os inibidores catódicos (inibem as ações catódicas) e os inibidores mistos (inibem as duas ações). Ainda é válido ressaltar que é a utilização de inibidores anódicos que apresentam os melhores resultados, porém uma desvantagem de sua utilização é que se deve escolher um inibidor que não altera as características físico-químicas e mecânicas do concreto, sendo que isto é uma restrição da maioria dos inibidores (LIMA, 1990).

Em particular o mecanismo de atuação de um inibidor está diretamente ligado ao processo eletroquímico de corrosão, portanto, se um determinado inibidor age de modo a ocasionar oxidação do metal, ele é dito então inibidor anódico. Do mesmo modo que, se o inibidor influenciar reações catódicas, ele é dito inibidor catódico. Vale ainda ressaltar que algumas substâncias químicas presentes nos inibidores devem satisfazer certas exigências para que este possa ser classificado como sendo inibidor de corrosão, dentre estas: a solubilidade deve ser tal que uma ligeira saturação da superfície corroída aconteça sem que o material seja lixiviado para o exterior do concreto; as moléculas presentes devem possuir um forte receptor ou doador de elétrons; devem ser compatíveis com o sistema para que efeitos colaterais adversos sejam evitados; e por fim, deve ser efetivo ao pH e à temperatura ambiente onde é utilizado (FREIRE, 2005).

Os inibidores são utilizados como método preventivo no aparecimento de corrosão, assim sua aplicação não exige mão-de-obra especializada e o custo é baixo quando comparado a outras soluções. Comumente, o inibidor é adicionado a água de emassamento, e deve-se controlar ao máximo a homogeneidade da mistura e sua dosagem. Como efeito os inibidores agem rompendo o circuito eletroquímico formado pela célula de corrosão (LIMA, 1996).

Ainda se acredita que alguns inibidores além de atuar sobre locais anódicos e catódicos da armadura, eles influenciam reduzindo a taxa de difusão de cloreto através do concreto de modo que resultam em alterações positivas na permeabilidade do material por interação entre os aditivos e os constituintes da pasta de cimento (FREIRE, 2005).

Pode-se dizer que as vantagens na utilização de inibidores de corrosão têm impulsionado o interesse de pesquisadores, dentre as vantagens podemos citar a fácil aplicação, ausência de

manutenção em estruturas protegidas e o custo relativamente baixo com sua aplicação. Devido a isso, inúmeras pesquisas vêm sendo realizadas e até mesmo o emprego desta técnica em construções e reparos tem crescido consideravelmente. Porém, existem limitações e desvantagens com a utilização destes inibidores, tais como, quando adicionados em dosagens inadequadas ou em misturas muito permeáveis, fica facilitada a entrada de agentes agressivos, outro fator bem relevante, é a utilização exagerada de inibidores anódicos que acarretam no agravamento no quadro de deterioração por favorecer a ocorrência de reações químicas que estimulam os processos corrosivos (FONSECA, 1998).

Por fim, ainda quanto ao comportamento dos inibidores na matriz de concreto, pode-se afirmar que estes afetam as propriedades do concreto em estado fresco ou até mesmo endurecido, por exemplo, em estudos realizados por FONSECA (1998), com a utilização de nitrito de sódio houve modificação na consistência do concreto, perda na resistência a compressão e no módulo de elasticidade, porém, mostram um excelente comportamento quanto a permeabilidade e absorção de água. Já no caso da utilização do benzoato de sódio está ligado ao volume de ar que introduz na massa de concreto fresco, causando perda de massa específica, perda na resistência a compressão e módulo de elasticidade, diminuição dos coeficientes de permeabilidade e absorção. Os resultados adquiridos fortalecem a ideia de que sempre se deve avaliar a utilização de inibidores de corrosão, não se limitando apenas a eficiência quanto aos processos corrosivos sobre as armaduras.

Ainda é válido ressaltar que os inibidores são classificados quanto o comportamento e a composição de cada um, com isso tem-se então:

- Inibidores Anódicos: estes atuam retardando ou impedindo a reação do ânodo, ou seja, atuam reprimindo as reações anódicas. Normalmente para que haja reação, inicialmente o inibidor reage com um produto de corrosão já formado resultando assim em um filme aderente e absolutamente insolúvel na superfície do ferro, ocorrendo deste modo à polarização anódica. Quando utilizado é recomendável que se utilize outro inibidor junto pois a ação combinada resulta numa ação sinérgica constituindo o chamado método dianódico. Exemplo: Tungstato e Molibdato (AZAMBUJA, 2003)
- Inibidores Catódicos: em síntese se trata de substâncias que fornecem íons metálicos que tem capacidade de reagir com a alcalinidade catódica e produzir assim compostos insolúveis capazes de reprimir ações catódicas pois impedem a difusão do oxigênio e a condução de elétrons. Deste modo, fica acentuada a polarização catódica e como o metal no catodo não entra em solução não

ocorrerá corrosão localizada nessas áreas. Exemplo: Nitrato de Cério (DALMORO, 2013).

- Inibidores de Adsorção: São constituídos por substâncias orgânicas que tem por função principal sua adsorção na superfície do material o qual terá de “proteger”. De certo modo, esse tipo de substancia tem a capacidade de formar películas sobre áreas anódicas e catódicas, interferindo diretamente com a ação eletroquímica. Ainda é valido ressaltar que mesmo em baixa concentração esse tipo de inibidor é muito eficaz. Exemplo: Benzoato de Sódio (AZAMBUJA, 2003).

1.6.4.1 Ação dos Inibidores de Corrosão Benzoato e Molibdato de Sódio

Inibidores de corrosão comumente adicionados à armaduras de concreto mais utilizados são à base de nitrito de cálcio e nitrito de sódio, já os orgânicos principalmente à base de amins (ANDRADE, 1992).

Quando a concentração de certos tipos de inibidores é adicionada abaixo do necessário, este é considerado perigoso, pois leva a formação de uma corrosão localizada (corrosão por pites) podendo gerar problemas muito maiores do que se a estrutura não tivesse recebido inibidor na composição. Dentre os inibidores “perigosos” vale citar o sulfato de zinco, o nitrito de sódio e o molibdato de sódio. Já no caso de inibidores ditos seguros, quando utilizados em concentração abaixo do necessário, agem como com um sistema em que a inibição não ocorreu, como exemplo vale citar o Benzoato de sódio e inibidores orgânicos (Lima, 2000).

Com o intuito de reduzir o processo de corrosão em amaduras de concreto, Lima (2000) testou a eficiência dos inibidores de corrosão Benzoato de Sódio, Molibdato de Sódio e Nitrito de Sódio através de sua inclusão na água de emassamento de argamassa de reparos e concluiu que o melhor inibidor nesse caso de execução de reparos localizados foi o Benzoato de Sódio, pois propiciou uma redução na taxa de corrosão na argamassa e no concreto adjacente.

Já em estudos realizados por Fonseca (1998) a ação do inibidor Benzoato de Sódio está intimamente ligada ao volume de ar que incorpora na massa de concreto no estado fresco. Devido a isso, como consequência sua utilização causa aumento nos valores de abatimento (slump test), perda de massa específica, redução na resistência à compressão e módulo de elasticidade, aumenta a resistividade elétrica e faz com que diminua os coeficientes de permeabilidade e absorção.

Os primeiros estudos com o molibdato de sódio como inibidor de corrosão data de 1939 e vem obtendo um crescimento muito considerável nos dias atuais, principalmente em fluidos de refrigeração (Vukasovich e Farr, citado por Lima, 1996).

A ação do inibidor molibdato se dá por adsorção na interface metal-eletrólito, assim, na presença de íons cloreto pode se ter a concentração necessária do inibidor pelo processo de troca iônica na interface do metal, pois o cloreto atua deslocando os íons do inibidor e deste modo assim formando um complexo com o ferro e acelerando a corrosão. Diante disto, para evitar este processo, deve-se aumentar a concentração do molibdato até uma concentração dita ótima. Vale lembrar também que acima da concentração ótima pode acelerar o processo corrosivo pois ocorre à dissolução do filme passivador para a formação de compostos complexos de molibdato (Lima, 1996).

Quando utilizado por BOLINA (2013), o inibidor molibdato de sódio na proporção de 1% apresentou excelentes resultados comparados aos outros inibidores por ele testados, porém, o elevado custo financeiro deste inibidor pode muitas vezes inviabilizar seu uso.

Outro exemplo da utilização de molibdato de sódio vale citar um estudo realizado por MODESTO (2008) onde a utilização do molibdato de sódio como inibidor de corrosão resultou no deslocamento dos potenciais de corrosão para valores mais positivos e a eficiência de inibição é crescente com o aumento da concentração da substância estudada.

Por fim vale citar um estudo realizado por Sagoe-Crentzil (1992) onde com a concentração de 2,5% de molibdato de sódio em relação à massa de cimento, ele obteve um decréscimo na taxa de corrosão na grandeza de cinco vezes quando comparado ao concreto sem inibidor e esta diferença aumenta ainda mais após decorridos 90 dias.

1.6.5 Monitoramento do Potencial de Corrosão- ASTM 876

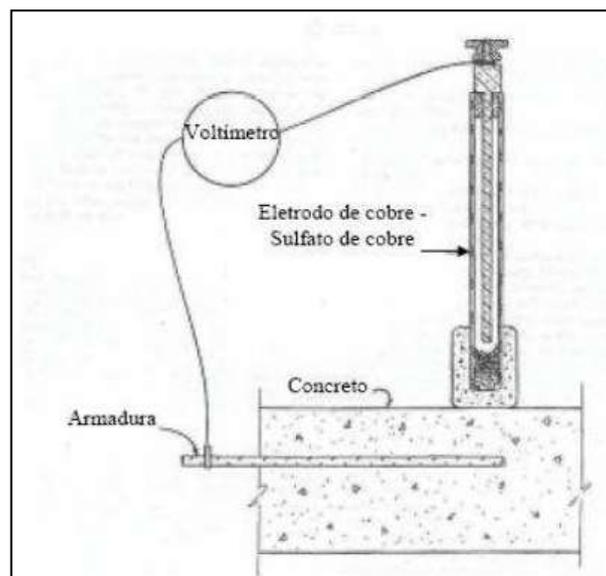
A medida de potencial eletroquímico de corrosão apresenta o estado de corrosão ou passividade das armaduras e fornece informações qualitativas que ajudam a compreender e analisar resultados de outros ensaios (OLIVEIRA, 2005).

A medida de potencial de corrosão é capaz de avaliar o estado de corrosão da armadura inserida no concreto, além disso, medidas de potencial de corrosão também se mostram úteis para a análise do efeito de inibidores de corrosão no concreto pois predizem o efeito da corrosão conforme a presença de oxigênio e cloreto ao longo da armadura em um concreto com fissuras (DOTTO, 2006).

Para Lima (2000) a medida de potencial de corrosão é determinada pela diferença entre o potencial elétrico que existe entre as armaduras e um eletrodo de referência que fica em contato com a superfície do concreto. Pode-se afirmar que a medida utilizando esse método é a técnica não destrutiva e de fácil aplicação conforme a ASTM C 876 (1991).

A Figura10 representa o método de ensaio para medir potencial de corrosão e Tabela 1 são apresentados critérios de avaliação através da medida de potencial de corrosão.

Figura 10- Medida de Potencial de Corrosão.



Fonte: Norma A ASTM C – 876 (1991)

Tabela 1- Critério de avaliação através da medida de potencial de corrosão.

Potencial de Corrosão Relativo ao Eletrodo de Referência de Cobre-Sulfato de Cobre	Probabilidade de Corrosão
< -350	>95%
Entre -200 e -350	50%
> -200	<5%

Fonte: Norma A ASTM C – 876 (1991)

1.6.6 Espectroscopia de Impedância Eletroquímica para Análise de Corrosão em Estruturas de Concreto Armado

Cada vez mais esta técnica vem sendo utilizada como um instrumento eficaz para análise e compreensão do fenômeno de corrosão em metais. Pode-se dizer que é uma das ferramentas mais utilizadas para a investigação do comportamento de interfaces eletroquímicas. O método consiste na aplicação de perturbações, em potencial ou em corrente com variação senoidal, de pequena amplitude e com frequências variadas, sobre um eletrodo em estado estacionário, sendo assim relação temporal que existe entre o potencial e a corrente corresponde à impedância do sistema. Com isso, quando a resposta for dada em corrente e estiver defasada em relação ao potencial aplicado, o sistema tem características capacitivas ou indutivas e a impedância tem um componente imaginário. Quando não houver defasagem, a impedância tem apenas um componente real, e o comportamento é resistivo. Estes diferentes comportamentos e a sua variação ao longo de uma varredura de frequência podem ser associados a características do processo eletroquímico (MELO, 2003)

Em outras palavras, na técnica de Espectroscopia de impedância eletroquímica (EIS), uma perturbação ondulatória senoidal de pequena amplitude (5 a 10 mV) é aplicada no eletrodo de trabalho num ponto $P(E_0, I_0)$, próximo ou no potencial de corrosão (E_{corr}). O sinal será na forma de $\Delta E = |\Delta E|e^{(j\omega t)}$. A resposta em corrente, se o sistema for linear, também será uma perturbação senoidal do tipo: $\Delta I = |\Delta I|e^{(j\omega t + \varphi)}$, onde $j = \sqrt{-1}$, $\varphi =$ ângulo de diferença de fase entre a onda senoidal de potencial e da corrente, $w = 2\pi f$, sendo f a frequência e t o tempo (GIACCHERO, 2013).

A impedância, Z pode ser expressa por um componente real (Z') e por um componente imaginário (Z''), é possível exprimir a impedância por meio das relações apresentadas abaixo:

$$Z = \frac{E(t)}{I(t)}$$

$$Z = Z' + j Z''$$

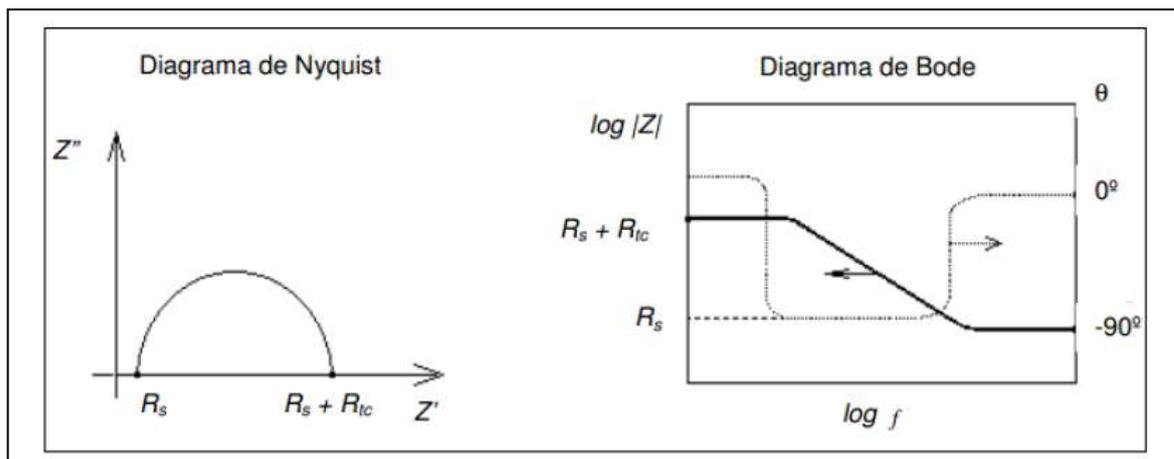
Onde j é o número complexo, isto é $j = -1$.

