

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE MATERIAIS E CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ESPECIALIZAÇÃO EM CONSTRUÇÃO CIVIL**

Dyrant de Almeida Paio

**DIAGNÒSTICO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO POR POTENCIAL DE CORROSÃO (HALF-CELL
POTENTIAL)**

**Belo Horizonte
2024**

Dyrant de Almeida Paio

**DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE
CONCRETO ARMADO POR POTENCIAL DE CORROSÃO (HALF-CELL
POTENTIAL)**

Monografia apresentada ao Curso de Especialização
em Construção Civil, da Escola de Engenharia da
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

Orientadora: Danielle Meireles de Oliveira

**Belo Horizonte
2024**

P148d

Paio, Dyrant de Almeida.

Diagnóstico e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado por potencial de corrosão (*Half-Cell Potential*) [recurso eletrônico] / Dyrant de Almeida Paio. - 2024.

1 recurso online (30 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Danielle Meireles de Oliveira.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG.

Bibliografia: f. 29-30.

1. Construção civil. 2. Diagnóstico. 3. Concreto Armado. 4..Testes não destrutivos. 5. Corrosão. 6. Viabilidade econômica. I. Oliveira, Danielle Meireles de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 691



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: DYRANT DE ALMEIDA PAIO

MATRÍCULA: 2022698856

RESULTADO

Aos 22 dias do mês de agosto de 2024 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:
"DIAGNÓSTICO E MONITORAMENTO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO POR POTENCIAL DE CORROSÃO (HALF-CELL POTENTIAL)"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 85

CONCEITO: B

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Profª. Drª. Danielle Meireles de Oliveira

Assinatura

Danielle Meireles de
Oliveira:04897576695

Assinado de forma digital por
Danielle Meireles de
Oliveira:04897576695
Dados: 2024.08.22 12:35:50 -03'00'

Nome

Profª. Drª. Sidnea Eliane Campos Ribeiro

Assinatura

gov.br

Documento assinado digitalmente
SIDNEA ELIANE CAMPOS RIBEIRO
Data: 22/08/2024 12:55:22-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E AVALIAÇÕES NAS CONSTRUÇÕES"

Belo Horizonte, 22 de agosto de 2024

Antonio
Neves de
Carvalho Jr

Assinado de forma
digital por Antonio
Neves de Carvalho Jr
Dados: 2024.08.23
02:10:33 -03'00'

Coordenador do Curso

Agradecimentos

Agradeço a Deus pelo dom da inteligência e sabedoria, aperfeiçoados nesse curso de especialização.

Agradeço a minha família pelo apoio e confiança depositadas.

Agradeço aos professores pela dedicação no curso em especial minha orientadora Danielle Oliveira.

Aos colegas que dividiram esse tempo e espaço na busca pelo aperfeiçoamento do conhecimento.

Resumo

O desenvolvimento do processo corrosivo desencadeado nas armaduras de concreto armado é um processo conhecido, estudado há décadas, infelizmente com pouca atenção dada pela maioria dos usuários no Brasil devido aos custos envolvidos no processo. O estudo dos mecanismos de diagnóstico e monitoramento é um tema de grande preocupação no mundo devido à deterioração das estruturas com o passar dos anos. O desencadeamento de processos corrosivos pode ocorrer de diversas formas, associado ou não a ações de deterioração física e mecânica. Este trabalho mostra como ocorre o diagnóstico, monitoramento por ensaio não destrutivo e a viabilidade econômica da corrosão em estruturas de concreto armado por carbonatação e ataques de íons cloretos. Para o presente estudo, foram realizadas pesquisas bibliográficas em livros, artigos, teses e dissertações, contato com empresas de diagnóstico de patologia e consultoria, tabulação de dados para a elaboração do texto final. Os resultados obtidos mostraram diferença de cerca de 73% de economia para o usuário caso seja feita o monitoramento por Potencial de Corrosão (*Half-Cell Potential*) de forma precoce.

