



UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO – UEMA
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS – CCT
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO – DMECP

MAYCHARLYSON MORAES CANTANHEDE

**ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DA CORROSÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM A PONTE DO IPASE**

São Luís – MA
2016

MAYCHARLYSON MORAES CANTANHEDE

**ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DA CORROSÃO NAS PROPRIEDADES
MECÂNICAS DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM A PONTE DO IPASE**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Msc. Francismar Rodrigues de Sousa

Cantanhede, Maycharlyson Moraes

Análise das influências da corrosão nas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte do ipase / Maycharlyson Moraes Cantanhede – São Luís, 2016.

63f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2016.

Orientador: Prof. Me Francismar Rodrigues de Sousa

1. Concreto armado. 2. Patologias. 3. Corrosão. I. Título.

CDU: 624.012.4:691.32(812.1)

ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DA CORROSÃO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DOS MATERIAIS QUE CONSTITUEM A PONTE DO IPASE

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão para a obtenção do grau de bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovada em, ____ de _____ de 2016.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Francismar Rodrigues de Sousa (Orientador)
Mestre em Engenharia Metalúrgica
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Thiago Aguiar Santos
Universidade Estadual do Maranhão

Prof. Daniele Rodrigues Freitas
Especialista em Docência do Ensino Superior
Universidade Estadual do Maranhão

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, a quem toda honra e toda glória devem ser dadas.

Aos meus pais, Antonio Vital e Solange Moraes por todo amor incondicional, carinho, dedicação e incentivo nos estudos. Mãe, pai, vocês são os meus maiores exemplos.

A minha tia Maria do Rosário, por todo o apoio ao longo da minha vida acadêmica

Ao meu irmão Mycharlyson, por todo suporte dado durante esses anos de vida acadêmica.

Aos meus amigos da turma de Engenharia Mecânica 2011.2, por toda a união ao longo dessa caminhada, por todos os momentos de estudos e por todos os momentos de descontração. Espero tê-los para sempre em minha vida.

Aos meus amigos do grupo de estudos, Luiz Carlos e Glauco Vinicius, por todos os momentos em que compartilhamos conhecimentos.

Aos meus amigos da Equipe Zeus de Aerodesign, por terem contribuído com a minha formação profissional.

A todos os professores do curso de Engenharia Mecânica, que contribuíram para minha formação profissional.

Ao professor e orientador Francismar Rodrigues, pela excelente orientação.

Ao Laboratório de Corrosão do IFMA, em especial ao Mestrando Thiago Aguiar, por todo suporte durante a realização dos ensaios para este trabalho.

Aos meus professores do ensino médio, em especial aos professores Valdemir Amaral e Eldo Jorge, por todo incentivo e apoio durante o ensino médio.

Aos meus amigos do Ensino médio, em especial aos amigos Pablo Jordan, Ighor Tales e Josué Silva, por todo conhecimento obtido no grupo de estudos.

A todos que de alguma forma, torceram e contribuíram, para a realização desse curso.

“O coração do homem planeja o seu caminho, mas o Senhor lhe dirige os passos.”

Provérbios 16:9

RESUMO

A agressividade de ambientes como rios, proporciona estados de corrosão associados a outras patologias inerentes que atacam o concreto armado e o material metálico em pontes, o que pode gerar sérias consequências à vida útil e a funcionalidade da estrutura. Este trabalho objetivou fazer uma relação entre a agressividade ambiental e o processo corrosivo que afetam a ponte que liga os bairros Caratatiua-Maranhão Novo e Maranhão Novo-Caratatiua da cidade de São Luis do Maranhão. Para análise dessa relação, tornou-se necessário fazer uma revisão bibliográfica sobre os processos de corrosão em estruturas de concreto armado, de modo a caracterizar as patologias que afetam a ponte em estudo e implementar ações que visem prevenir ou reduzir a degradação dos materiais da ponte. Nessa revisão bibliográfica, são analisados os mecanismos e a eletroquímica envolvida no processo de corrosão, e serão demonstrados alguns conceitos sobre o mecanismo de corrosão de acordo com alguns autores. Serão analisados ainda os microconstituintes do concreto e sua porosidade. Serão analisados ainda as causas e a origem deste fenômeno em estruturas de concreto armado o que irá favorecer um melhor entendimento de como ocorre o mecanismo de corrosão em armaduras de concreto, mesmo existindo uma proteção do meio externo. Conhecendo-se algumas características do concreto e quais as patologias mais comuns, torna-se possível fazer um mapeamento dos problemas encontrados nos elementos da ponte em estudo e, dessa forma pode-se escolher quais os métodos de intervenção e prevenção deverão ser implementados, afim de aumentar a vida útil da ponte em estudo. São apresentados ainda considerações sobre as reais condições da ponte em estudo, feitas através de uma visita ao local. Com o propósito de saber quais as reais condições estruturais da ponte, será analisado a viabilidade de realizar alguns ensaios, que objetivem mostrar a capacidade de carga dos elementos da que constituem a ponte.

Palavras-chave: Concreto armado. Patologias. Corrosão.

ABSTRACT

The aggressive environments such as rivers, provides corrosion conditions associated with other associated diseases that attack the concrete and the metal material bridges, which can cause serious consequences to the life and functionality of the structure. This paper aims to make a relationship between environmental aggressiveness and corrosive process affecting the bridge that connects the neighborhoods Caratatiua-Maranhão and New Maranhão New-Caratatitua the city of Sao Luis do Maranhao. For the analysis of this relationship, it became necessary to make a review on the corrosion processes in reinforced concrete structures, in order to characterize the conditions that affect the bridge study and implement actions to help prevent or reduce the degradation of bridge materials . In this literature review, the mechanisms and the electrochemistry involved in the corrosion process are analyzed, and will be demonstrated some concepts about the corrosion mechanism according to some authors. There will also be analyzed microconstituents of concrete and its porosity. There will also be analyzed the causes and origin of this phenomenon in reinforced concrete structures which will provide a better understanding of how the corrosion mechanism occurs in concrete armor, even if a protection from the outside environment. Knowing some characteristics of the concrete and which are the most common diseases, it becomes possible to make a mapping of the problems found in the elements of the bridge under consideration, and thus can choose which methods of treatment and prevention should be implemented in order to increase the life of the bridge in the study. They are also presented considerations about the actual conditions of the bridge study, done through a site visit. In order to know what the actual structural conditions of the bridge, the feasibility will be analyzed to perform some tests that aim to show the load capacity of the elements of the bridge.

Keywords: Reinforced concrete. Pathologies. Corrosion.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	- Processo Metalúrgico.....	18
Figura 2	- Tipos de corrosão e fatores que provocam	20
Figura 3	- Variação do número de oxidação.....	21
Figura 4	- Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado	23
Figura 5	- Zona de transição pasta/agregado de um concreto convencional típico.....	25
Figura 6	- Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras	28
Figura 7	- Diagrama de equilíbrio termodinâmico potencial versus PH para o Sistema Fe-H ₂ O a 25°C.....	29
Figura 8	- Frente de carbonatação	32
Figura 9	- Efeito dos íons cloreto na ruptura pontual da película passivadora e o início do processo de corrosão	34
Figura 10	- Metodologia.....	44
Figura 11	- Célula eletroquímica para o ensaio de polarização.....	48
Figura 12	- Eletrodos utilizados: (a) Eletrodo de Platina; (b) Eletrodo de Referência de Calomelano Saturado; (c) Eletrodo de Trabalho e o suporte	48
Figura 13	- Linxadeira para preparação as amostras a serem submetidas no ensaio.....	49
Figura 14	- Amostras do Aço ASTM A36 e Aço ASTM A588	49
Figura 15	- Crosta na estruturação metálica da ponte em constant contato com a água	52
Figura 16	- Curvas de polarização dos aços A36 e A588.....	52
Figura 17	- Cabeceira da ponte danificada (Perda de Material)	54
Figura 18	- Fissuração.....	55

Figura 19 - Trinca no pilar da ponte que fica em constant contato com a água do mar.....	56
Figura 20 - Trincas se propaganda em alguns pilares.....	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Gastos com manutenção e reparo em estruturas de concreto armado em países desenvolvidos	14
Tabela 2 - Probabilidade de corrosão através do Ecorr, segundo a ASTM C876.....	37
Tabela 3 - Técnicas Eletroquímicas através de corrente elétrica contínua	41
Tabela 4 - Composição química do aço ASTM A588, de acordo com o fornecedor GERDAU.....	47
Tabela 5 - Composição química do aço ASTM A36, de acordo com o fornecedor GERDAU.....	47

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Justificativa	15
1.2	Objetivos	16
1.2.1	Objetivo Geral	16
1.2.2	Objetivos Específicos	16
2	REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1	Definições de Corrosão	18
2.2	Tipos de Corrosão	19
2.3	Análise Eletroquímica	20
2.3.1	Íons, oxidação, redução	21
2.3.2	Reações de oxirredução (Redox)	21
2.4	Microestrutura do Concreto	23
2.5	Corrosão no concreto	25
2.5.1	Origem	25
2.5.2	Causas	26
2.5.2.1	<i>Fatores que favorecem a corrosão na armadura</i>	26
2.5.3	Mecanismos de formação	26
2.5.4	As fases da corrosão Segundo o modelo de <i>Tuutti</i>	27
2.5.5	Passivação da armadura de concreto	28
2.5.6	Variáveis que favorecem a corrosão do concreto	29
2.5.7	Iniciação da corrosão da armadura	30
2.6	Propriedades Mecânicas dos Materiais que constituem a ponte	34
2.6.1	Módulo de Elasticidade	35
2.6.2	Resistência a Compressão	35
2.7	Ensaio Eletroquímico de Corrosão	36

2.7.1	Ensaio de potencial de corrosão	36
2.7.1.1	<i>Funcionamento do Ensaio</i>	36
2.7.1.2	<i>Curvas de Polarização</i>	37
2.7.1.3	<i>Normas para realização do ensaio e interpretação dos resultados</i>	37
2.8	Ensaio de Ultrassom	38
2.8.1	Funcionamento do Ensaio	38
2.8.2	Características do Aparelho	38
2.8.3	Resultados fornecidos pelo ensaio e normas para realização	39
2.9	Métodos de prevenção e correção	39
2.9.1	Métodos de prevenção	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	44
3.1	Revisão Bibliográfica	44
3.2	Vistoria ao Local da Ponte	45
3.3	Coleta de Dados	45
3.4	Pesquisa de Materiais	46
3.5	Ensaio dos Materiais	46
3.6	Ensaio de Potencial de Polarização	47
3.7	Pesquisa para geração de tecnologia adequada	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	Análise da Estrutura Metálica	51
4.2	Análise da Estrutura de Concreto	53
4.3	Comparação de Resultados	58
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

O concreto armado utilizado nas obras de arte da engenharia apresenta excelentes resultados de desempenho e qualidade, entretanto requer certos cuidados na sua elaboração, visando otimizar a sua vida útil e obtenção de um melhor desempenho. A correta execução envolve estudo do traço, além da dosagem, manuseio e cura adequados, a manutenção preventiva periódica e a proteção contra agentes agressivos. E, quando algum desses itens não é devidamente seguido, os problemas resultantes precisam ser corrigidos com técnicas, produtos e mão- de- obra adequados (FERREIRA, 2000).

Entretanto, com o decorrer do tempo o concreto armado começou a apresentar uma série de patologias de significativa intensidade e incidência, o que acarreta elevados custos de recuperação. Essas patologias comprometem o aspecto estético, e muitas vezes comprometem a capacidade de resistência, podendo levar ao colapso da estrutura.

Esta incidência de patologias pode ser atribuída a dois fatores. Primeiro. O aumento da esbeltez das estruturas, reduzindo as dimensões das peças estruturais e o cobrimento das armaduras e incrementando as tensões de trabalho, favorecendo a tendência à fissuração e reduzindo a proteção das armaduras. Segundo. O aumento da agressividade do meio ambiente, causado principalmente pela industrialização (POLITO, 2006).

Dentre as manifestações patológicas existentes do concreto, podemos enfatizar a corrosão como a mais frequente e consiste sobretudo na deterioração da fase metálica, que resulta na constante perda de seção transversal, nesse processo formam-se como resultado da corrosão diversos produtos que se expandem fendilhando o concreto. A degradação do concreto consiste em uma combinação de alterações nas propriedades mecânicas, físicas e químicas que ocorrem tanto na superfície quanto no interior do concreto.