O módulo da impedância por sua vez é dado pela equação $|Z| = \sqrt{(Z'^2 + Z''^2)}$. Onde $Z' = |Z| \cos \varphi$, $Z'' = |Z| \sin \varphi$ e $\varphi = \arctg (Z''/Z')$

O valor de Z é geralmente representado através dos Diagramas de Nyquist e de Bode. O diagrama de Nyquist é representado por um gráfico Z'' versus Z' , para diferentes frequências, conforme mostra a Figura 11.

O diagrama de Bode é representado por dois gráficos, sendo um $\text{Log}|Z|$ versus $\text{Log } f$ e o outro ângulo de fase φ versus $\text{Log } f$, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11- Diagramas de Nyquist e Bode genérico para um sistema metal/eletrólito.



Fonte : Wolyneç, 2003

O Diagrama de Nyquist mostra na região das altas frequências o valor da resistência do eletrólito ou da solução designado como R_s na figura, geralmente na unidade $\Omega \cdot \text{cm}^2$, enquanto na região das baixas frequências mostra com grande aproximação o valor da soma da resistência à transferência de carga com a resistência da solução ($R_s + R_{tc}$) também na unidade $\Omega \cdot \text{cm}^2$. Da mesma forma o Diagrama de Bode também apresenta nas altas frequências o valor de R_s e nas baixas frequências o valor de $R_s + R_{tc}$ no gráfico $\text{Log}|Z| \times \text{Log } f$. Enquanto que o gráfico ângulo de fase, aqui representado como θ versus $\text{Log } f$ nos informa a tendência do sistema se aproximar de um comportamento resistivo $\theta \rightarrow 0^\circ$, ou capacitivo $\theta \rightarrow -90^\circ$, ou até mesmo indutivo $\theta \rightarrow +90^\circ$. Como a maioria das situações de prevenção contra a corrosão se apresentam entre um comportamento resistivo e capacitivo, ou seja de 0° até -90° é comum apresentar este gráfico rebatido para o eixo positivo ou seja na forma $-\theta$ (GIACCHERO, 2013).

A vantagem deste sistema é que apenas uma perturbação de pequena amplitude permite admitir que o sistema estivesse trabalhando em uma região linear, evitando assim funções matemáticas complexa. Também, com este sistema, é possível impor a perturbação em uma ampla gama de frequências e obter informações sobre os diversos processos eletroquímicos que

ocorrem na interface do eletrodo com a solução, sendo esses processos caracterizados por constantes de tempo. Através destas constantes é possível tirar informações concernentes aos processos eletroquímicos que ocorrem na interface. Também é possível trabalhar sob condições de polarização permitindo identificar eventuais mudanças no mecanismo de reação da interface em virtude da polarização introduzida (MODESTO, 2008).

3 METODOLOGIA

1.7 Materiais

Este tópico apresenta os materiais utilizados para a produção do concreto e os ensaios de caracterização dos mesmos, a dosagem do concreto e os métodos experimentais para análise da funcionalidade do concreto produzido de acordo com as normas recomendadas em cada caso analisado. Os ensaios de caracterização dos materiais foram realizados no Laboratório de Engenharia Civil da UNIPAMPA- Alegrete/RS, sendo que apenas o ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica foi realizado no Laboratório de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul- UFRGS- Porto Alegre/RS.

Foi adotado um traço padrão para comparativos entre as misturas propostas que são apresentadas no item 3.2. Sendo então inicialmente moldados corpos de prova com traço padrão e convencional, com traço padrão e a adição do inibidor de corrosão molibdato de sódio, o traço padrão com o inibidor de corrosão benzoato de sódio e o traço padrão com a mistura dos dois inibidores.

Os materiais utilizados para a confecção dos corpos de prova estão descritos a seguir:

1.7.1 Areia (Agregado miúdo)

O agregado miúdo utilizado para a realização da pesquisa foi a areia média, esta disponibilizada comercialmente pela Areeira Bairro localizada no município de Manoel Viana/RS.

1.7.1.1 Granulometria

Inicialmente para a caracterização foi realizado o ensaio granulométrico para a obtenção da composição granulométrica do material, sendo os procedimentos adotados para a realização do ensaio estabelecidos pela NBR 7217 (ABNT, 1987).

Para análise foi utilizada uma amostra de 0,5 Kg do material, a Tabela 2 apresenta os resultados encontrados no ensaio e o Gráfico 1 a curva granulométrica obtida a qual segue os limites de composição estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

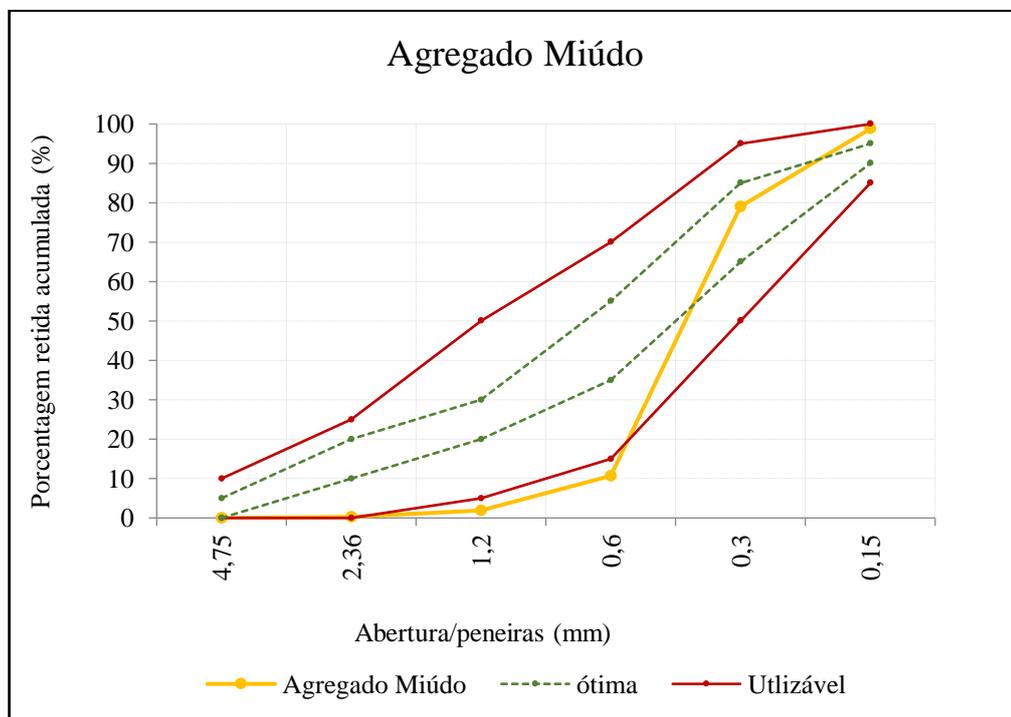
Tabela 2- Granulometria agregado miúdo.

PENEIRA	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDO ACUMULADO
4,75	0	0,00
2,36	1,2	0,24
1,2	8	1,84
0,6	44	10,65
0,3	341,6	79,02
0,15	98,7	98,78
FUNDO	6,1	100,00
TOTAL	499,6	

Fonte: Autora.

De acordo com os resultados o diâmetro máximo característico da areia média é de 1,2mm e o módulo de finura de 1,91.

Gráfico 1- Curva Granulométrica do Agregado Miúdo.



Fonte: Autora.

Apesar de o material não estar completamente inserido entre as curvas limites, o módulo de finura do agregado miúdo é de 1,91. Sendo que o módulo de finura utilizável varia de 1,55 à 2,20, o material está dentro dos parâmetros. Quanto ao o diâmetro máximo do agregado miúdo, o mesmo corresponde à 1,2mm, o que é característico na areia média.

1.7.1.2 Massa específica

Para a determinação da massa específica do agregado miúdo os procedimentos adotados para realização do ensaio seguiram as regulamentações da NBR 9775 (ABNT, 2012) que utiliza o frasco de Chapman. A Tabela 3 apresenta os resultados do ensaio.

Tabela 3- Massa Específica do Agregado Miúdo.

Areia	Unidade	Massa específica Chapman (g/cm ³)
Massa amostra areia seca	500	2,63
Volume do frasco água	200	
Areia + água	389,8	

Fonte: Autora.

De acordo com o resultado do ensaio, a massa específica do agregado miúdo é de 2,63 g/cm³.

1.7.2 Brita (Agregado graúdo)

O agregado graúdo utilizado foi a Brita 1, disponibilizado e comercializado pela empresa Pedra Rosada localizada no município de Alegrete/RS.

1.7.2.1 Granulometria

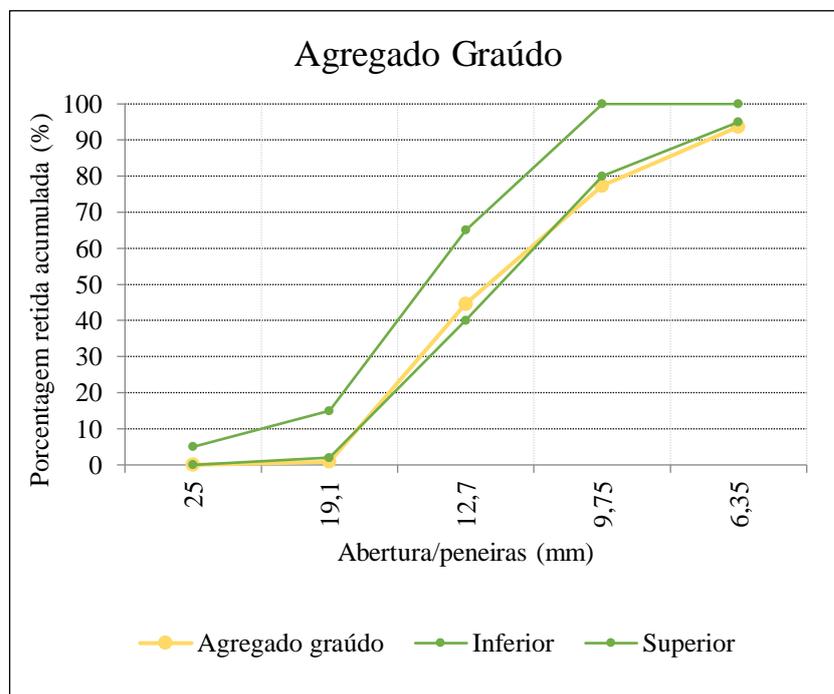
Para obtenção da composição granulométrica do material, foi realizado o ensaio granulométrico o qual seguiu as normativas estabelecidas pela NBR 7217 (ABNT, 1987). Como amostra foi utilizado 5,02 Kg do material, a Tabela 4 e o Gráfico 2 apresentam os resultados do ensaio e a curva granulométrica respectivamente, sendo analisado os limites estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2009).

Tabela 4- Resultados ensaio de granulometria do agregado graúdo.

PENEIRA	MATERIAL RETIDO (g)	% RETIDO ACUMULADO
25	0,00	0,00
19,1	46,2	0,92
12,7	2184,4	44,62
9,75	1634,8	77,32
6,35	819,1	93,71
4,75	101,8	95,74
Fundo	212,8	100,00
TOTAL	4999,10	

Fonte: Autora.

Gráfico 2- Curva Granulométrica do Agregado Graúdo.



Fonte: Autora.

O diâmetro máximo característico do agregado graúdo é de 19,1mm e módulo de finura de 1,74.

1.7.3 Cimento Portland CP IV

O cimento utilizado para a produção do concreto foi o CP IV-32 Votoran, sendo este um material pozolânico que apresenta resistência de 32MPa. Para obtenção da massa específica foi realizado o ensaio descrito pela NBR NM 23 (2000) que utiliza o frasco de Le Chatelier e foi

adquirido o valor de 2,89 g/cm³ quanto às exigências químicas físicas e mecânicas são fornecidas pelo fabricante.

1.7.4 Água de emassamento

A água utilizada na dosagem do concreto é água potável oriunda da rede pública de distribuição de Alegrete/RS (Corsan).

1.7.5 Aço

As barras de aço utilizadas foram CA50 de bitola 6,3mm, corrugadas, comumente empregada em construção civil que de acordo com a NBR 7480 (2007) são obtidas exclusivamente à quente, estas são comercializadas pela empresa Gerdau, sendo que todas as propriedades e características do material são fornecidas pelo fabricante.

Para a realização do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica, as barras foram cortas com 18 cm de comprimento, onde partes das barras foram envoltas por fita isolante para posterior execução do ensaio, quanto a colocação das barras nos corpos de prova, as mesmas foram posicionadas respeitado o cobrimento mínimo exigido pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014). A Figura 12 apresenta as barras utilizadas.

Figura 12- Barra de aço CA 50 de 6,3mm.



Fonte: Autora.

1.7.6 Inibidores de Corrosão

Os inibidores de corrosão utilizados foram molibdato e benzoato de sódio respectivamente nas Figuras 13 e 14.

Ambos foram adicionados ao traço do concreto na proporção de 1,5% do teor de cimento utilizado, percentuais maiores podem interferir negativamente no pH do concreto e nas propriedades mecânicas da mistura.

Figura 13- Molibdato de Sódio.



Fonte: Autora.

Figura 14- Benzoato de Sódio.



Fonte: Autora.

1.8 Confeção dos corpos de prova

Para análise e síntese do estudo foi utilizado o seguinte traço com referência em estudos já realizados (PEREIRA, 2015):

Traço padrão: 1(cimento): 1,9(areia): 2,72(brita) com a/c 0,5(água/cimento)

Mistura 1: cimento/areia/brita/água

Mistura 2: cimento/areia/brita/água/ Inibidor Benzoato

Mistura 3: cimento/areia/brita/água//plastificante/ Inibidor Molibdato

Mistura 4: cimento/areia/brita/água / Inibidor Benzoato + Inibidor Molibdato

De acordo com os procedimentos recomendados pela NBR 5738/2003 foram moldados os corpos de prova de todos os traços. Sendo que para execução, o procedimento seguiu 100% de agregado graúdo, posteriormente 25% água, logo após 100% cimento e 75% água, por fim 100% agregado miúdo. Nos casos em que se usaram os inibidores, o mesmo foi dissolvido em água e adicionado. No caso em que foi necessário o uso de plastificante, ainda foi separado um pouco de água para misturar o mesmo e adicionar. Apenas no traço com o inibidor molibdato foi necessário a utilização de plastificante (0,3% do cimento).