Palavras-chave: Corrosão, Diagnóstico, Concreto Armado, Ensaio não destrutivo, Potencial de Corrosão

Abstract

The development of the corrosive process originating in reinforced concrete steel bars is a known process, studied for decades, unfortunately with little attention given by most users in Brazil due to the costs involved in the process. The study of diagnostic and monitoring mechanisms is a topic of great concern in the world due to the deterioration of structures over the years. Corrosive processes can occur in different ways, associated or not with physical and mechanical deterioration. This work shows how the diagnosis, monitoring by non-destructive testing and the economic viability of corrosion in reinforced concrete structures due to carbonation and attacks by chloride ions occur. For the present study, bibliographical research was carried out in books, articles, theses and dissertations, contact with pathology diagnosis and consultancy companies, data tabulation for the preparation of the final text. The results obtained showed a difference of around 73% in savings for the user, if monitoring by Corrosion Potential (Half-Cell Potential) is carried out early.

Keywords: Corrosion, Diagnosis, Reinforced Concrete, Non-destructive testing, Corrosion Potential

Lista de Figuras

<i>Figura 1 - Representação de um pilha eletroquímica de corrosão em um mesmo metal</i>	<i>12</i>
<i>Figura 2 - Configuração de circuito para determinação de Potencial de Corrosão.</i>	<i>16</i>
<i>Figura 3 - (a) Esquema de medida de resistência por polarização linear (b) circuito equivalente</i>	<i>16</i>
<i>Figura 4 - Aparelhagem para medição da resistividade elétrica do concreto</i>	<i>17</i>
<i>Figura 5 - Diagrama de Nyquist, com seu circuito equivalente, mostrando o efeito da impedância disfuncional</i>	<i>17</i>
<i>Figura 6 - Ilustração do mecanismo de corrosão eletroquímica por ataque de íons cloreto.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 7 - Ilustração de sensor galvânico instalado no interior de corpo de prova.....</i>	<i>18</i>
<i>Figura 8 - Ensaio por velocidade de pulso ultrassônico</i>	<i>19</i>
<i>Figura 9 - (a) Fotografia digital de viga (b) termograma de viga.....</i>	<i>19</i>
<i>Figura 10 - Fluxograma metodológico para a elaboração do trabalho de pesquisa.....</i>	<i>21</i>
<i>Figura 11 - Fluxograma de eventos para a obra de recuperação estrutural</i>	<i>22</i>
<i>Figura 12 - Viga na extremidade do fundo de garagem com destacamento de concreto sem revestimento mínimo e armadura sob efeito severo de corrosão</i>	<i>26</i>

Lista de Tabelas

<i>Tabela 1 - Probabilidade de ocorrência de corrosão ASTM C-876/91</i>	<i>20</i>
<i>Tabela 2 - Encargos sociais em sentido estrito</i>	<i>26</i>
<i>Tabela 3 - Custos indiretos considerados</i>	<i>27</i>
<i>Tabela 4 - Orçamento de custo de manutenção de uma viga monitorada e não monitorada contra corrosão ...</i>	<i>28</i>

Sumário

1. Introdução	1
2. Revisão Bibliográfica.....	12
2.1 Corrosão em armaduras de concreto armado por ataques de íons cloretos... 12	
2.2 Corrosão em armaduras de concreto armado por carbonatação	14
2.3 Monitoramento de estruturas contra processos de corrosão em estruturas de concreto armado	15
2.4 Técnica de monitoramento de corrosão em estruturas de concreto armado por Potencial de Corrosão (Half-Cell Potential).....	19
2.4 Orçamentação envolvida no processos de diagnóstico de detecção de corrosão em estruturas de concreto armado por Potencial de Corrosão.....	20
3. Metodologia.....	21
4. Resultados e Discussões.....	22
4.1 Estudos das Condicionantes	22
4.1.2 Composição dos custos	23
4.1.2.1 Custo do material	24
4.1.2.2 Levantamento de quantitativos	24
4.1.2.3 Custo da mão de obra.....	24
4.1.2.4 Custo do aluguel dos equipamentos para ensaio de potencial de corrosão	25
4.1.3 Composição dos custos indiretos	25
4.1.3.1 Custos indiretos para o canteiro nas situações da corrosão monitorada e não monitorada	25
4.1.4 Fechamento do Orçamento.....	27
5. Considerações Finais	29
Referências Bibliográficas	30