As reações químicas que provocam a degradação do concreto podem ser resultantes de interações químicas entre agentes agressivos presentes no meio ambiente externo e os constituintes da pasta de cimento ou podem resultar de reações internas da estrutura, tais como eflorescência, ataques de sulfatos e reações causadoras por expansão (FERREIRA, 2000).

Na realização desse trabalho, fez-se um levantamento dos impactos econômicos originados pela corrosão de estruturas de concreto armado em diferentes países da Europa, uma vez que esse tipo de deterioração gera elevados custos de manutenções preventivas e corretivas. Os dados da tabela 1, disponibilizados por UEDA e TAKEWAKA demonstra o impacto econômico gerado pela recuperação de pontes submetidas ao processo de corrosão geram na economia de alguns países europeu. Entretanto, vale ressaltar que esses dados da tabela 1, referem-se ao ano de 2004. As manutenções corretivas e preventivas tornam-se necessárias, uma vez que o aspecto segurança deve ser levado em consideração, pois falhas provocadas por corrosão de equipamentos e estruturas podem acarretar acidentes de grandes proporções.

Tabela 1: Gastos com manutenção e reparo em estruturas de concreto armado em países desenvolvidos.

País	Gastos com construções novas	Gastos com manutenção e reparo	Gastos totais com construção
França	85,6 Bilhões de Euros (52%)	79,6 Bilhões de Euros (48%)	165,2 Bilhões de Euros
Alemanha	99,7 Bilhões de Euros (50%)	99 Bilhões de Euros (50%)	198,7 Bilhões de Euros
Itália	58,6 Bilhões de Euros (43%)	76,8 Bilhões de Euros (57%)	134,5 Bilhões de Euros
Reino Unido	60,7 Bilhões de Euros (50%)	61,2 Bilhões de Euros (50%)	121,9 Bilhões de Euro

Fonte: (UEDA e TAKEWAKA, 2007)

No Brasil, os impactos econômicos gerados pela corrosão em pontes de concreto armado também são elevados. De acordo com o Diário de Indústria e Comércio – DCI (2011):

O governo anunciou que vai investir R\$ 5,8 bilhões até 2018 em um programa de recuperação de 2.500 pontes e viadutos em rodovias federais no Brasil. O Programa de Reabilitação de Obras de Arte Especiais (Proarte) partiu da constatação de que 10% das estruturas deste tipo ou 500 pontes e

viadutos estão em péssimo estado de conservação e demandam reparos imediatos. (MANUTENÇÃO..., 2011, não paginado).

Baseado nessas informações sobre os impactos econômicos gerados por esse tipo de deterioração, deixam evidentes a relevância do tema deste trabalho.

A realização desse estudo torna-se necessário, pois a corrosão pode afetar as propriedades mecânicas dos principais materiais que constituem a ponte em estudo (parte metálica e concreto armado), e dessa forma, pode gerar impactos econômicos consideráveis. Baseado nisso, esse trabalho tem como objetivo fazer análises comparativas entre algumas propriedades mecânicas desses materiais antes e depois de sofrerem o processo de corrosão.

Feito a análise comparativa entre algumas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte, antes e depois de sofrerem o processo de corrosão, será possível definir até quais são reais condições estruturais da ponte.

1.1 Justificativa

Até o final da década de 80, a resistência à compressão ainda era, praticamente, o único parâmetro adotado para avaliar a qualidade do concreto. Em função disto, está ocorrendo uma degradação mais acelerada nas estruturas de concreto armado. Surge então um conceito até então pouco conhecido e praticamente não utilizado: a durabilidade do concreto. Este novo parâmetro é a capacidade do concreto de resistir às intempéries e aos demais processos de degradação.

O concreto armado utilizado nas obras de arte da engenharia nos dias atuais é resultado de uma associação inteligente de materiais, e apresenta excelentes resultados de desempenho e qualidade. Entretanto o mesmo pode sofrer vários tipos de deterioração, que podem ser causados por vários mecanismos. Dentre esses mecanismos, a corrosão é o que ocorre com maior frequência e gera impacto estrutural considerável em estruturas de concreto armado.

A análise das influências da corrosão nas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte do Ipase se justifica, em função da necessidade de se conhecer as suas reais condições estruturais. Para isso foi proposta uma metodologia que definiu as principais causas da corrosão, e a partir disso estabeleceu

através de ensaios, as influências que a deterioração por corrosão gera nas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte.

A realização deste trabalho também se justifica no ponto segurança, uma vez que determinando as reais condições estruturais da ponte, torna-se possível evitar falhas provocadas por corrosão da estrutura, evitando assim acidentes de grandes proporções.

Feito o mapeamento dos principais fatores que causam a deterioração por corrosão nessa ponte, e determinando através de ensaios quais as influências dessa deterioração nas propriedades mecânicas da parte metálica e do concreto armado, será possível propor intervenções que objetivem extinguir os principais problemas das estruturas tais como, corrigir pequenos danos (*Reparo*), fazer com que a estrutura tenha o desempenho original perdido (*Recuperação*), ou aumentar tal desempenho (*Reforço*)

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Estudar e analisar as influências da corrosão nas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte do Ipase, através da diagnose das mudanças sofridas pelo material em contato direto com o ambiente de serviço, que sem devidas ações corretivas ou preventivas podem causar sérios danos à estrutura e ao usuário.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Analisar as condições operacionais da ponte diagnosticando o grau de confiabilidade;
- b) Analisar as principais causas que favorecem a deterioração dos materiais que constituem a ponte;
- c) Verificar as alterações provocadas pelo ambiente de serviço nas estruturas metálicas analisadas;
- d) Analisar e classificar a origem da deterioração de acordo a literatura;

- e) Fazer análise comparativa das propriedades mecânicas antes e depois de sofrerem o processo de deterioração;
- f) Definir técnicas preventivas e corretivas que visem aumentar a vida útil da estrutura;
- g) Comparar resultados obtidos com os disponíveis na literatura.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Definições de Corrosão

Para iniciarmos nosso estudo sobre o tema, tornou-se necessário fazer um levantamento sobre as definições de corrosão de acordo com alguns autores.

Segundo Jones e Atkins (2012) a corrosão é a oxidação indesejada de um metal. Ela diminui a vida útil de produtos de aço como pontes e automóveis.

Segundo Callister Júnior (2011), corrosão é o ataque destrutivo e não intencional de um metal; esse ataque é eletroquímico e começa normalmente pela superfície.

Segundo Pannoni (2008) corrosão é resultado de uma reação de oxidação de um metal em presença de alguma substância ou elemento que sofre redução. É também todo processo eletroquímico que produz degradação e perda de propriedades químicas, físico-químicas ou mecânicas do material metálico.

Baseado nessas definições, podemos verificar que há uma unanimidade entre os autores sobre a definição de corrosão.

Os metais nobres (prata, ouro e platina) são estáveis e se encontram na natureza sob a forma metálica. Todos os outros metais são encontrados sob a forma de minérios e, portanto, em condições de maior estabilidade. Na figura 1 pode-se exemplificar que é necessário a utilização do processo metalúrgico, afim de fornecer energia e transformá-lo em metal (POLITO, 2006).

Desta forma, estando o metal em um equilíbrio meta estável, ao existir condições propícias à perda da energia, haverá a corrosão e o retorno à sua composição original estável.

Figura 1: Processo Metalúrgico.



Fonte: (Gentil, 2003 apud Polito, 2006).

Ao definirmos a corrosão, já obtemos algumas pistas sob como podemos controlá-la. Para que o metal sujeito à corrosão permaneça em equilíbrio estável, faz-se necessário a cessão contínua de energia em quantidade adequada, feita através de métodos de proteção (Fortes 1995).

2.2 Tipos de Corrosão

Classificação da corrosão de acordo a natureza do processo e segundo sua morfologia. De acordo com a natureza do processo, a corrosão pode ser classificada em química e eletroquímica.

Segundo Polito (2006), a primeira é chamada corrosão seca ou oxidação e ocorre por uma reação gás-metal e forma uma película de óxido. Apesar de existir consenso entre os autores consultados sobre esta definição, ela não é unanimidade:

Alguns autores afirmam que a corrosão química também é eletroquímica, embora em menor escala por apresentar menor quantidade de eletrólito, e não concordam, portanto com o termo corrosão seca, bem como diferenciam corrosão química de oxidação (CASCUDO, 1997, p. 18).

Já a corrosão eletroquímica ou em meio aquoso é resultado da formação de uma célula de corrosão, com eletrólito e diferença de potencial entre pontos da superfície. Se qualquer um destes elementos for retirado, ou se impedirmos a entrada de oxigênio o processo é paralisado. O eletrólito é representado pela umidade presente no interior do concreto. É uma solução carregada ionicamente que permite ocorrerem às reações e possibilita o fluxo iônico. A diferença de potencial entre dois pontos da superfície pode ocorrer por diversos fatores: por diferença de umidade, aeração, concentração salina, tensão no concreto e no aço, falta de uniformidade na composição do aço (Polito, 2006).

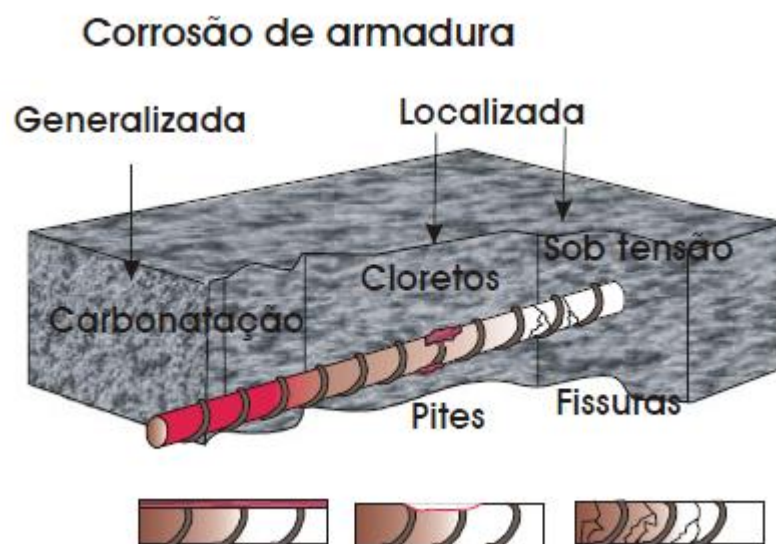
Segundo a morfologia, a corrosão pode ter várias classificações, entretanto para o nosso estudo, direcionado para a corrosão de estruturas de concreto, vamos nos concentrar em três tipos: Corrosão uniforme, corrosão por pite e corrosão sob tensão fraturante. (Polito, 2006)

- a) **A corrosão uniforme:** ocorre em toda a extensão da superfície, ocasionando perda uniforme de espessura (Cascudo, 1997).

- b) **A corrosão por pite:** também conhecida como puntiforme, ocorre em pontos ou pequenas áreas localizadas. Evoluem aprofundando-se, podendo causar o rompimento pontual da barra (Polito, 2006).
- c) **A corrosão por tensão fraturante:** é outro tipo de corrosão localizada, que ocorre concomitantemente com uma tensão de tração. Pode ocasionar o início de propagação de fissuras. Este fenômeno é de natureza transgranular ou intragranular (Polito, 2006).

Na figura 2 podemos exemplificar os tipos de corrosão mais frequentes em estruturas de concreto, bem como as principais causas.

Figura 2: Tipos de corrosão e fatores que provocam



Fonte: (Cascudo, 1997 apud Polito, 2006).

2.3 Análise Eletroquímica

Para um melhor entendimento do fenômeno da corrosão, será analisado a seguir o fenômeno eletroquímico em meio aquoso.

2.3.1 Íons, oxidação, redução

Em qualquer átomo estável o número de prótons é igual ao de elétrons. Quando por um motivo qualquer os números forem diferentes, o sistema ficará eletricamente carregado. Isto caracteriza o íon. Quando houver a perda de elétrons tem-se íon positivo ou cátion, e quando houver o ganho de elétron, íon negativo ou ânion (Polito, 2006).