Quantidade de Material para cada mistura: CPs 10x20: 0,00157m³, portanto para cada mistura 0,03925m³. Como base consumo de cimento 388Kg/m³. As tabelas 5 e 6 apresentam as

quantidades de material necessário para moldagem e a quantidade de corpos de prova necessários para realização de cada ensaio proposto, respectivamente.

Tabela 5- Quantidades de materiais necessários.

Material	Quantidade
Cimento	15,2296 Kg
Areia	28,93 Kg
Brita	41,42Kg
Água	7,61 Litros
Plastificante	-
Inibidor	228,44 gramas

Fonte: Autora.

Tabela 6- Quantidade de CPs para cada mistura:

Ensaio	Quantidades
Resistência à Tração	8
Resistência à Compressão (na tração diametral)	8
Absorção de água por imersão	3
Absorção de água por capilaridade	3
Espectroscopia de Impedância Eletroquímica	3 com armadura e grafite

Fonte: Autora.

As Figuras 15 e 16 apresentam as moldagens dos corpos de prova.

Figura 15- Moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Autora.

Figura 16- Corpos de prova moldados com a introdução das barras de aço e grafite.



Fonte: Autora.

Após a moldagem dos corpos de prova foram inseridas as barras de aço respeitando o cobrimento mínimo exigido por norma NBR 6118/2014 para classe de agressividade III que é de 4cm. Ainda nesta etapa vale ressaltar que os corpos de prova com a adição do inibidor

Benzoato de Sódio visualmente obtiveram incorporação de ar superior quando comparada aos outros.

1.9 Ensaios Mecânicos, Físicos e Químicos

1.9.1 Slump Test

No estado fresco, para todas as misturas foi realizado o ensaio de Slump Test, o qual segue as recomendações da NBR NM 67/1998. A Figura 17 apresenta uma imagem da realização de um dos ensaios.

Figura 17- Ensaio tronco de cone (Slump Test).



Fonte: Autora.

Vale ressaltar que todas as amostras atenderam o mínimo exigido por norma quanto à fluidez do concreto, exceto a mistura com molibdato precisou de aditivo plastificante.

Após moldagem e decorridos 7 e 28 dias (tempo de cura), tempo no qual todos os corpos de prova permaneceram em câmara úmida, os ensaios mecânicos, físicos e químicos já puderam ser realizados.

1.9.2 Análise do pH nas Misturas de Concreto

Ainda no estado fresco do concreto, devido a importância do pH da mistura, o qual segundo recomendações deve-se estar superior a 9 para que garanta a proteção da armadura contra a corrosão, foi utilizado papel indicador de pH fabricado pela empresa Macherey Nagel, para uma análise do pH nas misturas ensaiadas conforme se pode observar na Figura 19.

Figura 18- Indicador de pH do concreto.



Fonte: Autora.

É válido ressaltar que para todas as misturas o pH ficou em torno de 12, ou seja, garantia-se a proteção (passivação) da armadura quanto a alcalinidade do concreto.

1.9.3 Ensaio Mecânico de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Como ensaio mecânico foi realizado o ensaio de resistência à tração por compressão diametral, este segue as normativas da NBR 7222 (ABNT, 2011). O ensaio utiliza o equipamento universal da marca EMIC com capacidade de carga 200 KN. Com o auxílio de duas taliscas de fibra de madeira (especificadas pela NBR 10024/2012) o ensaio consiste em posicionar os corpos de prova entre estas taliscas de modo que ele permaneça em repouso ao longo da geratriz sobre o prato da máquina de compressão, após são aplicados carregamentos até que o corpo de prova sofra ruptura por compressão diametral. A Figura 19 apresenta o ensaio realizado.

O cálculo da resistência à tração por compressão diametral foi calculado através da seguinte equação:

$$f_c = \frac{2F}{\pi \cdot d \cdot L} \quad \dots(7)$$

Onde:

f_c = resistência à tração por compressão diametral, em MPa;

F = resistência máxima obtida no ensaio, em N;

d = diâmetro do corpo de prova, em mm;

L = altura do corpo de prova, em mm.

Figura 19- Ensaio de Resistência à Tração por Compressão Diametral.



Fonte: Autora.

1.9.4 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão com o Auxílio de Extensômetros

Outo ensaio mecânico realizado com os corpos de prova foi o ensaio de resistência à compressão foi utilizada a máquina de ensaio universal da marca EMIC com capacidade de 200KN. Conforme exigido pela NBR 5739 (2015), para que os resultados sejam confiáveis é necessário que as faces dos corpos de prova estejam perfeitamente lisas, para isso todos foram retificados com a Retificadora Automática para Corpo de prova do laboratório de Eng. Civil Unipampa.

Após os corpos de prova serem bem posicionados no centro do equipamento, foram aplicados carregamentos contínuos, sem choques e com uma velocidade de 0,2 MPa/s, a qual foi mantida constante durante todo o ensaio. O ensaio foi interrompido quando houve uma

queda da força, pois indicava que ocorreu a ruptura. Durante o ensaio também foram utilizados extensômetros para se obter as deformações ao longo do ensaio conforme Figura 20.

Figura 20- Ensaio de Resistência a Compressão.



Fonte: Autora.

A resistência à compressão foi calculada através da seguinte equação:

$$f_c = \frac{4F}{\pi \cdot D^2} \quad \dots (8)$$

f_c = resistência à compressão, em MPa;

F = resistência máxima alcançada, em N;

D = diâmetro do corpo de prova, em mm.

1.9.5 Ensaio Físico de Absorção de Água por Imersão

Os ensaios de absorção por imersão foram realizados conforme as recomendações da Norma Brasileira NBR 9778:1987 e foi utilizado 3 corpos-de-prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro e 200 mm de altura.

Para a realização do ensaio, a norma divide o procedimento em etapas que de maneira simples consiste em colocar em estufa à 105 ± 5 °C por até 72 horas. Resfriar até 23 ± 2 °C para determinar a massa seca em g.

Após as amostras foram colocadas em um tanque com temperatura controlada à 23 ± 2 °C, onde nas primeiras 4h com 1/3 da amostra imersa, nas 4h seguintes 2/3 imersa e completamente imerso nas 64h. Totalizando 72h. Deixar resfriar até 23°C e pesar. A Figura 21 apresenta as amostras em tanque imersas.

Figura 21- Amostras Imersas em Tanque com Temperatura Controlada.



Fonte: Autora.

Depois de saturadas foram colocadas as amostras em um recipiente cheio de água e elevado a temperatura progressivamente até o ponto de ebulição (depois de 15min e antes dos 30 min), onde foi deixado em ebulição por 5horas, repondo água à mesma temperatura. As Figuras 22 e 23 apresentam as amostras em recipiente em ebulição.

Figura 22- Amostras ensaiadas em recipiente para processo de ebulição.



Fonte: Autora.

Figura 23- Amostras em recipiente em ebulição.



Fonte: Autora.

Por fim, foi deixado as amostras esfriarem naturalmente (14h) à $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e foi registrado a massa da amostra imersa em balança hidrostática e posteriormente secadas com pano e determinado a massa em gramas conforme Figura 24.

Figura 24- Pesagem em Balança Hidrostática.



Fonte: Autora.

Para análise física procedemos à verificação da absorção de água através do método recomendado pela NBR 9778, dividindo-se a massa de água contida nos poros do corpo de prova de concreto saturado ($M_{sat}-M_s$) pela massa do corpo de prova seco em estufa 105°C por cerca de 72 horas (M_s). A absorção de água foi definida pela seguinte equação 9:

$$Abs (\%) = \frac{M_{sat}-M_s}{M_s} \times 100 \quad \dots (9)$$

Onde;

M_{sat} = Massa do corpo de prova saturado;

M_s = Massa do corpo de prova seco;

Abs = Absorção de água por imersão em porcentagem.

1.9.6 Ensaio Físico de Absorção de Água por Capilaridade

Para a determinação de absorção de água por capilaridade, foram ensaiados corpos de prova de acordo com a regulamentação da NBR 9779 (ABNT, 1995).

Inicialmente, após decorridos 28 dias, a primeira medida de massa foi realizada com cada corpo-de-prova ao ar e, em seguida, eles foram encaminhados à secagem em estufa à

temperatura de $105 \pm 5^\circ\text{C}$, até que obtivessem a constância de massa. Após, os corpos-de-prova foram resfriados ao ar à temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$ e, na sequência, novamente suas massas foram obtidas.

Antes da imersão em água, a lateral de cada corpo-de-prova e sua superfície foi coberta com fita durex, a fim de evitar influência do meio exterior ao resultado do experimento, conforme a Figura 25.

Figura 25- Amostras Envoltas por Fita Durex.



Fonte: Autora.

Foi realizada medida de absorção capilar nos períodos de tempo de 3, 6, 24, 48 e 72 horas de imersão dos corpos-de-prova em água, sendo esta obtida pela divisão do aumento da massa em cada tempo especificado pela área da seção transversal da superfície do corpo-de-prova em contato com a água. As Figuras 26 e 27 mostram as misturas no recipiente em contato com a água e a temperatura do ensaio, respectivamente.

Figura 26- Amostras em Recipiente de Ensaio de Capilaridade.



Fonte: Autora.

Figura 27- Temperatura de Ensaio de Capilaridade.



Fonte: Autora.

Antes da realização de cada pesagem, as superfícies dos corpos-de-prova em contato com a água foram enxugadas com pano úmido. Diante das pesagens iniciais (tempo = 3, 6, 24 e 48 horas), os corpos-de-prova voltaram imediatamente ao recipiente de ensaio, até a leitura da pesagem final de 72 horas.

Depois de realizadas todas as medidas, com o auxílio da prensa, para finalizar o ensaio os CPs foram rompidos à tração para que fosse obtida a altura de ascensão capilar máxima e

desenhada a distribuição de água no interior de cada corpo-de-prova, como pode ser observado as Figuras 28 e 29.

Figura 28- Altura de Ascensão Capilar e Distribuição de Água Amostra 1.



Fonte: Autora.

Figura 29- Altura de Ascensão Capilar e Distribuição de Água Amostra 2.



Fonte: Autora.

O cálculo da absorção capilar de água para cada mistura é dado pela seguinte expressão:

$$C = \frac{A-B}{s} \quad \dots(9)$$

Onde:

C = absorção de água por capilaridade;

A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante um período de tempo especificado, em gramas;

B = massa do corpo-de-prova seco, assim que esse atingir a temperatura de $23 \pm 2^\circ\text{C}$, em gramas;

S = área de seção transversal, em cm^2 ;

1.9.7 Monitoramento de Potencial de Corrosão- ASTM 876

O processo de corrosão acelerada que consistiu de 28 ciclos de imersão e secagem dos corpos-de-prova durante o período de 7 meses, sendo que cada ciclo foi composto de secagem em estufa por 3 dias e imersão parcial dos corpos-de-prova em solução contendo íons cloreto por 4 dias. No processo de imersão, as amostras foram colocadas em um recipiente com 3,5% de NaCl, conforme Figura 30 (DOTTO, 2006).

Figura 30- Imersão dos Corpos-de- Prova em Solução 3,5% de NaCl.



Fonte: Autora.

Durante esta etapa os concretos foram parcialmente submersos para promover a entrada do oxigênio e do eletrólito na armadura, favorecendo assim o processo de corrosão eletroquímico. No decorrer do experimento, foram obtidas as medidas de potencial de corrosão diferentemente da norma ASTM C 876 (1991), utilizando um eletrodo de calomelano saturado (ECS) como eletrodo de referência, acoplado a um multímetro e sem a utilização da esponja

umidificada. Estas medidas são comparativas entre os potenciais lidos na presente pesquisa e não se correlacionam com a técnica já normatizada.

Foram adquiridas 5 medidas de potencial de corrosão em triplicata para cada mistura conforme Tabela 7.

Tabela 7- Períodos em meses dos ciclos de Imersão e Secagem.

Números de Ciclos	Tempo (meses)
4 ciclos	1
13 ciclos	3
17 ciclos	4
24 ciclos	6
28 ciclos	7

Fonte: Autora.

1.9.8 Ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Medidas de espectroscopia de impedância eletroquímica foram realizadas no potencial do circuito aberto em uma ampla faixa de frequência de 100 kHz até 10 mHz com uma amplitude de onda senoidal de 10 mV.

Todas as medidas eletroquímicas foram realizadas no equipamento da Autolab, modelo microautolab. Para aquisição dos dados se curto- circuitou o eletrodo de referência com o eletrodo auxiliar conectando-se na barra de grafite dos corpos-de-prova. Enquanto que, na barra de aço conectou-se o eletrodo de trabalho, compondo assim uma célula eletroquímica em estado sólido. A Figura 31 apresenta o método de ensaio.

Figura 31- Procedimento do ensaio de espectroscopia de impedância eletroquímica.



Fonte: Autora.

1.9.9 Curvas de Polarização

Medidas de polarização anódica foram feitas a fim de acelerar o processo corrosivo e observar comparativamente a eficiência dos inibidores de corrosão na barra de aço CA 50.

As medidas foram feitas a partir do potencial de corrosão até + 400 mV do E_{corr} , com $1 \text{ mV} \cdot \text{s}^{-1}$ de velocidade de varredura. A solução utilizada consiste em um eletrólito que simula a solução nos poros do concreto que é composta de 8g/L de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 0,01 mol/L de NaOH, 0,01 mol/L de KOH e 0,25 g/L de $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (pH= 13,30).

1.9.10 Ensaio de Penetração de Íons Cloretos por Imersão

Após realizados os ciclos para obtenção dos resultados de espectroscopia de impedância eletroquímica os corpos de prova foram submetidos à ruptura por compressão diametral formando duas fatias nas quais foi aspergida uma solução de nitrato de prata (AgNO_3). Este procedimento faz com que sejam originadas duas regiões de coloração bem definidas na amostra, uma de coloração marrom e outra esbranquiçada. A região marrom corresponde à região livre da ação de cloretos, já a região esbranquiçada representa a região que contém cloretos. Essa diferença colorimétrica possibilita a verificação da profundidade da penetração dos íons cloretos por meio de imagens digitais. A Figura 32 apresenta a solução de nitrato de prata que foi utilizada para aspersão.

Figura 32- Solução de Nitrato de Prata.



Fonte: Autora.