1. Introdução

Os efeitos da corrosão em estruturas de concreto armado causam anualmente gastos públicos e privados expressivos devido principalmente ao envelhecimento das estruturas ou a falha de projeto, execução ou utilização indevida das estruturas. Devido a Vida Útil de Projeto (VUP) estar relacionada ao início da corrosão, até então, o monitoramento contra a corrosão não significava preocupação pelos usuários. Com o passar dos anos, na medida que uma grande quantidade de estruturas construídas começou a apresentar a patologia, verificou-se a necessidade de estudo e aprofundamento do assunto, devido aos problemas de segurança que esse processo degradativo tem o poder de causar.

Corrosão em estruturas de concreto armado reside no fato das características intrínsecas e extrínsecas dos materiais e elementos químicos envolvidos no processo serem alteradas. Elas podem ser generalizadas, por carbonatação, localizadas por íons cloretos, ou ataques de sulfatos no concreto. A corrosão é um processo em que ocorre a redução da massa do aço no concreto armado pela produção de óxido de ferro. Devido ao princípio da matéria sempre procurar o estado de menor energia o processo da corrosão ocorre de forma natural, sendo acelerado por processos eletroquímicos ou aqueles que ocorrem em meio aquoso.

Os processos de formação dos produtos da corrosão ocorrem por processos químicos e eletroquímicos de forma não linear. Pilhas eletroquímicas formam-se em sentido longitudinal na barra de aço caracterizando corrosão uniforme, mas podem ocorrer também corrosões localizadas (pite) de diferentes modos e intensidades. Tudo isso ocorre devido à grande variabilidade do ambiente do concreto armado em termos de porosidade ou de agentes agressivos como os carbonatos e os cloretos. As reações de oxidação e consequente deposição dos produtos de corrosão dependerão necessariamente da sua localização na estrutura.

Em nível nacional, ainda são poucos os dados disponíveis. O levantamento de manifestações patológicas realizado por Dal Molin (1988), no Rio Grande do Sul, mostra que apenas 11% do total de problemas patológicos em edificações encontrados, referem-se a corrosão de armaduras. Essa porcentagem sobe para 40% quando analisada segundo a gravidade e implicações na segurança estrutural. Magalhaes et al. (1989), da Divisão de Obras de Arte da Prefeitura de São Paulo, realizaram vistoria em 145 viadutos e pontes, classificando 22 como de alto risco e 18 como risco médio, sendo que 58% apresentavam problemas de corrosão de armadura. Esses dados reforçam o estudo sistemático das patologias das construções no Brasil a partir dessa época e principalmente na atualidade.

O diagnóstico, mesmo que tardio dessa patologia é importante, mas oneroso para o proprietário, devido aos elevados custos de manutenção envolvidos no processo. A identificação de processos de corrosão precoce pode levar a uma economia substancial para o proprietário. Apesar disso, o monitoramento da corrosão de armaduras é baixo no Brasil devido à falta de tecnologias disponíveis aliada à falta de investimentos.

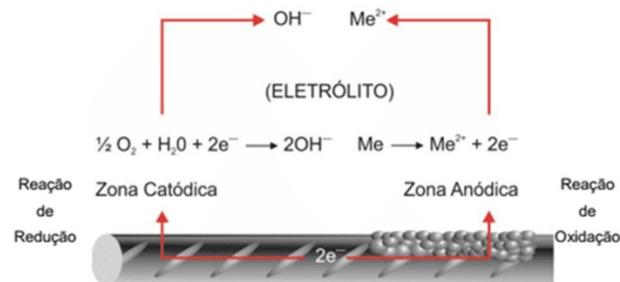
Como será demonstrado nesse trabalho, uma opção viável é o monitoramento da corrosão por Potencial de Corrosão, método de monitoramento, devido ao baixo custo de aplicação. Além disso, pode ser utilizado como método de monitoramento contínuo apesar de algumas deficiências. Mendeiros et al. (2017) discutem proposições relevantes e insuficientes desse processo de monitoramento. O método consiste na medição do equilíbrio entre a corrente anódica e a corrente catódica, sujeitas à polarização, devido a célula de corrosão tender a atingir um estado eletroquímico estacionário. Após a identificação de um determinado valor de diferença de potencial (d.d.p), constata-se a probabilidade de corrosão e procede-se com a manutenção imediata ou não.