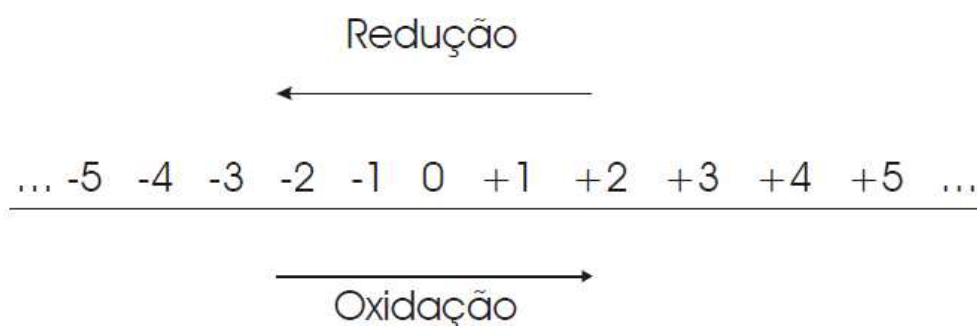
Como os elétrons se localizam externamente ao átomo, somente haverá a formação de íon pela variação de elétrons.

No conceito mais moderno, oxidação é a perda de elétrons, ocasionando o aumento do número de oxidação; Redução por sua vez é o ganho de elétrons, ocasionando a diminuição do número de oxidação. Apresentamos a seguir dois exemplos de oxidação e redução (Polito, 2006).



Na figura 3 podemos também representar a oxidação e a redução através da variação do número de oxidação (Nox).

Figura 3: Variação do número de oxidação.



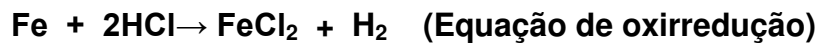
Fonte: Gentil (2003).

2.3.2 Reações de oxirredução (Redox)

São reações onde existe variação do número de oxidação, podendo em alguns casos, haver perda ou ganho de elétrons. Os dois eventos são simultâneos, ou seja, sempre que ocorre a perda de elétrons (oxidação), também ocorre à redução (ganho de elétrons) (Polito, 2006).

Segundo Pinto (2003, p. 53) redox consiste em:

Fenômeno inseparável formador do sistema onde elétrons são sequestrados de um átomo (oxidação) e entregues a outro átomo (redução). Como os elétrons têm carga negativa, quem perde fica positivo, quem ganha fica negativo. A força que executa estas reações é patrocinada pelo potencial eletroquímico.



↓



↓



Neste processo existe o elemento redutor que é responsável pela redução do outro elemento e sofre oxidação, ou seja, perde elétrons; e existe o elemento oxidante que é o responsável pela oxidação do outro elemento e sofre redução, ou seja, recebe elétrons (Polito, 2006).

Por fim, outros aspectos a serem considerados quando metais estão corroendo são:

1. Ânodos e cátodos ocorrem próximos um do outro e também se alternam constantemente.
2. As regiões anódicas e catódicas não são separáveis.

Com isso, podemos concluir que: A lei fundamental da corrosão é mantida, ou seja, a velocidade de oxidação total é igual a velocidade de redução total.

2.4 Microestrutura do Concreto

Sabendo-se que a estrutura de concreto em estudo, é caracterizada por ser bastante heterogênea, complexa e porosa, e está submetida principalmente a esforços de compressão, torna-se indispensável fazer estudo das suas

características microestruturais, pois dessa forma será possível fazer uma estimativa da sua vida útil.

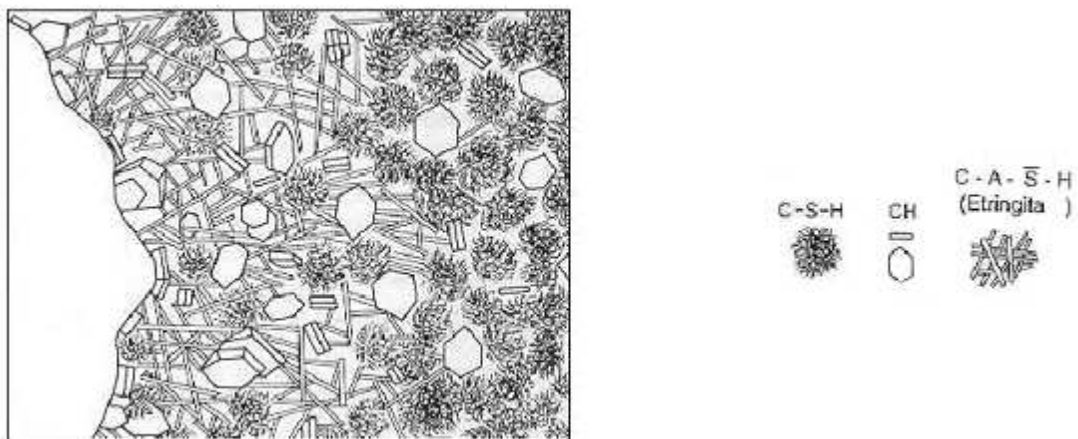
O concreto endurecido pode ser considerado com uma rocha artificial, comparável a um aglomerado constituído por uma associação de agregados graúdos e grãos de areia, de dimensões variáveis, englobados por uma pasta de cimento (Paulon, 2005).

Devido a grande porosidade existente no concreto, pode-se classificá-lo como um falso sólido (Paulon, 2005)

A nível macroscópico o concreto aparenta ter somente dois constituintes distintos: Partículas de agregado e a pasta de cimento endurecida. Entretanto, segundo Mehta e Monteiro (2014), analisando sua microestrutura observa-se um terceiro constituinte: a zona de transição (Polito, 2006).

Na figura 4, podemos verificar que esta região possui características diferentes do restante da pasta. Paulon (2005) define esta zona de transição como uma auréola de transição em torno dos agregados (Polito, 2006).

Figura 4: Zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado.



Fonte: Mehta e Monteiro (2014).

Os três constituintes do concreto são importantes para definir as propriedades do mesmo:

- a) **Fase agregada:** Responsável pela massa unitária, módulo de elasticidade e estabilidade dimensional.

- b) **Pasta de cimento:** Na pasta de cimento existe uma série de elementos na fase sólida, como por exemplo, silicato de cálcio hidratado (C-S-H), Hidróxido de cálcio Ca(OH)_2 e Sulfoaluminatos de cálcio. Embora exista esses sólidos, a pasta de cimento apresenta uma série de vazios que influenciam nas propriedades do concreto.
- c) **Zona de transição:** Essa região apresenta uma quantidade maior de vazios e uma série de microfissuras, o que irá favorecer para que essa região tenha uma menor resistência no concreto.

Na figura 5 podemos verificar que esta zona de transição se caracteriza por ser mais porosa e o local onde a as primeiras fissuras aparecem. Segundo Paulon (2005), apesar da pasta do cimento ser considerado um meio isotrópico, a auréola de transição é uma zona fortemente anisotrópica. Mehta e Monteiro (2014) afirmam que a espessura da zona de transição varia de 10 a 50 μm e a classificam como “o elo fraco da corrente”.

O fato é que, os vazios existentes e a solução que os preenche influenciam no transporte da massa de íons dentro do concreto. Reações com íons cloreto e sulfatos, e suas cinéticas são afetados pelo tamanho dos vazios e sua continuidade.

Segundo Cascudo (2005) todos os aspectos da tecnologia do concreto que contribuem para obter um produto de maior compacidade e de menor índice de vazios, contendo uma porosidade que minimize o transporte de íons, gases e líquidos através de sua estrutura interna, são relevantes sob o ponto de vista da corrosão de armadura (Polito, 2006).

Podemos concluir que é inegável a relação propriedade-estrutura dos vazios para a durabilidade do concreto, mais precisamente para a estrutura dos hidróxidos dos silicatos de cálcio e a solução que permeia pelos vazios (Polito, 2006).

Figura 5: Zona de transição pasta/ agregado de um concreto convencional típico.



Fonte: Dal Molin, 1994 citado por Kaefer.

2.5 Corrosão no concreto

A corrosão da armadura do concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, no qual o eletrólito apresenta uma considerável resistividade elétrica (Polito, 2006).

Os principais fatores que levam ao fenômeno da corrosão no concreto estão associados principalmente às características do concreto, ao meio ambiente e à disposição das armaduras e dos componentes estruturais afetados.

2.5.1 Origem

O processo de construção pode ser dividido em cinco grandes etapas: planejamento, projeto, fabricação, execução e utilização. Apesar de grande parte das patologias ocorrerem durante a etapa de utilização, a maioria delas tem a sua origem na etapa de projeto, e é justamente lá que as intervenções apresentam os melhores resultados, com os menores custos. A especificação correta do concreto a ser empregado, sua relação A/C, o tipo de cimento, a adequada espessura de cobrimento em relação ao ambiente, a utilização de proteção das armaduras, são algumas das medidas que se tomadas de maneira correta na fase de projeto, melhoram a durabilidade das estruturas à corrosão de armadura (Polito, 2006).

De acordo com Freire (2005), a corrosão na armadura é causada principalmente por fatores mecânicos (Vibrações e erosão), físicos (variações de temperatura), biológicos (bactérias) e químicos (sais e óxidos).

2.5.2 Causas

Os agentes que causam os problemas patológicos podem ser vários. No caso da corrosão de armadura podem ser destacados: o CO_2 ; os sais, principalmente o cloreto; a incompatibilidade de metais (Polito, 2006).

2.5.2.1 Fatores que favorecem a corrosão na armadura

De acordo com Bohni (2005), os fatores que favorecem a corrosão na armadura são:

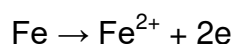
1. Diferença de potencial entre dois pontos da armadura, possibilitando assim o fluxo de elétrons;
2. O concreto deve está úmido garantindo assim a existência de um eletrólito;
3. Presença de oxigênio, para que ocorra a reação catódica;
4. A ocorrência do rompimento da camada passivadora da armadura, pode ser feita ação de íons cloreto ou pela carbonatação.

2.5.3 Mecanismos de formação

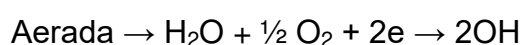
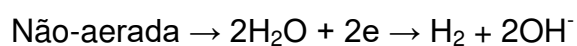
O processo de corrosão do aço no concreto envolve uma fase inicial, na qual os agentes agressivos alteram as condições do concreto no entorno da barra, despassivando a armadura, seguindo-se da formação de uma célula de corrosão, responsável pela propagação da corrosão.

O mecanismo de corrosão eletroquímico apresenta as seguintes reações:

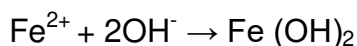
Na área anódica (corrosão)



Na área catódica (sem corrosão)



Segundo Cascudo (2005), os íons de ferro Fe^{2+} migram pelo eletrólito em direção ao catodo e os íons de hidroxila (OH^-) migram para o anodo. Numa região intermediária eles se encontram e precipita-se o hidróxido ferroso, pela seguinte reação (Polito, 2006):



Como primeiro produto da corrosão tem-se o hidróxido de ferro (II), $\text{Fe}(\text{OH})_2$, que em meio não-aerado se transforma em magnetita, Fe_3O_4 , de cor preta ou esverdeada; e em meio aerado se transforma em hidróxido de ferro (III), $\text{Fe}(\text{OH})_3$, de cor castanho alaranjado (Gentil, 2003).

Os produtos de corrosão podem ser formados também em regiões próximas ao catodo, porque o OH^- , um íon maior do que o Fe^{2+} , apresenta mobilidade iônica menor do que o íon de ferro (Cascudo, 2005).

2.5.4 As fases da corrosão segundo o modelo de *Tuutti*

Os modelos de vida útil, associados ao fenômeno da corrosão, usualmente se baseiam no modelo fenomenológico proposto por *Tuutti* (1982). Na figura 6 podemos verificar que esse modelo, na sua forma original, apresenta uma fase de iniciação e outra fase de propagação da corrosão.

A fase de iniciação se caracteriza pela penetração dos agentes agressivos, até o momento no qual a armadura se despassiva. Essa fase depende das características de agressividade do meio ao qual a estrutura está exposta e das características dos materiais, como o tipo de cimento, porosidade superficial do concreto, tipo de aço etc. Com a despassivação da armadura, inicia-se a fase de propagação da corrosão.

A fase de propagação da corrosão se caracteriza pelo desenvolvimento das reações de corrosão, as quais podem ser mais ou menos rápidas em função das variáveis que controlam a cinética das reações, ou seja, em função da disponibilidade de oxigênio, da resistividade do meio, da temperatura etc

Figura 6: Modelo de Tuutti para a corrosão de armaduras.



Fonte: Tuutti (1982).