4 RESULTADOS

1.10 Ensaio Mecânico de Resistência à Tração por Compressão Diametral

Os ensaios de Resistência à Tração por Compressão Diametral foram realizados aos 7 e aos 28 dias para todas as misturas. Não se observou uma variação significativa entre os corpos de prova apesar de que na presença de molibdato os valores acompanharam uma tendência de resultados menores quando comparado ao concreto convencional aos 7 dias. Enquanto que os corpos de prova na presença de benzoato apresentaram uma tendência de resultados menores aos 28 dias.

As Tabelas 8 e 9 e os Gráficos 3 e 4 mostram esta sutil tendência de resultados mais claramente.

Tabela 8- Resultados de Resistência à Tração aos 7 dias.

Corpos de Prova	7 dias (Mpa)				Média	Variância	Desvio Padrão
Concreto Convencional	2,85	2,67	3,06	3,24	2,96	0,05	0,21
Concreto com Benzoato	2,17	2,72	2,51	2,29	2,42	0,04	0,21
Concreto com Molibdato	2,12	1,77	2,19		2,03	0,03	0,18
Concreto com Benzoato e Molibdato	2,06	2,17	2,67	2,61	2,38	0,07	0,27

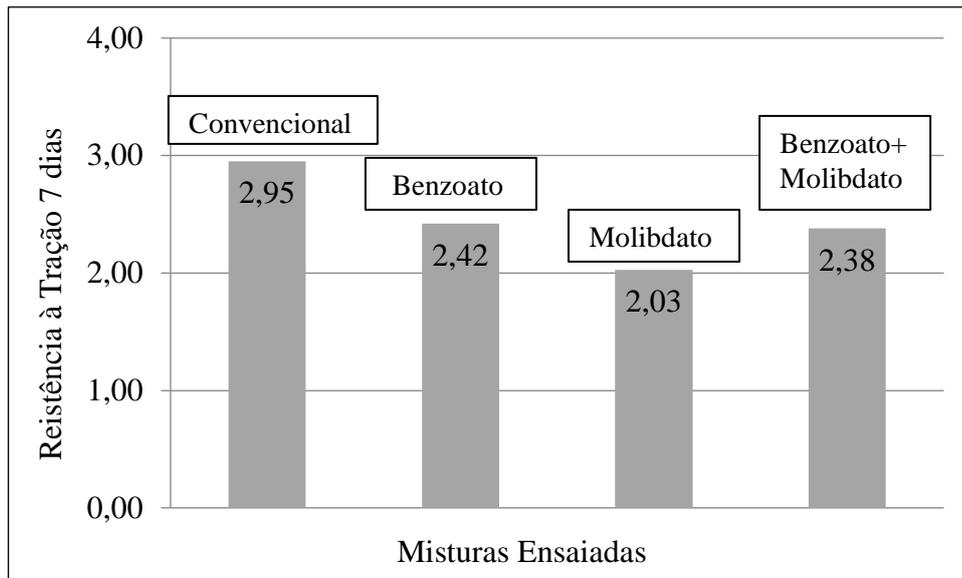
Fonte: Autora.

Tabela 9- Resultados de Resistência à Tração aos 28 dias.

Corpos de Prova	28 dias (Mpa)				Média	Variância	Desvio Padrão
Concreto Convencional	4,06	3,89	4,32	4,29	4,14	0,03	0,18
Concreto com Benzoato	2,42	3,82	3,28	3,8	3,33	0,32	0,57
Concreto com Molibdato	3,55	4,31	3,7	2,87	3,60	0,26	0,51
Concreto com Benzoato e Molibdato	2,87	3,83	3,12	3,58	3,35	0,14	0,38

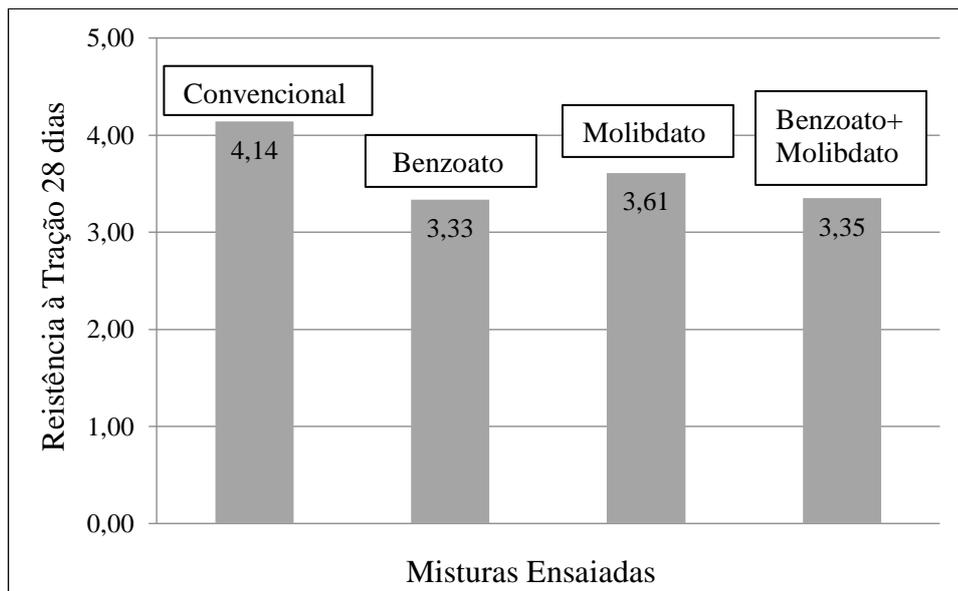
Fonte: Autora.

Gráfico 3- Resultado de resistência à Tração por Compressão Diametral aos 7 dias.



Fonte: Autora.

Gráfico 4- Resultado de Resistência à Tração por Compressão Diametral aos 28 dias.



Fonte: Autora.

Sabe-se da literatura que com a utilização do benzoato de sódio no concreto armado ocorre um aumento do volume de ar na massa de concreto fresco, causando perda de massa específica, perda na resistência a compressão e módulo de elasticidade, diminuição dos coeficientes de permeabilidade e absorção. Esta sutil diminuição quase que insignificante

reforçam a ideia de que na quantidade utilizada, não se está limitando a eficiência mecânica da armadura.

Por fim, pode-se observar houve pouca variação entre as misturas e que esta variação pode justificar-se pela pouca variabilidade no modo de execução deste ensaio.

1.11 Ensaio Mecânico de Resistência à Compressão com o Auxílio de Extensômetros

Para a realização deste ensaio, corpos de prova foram ensaiados aos 7 e aos 28 dias, conforme segue resultados nas Tabela 10 e 11:

Tabela 10- Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 7 dias.

Corpos de Prova	7 dias (Mpa)				Média	Variância	Desvio Padrão
Concreto Convencional	19,76	23,9	23,4	20,08	21,77	3,48	1,87
Concreto com Benzoato	18,81	17,03	18,3	18,97	18,28	0,58	0,76
Concreto com Molibdato	20,65	21,4	18,2		20,09	1,85	1,36
Concreto com Benzoato e Molibdato	17,56	15,4	16,1		16,35	0,81	0,90

Fonte: Autora.

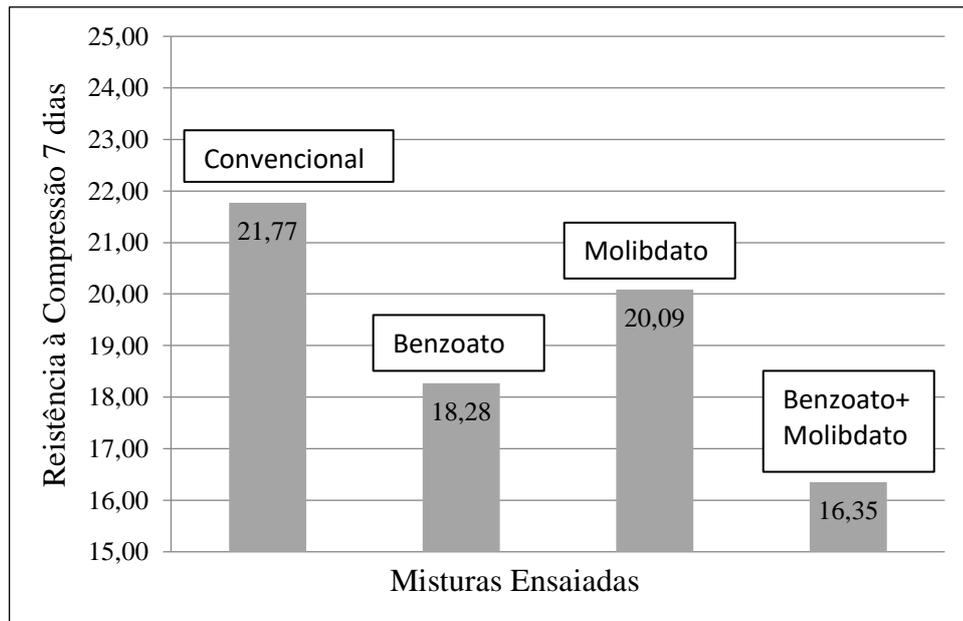
Tabela 11- Resultados do Ensaio de Resistência à Compressão Axial aos 28 dias.

Corpos de Prova	28 dias (Mpa)				Média	Variância	Desvio Padrão
Concreto Convencional	35,76	35,34	34,4	32,58	34,52	1,50	1,22
Concreto com Benzoato	30,38	26,44	29,7	35,31	30,46	10,07	3,17
Concreto com Molibdato	33,64	28,59	28,8	29,98	30,25	4,13	2,03
Concreto com Benzoato e Molibdato	28,05	29,67	21,6	21,65	25,25	13,38	3,66

Fonte: Autora.

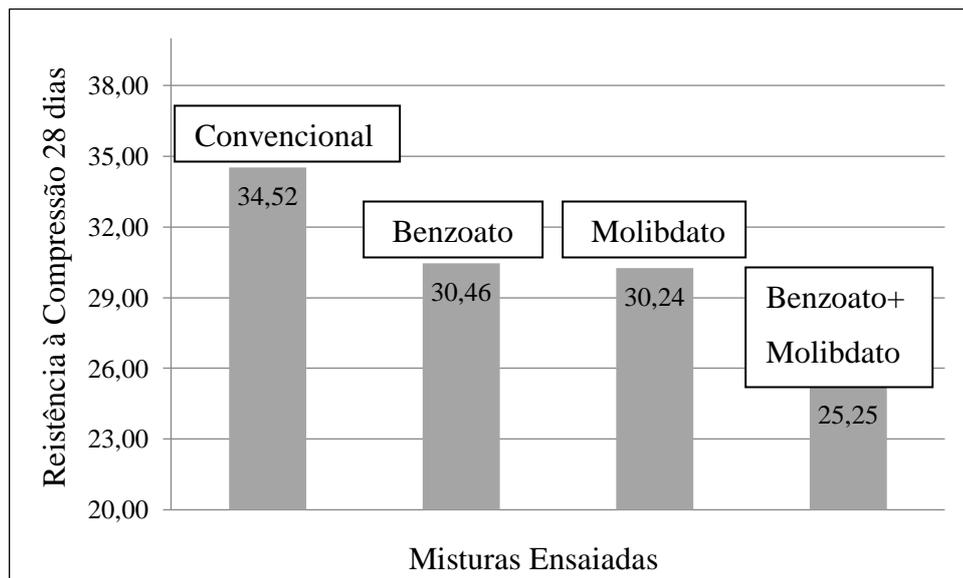
Os resultados são expressos graficamente pelos Gráficos 5 e 6.

Gráfico 5- Resultados de Resistência à Compressão aos 7 dias.



Fonte: Autora.

Gráfico 6- Resultados Resistência à Compressão aos 28 dias.



Fonte: Autora.

Diante dos resultados é válido ressaltar que durante a dosagem dos corpos de prova com inibidor benzoato e nos corpos de prova com os dois inibidores (benzoato + molibdato) pode-se observar uma elevada incorporação de ar, o que nestes dois casos a queda na resistência pode justificar-se por este fato. Com isso, de acordo com as médias encontradas podemos afirmar que em algumas situações houve uma variância considerável nos resultados, porém na média

de todos dos corpos de prova ensaiados, todos atenderam a resistência mínima de 25MPa para os quais foram produzidos. Diante disto, o ensaio mecânico que é de suma importância nos permite dar sequência na pesquisa, pois do contrário, caso estes mínimos não fossem atendidos não teria sentido a utilização destes inibidores.

Em colaboração aos resultados, vale citar pesquisa realizada por LUZ (1999) na análise da resistência à compressão para concretos com adições de cloreto de sódio em diferentes porcentagens, resultados quais muito similares aos encontrados por MUNIZ (1996). De acordo com ambos os estudos, a resistência à compressão diminui com o aumento do percentual de cloreto de sódio adicionado ao concreto, pois de acordo com os resultados este comportamento deve-se à interferência na cristalização dos produtos de hidratação. Para os autores, tem-se conhecimento que o C3A é consumido inicialmente na formação da etringita, somente em seguida é que ocorre a reação com cloreto de sódio, formando o sal de Friedel. Já no caso da adição de NaCl na preparação do concreto, este tende a reagir com o aluminato tricálcico, consequentemente diminuindo a formação da etringita. Dessa forma, o aumento do percentual de cloreto de sódio no concreto leva a um aumento na formação do sal de Friedel e, sendo este mais fraco que a etringita confere ao concreto uma menor resistência à compressão.

Por fim, ainda vale citar uma pesquisa realizada por OLIVEIRA (2000) sobre a resistência à compressão de um concreto preparado com os inibidores de corrosão nitrito de sódio, molibdato de sódio e molibdato de amônio em diferentes proporções. De acordo com os resultados encontrados, a resistência à compressão permanece praticamente constante quando se aumenta a porcentagem de nitrito de sódio, molibdato de amônio e a mistura nitrito/molibdato. Pode-se justificar este comportamento devido às reações químicas entre esses inibidores e os silicatos formarem complexos intermediários com a resistência da mesma ordem que a etringita, não alterando a formação da zona de transição e a resistência à compressão do concreto. Porém apenas com o aumento da porcentagem de molibdato de sódio a resistência à compressão decresceu em torno de 10 % para a adição de 3% desse inibidor.