Dessa forma, esse trabalho se propõe a apresentar o diagnóstico eletroquímico da corrosão em estruturas de concreto armado em situações de carbonatação e ataques de íons cloretos, a técnica de monitoramento de corrosão por Potencial de Corrosão (Half-Cell Potential) e a relação custo-benefício da sua utilização preventiva.

2. Revisão Bibliográfica

De acordo com Ribeiro et al. (2018), para ocorrer uma reação eletroquímica é preciso ocorrer a transferência de elétrons em um meio, no caso um metal, denominado eletrodo. A corrosão se inicia com um agente oxidante que chega até o metal através de um meio que pode ser a água, denominada eletrólito, provocando uma zona anódica, fazendo essa região oxidar (dissolução do metal), ao mesmo tempo em que ocorre a transferência dos elétrons remanescentes para a zona catódica da célula, fazendo essa região reduzir, como pode ser observado na Figura 1. Para ocorrer a reação de redox é preciso haver sempre um fluxo de agente oxidante (corrente catódica) e um fluxo de cátion metálico (corrente anódica) em direção ao meio corrosivo. Esse processo é descrito como pilha eletroquímica.

Figura 1 - Representação de um pilha eletroquímica de corrosão em um mesmo metal



Fonte: Adaptado de Cascudo (1997)

Helene, (1999) discute que na armadura de aço pilhas não são formadas em sequência com o mesmo potencial, mas em sequências de potenciais elétricos diferentes devido à grande quantidade de variações do meio como alcalinidade, acidez, álcalis, oxigênio, íons cloretos, entre outros. Pelo mesmo motivo vários tipos de corrosão podem ocorrer simultaneamente.

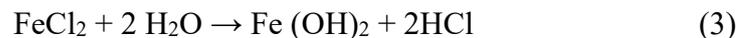
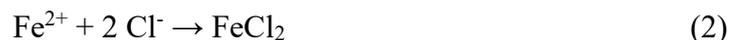
2.1 Corrosão em armaduras de concreto armado por ataques de íons cloretos

Mehta et al. (1994) mostram que a corrosão por ação de cloretos são aquelas em que íons cloretos Cl^- advindas de diversas fontes, como atmosferas marítimas, são introduzidos nos poros do concreto, podendo alcançar a armadura. De acordo com o American Concrete Institute (ACI, data) a corrosão por adição de cloretos pode ocorrer de três formas:

- Teoria da adsorção: íons adsorvidos na superfície metálica em competição com o oxigênio dissolvido ou com íons hidroxila.
- Teoria do filme óxido: íons cloreto penetram no filme óxido passivante sobre o aço, através de poros ou defeitos ou através de dispersão coloidal.
- Teoria de complexo transitório: Íons Cl^- competem com os íons hidroxila (OH^-), para a produção dos íons ferrosos.