2.5.5 Passivação da armadura de concreto

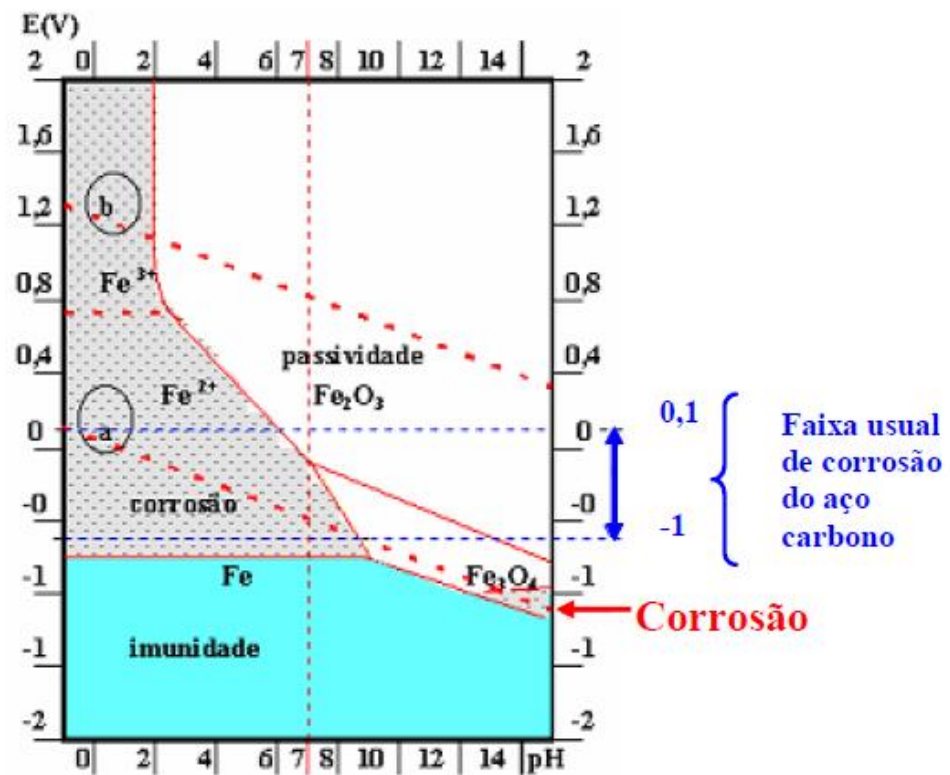
O concreto oferece ao aço uma dupla proteção. Primeiro uma proteção física, separando o aço do contato direto com o meio externo e, segundo, uma proteção química, conferida pelo elevado pH do concreto, o qual promove a formação de uma película passivadora que envolve o aço.

A formação e estabilidade dessa película têm relação com a elevada alcalinidade da solução aquosa presente nos poros do concreto. Inicialmente se pensou que essa alcalinidade se devia essencialmente à presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), resultante das reações de hidratação do cimento.

A película passivadora protetora do aço é gerada a partir de uma rápida e extensa reação eletroquímica que resulta na formação de uma fina camada de óxidos, transparente e aderente ao aço (POURBAIX, 1987).

A ação de proteção exercida pela película passivadora é garantida pela alta alcalinidade do concreto e um adequado potencial eletroquímico. Essa condição pode ser melhor observada na figura 7, que mostra o diagrama de equilíbrio termodinâmico proposto por *Pourbaix*) para o ferro em meio aquoso, que mostra as condições de pH e potencial nas quais o ferro pode situar-se em três condições distintas: corrosão, passivação ou imunidade.

Figura 7: Diagrama de equilíbrio termodinâmico *potencial versus PH* para o sistema Fe- H_2O a 25°C.



Fonte: Pourbaix (1987).

A zona de imunidade corresponde à região do diagrama onde o aço não se corrói, independentemente da natureza do meio ser ácido, neutro ou alcalino. A zona de passivação corresponde àquela em que as reações observadas são as de formação da película passivadora, a qual será mais ou menos perfeita em função do nível de proteção que esta camada ofereça ao metal. A zona de corrosão corresponde àquela onde há as condições termodinâmicas necessárias para que o metal possa desenvolver a corrosão (Pourbaix, 1987).

2.5.6 Variáveis que favorecem a corrosão do concreto

Sabe-se que o mecanismo da corrosão do concreto é de natureza eletroquímica, ou seja, há formação de pilhas eletroquímicas no interior do concreto, baseado nisso, faz-se necessário o conhecimento dos mecanismos atuantes no processo. As variáveis mais importantes, são:

- a) Meio corrosivo – composição química, concentração, impurezas, pH, temperatura e sólidos em suspensão
- b) Material – composição química, impurezas e processo de obtenção
- c) Condições operacionais – solicitações mecânicas, movimento relativo com o meio, condições de imersão.

As pilhas se caracterizam por uma área anódica, onde ocorre a oxidação com perda de massa, e a área catódica, onde ocorre a redução de oxigênio. As duas reações ocorrem simultaneamente e são dependentes.

Cascudo (2005) faz uma descrição bem sucinta do processo de corrosão da armadura do concreto. Na reação anódica são produzidos íons de ferro e elétrons, e no processo catódico esses elétrons são aproveitados na reação de redução de oxigênio, tendo-se como produto a hidroxila. Como se desprende do processo eletroquímico, há a formação de corrente elétrica, que se conduz pela armadura, no sentido anodo-catodo, fechando o circuito no sentido contrário de forma iônica pelo eletrólito. As reações químicas entre os produtos das reações eletroquímicas (íons ferro e hidroxilas) geram produtos de corrosão (óxidos e hidróxidos de ferro), de natureza expansiva (Polito, 2006).

Como o processo de corrosão é eletroquímico, procura-se evitar que haja as condições que viabilizem a formação da pilha. Entre elas estão: a presença de eletrólito, a aeração diferencial, contato entre metais diferentes, áreas de diferentes deformações, áreas de diferentes tensões e corrente elétrica.

A presença de eletrólito é pré-condição para a ocorrência da corrosão eletroquímica, daí a importância da presença de eletrólitos, como sais, no processo.

2.5.7 Iniciação da corrosão da armadura

Os principais causadores da corrosão de armadura do concreto, por unanimidade dos autores consultados, são o CO_2 e os íons de cloreto. Sendo que o primeiro contribui com a queda do pH e a consequente despassivação da armadura e o segundo contribui com a diminuição da resistividade do concreto e o ataque a camada passivadora (Polito, 2006).

A corrosão da armadura pode gerar sérias consequências, dentre as quais podemos enfatizar:

1. Perda de seção transversal e uma consequente diminuição da resistência mecânica;
2. Formação de óxidos e hidróxidos que incorporam muitas moléculas de água em sua composição, que gera uma tendência à expansão, o que resulta em surgimento de fissuras, e em alguns casos, deslocamento da camada de cobrimento;
3. Perturbações na interface aço/concreto, decorrentes da degradação das camadas externas do aço e acúmulo de óxidos, prejudicando a transferência de tensões entre eles.

a) Pela carbonatação:

Normalmente a carbonatação é condição essencial para o início da corrosão da armadura no interior do concreto. A alcalinidade do concreto é obtida principalmente pela presença de Ca(OH)_2 (hidróxido de cálcio), liberado das reações do cimento e pode ser reduzida com o tempo.

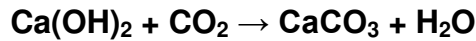
Segundo Figueiredo (2005), carbonatação consiste em um processo físico-químico de neutralização da fase líquida intersticial do concreto, saturada de hidróxido de cálcio e de outros compostos alcalinos hidratados.

Os constituintes presentes na atmosfera que podem causar a redução do pH são o CO_2 (gás carbônico), o SO_2 (dióxido de enxofre), e o H_2S (gás sulfídrico), sendo que o principal é o primeiro, daí o nome de carbonatação.

A carbonatação ocorre quando o CO_2 , do ar ou em água agressivas, se combina com o Ca(OH)_2 , formando o carbonato de cálcio, CaCO_3 , insolúvel. Este processo faz cair o pH da solução de equilíbrio de 12,5 para 9,4, que é o pH que precipita este composto. Para Gentil (2008) este novo pH fica entre 8,5 e 9,0.

Apesar da diferença entre os diversos autores consultados, eles concordam que ambos os valores de pH são capazes de despassivar a armadura e deixar a porta aberta para a corrosão da armadura.

A reação principal de carbonatação é:



O processo ocorre em várias etapas envolvendo diversas reações secundárias, embora o carbonato de cálcio seja sempre um dos produtos finais (Cascudo,1997).

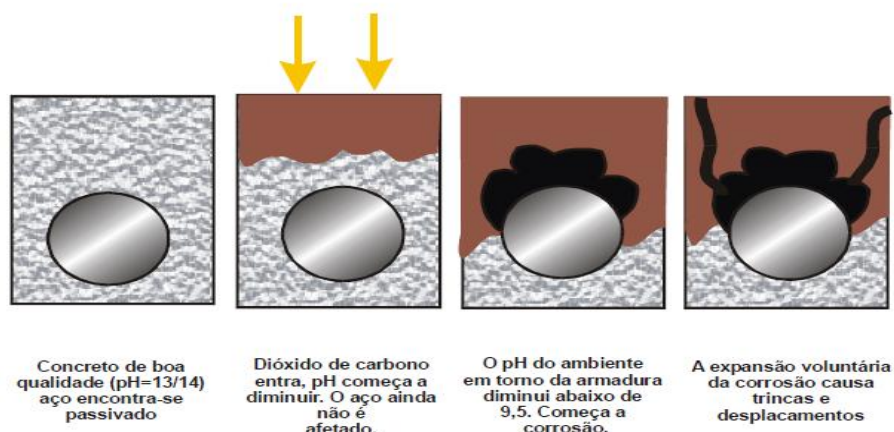
A ação do CO_2 sobre os constituintes do cimento hidratado é muito complexa, não se limitando apenas ao hidróxido de cálcio, atacando e decompondo todos os produtos na hidratação do cimento. Rodrigues (2005) apresenta micrografia eletrônica de varredura evidenciando a morfologia do carbonato de cálcio (Polito, 2006).

Uma característica da carbonatação é a existência de uma “frente” de avanço, que divide duas áreas de pH muito diferentes, uma com pH em torno de 8 e outra com pH acima de 12. Na figura 8, podemos observar a frente de carbonatação avança progressivamente em direção ao interior do concreto. É muito importante que ela não chegue à armadura (Polito, 2006).

A frente de carbonatação deve sempre ser mensurada com relação à espessura do concreto de cobertura da armadura (Cascudo,1997).

A profundidade de carbonatação cresce, inicialmente, rapidamente, prosseguindo mais lentamente e tendendo assintoticamente a uma profundidade máxima (Rodrigues, 2001).

Figura 8: Frente de carbonatação.



Fonte: Rodrigues (2001).

b) Pela ação dos íons cloreto

Os íons cloreto (Cl^-) penetram nos poros do concreto, conjuntamente com a água e o oxigênio e, ao encontrar a película passivadora da armadura, provocam desestabilizações pontuais nessa película. Várias teorias tentam representar esse fenômeno. No entanto, a maioria delas converge em relação ao fato de que a ruptura da película passivadora é algo dinâmico, com eventos repetidos de despassivação e repassivação, até a despassivação definitiva da armadura, bem como que este efeito ocorre de forma localizada. Essa é uma característica que faz com que a corrosão desencadeada por cloretos seja tipicamente por pites, diferindo do que ocorre devido à carbonatação (corrosão generalizada).

Figueiredo (2005) define as formas que os íons de cloreto podem chegar até o concreto (Polito, 2006):

1. uso de aceleradores de pega que contêm CaCl_2 ;
2. na forma de impurezas dos agregados e da água de emassamento;
3. atmosfera marinha;
4. água do mar;
5. sais de degelo;
6. processos industriais.

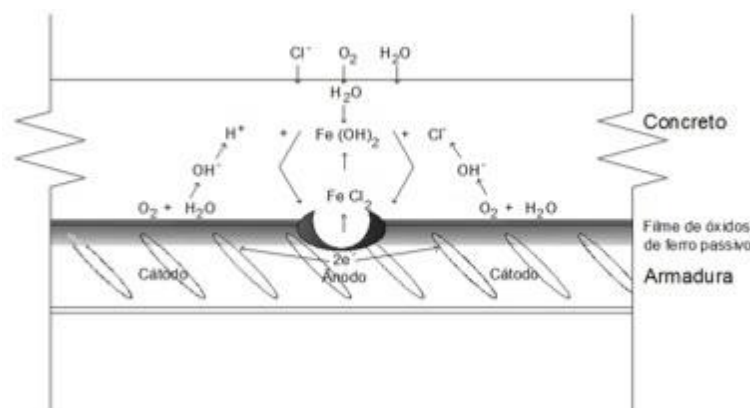
Ainda segundo Figueiredo (2005), os íons podem ser encontrados no interior do concreto em três diferentes formas:

1. quimicamente combinados (cloroaluminatos);
2. fisicamente absorvidos na superfície dos poros capilares;
3. livres na solução dos poros do concreto.