1.12 Ensaio Físico de Absorção de Água por Imersão

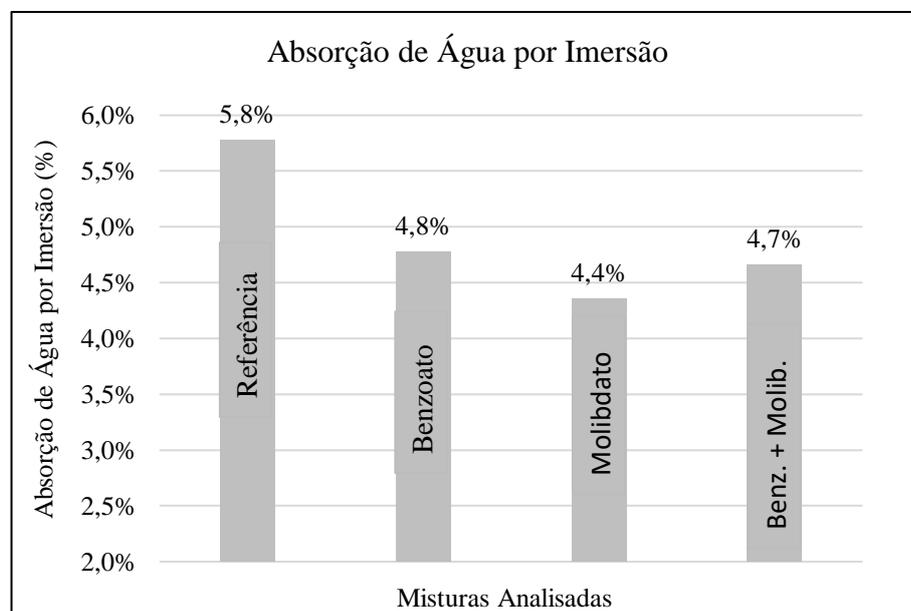
A Tabela 12 e o Gráfico apresenta dos resultados em porcentagem da absorção capilar em cada caso das 3 amostras ensaiadas.

Tabela 12- Resultados dos ensaios de Absorção de Água por imersão.

Corpos de Prova	Média das Massas Seca (g)	Média das Massas Saturada (g)	Absorção Capilar (%)
Mistura Referência	3587,8	3795,07	5,78%
Mistura Com Benzoato	3594,37	3766,10	4,78%
Mistura com Molibdato	3580,40	3736,33	4,36%
Mistura com Benzoato e Molibdato	3538,83	3703,73	4,66%

Fonte: Autora.

Gráfico 7- Absorção de Água por Imersão NBR 9778.



Fonte: Autora.

De acordo com os resultados encontrados podemos observar uma maior absorção de água por imersão nos corpos de prova com traço referência, ou seja, sem a adição de inibidores. Já no caso dos corpos de prova com inibidores, podemos observar uma menor absorção de água por imersão na mistura com molibdato, um pouco maior na mistura com benzoato e um valor intermediário com ambos inibidores. Este fato pode justificar-se, pois como já citado no capítulo 3.2, as misturas com benzoato de sódio apresentaram uma incorporação de ar visualmente perceptível.

Em colaboração a estes resultados, vale citar o trabalho de TRINDADE (2013), onde os índices de absorção de água encontrados pelo autor foram similares aos do trabalho em discussão e o maior valor encontrado também se referia a mistura analisada sem os inibidores, ou seja, pode-se dizer que a presença de inibidores faz com que a absorção de água por imersão seja menor.

1.13 Ensaio Físico de Absorção de Água por Capilaridade

As Tabelas 13 à 16 apresentam os valores encontrados de absorção capilar, e o Gráfico 8 apresenta estes resultados de forma sucinta das 3 amostras ensaiadas.

Tabela 13- Absorção por Capilaridade Concreto Referência.

Corpos de prova moldados no dia 12/01 Referência			Área da seção transversal (cm ²)	Absorção Capilar (g/cm ²)
Peso (g)	Média (g)	Variação de Massa (%)		
Peso após 72h seco em estufa: 15/02	3619,40	-	71,14	0,978
Peso após 24h com imersão:16/02	3670,41	0,51		
Peso após 48h com imersão: 17/02	3681,56	0,11		
Peso após 72h com imersão:18/02	3688,96	0,07		

Fonte: Autora.

Tabela 14- Absorção por Capilaridade Concreto com Benzoato.

Corpos de prova moldados no dia 13/01 Benzoato			Área da seção transversal (cm ²)	Absorção Capilar (g/cm ²)
Peso (g)	Média	Variação de Massa (%)		
Peso após 72h seco em estufa: 15/02	3544,12	-	71,96	1,014
Peso após 24h com imersão:16/02	3602,83	0,40		
Peso após 48h com imersão: 17/02	3611,06	0,08		
Peso após 72h com imersão:18/02	3617,06	0,06		

Fonte: Autora.

Tabela 15- Absorção por Capilaridade Concreto com Molibdato.

Corpos de prova moldados no dia 18/01 Molibdato			Área da seção transversal (cm ²)	Absorção Capilar (g/cm ²)
Peso	Média	Variação de Massa (%)		
Peso após 72h seco em estufa: 15/02	3612,5	-	73,8	0,926
Peso após 24h com imersão:16/02	3663,73	0,51		
Peso após 48h com imersão: 17/02	3674,86	0,11		
Peso após 72h com imersão:18/02	3680,83	0,06		

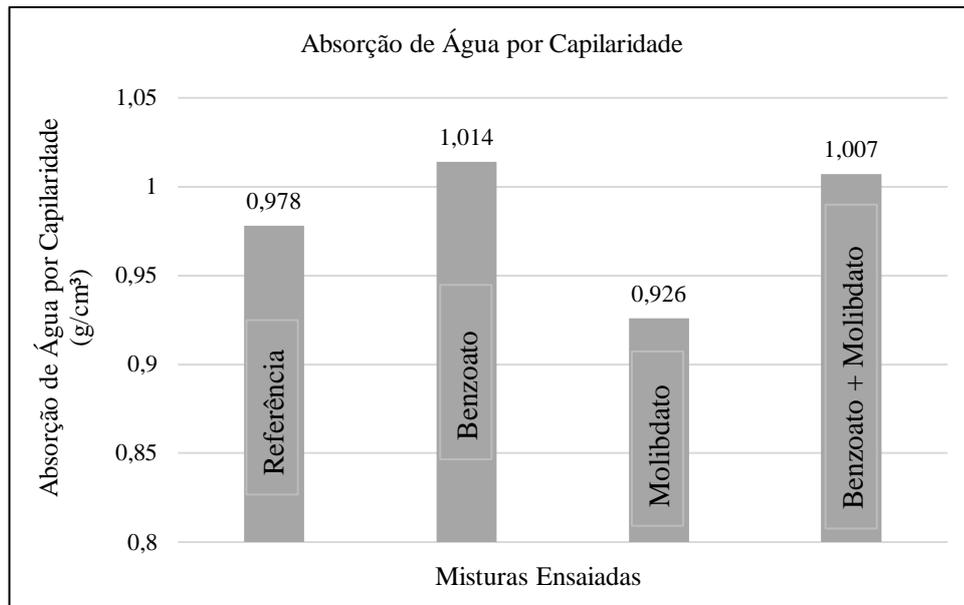
Fonte: Autora.

Tabela 16- Absorção por Capilaridade Concreto com Benzoato e Molibdato.

Corpos de prova moldados no dia 19/01 Benzoato e Molibdato			Área da seção transversal (cm ²)	Absorção Capilar (g/cm ²)
Peso	Média	Variação de Massa (%)		
Peso após 72h seco em estufa: 15/02	3557,83	-	72,43	1,007
Peso após 24h com imersão:16/02	3612,31	0,54		
Peso após 48h com imersão: 17/02	3627,13	0,15		
Peso após 72h com imersão:18/02	3635,83	0,09		

Fonte: Autora.

Gráfico 8- Absorção de Água por Capilaridade.



Fonte: Autora.

No concreto a microestrutura influencia diretamente no volume absorvido por capilaridade, a altura de ascensão dos líquidos nos poros e a velocidade de absorção. Também pode-se dizer que as forças capilares aumentam proporcionalmente a diminuição do diâmetro dos poros, e assim é possível afirmar que quanto menores os diâmetros dos poros, maiores as alturas de ascensão, e poros maiores apresentam uma menor altura de ascensão e maiores volumes absorvidos.

Como sabemos o valor da absorção capilar depende diretamente das massas dos corpos de prova seco e após imersão parcial em água por um período de tempo e área de ascensão capilar nos corpos de prova. Com isso, podemos observar que entre as quatro misturas ensaiadas houve pouca diferença nos resultados, sendo que os corpos que maior apresentaram valor de capilaridade foram os que tinham a presença do inibidor Benzoato, isso pode ter ocorrido pelo fato já mencionado de a incorporação de ar ter sido visualmente significativa nessas misturas, consequentemente houve a presença de mais poros capilares e assim uma maior absorção de água por capilaridade.

1.14 Monitoramento do Potencial de Corrosão

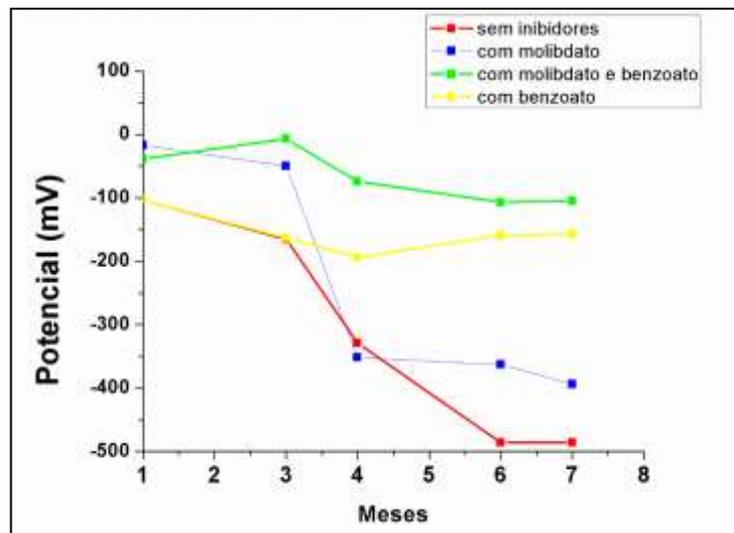
Medidas de potencial de corrosão foram realizadas a fim de monitorar a probabilidade de corrosão na armadura em comparação entre as amostras analisadas.

No Gráfico 9 é possível observar o aumento significativo da probabilidade de corrosão na ausência dos inibidores (curva em vermelho). Após 4 meses o potencial de corrosão na ausência dos inibidores torna-se ativo, ou seja, menor que -350 mV.

A presença de cada um ou dos dois inibidores juntos diminui a probabilidade de corrosão na armadura (benzoato de sódio, curva em amarelo). Entretanto o uso dos dois inibidores mostra claramente um efeito sinérgico minimizando a corrosão na barra de aço de forma bastante eficaz uma vez que é a situação menos ativa eletroquimicamente, ou seja, que tem o maior valor de potencial de corrosão (potencial médio de corrosão de -138 mV em 7 meses).

O benzoato de sódio mostrou-se mais eficaz que o molibdato de sódio uma vez que este se conservou na região passiva para até 7 meses de ciclos de imersão e secagem, em contrapartida o molibdato de sódio se mostrou não eficiente após 4 meses de imersão uma vez que ultrapassou a transição passivo/ativo.

Gráfico 9- Potencial de Corrosão Corpos-de- Prova após 7 meses de ciclos de imersão e secagem em solução que simula água do mar (3,5% NaCl).



Fonte: Autora.

Conforme o diagrama (Gráfico 9) observa-se que na presença dos dois inibidores, ou somente de benzoato de sódio encontra-se em passiva, enquanto que na ausência dos dois inibidores ocorre a transição passivo/ativo para 7 meses.

1.15 Ensaio de Espectroscopia de Impedância Eletroquímica

Nos diagramas de Bode podemos observar o comportamento eletroquímico do concreto na extremidade à direita, na região das altas frequências ($f = 100 \text{ kHz}$), e da interface concreto/aço na extremidade à esquerda, na região das baixas frequências ($f = 10 \text{ mHz}$), Gráfico 10. O patamar no gráfico $\text{Log } |Z|$ versus $\text{Log } f$ (Gráfico 10) entre as extremidades da esquerda e da direita se refere a resistividade do concreto. A resistividade do concreto mostra valores bem elevados na ordem de $10^5 - 10^7 \text{ Ohm.cm}^2$ para tempos recentes de ciclos de imersão e secagem pois o aço ainda se encontra em estágio de corrosão passiva conforme norma ASTM C- 876, como visto no capítulo 4.4 desta dissertação e também em concordância a estudos anteriores realizados por DOTTO (2006).

Entretanto é possível observar uma nítida diferença não somente nos valores de resistência do concreto, mas também na resistência da interface concreto/aço nas situações em que temos presentes os dois inibidores e na presença de benzoato de sódio ($R_{\text{concreto}} = 10^6 \text{ } \Omega.\text{cm}^2$ e $R_{\text{concreto/aço}} = 10^7 \text{ } \Omega.\text{cm}^2$) (Gráfico 10). A ausência dos inibidores mostra valores menores de resistência do concreto, e resistência contra a corrosão na interface concreto/aço ($R_{\text{concreto}} = 10^{3.8} \text{ } \Omega.\text{cm}^2$ e $R_{\text{concreto/aço}} = 10^{4.4} \text{ } \Omega.\text{cm}^2$).

No diagrama $-\hat{\text{Ângulo de fase versus Log } f}$ (Gráfico 11) observa-se três regiões distintas aparecem duas constantes de tempo incompletas uma na alta frequência ($f = 100 \text{ kHz}$) associada ao concreto e outra na baixa frequência ($f = 10 \text{ mHz}$) associada a pasta/barra de aço. Os valores de ângulos de fases nas altas frequências fornecem informações do estado do mais resistivo ou capacitivo da pasta de concreto, enquanto temos valores de -60° para a ausência de inibidores e na presença de molibdato, que caracterizam um comportamento mais difusional e permissivo ao transporte de íons cloretos através do concreto, temos valores de -80° na presença dos dois inibidores e na presença de benzoato de sódio, que caracterizam um comportamento menos difusional e mais capacitivo.

Na região das mais baixas frequências é possível observar ângulos de fases mais resistivos de -22° caracterizando uma maior resistência a passagem de íons cloretos até a barra de aço na presença dos dois inibidores ou na presença somente de benzoato de sódio.

O ângulo de fase de -55 na ausência dos inibidores caracteriza um comportamento de intensa difusão dos íons cloretos até a barra de aço, enquanto que na presença de molibdato de sódio temos um impedimento e/ou dificuldade sutilmente maior uma vez que o ângulo de fase se encontra em torno de -65° .