Para Alhozaimy et al. (2014) fases de óxidos instáveis se desenvolvem no filme passivo devido à adsorção de íons cloreto no filme passivo instável. Após penetrarem nos poros do concreto, o agente oxidante íons cloretos, água e oxigênio alcançam a camada passivadora produzindo corrosão localizada denominada corrosão por pite. Quando a camada passivadora do aço é destruída, o processo de corrosão se inicia e os íons cloreto ativam a superfície do aço, formando uma zona anódica, na qual ocorrem as reações apresentadas nas 1,2 e 3.:

Reação de oxidação do Ferro:



O processo de despassivação pela penetração de cloretos consiste na reação do ânion cloro com o cátion ferro proveniente dos óxidos que formam a camada de passivação, óxido férrico (Fe_2O_3) e óxido ferroso (FeO), entretanto, o produto formado é solúvel. O produto é removido do filme de proteção, criando áreas expostas. Matos, Oswaldo Cascudo (1999) esclarecem que os íons cloreto contribuem para que a zona anódica tenha o seu pH reduzido, mas a liberação de hidróxidos, devido às reações catódicas, aumenta o pH dessas áreas. Assim a corrosão por pites diminui o pH das zonas anódicas e aumenta o pH das zonas catódicas próximas. Os íons cloreto podem ser encontrados no interior do concreto em três diferentes formas.:

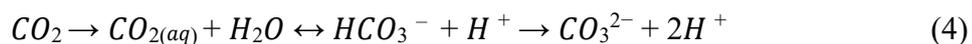
- a) **Cloroaluminatos:** São incorporados aos produtos da hidratação do cimento e retida por adsorção física à superfície dos poros capilares de gel e cloretos livres dissolvidos na solução dos poros.
- b) **Cloretos livres:** Se encontraram sob a forma iônica na solução intersticial (cloretos solúveis em água);
- c) **Cloretos totais:** “cloretos fixos” ou “cloretos quimicamente ligados”, incluindo os íons fortemente adsorvidos ao CSH, bem como os que se encontram quimicamente ligados à matriz cimentícia sob a forma de cloro aluminatos;

2.2 Corrosão em armaduras de concreto armado por carbonatação

Acreu, Aguida Gomes (2004) discorrem que corrosão por carbonatação é aquela em que gases como gás carbônico CO_2 dióxido de enxofre SO_2 , ou gás sulfídrico H_2S , reduzem o pH da estrutura ao reagirem com hidróxido de cálcio $CaCO_3$, como apresentado nas equações 4,5,6,7 e 8.:

A difusão ocorre em quatro etapas:

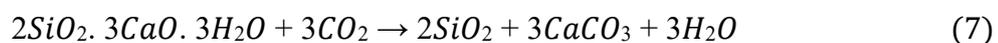
1ª etapa: Difusão para o interior do concreto



2ª etapa: Formação do carbonato de cálcio



3ª etapa: Reação com silicatos e aluminatos



4ª etapa: Precipitação do carbonato de cálcio e a produção de água



Após a introdução de dióxido de carbono nos poros de concreto, esse reage com a água produzindo íons bicarbonatos que reagirão com íons cálcio na formação de carbonato de cálcio, que por sua vez, reduzirá pH do concreto e conseqüentemente reduzirá a capacidade da camada passivadora do aço de proteger o aço.

2.3 Monitoramento de estruturas contra processos de corrosão em estruturas de concreto armado

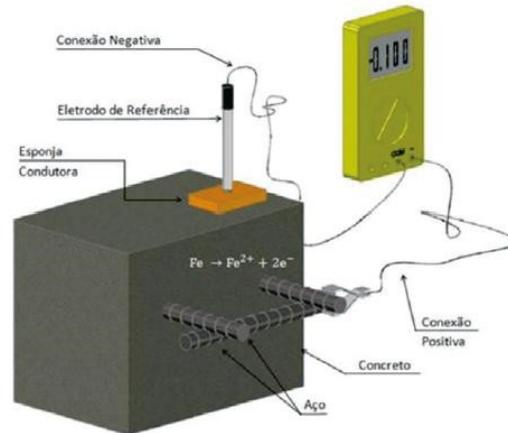
O monitoramento das estruturas de concreto armado contra corrosão pode ser executado através de métodos diretos e indiretos, tecnologias ópticas ou eletroquímicas. Os métodos diretos, destrutivos, referem-se a elementos de aço (concretados juntos com o elemento estrutural), a fim de fazer a sua retirada posterior para se verificar a massa perdida durante um espaço de tempo. Por outro lado, os métodos indiretos, podem ser destrutivos ou não destrutivos, baseados na condução da corrente elétrica circulante no sistema. Os métodos ópticos utilizam ondas acústicas ou magnéticas emitidas pelos processos corrosivos para a sua apuração, já os métodos eletroquímicos, situação desse trabalho, consideram a corrente elétrica circulante para constatação do processo de corrosão.