A Figura 9 representa o efeito dos íons cloreto na ruptura pontual da película passivadora e o início do processo de corrosão. Uma vez iniciado o processo corrosivo, os cloretos que se combinam inicialmente com os íons Fe^{2+} , formando FeCl_2 , são reciclados através da hidrólise desses produtos, liberando os Cl^- para novas reações, mas também liberando íons H^+ . A liberação de H^+ faz com que a área anódica tenha a sua acidez aumentada e o potencial dessa área se torne

mais negativo. Por outro lado, a formação de OH^- em função das reações catódicas, eleva o pH dessas áreas. Assim, a corrosão por pites é autossustentada, diminuindo o pH nas áreas anódicas e aumentando o pH nas áreas catódicas adjacentes, reduzindo as chances de futuro ataque nessas áreas catódicas. Com a continuidade do processo, mais íons Cl^- penetram no concreto, unindo-se àqueles reciclados para participarem de novas reações (Polito, 2006).

Figura 9: efeito dos íons cloreto na ruptura pontual da película passivadora e o início do processo de corrosão.



Fonte: Polito (2006).

2.6 Propriedades Mecânicas dos Materiais que constituem a ponte

Na análise das influências da corrosão nos materiais que constituem a ponte, buscou-se analisar quais seriam as propriedades mecânicas que seriam mais afetadas, isso para a parte metálica e para a estrutura de concreto. Baseado nisso, tornou-se possível determinar que para estrutura metálica, a propriedade mecânica mais afetada com a corrosão, é o módulo de elasticidade, tendo em vista que de acordo com Gentil (2005), a corrosão tende a diminuir a resistência mecânica dos aços, pois em termos microestruturais as ligações tendem a ser fragilizadas, o que afeta a rigidez do material e consequentemente o seu módulo de elasticidade.

Já análise da estrutura de concreto, avaliou-se que: Nas regiões em que o concreto não é adequado, ou não recobre, ou recobre deficientemente a armadura, a corrosão torna-se progressiva com a consequente formação de óxihidróxidos de ferro, que passam a ocupar volumes de 3 a 10 vezes superiores ao volume original

do aço da armadura, podendo causar pressões de expansão superiores a 15 MPa ($\approx 150 \text{ kgf/cm}^2$).

Essas tensões provocam, inicialmente, a fissuração do concreto na direção paralela à armadura corroída, o que favorece a carbonatação e a penetração de CO_2 e agentes agressivos, podendo causar o lascamento do concreto.

Baseado nisso, observa-se que essa perda de massa gerada pela corrosão, pode proporcionar diminuição na capacidade de carga de alguns pilares da ponte, logo a propriedade mecânica do concreto que pode ser mais impactada com a deterioração por corrosão, é a resistência a compressão.

2.6.1 Módulo de Elasticidade

No regime elástico a tensão e a deformação possuem uma relação linear. A inclinação da reta tensão versus deformação é definida como o módulo de elasticidade ou o módulo de Young,

$$\sigma = E\varepsilon$$

Em que :

σ = Tensão

E = Módulo de Elasticidade

ε = Deformação

O módulo de elasticidade é uma propriedade intrínseca do material, estando relacionado a sua rigidez. Quanto maior E maior é dita a rigidez do material. Ele está também relacionado à energia de ligação do material. Quanto maior a energia de ligação maior é o módulo de elasticidade. Maior é também a temperatura de fusão, segundo Van Vlack (1973).

2.6.2 Resistência a Compressão

Consiste na capacidade que o concreto tem de resistir a aplicação de carga compressiva axial. Os fatores que influenciam na resistência a compressão são: temperatura, velocidade de deformação, anisotropia do material, tamanho de grão, porcentagem de impurezas e condições ambientais, de acordo com Garcia (2000).

Sabendo-se quais são as propriedades mecânicas que podem ser afetadas pela corrosão, de acordo com a bibliografia, será necessário fazer ensaios na estrutura metálica e estrutura de concreto, de modo a verificar a real influência da corrosão na ponte em estudo.

2.7 Ensaios Eletroquímicos de Corrosão

Tendo em vista que o processo de corrosão envolve fenômenos eletroquímicos, medidas eletroquímicas são comumente utilizadas no estudo do processo de corrosão. Algumas técnicas são utilizadas em laboratório para determinar a susceptibilidade de aços a sofrerem o processo de corrosão e a taxa de corrosão dos mesmos. Dentre esses ensaios eletroquímicos, podemos destacar: Ensaio de potencial de corrosão.

2.7.1 Ensaio de potencial de corrosão

Este tipo de ensaio surgiu na década de 50 na América do Norte e passou a ser muito usada com maior frequência nos estados unidos. O uso desse ensaio tem como objetivo mapear manifestações patológicas geradas pela corrosão em estruturas reais.

2.7.1.1 Funcionamento do Ensaio

A utilização do potenciostato é o meio mais comum para o estudo das reações eletroquímicas de um corpo-de-prova imerso numa solução, e é particularmente importante no estudo do comportamento eletroquímico de aços inoxidáveis. O potenciostato pode ser descrito como um circuito elétrico capaz de manter constante uma diferença de potencial entre o corpo-de-prova em estudo (eletrodo de trabalho) e um eletrodo inerte, chamado de contra-eletrodo, construído de grafite ou platina; um eletrodo de referência (como o de calomelano saturado) permite a leitura do potencial a que está submetido o eletrodo de trabalho; esta informação, e a corrente registrada no sistema, permitem caracterizar as reações eletroquímicas que se estabelecem (MAGNABOSCO, 1995).

As reações eletroquímicas que podem ocorrer na interface de um corpo-de-prova dependem do potencial de eletrodo a que a superfície está submetida, e o estudo destas reações pode ser feito através da relação entre o potencial aplicado e a corrente gerada nas reações eletroquímicas (anódicas e catódicas) que se desenvolvem. Assim, a varredura contínua de potencial e o correspondente registro da corrente permitem o estudo do comportamento eletroquímico de um material, gerando a curva de polarização deste material (SEDRIKS, 1986).

2.7.1.2 Curvas de Polarização

Utilizando a relação entre potencial aplicado na interface metal-solução (eletrólito) e a corrente gerada, pode-se obter as curvas de polarização. Essas curvas podem ser obtidas da seguinte maneira: Utiliza-se um sistema a partir de um eletrodo principal contendo o metal que se deseja avaliar, como eletrodo de trabalho, e dois auxiliares (referência e contra eletrodo), todos imersos na mesma solução (meio corrosivo), ligados a uma mesma fonte de tensão externa. Com o sistema imerso em solução, observa-se na interface metal-eletrólito uma diferença de potencial (ddp) devido a dupla camada elétrica ali formada. Nessa interface, ocorrem reações de redução e oxidação.

2.7.1.3 Normas para realização do ensaio e interpretação dos resultados

De acordo com a ASTM C876 (AMERICAN...,1991) a interpretação dos resultados é dada pela tabela 2. Entretanto, ressalta-se que estes valores podem ter um erro em função das condições de realização do ensaio.

Tabela 2: Probabilidade de corrosão através do E_{corr} , segundo a ASTM C876

Potenciais de corrosão- ESC	Probabilidade de corrosão (%)
$E_{corr} > -200 \text{ mV}$	<10
$-200 \text{ mV} < E_{corr} < -350 \text{ mV}$	Incerta
$E_{corr} < -350 \text{ mV}$	>90%

Fonte: AMERICAN... (1991).

2.8 Ensaio de Ultrassom

Para a análise da resistência a compressão axial dos pilares de concreto, optou-se pela realização de um ensaio não-destrutivo, visto que a extração de testemunhos é mais prejudicial à estrutura e danifica a estrutura, fazendo assim com que seja necessário reparos na mesma. De acordo com Palácios (2012), os atrativos dos ensaios não-destrutivos são: rapidez na execução, disponibilidade imediata dos resultados e poucas restrições em relação aos locais que os ensaios podem ser executados. Diante disso, o ensaio que mais se adequa para verificação da resistência a compressão dos pilares da ponte em estudo, foi o de ultrassom.

2.8.1 Funcionamento do Ensaio

O método ultra-sônico está baseado na propagação de ondas sonoras de alta frequência pelo material analisado. A variação da velocidade das ondas está associada a quantidade de poros e vazios, o que fará com que seja possível detectar discontinuidades. O objetivo da realização do ensaio é projetar o som para dentro do material a ser analisado, medindo o tempo até que o mesmo se propague até um outro ponto qualquer. Sabendo a distância entre os pontos, é possível determinar a velocidade média no trecho de propagação. Para que a precisão deste ensaio seja efetivada, a aplicação do método exige alguns cuidados, como a limpeza da superfície (retirando carepas, tintas, pó, graxa e tudo que possa mascarar ou impedir a penetração do feixe sônico).

2.8.2 Características do Aparelho

O aparelho é constituído de dois transdutores que trabalham juntos na medição propriamente dita (um emissor e o outro receptor) e um minicomputador que analisa os dados e mostra os resultados na tela. As ondas são transmitidas pelo transdutor emissor, que consiste em um cristal piezo-elétrico capaz de converter a energia elétrica em onda mecânica (sonora). Quando esse transdutor está em contato com o material a ser analisado, emite uma onda que atravessa o mesmo. Ao

encontrar uma descontinuidade esta onda é refletida, retardando o sinal que é captado pelo receptor, de acordo com Finch (1985).

2.8.3 Resultados fornecidos pelo ensaio e normas para realização

Em função da sua sensibilidade a estes fatores, os ensaios ultra-sônicos servem para caracterizar um determinado material, sua integridade e outras propriedades físicas, tornando-se uma técnica bastante usada para o controle de qualidade, detecção de defeitos, de descontinuidades, medição de espessuras ou caracterização dos materiais constituintes do concreto e resistência a compressão, segundo estabelece a norma americana ASTM E 114-95 (AMERICAN..., 1995). O ensaio de ultrassom possui elevada sensibilidade para detecção de pequenas trincas e fissuras. Além de indicar o tamanho dessa possível falha, ele é capaz de apontar a profundidade do dano, o que é um fator importante para proceder um reparo. Com o propósito de obter resultados mais coerentes na realização do ensaio, torna-se necessário realizar três leituras no pilar escolhido, visando abranger todas as direções (x, y e z).

2.9 Métodos de prevenção e correção

Uma vez que já foi abordado como ocorre a corrosão em estruturas de concreto, bem como suas origens, causas e mecanismos envolvidos na sua iniciação e propagação, e obtido um diagnóstico através de vistoria no local, torna-se possível estabelecer quais as técnicas de correção ou prevenção deverão ser implementadas afim de aumentar a vida útil da estrutura.

2.9.1 Métodos de prevenção

a) Proteção Física da Armadura- Revestimentos

A armadura poderá ser protegida contra a corrosão com a utilização de revestimentos em sua superfície. Esses revestimentos podem ser de metais mais resistentes ou de materiais orgânicos, à base de epóxi, por exemplo.

b) Galvanização

A galvanização consiste em emergir a armadura em um banho de zinco fundido. Em sua superfície se formarão duas camadas. Uma mais interna composta de uma liga de zinco-ferro e uma mais externa composta de zinco puro.

O zinco protege o aço de duas formas. Como barreira entre o aço e ambiente e, como anodo de sacrifício.

c) Resinas epóxi

Os revestimentos epóxi quando aplicados na armadura funcionam como barreira física. De acordo com Gentil (2008), resina epóxi é um dos mais importantes veículos para o combate à corrosão. Ela possui boas propriedades de aderência e resistência química, alta resistência à abrasão e ao impacto.

Segundo Gonçalves (2003), as espessuras do revestimento devem compreender entre 180 µm e 300 µm, de maneira a não comprometer a flexibilidade e garantir uma proteção eficaz.

d) Proteção Química- Inibidores de corrosão

Segundo Monteiro (2005), um inibidor de corrosão é um composto químico que quando introduzido no concreto em quantidades reduzidas, pode evitar ou diminuir a corrosão das armaduras sem afetar negativamente as propriedades físicas ou microestrutura do concreto. A utilização de inibidores de corrosão é considerada por muitos autores como um dos melhores métodos para a proteção contra a corrosão (Polito, 2006).