Estas constantes de tempo apresentam-se incompletas devido a faixa de frequência imposta ao experimento, Gráfico 11. Não se observa um desempenho anticorrosivo significativo para o inibidor molibdato de sódio para tempos recentes de imersão (1 mês equivalente a 4 ciclos de imersão e secagem). Enquanto que, para o inibidor benzoato de sódio e para a mistura benzoato com molibdato de sódio observa-se um comportamento eletroquímico semelhante como é possível observar no perfil dos diagramas de Bode ($\text{Log}|Z|$ versus $\text{Log} f$, Gráfico 10, e Ângulo de fase versus $\text{Log} f$, Gráfico 11)

Na região das médias frequências 10 kHz a 1 Hz observa-se um segundo patamar no gráfico $\text{Log}|Z|$ versus $\text{Log} f$ (Gráfico 10) e uma terceira constante de tempo no gráfico ângulo fase versus $\text{Log} f$ (Gráfico 11) para os corpos-de-prova em presença de benzoato de sódio e molibdato com benzoato de sódio. Este comportamento diferenciado está associado ao somatório da resistência elétrica do concreto com a resistência interfacial (concreto/barra de aço).

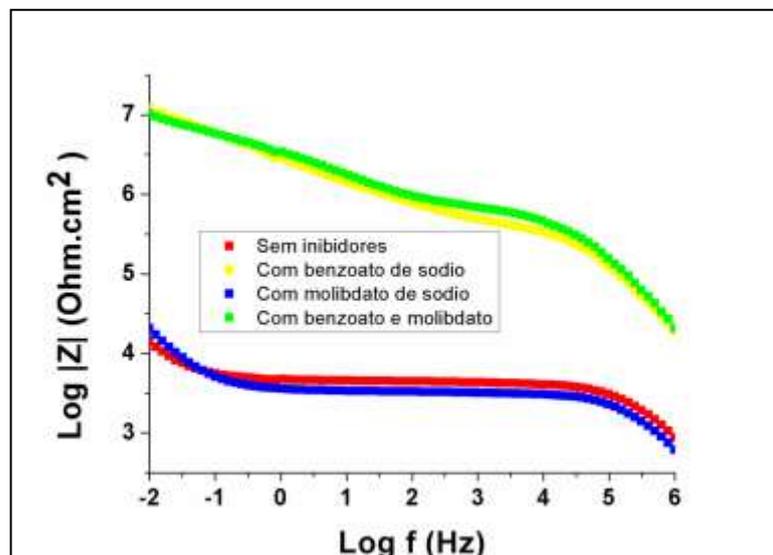
Esta constante de tempo e/ou este patamar comprova o bom desempenho anticorrosivo do uso conjunto dos dois inibidores. Desta forma temos três interfaces a considerar:

Interface 1) barra de aço/inibidor de corrosão;

Interface 2) inibidor de corrosão/concreto e

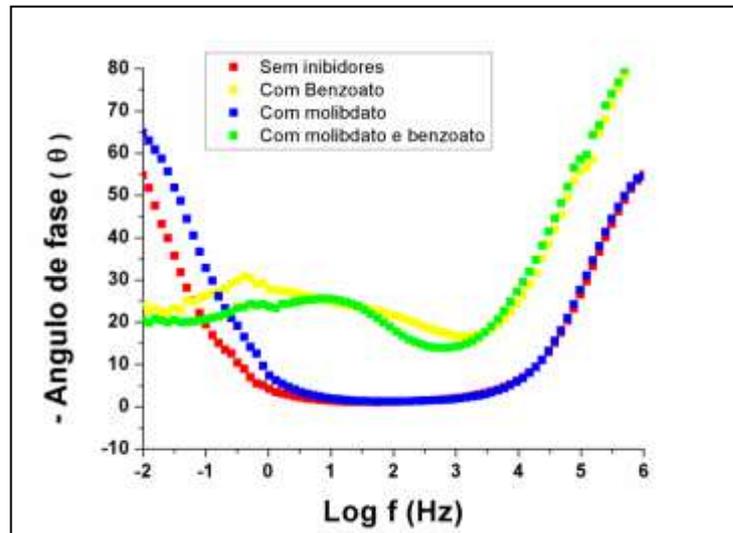
Interface 3) concreto/ eletrólito.

Gráfico 10- Diagramas de Bode, $\text{Log}|Z|$ versus $\text{Log} f$, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 4 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



Fonte: Autora.

Gráfico 11- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase *versus* Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 4 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



Fonte: Autora.

Observações: Diagramas de Bode dos corpos-de-prova na ausência de inibidor (•), com molibdato de sódio (◐), com benzoato de sódio (◑) e com benzoato e molibdato de sódio juntos (◒) após 1 mês (4 ciclos) de ciclos de imersão e secagem em solução que simula água do mar (3,5% NaCl).

A resistência do concreto se mantém de 1 mês até 4 meses em $10^{3,8}$ Ohm.cm² para os corpos-de-prova em ausência dos inibidores e na presença de molibdato de sódio (Gráfico 12).

Os corpos-de-prova contendo os dois inibidores diminuem a resistência do concreto em cerca de 100 vezes de 1 mês para 4 meses de imersão (de 10^6 para $10^{3,8}$ Ohm.cm²), enquanto que no corpo-de-prova contendo benzoato temos uma redução na resistência do concreto de cerca de 90 vezes (de 10^6 para $10^{4,25}$ Ohm.cm²).

Ao observar o perfil no diagrama de – ângulo de fase versus log f observa-se um perfil mais difusional do concreto para todas as situações, comparando 1 mês e 4 meses (Gráfico 13) indicando a menor dificuldade de difusão dos íons cloretos nos poros do concreto. Entretanto evidencia-se um perfil sutilmente mais resistivo para a situação em presença de benzoato de sódio.

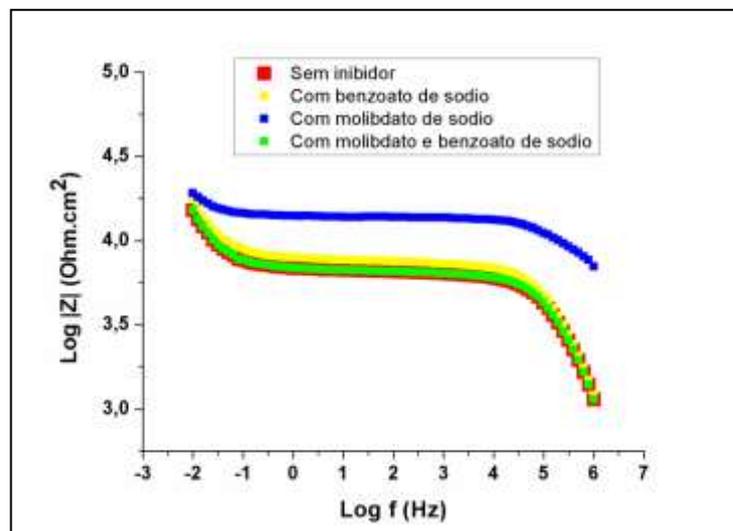
Para 7 meses de ciclos de imersão e secagem observa-se um comportamento mais dispersivo para a presença dos dois inibidores se comparado as demais situações no mesmo tempo de imersão (Gráficos 14 e 15). Entretanto apesar desta dispersão de pontos na ampla

faixa de frequência analisada, associada a não estabilização do potencial de corrosão, na presença dos dois inibidores temos os maiores valores de impedância na região das mais baixas frequências, que está associada a maior resistência na interface concreto barra de aço. Observa-se também um aumento considerável na resistência do concreto em cerca de 10^7 Ohm.cm^2 (7 meses- Gráfico 14) que é 100 vezes maior que $10^{3,8} \text{ Ohm.cm}^2$ (4 meses – Gráfico 10), e 10 vezes maior que 10^6 Ohm.cm^2 .

Estas variações de resistência do concreto provavelmente se devem ao equilíbrio difusão/cristalização, ou seja, de difusão do eletrólito junto com o oxigênio nos poros de concreto o que diminui consideravelmente sua resistência (de 1 para 4 meses) e também a cristalização de sais nos poros de concreto o que aumenta a sua resistência (de 4 para 7 meses).

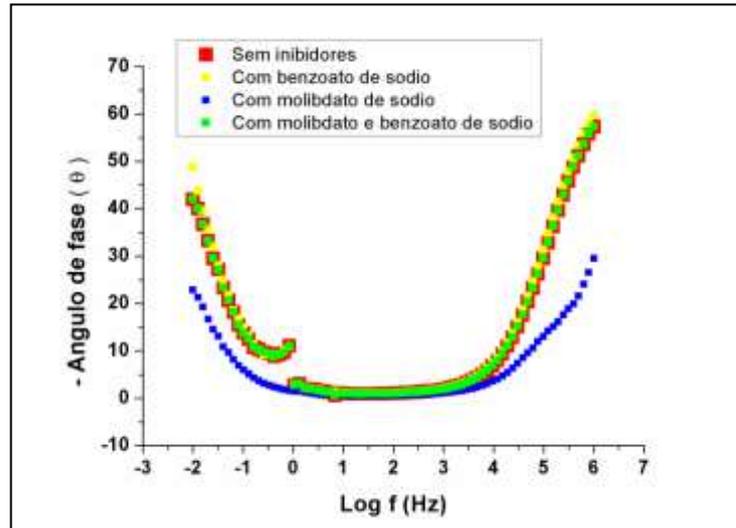
Aos 4 meses é possível observar um comportamento mais resistivo atribuído ao molibdato de sódio quando comparado ao benzoato de sódio, indicando provavelmente sua atuação a partir dos 4 meses de imersão, o que configura uma melhora de forma sinérgica aos 7 meses na presença dos dois inibidores. Aos 7 meses de imersão o molibdato também mostra um comportamento superior quanto a proteção à corrosão comparado ao benzoato, desta forma pode-se propor que o comportamento do benzoato de sódio é mais rápido quanto a proteção contra a corrosão, entretanto quando sua performance anticorrosiva diminui o molibdato começa a atuar no processo de aumento da resistência do concreto através da cristalização e/ou bloqueamento nos poros do concreto.

Gráfico 12- Diagramas de Bode, $\text{Log } |Z|$ versus $\text{Log } f$, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 7 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



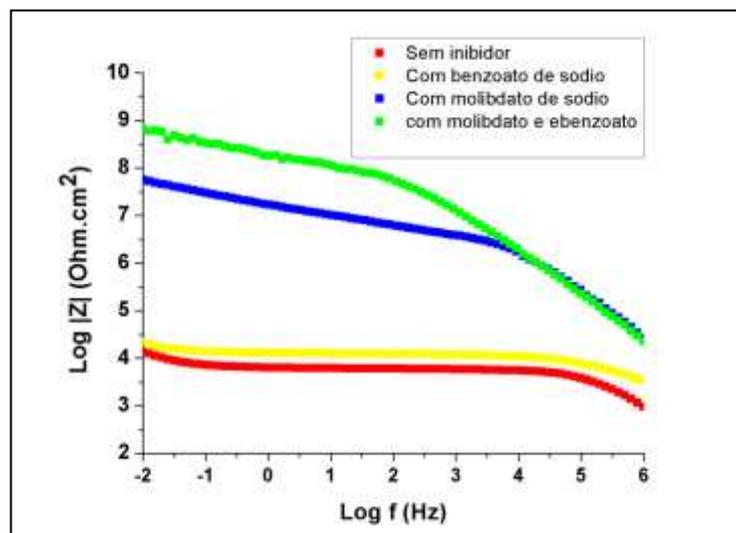
Fonte: Autora.

Gráfico 13- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase *versus* Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 7 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



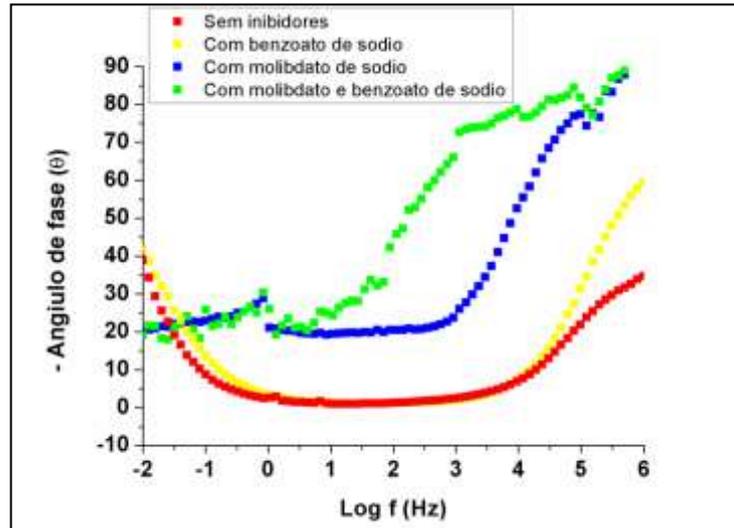
Fonte: Autora.

Gráfico 14- Diagramas de Bode, - Log |Z| *versus* Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 28 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



Fonte: Autora.

Gráfico 15- Diagramas de Bode, - Ângulo de fase *versus* Log f, dos corpos-de-prova de concreto armado imersos em NaCl 3,5% NaCl após 28 ciclos de imersão e secagem na presença e ausência dos inibidores de corrosão.



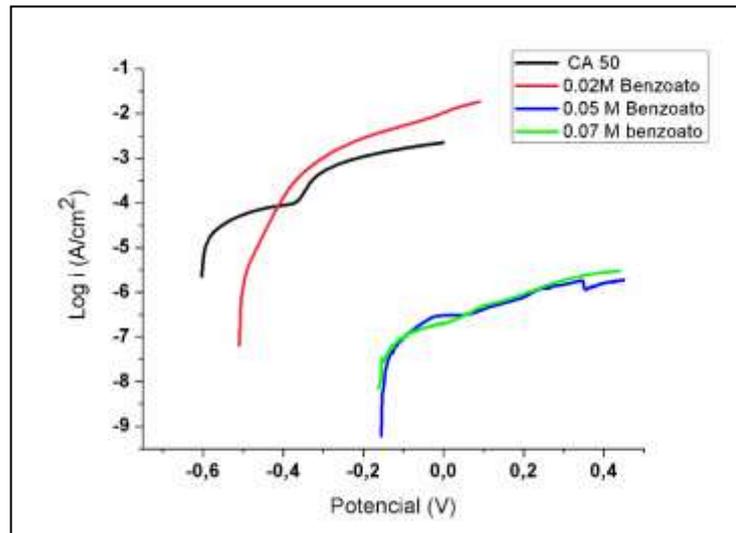
Fonte: Autora.

1.16 Curvas de Polarização

As medidas de polarização anódica das barras de aço CA50 foram realizadas a 1mV/s a partir do potencial de circuito aberto com diferentes concentrações dos inibidores benzoato em solução que simula o eletrólito nos poros.

Observou-se no Gráfico 16 uma maior atividade de oxidação na ausência de benzoato de sódio bem como na presença de 0,02 M de benzoato de sódio quando comparado a presença de 0,05 e 0,07M de benzoato de sódio. A significativa redução dos valores de correntes bem como a elevação do potencial de corrosão para valores em torno de -180 mV na presença de 0,05 e 0,07 M comprovam o efeito benéfico deste inibidor na passivação da armadura.