Para os métodos indiretos, situação de maior aplicação, podem ser citados:

a) Potencial Eletroquímico (Half-Cell Potential)

Calcula a diferença de potencial elétrico entre um eletrodo de referência e a armadura de aço. É um método não destrutivo. Para tanto é preciso que haja um eletrodo o qual se deseja se calcular o potencial elétrico, um eletrodo de referência e uma solução eletrolítica de acordo com a Figura 2:

Figura 2 - Configuração de circuito para determinação de Potencial de Corrosão.

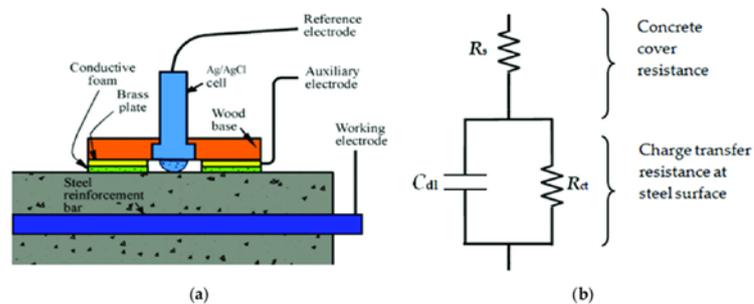


Fonte: Rocha (2012).

b) Resistência de Polarização Linear (Linear Polarization Resistance, LPR)

Descarga elétrica na armadura de aço de forma direta para calcular a resposta eletroquímica (Figura 3). Consiste em um método não destrutivo.

Figura 3 - (a) Esquema de medida de resistência por polarização linear (b) circuito equivalente

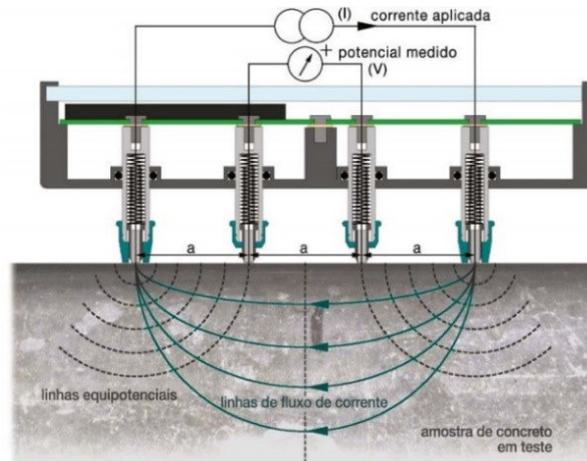


Fonte: Mehdi Nikoo et al. (2017)

c) Resistividade Elétrica do Concreto

Através do cálculo da resistividade elétrica do concreto, pode ser relacionada de forma inversa a ocorrência de corrosão na armadura, Figura 4. Consiste em um método não destrutivo.

Figura 4 - Aparelhagem para medição da resistividade elétrica do concreto

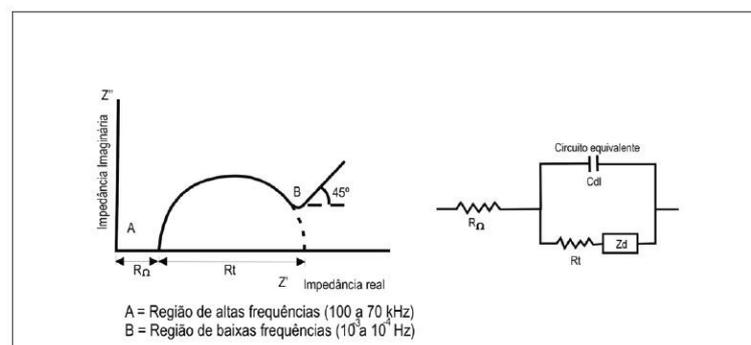


Fonte: Adaptado de Proceq (2017)

d) Técnicas de Impedância Eletroquímica (Electrochemical Impedance Spectroscopy, EIS)

Cálculo da impedância do sistema eletroquímico para análise da ocorrência de corrosão nas armaduras do concreto (Figura 5). Consiste em um método não destrutivo.