Condição para utilização de inibidores: inibidores só devem ser adicionados à massa de concreto quando houver presença de cloretos e forem dosados em função dos teores de cloretos livres.

Gentil (2003) afirma que, para que a utilização de inibidores tenha bons resultados é preciso considerar quatro aspectos: a causa da corrosão, para identificar se o problema pode ser solucionado com a utilização de inibidores; o custo da sua utilização, para verificar se o custo excede o das perdas causadas pela corrosão; as propriedades e mecanismo dos inibidores, para verificar sua compatibilidade; e finalmente as condições adequadas de adição e controle, para garantir a correta utilização (Polito, 2006).

De acordo com Gentil (2008), entre os inibidores mais usados estão o Nitrito de sódio, NaNO_2 , e Nitrito de cálcio, $\text{Ca}(\text{NO}_2)_2$, que agem formando uma película protetora de óxido de ferro passivando a armadura e protegendo-a contra a corrosão.

e) Técnicas Eletroquímicas

As técnicas eletroquímicas de proteção e reparo em estruturas danificadas por corrosão de armadura são três; Proteção catódica, Extração eletroquímica de cloretos e Realcalinização (MONTEIRO, 2005).

Em princípio estas técnicas consistem em aplicar uma corrente elétrica contínua entre a armadura, que funciona como catodo, e um eletrodo auxiliar externo, que funciona como o anodo (GONÇALVES; ANDRADE; CASTELLOTE, 2003). Na tabela 3 podemos perceber que as principais diferenças estão na densidade de corrente aplicada e na duração do tratamento (Polito, 2006).

Tabela 3 - Técnicas Eletroquímicas através de corrente elétrica contínua

Características	Proteção Catódica	Extração de Cloretos	Realcalinização
Detém a corrosão por	Polarização das armaduras até o potencial de imunidade	Eliminação dos agentes agressivos	Restauração da alcalinidade perdida no entorno da armadura
Duração do tratamento	Permanente	De 4 a 10 semanas	1 a 2 semanas
Densidade de corrente típica	10 mA/m ²	0,8 a 2 A/m ²	0,8 a 2 A/m ²

Fonte: Gonçalves, Andrade e Castellote (2003).

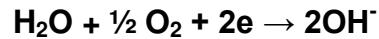
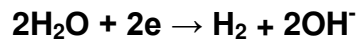
1) Proteção catódica

Segundo Polito (2006), quando se aplica uma proteção catódica, três podem ser as causas da redução da corrosão:

- a) O potencial do metal atinge um valor, onde todo ele se transforma em catodo.



- b) O eletrólito próximo à superfície do metal se torna mais básico por causa da redução dos íons hidrogênio, H^+ , ou da redução do oxigênio.



- c) A elevação do pH pode causar a precipitação de substâncias insolúveis, como o $CaCO_3$ e $Mg(OH)_2$, que formam uma camada protetora para o metal.

2) Extração de cloretos

A extração de cloretos retira pela ação do campo elétrico de um eletrodo externo, os íons de cloretos carregados negativamente. Como resultado do processo a alcalinidade do concreto também aumenta devido à reação catódica.

O processo é muito simples. Os íons são transportados para fora do concreto por migração. Durante o processo íons de cátions são transportados para a armadura, ânions migram para fora do concreto e hidroxilas são produzidas na superfície da armadura pela reação catódica.

3) Realcalinização

De acordo com Polito(2006), a realcalinização tem por objetivo restaurar a alcalinidade do concreto ao redor das armaduras, afim de repassivá-las pela hidrólise da água no catodo e pelo estabelecimento de um fluxo eletrosmótico que introduz os íons carbonato da solução externa para a armadura.

d) Métodos complementares

Sistema de reparo por proteção por barreira: Esse tipo de sistema é geralmente usado como complemento a outros sistemas de proteção fornecendo uma proteção a mais contra o ingresso de agentes agressivos.

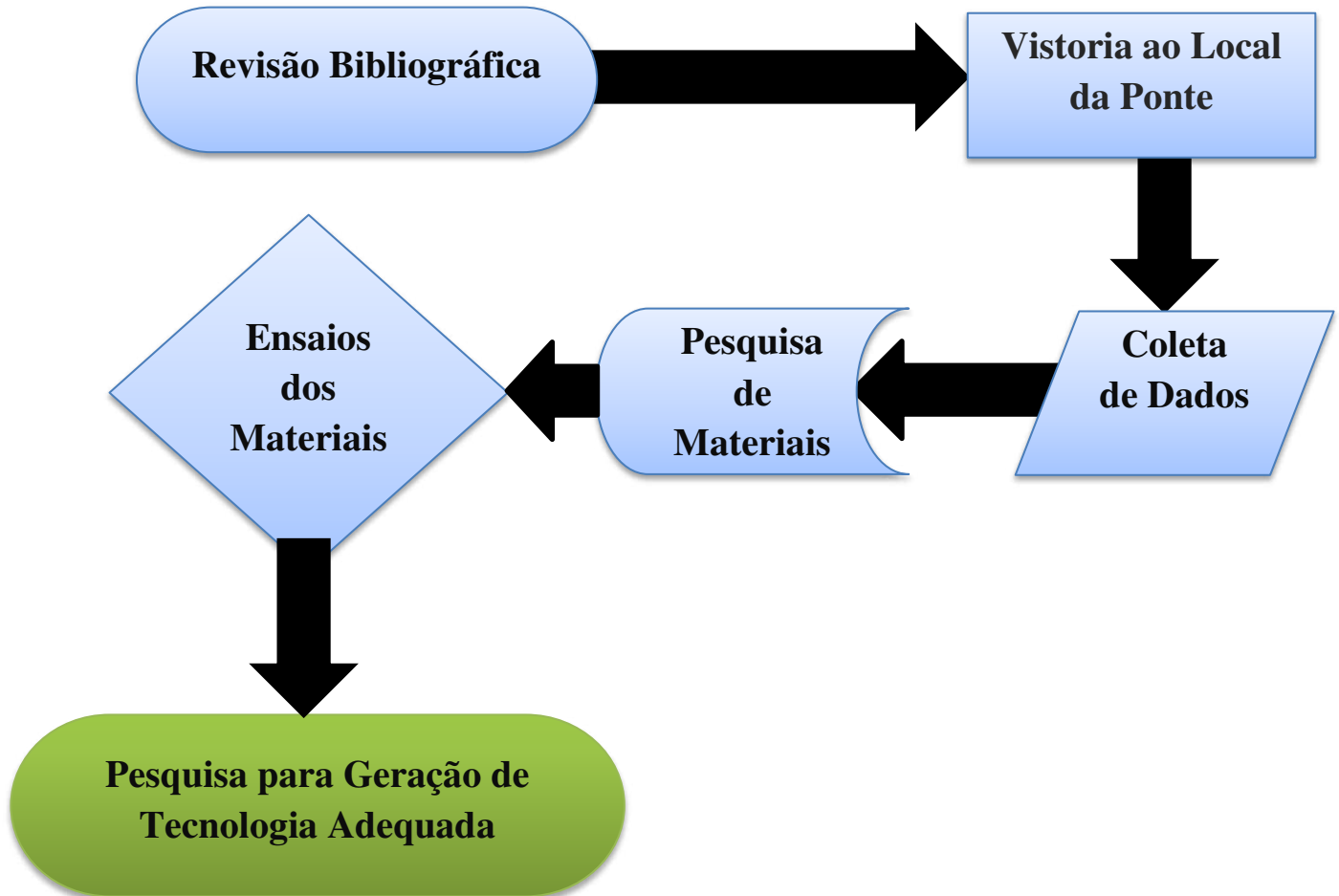
Segundo Gentil (2008) na aplicação de tintas sobre superfícies de concreto são importantes os seguintes cuidados:

1. Limpeza para a retirada da nata superficial de cimento devendo ser feita por ação mecânica lixamento.

2. Usar tintas não saponificáveis, ou seja, tintas resistentes a alcalinidade do concreto.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 10 - Metodologia



Fonte: Próprio do Autor.

3.1 Revisão Bibliográfica

Fez-se um levantamento de dados referente ao assunto em livros, sites, artigos, dissertações, teses e outras fontes de materiais que vieram a contribuir positivamente para elaboração desse trabalho. Essa revisão bibliográfica serviu de embasamento para que fosse possível entender o mecanismo da corrosão na estrutura metálica e no concreto, que são materiais que constituem a ponte.

3.2 Vistoria ao Local da Ponte

Com o propósito de saber quais as reais condições estruturais em que se encontra a ponte em estudo, fez-se uma vistoria ao local da ponte. Durante essa vistoria tornou-se possível caracterizar o ambiente de serviço da ponte em estudo, bem como analisar as principais causas da sua deterioração e a partir disso fazer análise comparativa com informações que foram encontradas na revisão bibliográfica.

3.3 Coleta de Dados

Durante a vistoria ao local da ponte, foi avaliado a possibilidade de extração de corpos de prova, para posteriormente serem feitos ensaios para analisar as influências da deterioração em algumas propriedades mecânica dos materiais que constituem a ponte. Porém, foi verificado que não seria viável extrair corpos de prova, visto que seria necessário posteriores reparos na estrutura da ponte. Baseado nessa dificuldade, optou-se pela execução de ensaios não-destrutivos. O outro ponto da coleta de dados consistiu em ir até a construtora responsável pela obra da ponte, e tentar obter algumas informações, tais como: Propriedades dos materiais antes de sofrerem o processo de deterioração e tempo de serviço dos mesmos.

Uma vez que a empresa responsável não encontra-se mais em São Luís, tentou-se obter informações de projeto na Secretaria de Infraestrutura do Estado (SINFRA), porém a resposta dada foi que diante das constantes transições de governo, os dados de projeto da ponte foram perdidos, algo que dificultou em parte a realização deste trabalho.

Durante a visita à SINFRA, foi obtida a informação que diante do estado estético da ponte, a Promotoria exigiu um relatório técnico da SINFRA, sobre as condições estruturais da ponte. Diante disso, este trabalho teve mais relevância, uma vez que alguns dados da ponte obtidos eram repassados à SINFRA, a fim de compor esse relatório.

3.4 Pesquisa de Materiais

Foram desenvolvidas pesquisas em pontes de concreto armado que apresentaram falhas em serviço fornecendo diagnose e levantamento das possíveis causas da deterioração e falha por ruptura. Estas pesquisas tiveram como propósito o levantamento dos principais problemas apresentados, especificamente àqueles relacionados com corrosão.

3.5 Ensaios dos Materiais

Com o propósito de identificar quais as principais características e propriedades dos materiais que constituem a ponte, assim como o desempenho industrial dos mesmos, foram realizados alguns ensaios, de modo a avaliar as características desses materiais. Com a realização de alguns desses ensaios tornou-se possível analisar as possíveis influências que a deterioração por corrosão exerce nas propriedades mecânicas dos materiais que constituem a ponte, bem como a suscetibilidade desses materiais a sofrerem corrosão. Para isso, os seguintes ensaios foram realizados:

- a) Inspeção visual;
- b) Mapeamento de fissuras;
- c) Ensaios de resistência à compressão não-destrutivo;
- d) Potencial de corrosão;

Porém, vale ressaltar que alguns fatores foram levados em consideração para a realização dos ensaios. Primeiro levou-se em consideração a relevância do ensaio, bem como sua viabilidade para a realização do mesmo.

Durante este trabalho, optou-se pela realização de ensaios não-destrutivos, uma vez que confeccionar corpos de prova, para simular o pilar de uma ponte, com um ambiente de serviço parecido, não é uma tarefa fácil.

3.6 Ensaio de Potencial de Polarização

Com o propósito de avaliar a susceptibilidade da estrutura metálica da ponte a corrosão, fez-se um ensaio de potencial de polarização, no laboratório de corrosão do IFMA, afim de justificar a utilização desse aço na ponte, visto que o mesmo encontra-se em contato direto com íons cloreto. Para isso, ensaiou-se o aço ASTM A36(Aço que também poderia ser utilizado na ponte) e o aço ASTM A588 (Aço utilizado na ponte).