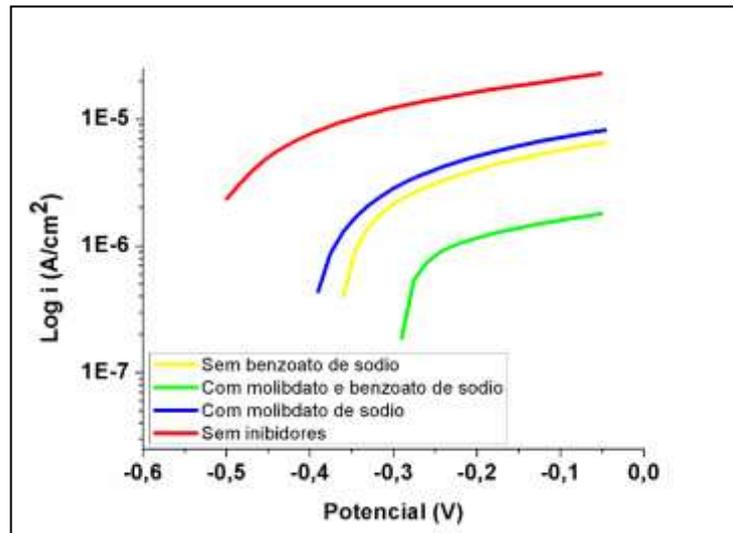
Gráfico 16- Curvas de polarização anódica do aço CA50 em solução que simula o eletrólito dos poros do concreto na presença e ausência de diferentes concentrações de benzoato de sódio.



Fonte: Autora.

Medidas de polarização anódica mostram que a barra de aço CA50 apresenta menores densidades de corrosão na presença dos dois inibidores que comparado aos inibidores utilizados isoladamente e comparado a ausência dos inibidores. O deslocamento do potencial de corrosão para valores mais positivos bem como a diminuição dos valores de corrente anódica comprovam a menor atividade eletroquímica do aço em presença dos dois inibidores (Gráfico 17).

Gráfico 17- Curvas de polarização anódica do aço CA50 em solução que simula o eletrólito dos poros do concreto na presença e ausência de um dos dois inibidores benzoato e molibdato de sódio nas concentrações de 0,07M.



Fonte: Autora.

1.17 Ensaio de Penetração de Íons Cloretos por Aspersão

Por fim, após os corpos de prova passarem pelos ciclos no ensaio de espectroscopia, os mesmos foram rompidos para que pudéssemos observar a profundidade de penetração dos íons cloreto. As Figuras 33 `a 36 apresentam essas imagens em forma digital.

Figura 33- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto Convencional.



Fonte: Autora.

Figura 34- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Benzoato.



Fonte: Autora.

Figura 35- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Molibdato.



Fonte: Autora.

Figura 36- Profundidade de Penetração Íons Cloreto Concreto com Benzoato e Molibdato.



Fonte: Autora.

Diante das imagens digitais das distintas misturas podemos observar uma maior penetração de íons cloreto (coloração esbranquiçada) no concreto convencional utilizado como referência. Quanto a cor marrom podemos observar que tanto na mistura com o inibidor benzoato quanto na mistura com o inibidor molibdato se faz presente, porém com uma maior predominância na mistura com os dois inibidores utilizados simultaneamente. Deste modo pode ser dizer que na mistura com a utilização dos dois inibidores houve uma maior proteção, ou seja, menor penetração de íons cloreto.

Em colaboração com estes resultados Feng (2017) utilizando tripolifosfato de alumínio e Diamanti (2015) utilizando os inibidores tartarato, benzoato, glutamato, dimetil-etanolamina e trietilenotetramina, constataram que estes inibidores podem reagir com os componentes do cimento formando novos produtos precipitados os quais bloqueiam as micro trincas ou micro poros do concreto. Deste modo, a difusão dos íons cloreto agressivos no concreto sofre um retardo significativo, e conseqüentemente aumenta a vida útil da estrutura.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho tem por objetivo analisar a viabilidade da utilização dos inibidores de corrosão Benzoato e Molibdato de Sódio dentro da matriz do concreto. Com isso foram concretados corpos de prova com o traço convencional sem inibidores para servir como referência na análise, corpos de prova com a adição do inibidor de corrosão Benzoato de Sódio na proporção de 1,5% do teor de cimento, corpos de prova com a adição de 1,5% de Molibdato de Sódio e por fim corpos de prova com a adição dos dois inibidores simultaneamente também na proporção de 1,5%. O traço utilizado era para obtenção de concretos com resistência de 25MPa. Durante o processo de concretagem foi possível analisar uma elevada incorporação de ar nos traços em que o inibidor Benzoato de Sódio se fez presente.

Com isso, diante de uma análise detalhada nos resultados encontrados após uma série de ensaios realizados ao longo da pesquisa, podemos chegar as seguintes conclusões:

- Nos ensaios de resistência a tração por compressão diametral que foi realizado de acordo com a NBR 7222 podemos observar uma pouquíssima variação nos resultados encontrados entre as misturas ensaiadas e isso se dá pela baixa confiabilidade do método de ensaio, portanto não foram encontrados resultados que pudessem ser utilizados de forma qualitativa.
- No que diz respeito a análise dos resultados de resistência a compressão de acordo NBR 5739, obtivemos uma perceptível variação nos resultados finais (28 dias), principalmente naqueles em que foi utilizado o inibidor benzoato de sódio onde foram adquirido resultados com queda nos valores de resistência, isso pode ter ocorrido devido a incorporação de ar na mistura ter sido considerável. Porém, ainda podemos afirmar que mesmo com essa variação negativa nos resultados, as médias encontradas atenderam a resistência de compressão mínima de 25MPa para os quais foram produzidos podendo afirmar que os resultados foram satisfatórios.
- O ensaio físico de absorção de água por imersão (NBR 9778) nos mostrou que na mistura referência houve um percentual maior de absorção quando comparado a todas outras misturas. Os corpos de prova com a adição de benzoato de sódio foram os que apresentaram menor absorção de água por imersão. Deste modo, podemos dizer que a adição destes inibidores de corrosão fizera com que os poros do concreto bloqueassem parcialmente a absorção de água, sendo assim os resultados encontrados neste ensaio foram satisfatórios

- Quanto a análise dos resultados obtidos durante o ensaio de absorção de água por capilaridade (NBR 9779), infelizmente novamente devido a incorporação de ar ter sido maior nos casos que tínhamos o componente Benzoato presente nas misturas, encontramos uma maior absorção de água por capilaridade nestas, pois provavelmente tivemos a presença de mais poros capilares nesses casos.
- No monitoramento do potencial de corrosão permitiu uma análise comparativa entre as amostras testadas diferentemente da norma ASTM C-876 (2015) a qual relaciona as medidas de potencial a um padrão de probabilidade de corrosão. Entretanto foi possível observar a passividade da armadura para todos os ciclos de imersão e secagem realizados na presença dos dois inibidores indicando o efeito sinérgico do benzoato com o molibdato de sódio.
- As medidas de polarização anódica mostram claramente a menor atividade eletroquímica da barra de aço CA 50 na presença dos dois inibidores através de um deslocamento do potencial de corrosão para potencial mais positivos bem como uma menor intensidade de corrente anódica.
- O monitoramento dos ciclos de imersão e secagem através da técnica de impedância eletroquímica mostraram-se eficientes para elucidar as interfaces concreto/eletrólito, pasta de cimento e barra de aço/concreto quanto a resistência contra a corrosão. A presença de benzoato de sódio se mostrou eficiente no aumento da resistência da armadura contra a corrosão para os tempos de imersão e secagem recentes. Enquanto que o molibdato de sódio se mostrou mais eficiente para tempos mais longos de imersão e secagem configurando um possível mecanismo de cinética lenta deste inibidor.
- Por fim, após todos os ciclos de imersão e secagem em solução salina, rompemos os corpos de prova e com o auxílio de Nitrato de Prata foi possível fazer uma análise da penetração de íons cloreto por imersão. Claramente através de imagens digitais podemos observar o melhor desempenho os corpos de prova na presença de inibidores de corrosão, principalmente na presença de benzoato de sódio, pois a coloração marrom (ausência de íons cloreto) se apresenta de forma mais uniforme quando comparado ao concreto referência em que a coloração esbranquiçada (presença de íons cloreto) é bem perceptível. Os corpos de prova na presença de inibidores apresentaram inferior presença de íons cloreto quando comparado aos corpos de prova referência, isso se dá ao fato dos inibidores terem

reagido com os componentes do cimento formando novos produtos precipitados os quais bloquearam parcialmente as micro trincas ou micro poros do concreto. Assim os resultados observados nesse procedimento também foram satisfatórios.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho foi desenvolvido como um estudo experimental preliminar sobre a viabilidade na utilização dos inibidores benzoato e molibdato de sódio em estruturas de concreto armado na proporção de 1,5% do teor de cimento utilizado. Para um entendimento mais abrangente, os seguintes estudos são sugeridos:

- Testar os inibidores nesta concentração em diferentes traços de concreto;
- Testar os inibidores em diferentes concentrações com o mesmo traço de concreto deste trabalho;
- Analisar o comportamento destes inibidores durante um período maior de tempo que nesta pesquisa não foi possível.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCP- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland.** (Boletim Técnico 106) 7.ed. São Paulo, 2002. 28p.

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de estruturas de concreto: procedimento.** NBR 6118. Rio de Janeiro, 2014.

_____. NBR 5739: **Concreto – Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: 2015.

_____. NBR 5737: **Cimentos Portland Resistentes a Sulfatos.** Rio de Janeiro: 1992.

_____. NBR 12989: **Cimento Portland de Branco.** Rio de Janeiro: 1993.

_____. NBR 13116: **Cimento Portland de Baixo Calor de Hidratação.** Rio de Janeiro: 1994.

_____. NBR 7222: **Argamassa e concreto – Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: 2011.

_____. NBR 7217: **Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, 1987.

_____. NBR 9775: **Agregado miúdo – Determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 10024: **Chapa dura de fibra de madeira — Requisitos e métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 7480: **Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado- Especificação.** Rio de Janeiro, 2007.

_____. NBR 5738: **Concreto-Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: 2003.

_____. NBR 7211: (2009). **Agregado para concreto - especificação.** Rio de Janeiro.

_____. **NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, 2000.

_____. **NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR 11768: Aditivos para Concreto de Cimento Portland.** Rio de Janeiro, 1992.

ASTM 876 - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM C-876: Annual book of ASTM Standards. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concrete.** ASTM C876, Philadelphia, 1991.

ALBUQUERQUE, R.T.O; LIMA, N.L.A. Adições minerais ao concreto: melhores propriedades, maior economia e mais sustentabilidade. **Revista Águila**, Rio de Janeiro, n.10, p.57-64, jul./dez. 2014. Disponível em: <https://docplayer.com.br/17595412-Adicoes-minerais-ao-concreto-melhores-propriedades-maior-economia-e-mais-sustentabilidade.html>. Acesso em: 12 abril 2018.

ALHADAS, M.F.S. **Estudo da influência do agregado graúdo de diferentes origens mineralógicas nas propriedades mecânicas do concreto.** Dissertação para Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/ISMS-7RTNGX>. Acesso em: 8 outubro 2017.

ANDRADE, C. **Últimos avances en el cálculo de la vida útil del hormigon estructural.** In JORNADAS SUDAMERICAS DE INGENIERIA ESTRUCTURAL, Punta del Este, Uruguai. Memórias...[CD-ROM]. Punta del Este: EDITOR, 2000.

ANDRADE, C. **Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras.** São Paulo: Pini, 1992. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/willamiborges1/manual-para-diagnostico-de-obras-deterioradas-por-corrosao-de-armaduras>. Acesso em: 17 out. 2017.

ARIVABENE, A.C. Patologias em estruturas de concreto armado estudo de caso. **Revista Especialize On-line IPOG**, Goiânia, v.1, n.10, dezembro/2015. Disponível em: <https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online/edicao-n10-2015/patologias-em-estruturas-de-concreto-armado-estudo-de-caso/>. Acesso em: 08 ago. 2017.

AZAMBUJA, D. S.; MARTINI, E.A.; MÜLLER, L. **Corrosion behaviour of iron and AISI 304 Stainless Steel in tungstate aqueous solutions containing chloride.** São Paulo, v.14, n.4, p.570-576, 2003.

BARBOSA, Fred Rodrigues *et al.* **Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido ao ataque de íons cloreto**. 54º Congresso Brasileiro do Concreto. Maceió, 2012. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/280316499_Corrosao_de_Armadura_em_Estruturas_de_Concreto_Armado_devido_ao_Ataque_de_Ions_Cloreto. Acesso em: 04 ago. 2017.

BERTOLINI, L. **Materiais de Construção**. São Paulo: Oficina de Textos, 2010. Disponível em: <https://www.ofitexto.com.br/livro/materiais-de-construcao-patologia-reabilitacao-e-prevencao/>. Acesso em: 03 ago. 2017.

BOLINA, C. C. Inibidores de corrosão: análise da eficiência frente à corrosão do aço induzida por cloretos e carbonatação em meio aquoso. **Revista Engevista**, v.15, n.1, p. 81-94, abril/2013. Disponível em: <http://periodicos.uff.br/engevista/article/view/8929/6399>. Acesso em 02 ago.2017.

CABRAL, A. E. B.; **Avaliação da eficiência de sistemas de reparo no combate à iniciação e à propagação da corrosão do aço induzida por cloretos**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Porto Alegre – RS. Disponível em: <http://www.dominiopublico.gov.br/download/texto/ea000210.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2017.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras em concreto**. São Paulo: Pini, 1997. p. 61-67.

CASCUDO, O. **O controle da corrosão de armaduras de concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1997. p. 23-45.

CASTRO, A.L; LIBORIO, J.B.L; PANDOLFELLI, V. C. **A influência do tipo de cimento no desempenho de concretos avançados formulados a partir do método de dosagem computacional**. In: Scientific Electronic Library Online, v.57, n.354, 2011. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0366-69132011000100002&script=sci_abstract&tlng=pt. Acesso em: 05 ago. 2017.

CAVALCANTI, D.J.H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação mestrado em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas, 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/handle/riufal/389>. Acesso em: 17 jun. 2017.

CHRIST, R. **Desenvolvimento de compósitos cimentícios avançados à base de pós-reativos com misturas híbridas de fibras e reduzido impacto ambiental**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014. Disponível em: <http://www.repositorio.jesuita.org.br/handle/UNISINOS/3207>. Acesso em: 13 jun. 2017.