Na realização do ensaio, utilizou-se uma solução de cloreto de sódio na água, a uma concentração de 3,5 %, visando simular o ambiente de trabalho da ponte.

a) Aço 1: ASTM A588(Aço utilizado na ponte)

Tabela 4: Composição química do aço ASTM A588, de acordo com o fornecedor GERDAU

Elemento	C	Mn	Si	P	Cr	S	Cu	V
% Peso	0,20	1,35	0,6	0,04	0,70	0,05	0,4	0,1

Fonte: GERDAU (2015).

b) Aço 2: ASTM A36 (Aço que também poderia ser utilizado na ponte)

Tabela 5: Composição química do aço ASTM A36, de acordo com o fornecedor GERDAU

Elemento	C	Mn	Si	P	S	Cu	Nb + V
% Peso	0,27	1,20	0,4	0,04	0,05	0,20	0,15

Fonte: GERDAU (2015).

As figuras abaixo, mostram os equipamentos do laboratório de corrosão do IFMA que foram utilizados no ensaio eletroquímico.

Figura 11 - Célula eletroquímica para o ensaio de polarização.



Fonte: Próprio do Autor.

Figura 12 - Eletrodos utilizados: (a) Eletrodo de Platina; (b) Eletrodo de Referência de Calomelano Saturado; (c) Eletrodo de Trabalho e o suporte.



Fonte: Próprio do Autor.

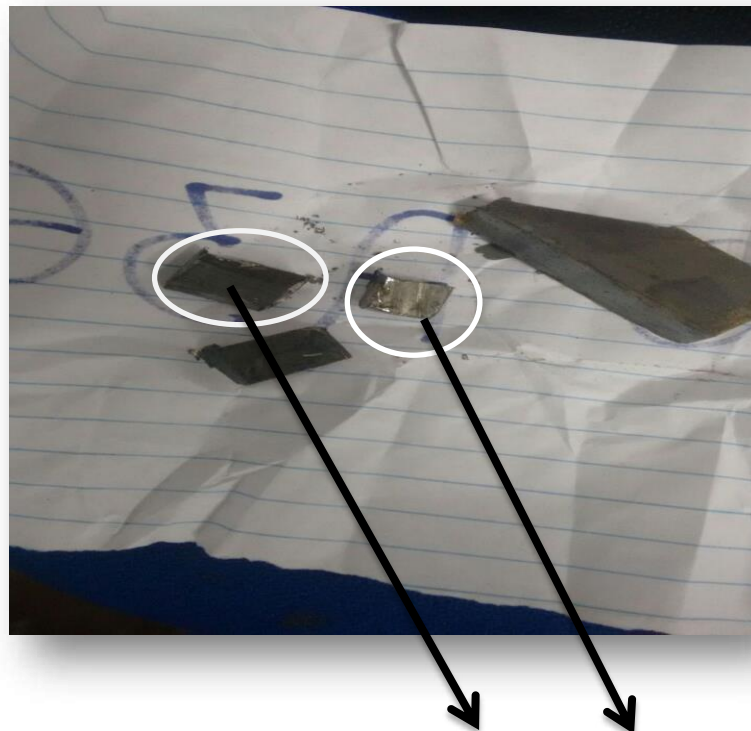
Figura 13 - Linxadeira para preparação as amostras a serem submetidas no ensaio.



Fonte: Próprio do Autor.

A figura 14 abaixo mostra as amostras a serem submetidas ao ensaio eletroquímico

Figura 14 - Amostras do Aço ASTM A36 e Aço ASTM A588



Aço ASTM A36 e Aço ASTM A588

Fonte: Próprio do Autor.

3.7 Pesquisa para geração de tecnologia adequada

Este trabalho também consiste em uma pesquisa com vistas ao desenvolvimento de uma tecnologia apropriada e economicamente viável. As pesquisas a serem desenvolvidas neste sentido terão um caráter científico, norteado pelos princípios modernos de Engenharia dos Materiais e Métodos de Proteção Anticorrosivos. Com essa pesquisa será possível estabelecer técnicas preventivas ou corretivas que deverão ser implementadas a fim de aumentar a vida útil da ponte em estudo.

Através da prevenção das falhas e adoção de técnicas corretas de reparo. Será feito um procedimento de atuação através de vistoria do local, do histórico da estrutura das pontes e do resultado de exames complementares; diagnóstico da situação e definição da conduta a partir da escolha de alternativa de intervenção mais conveniente.

A partir da revisão bibliográfica, tornou-se possível identificar algumas técnicas preventivas e corretivas que podem ser implementadas a fim de aumentar a vida útil da estrutura que está sendo deteriorada pela corrosão. Para estabelecer quais técnicas preventivas ou corretivas deveriam ser aplicadas, tornou-se necessário conhecer as condições estruturais da ponte e diagnosticar os fatores responsáveis.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o propósito de saber as reais condições estruturais em que se encontram as pontes em estudo, fez-se uma vistoria ao local, e em seguida algumas observações sobre o aspecto estético da ponte. Por seguinte, buscou-se observar se algumas técnicas preventivas ou corretivas estavam sendo implementadas nas pontes em estudo, objetivando evitar o fenômeno da corrosão.

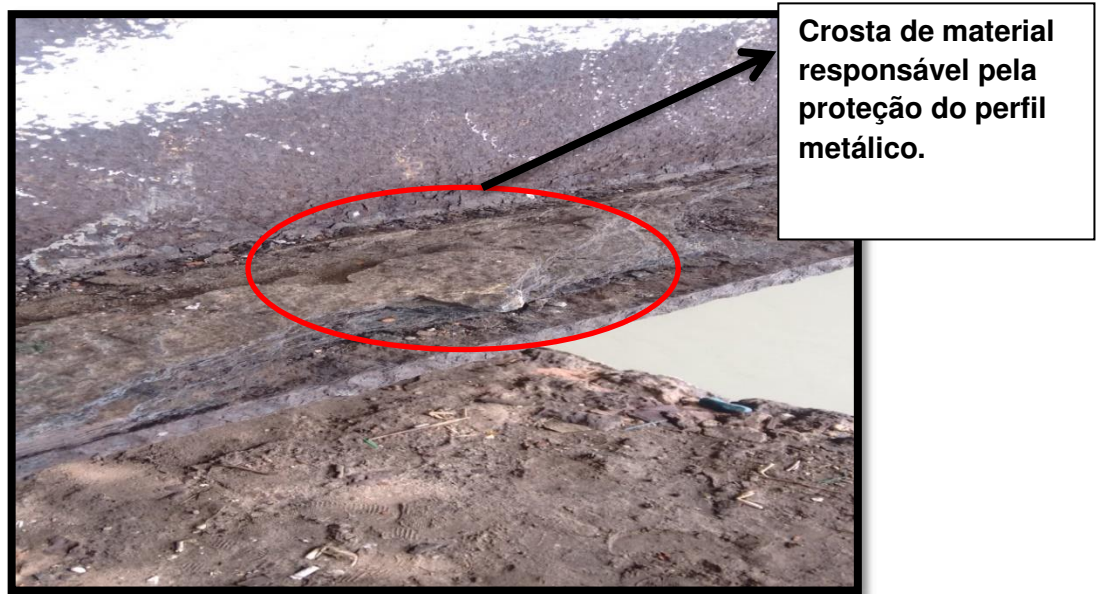
Para iniciar as observações nas pontes, tornou-se necessário fazer uma caracterização do ambiente no qual a ponte está exposta. Tendo em vista que no ambiente é litorâneo e de forte presença de nevoa salina que expõe a estrutura a uma contaminação constante de diversos sais como NaCl, $MgCl_2$, $MgSO_4$ por exemplo, pode-se caracterizar o ambiente como de agressividade forte, de acordo a NBR 6118.

4.1 Análise da Estrutura Metálica

Durante a vistoria ao local, observou-se, de acordo com a figura 15 que a parte metálica da ponte, que fica submersa dependendo da variação de maré, está submetida a ação de íons cloreto, entretanto essa crosta observada tem como objetivo proteger o perfil metálico da ponte da ação da corrosão, visto que esse aço, ASTM A588 possui elementos de liga que lhe conferem elevada resistência a corrosão, de acordo com o Engenheiro Civil, Professor Ivar Hortegal que acompanhou a execução da obra.

É importante enfatizar que em São Luís a umidade relativa situa-se geralmente na faixa de 80%, de acordo com o INPE e esse valor já afeta de forma significativa a velocidade carbonatação, que por sua vez irá favorecer a corrosão. Entretanto em condições de baixa umidade (inferiores a 50%) a carbonatação é menor, porque não haverá água para dissolver o CO_2 .

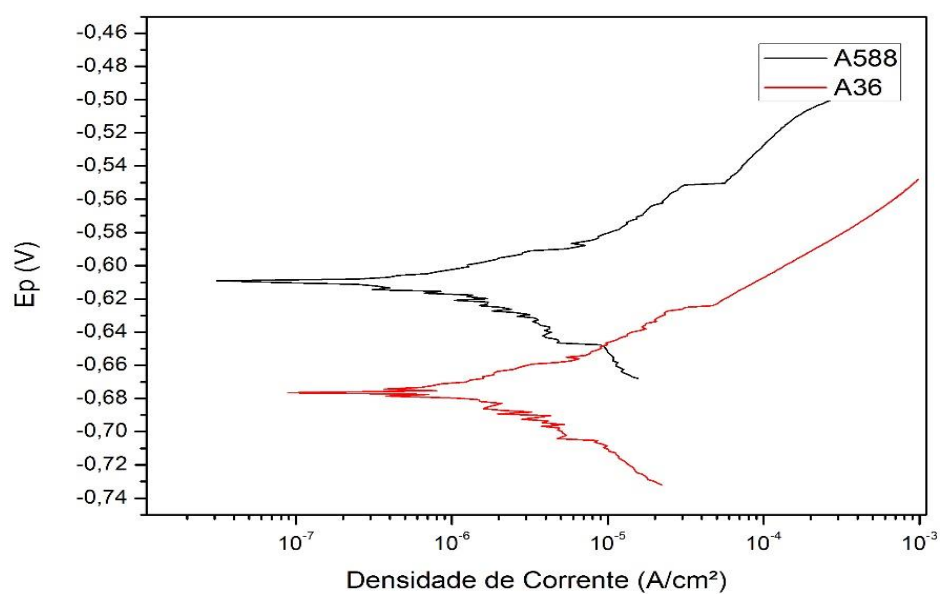
Figura 15. Crosta na estrutura metálica da ponte em constante contato com a água.



Fonte: Próprio do Autor.

A figura 16 mostra o resultado do ensaio da avaliação de susceptibilidade dos aços A36 e A588 a sofrerem o processo de corrosão.

Figura 16. Curvas de Polarização dos aços A36 e A588.



Fonte: Próprio do Autor.

De acordo com a análise do gráfico, podemos verificar que de fato, o melhor aço a ser utilizado na ponte, é o ASTM A588, visto que o mesmo necessita de um maior potencial para que ocorra a despassivação do mesmo, ou seja, para que o processo de corrosão se inicie. O que proporciona ao aço A588 alta resistência a corrosão, são alguns dos elementos de liga que o mesmo possui. Caso o aço utilizado fosse o ASTM A36, o processo de corrosão iria ser mais rápido, uma vez que o potencial necessário para a despassivação seria menor. Sabendo-se que o ambiente no qual a ponte se encontra é considerado agressivo, a corrosão iria afetar a resistência mecânica do aço A36, fazendo com que a possibilidade de falha estrutural aumentasse. A corrosão iria favorecer uma diminuição na rigidez do perfil metálico, visto que a mesma altera o módulo de elasticidade. Com isso teríamos uma diminuição na resistência a flexão do perfil, uma vez que a flecha é inversamente proporcional a rigidez “EI” do material.

4.2 Análise da Estrutura de Concreto

Ainda durante a vistoria ao local, fez-se um percurso ao longo das pontes, nos sentidos Caratatiua-Maranhão Novo e Maranhão Novo-Caratatitua, objetivando conhecer as reais condições estéticas da mesma e, de acordo com a figura 17, observou-se que em alguns pontos o concreto está danificado.

Um sintoma recorrente da corrosão por contaminação de cloretos segundo Gentil é a presença de uma coloração avermelhada junto a armadura, assim como mostra a figura 17.

Figura 17. Cabeceira da ponte danificada(Perda de Material)



Fonte: Próprio do Autor.

Essa perda de material está associada a dois fatores:

- a) Presença de umidade (Carbonatação);
- b) Presença de Sais (Íons cloreto), local pode ter ficado susceptível à corrosão devido a passagem de veículos, que gera vibração e origina fissuras.

Esses dois fatores contribuem de forma significativa no avanço do processo de corrosão, ainda mais em quando não há mais a cobertura e o aço fica exposto ao ambiente, assim como observamos na figura 17.

Ao longo das pontes, observou-se alguns pontos em que existiam fissurações, assim como mostra a figura 18, algo que é caracterizado como um dos sintomas da corrosão.

Figura 18. Fissuração



Fonte: Próprio do Autor.

Essa fissura no concreto é originada da seguinte maneira: Como resultado da corrosão, é originado o hidróxido de ferro, e dessa forma um volume maior será ocupado, proporcionando assim uma tensão interna, que origina a fissura, que pode ser agravado pela vibração originada pela passagem de veículos pela ponte.

Baseado no entendimento sobre a corrosão em estruturas de concreto e tendo-se definido o estado em que se encontra a ponte em estudo, torna-se possível saber como implementar as ações preventivas e corretivas necessárias para aumentar a vida útil da estrutura.

Uma vez que o ambiente onde a ponte está localizada é dado como agressivo, tornou-se possível estabelecer a condição de que o principal responsável pela corrosão da ponte em estudo, são os cloretos e a umidade relativa que contribui com o aumento da velocidade de carbonatação.

Ainda na visita na ponte buscou-se fazer registros fotográficos dos pilares da ponte que ficam em contato com a água do mar e que são de difícil acesso, dependendo das variações das marés, para obter os reais problemas estruturais gerados pela corrosão. O resultado está ilustrado na figura 19.

Figura 19. Trinca no pilar da ponte que fica em constante contato com a água do mar



Fonte: Próprio do Autor.

É importante enfatizar que em uma segunda vistoria na ponte, observou-se que algumas medidas preventivas e corretivas foram implementadas na parte superior da ponte, objetivando evitar o fenômeno da corrosão ou acabar com o mesmo. Dentre as medidas implementadas podemos destacar:

- a) **Corretivas:** Remoção do material deteriorado e sua devida reconstrução.
- b) **Preventivas:** Adição de tintas que protegem a estrutura de concreto contra a corrosão.

Entretanto, é importante ressaltar a necessidade de se implementar ações corretivas nos pilares da ponte, uma vez que de acordo com a inspeção visual realizada, constatou-se a existência de trincas em alguns pilares da ponte, trincas

que podem se agravar com o mecanismo da corrosão. As figuras a seguir mostram o real estado de alguns pilares:

Figura 20. Trincas se propagando em alguns pilares



Fonte: Próprio do Autor.

De acordo com a figura acima, pode-se observar que os mecanismos de corrosão causam perda de massa nos pilares de concreto, e isso irá favorecer uma redução da capacidade de carga dos pilares, fazendo assim com que a resistência a compressão axial diminua. Essa trinca é originada da seguinte maneira: Os íons cloreto penetram no concreto e fazem com que a armadura tenha reações de expansão na ordem de 15 Mpa e, dessa forma o concreto começa a trincar, perdendo massa, e tendo redução da área e consequentemente a sua capacidade de carga reduzida.

4.3 Comparação de Resultados

Com o propósito de ratificar os resultados encontrados nesse trabalho, fez-se uma análise comparativa com alguns estudos já feitos sobre o assunto em questão.

De acordo com um artigo “Corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado devido a carbonatação”, publicado na Revista online ipog Especialize (Dezembro de 2015), conclui-se que:

A corrosão das armaduras é a patologia mais recorrente nas estruturas de concreto armado, causando problemas tanto na estética, quanto na utilização e segurança das estruturas. O processo corrosivo se caracteriza por provocar a destruição do aço e, conseqüentemente danos estruturais como a diminuição da área de seção transversal, a perda de aderência entre o concreto e a armadura e a fissuração do concreto provocada pelo acúmulo de produtos de corrosão junto às barras de armadura – que podem levar ao deslocamento do concreto nos estágios mais avançados.

Nas estruturas de concreto armado, a corrosão é caracterizada por ser um processo eletroquímico. Que pode ser causado pela carbonatação, que provoca uma diminuição do pH causando por consequência a despassivação da armadura, por ação de íons cloretos contribuindo com a diminuição da resistividade do concreto e com o ataque da camada passivadora”

Baseado nessa análise comparativa, observa-se que neste trabalho a principal patologia que afeta a ponte que liga os bairros Caratitua-Maranhão Novo e Maranhão Novo- Caratatiua, também foi a corrosão. Nessa análise ficou evidente que o principal mecanismo de formação da corrosão também foram: ação íons cloreto e carbonatação.

Outra observação a ser feita é que as sintomatologias encontradas também são fissuração, perda de aderência entre o concreto e armadura, perda de material e exposição do aço à atmosfera, assim como podemos observar nos registros fotográficos.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Durante a realização deste trabalho, que iniciou-se com um levantamento bibliográfico para que fosse possível ter um entendimento de como ocorre a corrosão em estruturas de concreto e estrutura metálica, como ela se inicia e de que forma se propaga. Baseado nesse entendimento sobre a corrosão em estruturas de concreto e estruturas metálicas, tornou-se possível saber como implementar as ações preventivas e corretivas necessárias para aumentar a vida útil da estrutura.

Uma vez que o ambiente onde a ponte está localizada é dado como agressivo, tornou-se possível estabelecer a condição de que o principal responsável pela corrosão da ponte em estudo, são os cloretos e a umidade relativa que contribui com o aumento da velocidade de carbonatação.

Outro aspecto a ser observado é que a parte metálica da ponte que fica em contato com a água do mar (íons cloreto), dependendo da variação das marés, possui uma “crosta” que a protege da corrosão, visto que o material utilizado é de alta resistência a corrosão, o que faz com que o potencial necessário para que ocorra a despassivação da parte metálica seja alto. Algo que embora o ambiente seja classificado como agressivo, a probabilidade de ocorrência da corrosão é menor do que 10%, de acordo com a curva de polarização do aço ASTM A588 e com a ASTM C876 (1991).

Já os pilares da ponte que ficam em contato também com a água, dependendo da maré, apresentam trincas que podem levar ao colapso estrutural. Seria ideal fazer um ensaio para medir a capacidade de carga dos pilares mais críticos, porém não foi possível, em virtude da dificuldade de criar em laboratório um corpo de prova com tais características de trabalho. Entretanto fez-se um registro fotográfico e de acordo com a literatura, tornou-se possível estabelecer as causas das trincas existentes. Tendo em vista que o responsável pelas trincas nos pilares, é a reação de expansão da armadura, no momento em que a mesma é submetida a ação de íons cloretos.

Baseado no fato que a armadura é responsável pela trinca nos pilares de concreto, pois a mesma se expande e ocupa volumes maiores, gerando assim tensões de até 15 MPa, a geração de tecnologia adequada para aumentar a vida útil da ponte, baseado nos princípios de engenharia de materiais, seria adicionar

elementos de liga a armadura, a fim de aumentar a sua resistência a corrosão, fazendo assim com que os pilares não trinquem e consequentemente não tenham sua resistência a compressão reduzida.

Na última visita a ponte, observou-se que algumas medidas preventivas e corretivas foram implementadas, ações essas que eram condizentes com as propostas na literatura, tais como: Pintura das estruturas de concreto, remoção do material deteriorada e a correta substituição do mesmo. Porém, nos pilares que apresentam trincas, que ficam em pontos de difícil acesso da ponte, ainda não foram realizadas ações que objetivassem corrigir tal problema.

Os pontos críticos da ponte levantados nesse trabalho foram apresentados à SINFRA, para que ações corretivas fossem tomadas.

REFERÊNCIAS

AMERICAN Society for testing and materials . Annual book of ASTM Standards. Standard test for half-cell potentials of uncoated reinforcing steel in concret, **ASTM C876**, Philadelphia, 1991.

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

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

CALLISTER JÚNIOR, William D. **Ciência e Engenharia de Materiais: uma introdução**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Tecnicos e Cientificos Editora S.A, 2011.

CASCUDO, Oswaldo. Inspeção e Diagnóstico de estrutura de concreto com problemas de corrosão de armadura. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**. cap. 35, p.1071 – 1108. São Paulo: IBRACON, 2005. v. 2.

_____. **O controle da corrosão de armaduras em concreto – inspeção e técnicas eletroquímicas**. Goiânia, GO: Editora UFG, 1997. 237p.

CEBELCOR. **Lecciones de corrosión electroquímica**. 3 ed. Bruselas, 1974. 644 p. Engenharia), Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, 1995, 181 p.

FERREIRA, Rui Miguel. **Avaliação dos ensaios de durabilidade do betão.2000**. 246 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade do Minho, Braga, 2000.

FIGUEIREDO, Enio Pazini. Efeitos da carbonatação e de cloretos no concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, cap. 27, p. 829 – 855, São Pulo: IBRACON, 2005., v. 2.

FINCH,T. Non-destructive testing in building services – A general introduction, BSRIA-Building Services Research and Information Association, Technical Note TN 10/85, 1985, 22 p.

FREIRE, K.R.R. **Avaliação do desempenho de inibidores de corrosão em armaduras de concreto**. 2005. 211 p. Dissertação de mestrado. Universidade Federal do Paraná, 2005.

GARCIA, A.; SPIM, J.A.; SANTOS, C. A. dos. **Ensaio dos materiais**. Rio de Janeiro: LTC, 2000.

GERDAU. 2015. Disponível em: <www.gerdau.com.br>. Acesso em: 20 set. 2016.

GENTIL, V. **Corrosão**. 6. ed. Revisada. Rio de Janeiro: LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora, 2008.

_____. **Corrosão**. 4. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2003. 341p.

GONÇALVES, A.; ANDRADE, C.; CASTELLOTE, M. Procedimientos de reparación y protección de armaduras. **Manual de rehabilitación de estructuras de hormigón**. São Paulo: Editores Paulo Helene e Fernanda Pereira, 2003. p. 341-376.

JONES, Loretta; ATKINS, Peter. **Princípios de Química**. 5. ed. [S.l.]: Bookman Companhia, 2012.

KAEFER, Luis Fernando. **Considerações sobre a microestrutura do concreto**, Sd.

MAGNABOSCO R. Influência da microestrutura no comportamento eletroquímico do aço inoxidável UNS S31803 (SAF 2205).

MANUTENÇÃO de pontes e viadutos. Diário Comércio Indústria e Serviços, 2011. Disponível em: <<http://www.dci.com.br/opiniao/manutencao-de-pontes-e-viadutos-id260857.html>>. Acesso em: 20 ago. 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed.(Português) e 4. ed(Inglês) São Paulo: Editora Pini, 2014.

MONTEIRO, E. B. Reabilitação de estruturas de concreto. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, cap. 36, p.1109 – 1125. São Paulo: IBRACON, 2005. of stainless steels. Corrosion n.7, v. 42, jul.1986. p. 376-89.

PALACIOS M. P. G. **Emprego de ensaios não destrutivos e de extração de testemunhos na avaliação da resistência à compressão do concreto.** Brasília, 2012.

PANNONI, Fabio Domingos. **Fundamentos da corrosão.** 2008.

PAULON, Vladimir Antônio. A micro estrutura do concreto convencional. **Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações**, cap. 19, p.582 – 604, São Paulo: IBRACON, 2005.

PINTO, Evandro Sales. Perigo nas estruturas enterradas. **Revista recuperar nº 53**, Rio de Janeiro, Ed. Thomastec, 2003.

POLITO, G. **Corrosão em estruturas de concreto armado: causas, mecanismos, Prevenção e recuperação.** Minas Gerais: UFMG, 2006.

POURBAIX, M. **Atlas of electrochemical equilibria in aqueous solutions.** Brussels, 1987.

RODRIGUES, Joaquim. Bom concreto (armado) versus corrosão, **Revista recuperar nº 44**, Rio de Janeiro: Ed. Thomastec, 2001.

_____. E a recuperação do concreto da edificação?, **Revista recuperar nº 64**, p. 12-17, Rio de Janeiro: Ed. Thomastec, 2005.

SEDRIKS, A. J. Effects of alloy composition and microstructure on the pasivity
STANDARD Practice for Ultrasonic Pulse-Echo Straight-Beam Examination by the
Contact Method Annual book of astm standards. v. 03. Nondestructive Testing. West
Conshohocken: ASTM E 114-95, 1995, 920 p.

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

UEDA, T.; TAKEWAKA, K. Perfomance-based Standar Specifications for
Maintenance and Repair of Concrete Structures in Japan. Structural Engeneering
International, v. 4, p. 359, 2007.

VLACK, L.H. VAN. **Propriedades dos Materiais Cerâmicos.** São Paulo: Universidade de São Paulo, 1973.