CUNHA, A.; HELENE, P. **Despassivação das armaduras de concreto por ação da carbonatação.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001. Disponível em: http://www.pcc.usp.br/files/text/publications/BT_00283.pdf. Acesso em: 19 jul. 2017.

DALMORO, V. **Revestimento a base de sílica e ácido fosfônico para proteção anticorrosiva da liga de alumínio AA2024-T3.** Programa de pós-graduação em química. Universidade Federal de Porto Alegre, 2013, Porto Alegre/RS. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/97853>. Acesso em: 13 jun. 2017.

DIAMANTTI, M.V. Molecular modelling and electrochemical evaluation of organic inhibitors in concrete. In: **Corrosion Science**, v.100, p 231-241, nov. /2015.

DOTTO, J.M.S. **Corrosão de aço induzida por íons cloretos - uma análise crítica das técnicas eletroquímicas aplicadas ao sistema aço-concreto com ou sem pozolana.** Tese (doutorado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS, 2006. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/7524>. Acesso em: 08 ago. 2018.

EHRENBRING, H.Z.; TUTIKIAN, B. F. **Concretos reforçados com fibras naturais e fibras recicladas.** In: fórum internacional de resíduos sólidos. 7.ed. Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://www.institutoventuri.org.br/ojs/index.php/firs/issue/view/1>. Acesso em 04 fev. 2018.

FENG, X. et. al. The corrosion inhibition efficiency of aluminum tripolyphosphate on carbon steel in carbonated concrete pore solution. In: **Corrosion Science**, v.124, p 150-159, 2017. Disponível em:< www.elsevier.com/locate/corsci>. Acesso em 27 de agosto de 2017.

FONSECA, R.L.M.; DJANIKIAN, J.G. **Estudo de inibidores de corrosão em concreto armado.** In: Scientific Electronic Library Online, v.15, n.3. São Paulo: BT/PCC/212, 1998. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1517-70762010000300006. Acesso em: 08 ago. 2017.

FRANCINETE JR, P.; FIGUEIREDO, E.J.P **Estudo da difusão do oxigênio no concreto.** Boletim Técnico da EPUSP, BT/PCC/238,1999.

FREIRE, K. R.R. **Avaliação de técnicas eletroquímicas na monitoração de corrosão por sulfetos em sistema de água por resfriamento industrial.** Dissertação Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais, Universidade Federal do Paraná, 2005. Disponível em: <http://www.pipe.ufpr.br/portal/defesas/dissertacao/005.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2017.

GENTIL, V. **Corrosão.** 3.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength selfcompacting concrete. Catalunya, Espanha.** Tese de Doutorado, Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GONÇALVES, R.D C. GONÇALVES. **Agregados reciclados de resíduos de concreto- um novo material para dosagem estruturais.** Dissertação Mestrado em Engenharia de Estruturas. São Carlos/ SP, 2001. Disponível em:
https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-06052016-150748/publico/Dissert_Goncalves_RodrigoDC.pdf. Acesso em: 03 mar. 2018.

GIACCHERO, L.F. **estudo da resistência à corrosão de filmes orgânicos para proteção temporária do aço-carbono e aço galvanizado.** Dissertação de Mestrado em Ciências e Engenharia e Materiais, Universidade Federal de Santa Catarina, 2013. Disponível em:
<http://tede.udesc.br/bitstream/tede/1534/1/Luiz%20Fernando%20Giacchero.pdf>. Acesso em 04 maio. 2018.

HELENE, P. R. L. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado.** 1993. Tese Livre Docência em Engenharia Civil - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993. Disponível em:
https://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/44536119/TD1Paulo_Helene.pdf?response-content-disposition=inline%3B%20filename%3DUNIVERSIDADE_DE_SAO_PAULO_ESCOLA_POLITEC.pdf&X-Amz-Algorithm=AWS4-HMAC-SHA256&X-Amz-Credential=AKIAIWOWYYGZ2Y53UL3A%2F20191209%2Fus-east-1%2Fs3%2Faws4_request&X-Amz-Date=20191209T193149Z&X-Amz-Expires=3600&X-Amz-SignedHeaders=host&X-Amz-Signature=7afed337cecb08d9979bbffb308c542017a71c905a301ce3284a0d8e88f58ccb. Acesso em: 17 ago. 2017.

HELENE, P. R. L. Introdução da durabilidade no projeto das estruturas de concreto. **Revista Antac**, v.1, n.2, p. 45-47. São Paulo, 1997. Disponível em:
<https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3355/1808>. Acesso em: 05 maio 2018.

IBRACON. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**, v.2. São Paulo, 2005.

JUNIOR, E.R. Propriedades dos materiais constituintes do concreto. **Revista Especialize Online IPOG**, v.1, n.10. dez. /2015. Goiânia/GO. Disponível em:
<https://www.ipog.edu.br/revista-especialize-online-busca?autor=Enio+Ribeiro+J%FAnior+&palavrasChave=>. Acesso em: 06 maio 2018.

LIMA, M. G. **Inibidores de corrosão: compatibilidade comento-aditivo.** Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo. Boletim Técnico BT/PCC/168, p.20. 1996.

LIMA, M. G. **Inibidores de corrosão: avaliação da eficiência frente à corrosão de armaduras provocada por cloretos**. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo, 1996. Disponível em: <http://periodicos.uff.br/engevista/article/download/8929/6399>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2017.

LIMA, R. C. **Avaliação da eficiência de inibidores de corrosão em reparo de estruturas de concreto**. São Paulo. Dissertação Mestrado em Engenharia - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo. 2000. Disponível em: https://www.academia.edu/17220486/Avalia%C3%A7%C3%A3o_da_efici%C3%Aancia_de_inibidores_de_corros%C3%A3o_em_reparo_de_estruturas_de_concreto. Acesso em 12 maio. 2018.

LIMA et.al. **Concreto e suas Inovações**. In: Ciências Exatas e Tecnológicas. Maceió, periódicos, 2014. Disponível em: <https://periodicos.set.edu.br/index.php/fitsexatas/article/view/1285>. Acesso em: 17 jun. 2018.

LIMA, M.G. **Influencia dos componentes do concreto na corrosao das armaduras**. Porto Alegre, 1990. CPGEC, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

LUZ, D. C. S. **Estudo eletroquímico da corrosão de aço com e sem proteção de níquel imerso em concreto**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1999. Disponível em: <ftp://ftp.ufrn.br/pub/biblioteca/ext/bdtd/DjalmaRS.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2018.

MARTINS, P.B.M. **Influência da granulometria agregado miúdo na trabalhabilidade do concreto**. Dissertação- Universidade Estadual de Feira de Santana, BA, 2008. Disponível em: <http://civil.uefs.br/DOCUMENTOS/PAULO%20BENJAMIM%20MORAIS%20MARTINS.pdf>. Acesso em 12 ago. 2018.

MEDEIROS, B.L. **Estruturas subterrâneas de concreto: levantamento de manifestações patológicas na região metropolitana de Curitiba e análise de sistemas de reparo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/7277>. Acesso em: 13 jun. 2018.

MEHTA. P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Estrutura, propriedades e materiais**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1994.

MEHTA, P. K.; AITCIN, P.C. **Principles Underlying Production of High- Performance Concrete**. Cement Concrete and Aggregates, Winter, v.12, 1990.

MISSAU, F. **Penetração de cloretos em concretos contendo diferentes teores de cinza de casca de arroz**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa

Maria, Santa Maria, 2004. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/7674>. Acesso em: 15 mar. 2018.

MODESTO, M. G. **Avaliação do molibdato de sódio, tungstato de sódio e um copolímero a base de silano como inibidores de corrosão para o aço-carbono abnt 1005 em meio de nacl 3,5%**. Dissertação de mestrado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2008. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-10112008-112012/en.php>. Acesso em: 18 ago. 2017.

MELO, H. G. **Impedância eletroquímica aplicada ao estudo da corrosão e de processos de proteção**. São Paulo: PQI/EPUSP, 2003.

MONTEIRO, E.C.B. **Estudo da capacidade de proteção de alguns tipos de cimentos nacionais, em relação à corrosão de armaduras sob a ação conjunta de CO₂ e íons cloretos**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, 1996. Disponível em: <http://www.pecc.unb.br/wp-content/uploads/dissertacoes/M96-4A-Eliana-Monteiro.pdf>. Acesso em: 19 set. 2017.

MUNIZ, C. V. S. **Influência da adição de nitrito de sódio na resistência à corrosão do concreto armado**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 1996. Disponível: <https://www.passeidireto.com/arquivo/68781134/estruturas-de-concreto-i-46/44>. Acesso em: 20 maio. 2018.

NEPOMUCENO, A. A.; BAUER, E.; VASCONCELOS, K. L. **Estudo de inibidores de corrosão utilizando a resistência de polarização (Rp), ambiente contaminado com cloreto**. In: IV Congresso Iberoamericano de Patologia das construções, VI Congresso de Controle de Qualidade, RS, 1997. Anais: Porto Alegre, UFRGS, CPGEC, 1997. v.1.

NEVILLE, A.M. **Propriedades do concreto**. 2 ed. São Paulo: Ed. Pini, 1997.

NUNES, F.W.G. **Resistência e módulo de elasticidade de concretos usados no rio de janeiro**. Dissertação de Mestrado em Engenharia. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <file:///C:/Users/sotrin/Downloads/Fabio%20Wendell%20da%20Graca%20Nunes.pdf>. Acesso em: 23 set. 2017.

OLIVEIRA, M. Q. **Estudo da eficiência dos silanos aplicados em estruturas de concreto armado com corrosão de íons cloreto**. Escola politécnica de Pernambuco, 2005. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_nlinks&ref=000197&pid=S1517-7076201000030000600002&lng=pt. Acesso em: 22 abril 2018.

OLIVEIRA, P. J; RIBEIRO; SALLES; MOREIRA; **Concreto Compactado a Rolo- Características e Propriedades**. In: I Simpósio de Obras de Concreto Compactado com Rolo, 1995. Anais: São Paulo, 1995. p.187-208.

OLIVEIRA, Y. H. **Uso de inibidores de corrosão em concreto de alto desempenho.** Dissertação de Mestrado - Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000. Disponível em: <http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo11145/>. Acesso em 24 set. 2017.

ORMELLESE, M. *et. al.* A study of organic substances as inhibitors for chloride-induced corrosion in concrete. In: **Corrosion Science**, v.51, 2959-2968. Dez/2009.

PEREIRA, P.A. **Efeito inibidor dos ânions carboxilato e benzoato na corrosão de armaduras de concreto armado.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Pampa. Alegrete, 2015. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/784/1/Efeito%20inibidor%20dos%20%C3%A2nios%20carboxilato%20na%20corros%C3%A3o%20de%20estruturas%20de%20concreto%20armado.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2017.

QUARESMA, L.F. **Agregados para Construção Civil. Ministério de Minas e Energia.** Relatório Técnico, 2009.

QUININO, U. C. M. **Investigação experimental das propriedades mecânicas de compósitos de concreto com adição híbridas de fibras.** Tese de Doutorado em Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação da Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/118825>. Acesso em: 15 ago. 2018.

RAMANATHAN, L. V. **Corrosão e seu controle.** Editora Hemus 1988, São Paulo.

RATTMANN, Karla R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão de armaduras do concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005. Disponível em: <https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/34720>. Acesso em: 03 maio 2018.

REGATTIERI, C.E.X; HELENE, P. R. L. **Mecanismos de transporte de agentes agressivos no concreto.** Boletim Técnico. Universidade Federal de São Paulo. São Paulo, 1999. EPUSP-BT/PCC/232. p.19.

RIBEIRO, A.C. B; ALMEIDA, I.R. **Study on high performance roller compacted concrete.** *Materials and Structure*, v.33, p.398-402, 2000.

SAGOE-CRENTZIL, K. K.; YILMAZ, D.; GLASSER, F.P. **Properties of inorganic corrosion inhibition admixtures in steel reinforced OPC mortars: Part I – chemical properties.** *Advances in cement Research*. v.4, n. 15, p 91-96. 1992.

SANTOS, A.V. Corrosão de armadura em estruturas de concreto armado devido a carbonatação. **Revista Especialize Online IPOG.** Edição n.10. Dez 2015. Salvador/ BA.

Disponível em: [file:///C:/Users/sotrin/Downloads/aleilson-vilas-boas-dos-santos-101713613%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/sotrin/Downloads/aleilson-vilas-boas-dos-santos-101713613%20(1).pdf). Acesso em: 14 jun. 2018.

SANTOS, L. **Avaliação da resistividade elétrica do concreto como parâmetro para a previsão da iniciação da corrosão induzida por cloretos em estruturas de concreto.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <https://repositorio.unb.br/handle/10482/5188>. Acesso em: 03 jul. 2018.

SILVA, D.R. **Estudos de inibidores de corrosão em concreto armado visando a melhoria na sua durabilidade.** Tese de Doutorado em Ciências e Engenharia e Materiais, Natal/RN, 2006. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/12869>. Acesso em: 05 abril 2018.

SILVA, A. B; MACIEL. J.C.S. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Revista Igapó**, v.4, n.4, p.47-63, 2009. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/viewFile/3575/1979>. Acesso em: 04 maio 2018.

TRINDADE, E.C. **Corrosão acelerada por imersão modificada (ensaio caim) de estruturas de concreto armado contendo cinza da casca de arroz e água da mandioca brava.** Universidade Federal do Pampa. Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Alegrete, 2013. Disponível em: <http://dspace.unipampa.edu.br/bitstream/rii/760/1/Corrosao%20acelerada%20por%20imersao%20modificada%20%28ensaio%20CAIM%29%20de%20estruturas%20de%20concreto%20armado%20contendo%20cinza%20da%20casaca%20de%20arroz%20e%20agua%20da%20mandioca%20brava.pdf>. Acesso em: 12 fev. 2017.

TRINDADE, D.S. **Patologia em estruturas de concreto armado.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria/RS, 2015. Disponível em: http://coral.ufsm.br/engcivil/images/PDF/2_2015/TCC_DIEGO%20DOS%20SANTOS%20DA%20TRINDADE.pdf. Acesso em: 17 maio 2018.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004). Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/3918/000450678.pdf?sequence=1>. Acesso em 16 jun. 2018.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland.** In: 53º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO – IBRACON. 2011, Florianópolis. Anais eletrônicos... Florianópolis, 2011. Disponível em: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2014/07/lc56.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2018.

VOTORANTIM CIMENTOS. **Especificação cimento Portland**. Disponível em: <https://www.votorantimcimentos.com.br/produtos/cimentos-tocantins/>. Acesso em: 02 fev. 2017.

WOLYNEC, S. **Técnicas eletroquímicas em corrosão**. São Paulo: Edusp, 2003. Disponível em: <https://bdpi.usp.br/item/001308417>. Acesso em: 13 fev. 2018.