Figura 5 - Diagrama de Nyquist, com seu circuito equivalente, mostrando o efeito da impedância disfuncional

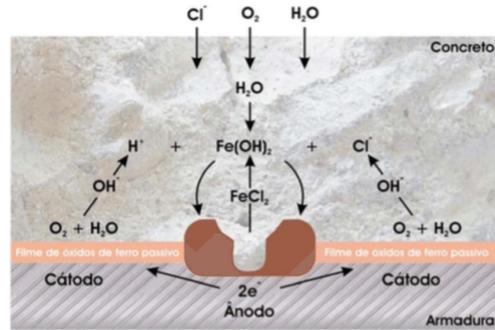


Fonte: Ribeiro et al. (2013).

e) Análise de Cloretos no Concreto

Calcula a concentração de íons cloretos no concreto. Através de uma relação diretamente proporcional pode-se aferir a probabilidade da ocorrência de corrosão (Figura 6). Consiste em um método destrutivo.

Figura 6 - Ilustração do mecanismo de corrosão eletroquímica por ataque de íons cloreto.

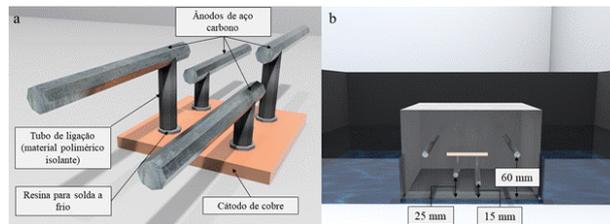


Fonte: Cascudo, (1997)

f) Sensores de Corrosão Embutidos

Sensores concretados junto à peça estrutural do concreto com a finalidade, de forma remota, de verificar os níveis de cloro, pH, cloretos e umidade, (Figura 7). Consiste em um método não destrutivo.

Figura 7 - Ilustração de sensor galvânico instalado no interior de corpo de prova



Fonte: Valdés et al. (2021)

g) Ultrassom (Ultrasonic Pulse Velocity)

Realizado através de amplificadores de ondas para comparação de parâmetros pré-estabelecidos a ocorrência e a severidade do processo corrosivo (Figura 8). Consiste em um método não destrutivo.

Figura 8 - Ensaio por velocidade de pulso ultrassônico



Fonte: Olson Engineering (2022).

h) Termografia Infravermelha

Através da detecção de fissuras no concreto, verifica a probabilidade da ocorrência de corrosão no ponto analisado (Figura 9). Consiste em um método não destrutivo.

Figura 9 - (a) Fotografia digital de viga (b) termograma de viga



Fonte: Washer, (2012)

2.4 Técnica de monitoramento de corrosão em estruturas de concreto armado por Potencial de Corrosão (Half-Cell Potential)

Riberito, et al. (2018) descrevem que a medida do Potencial de Corrosão se caracteriza pela reação do metal com o meio onde está inserido, no caso abordado o concreto armado. A ASTM, em sua norma C – 876/91 (Standard test method for corrosion potential of uncoated reinforced steel concrete) (Tabela 1), apresenta como critério de avaliação da corrosão intervalos de potenciais e a probabilidade da ocorrência da corrosão com o eletrodo de referência calomelano saturado.

Tabela 1 - Probabilidade de ocorrência de corrosão ASTM C-876/91

Calomel	Corrosion condition
> -0.12 V	Low ((10 %) risk of corrosion)
-0.12 to -0.276 V	Intermediate corrosion risk
< -0.276 V	High ((> 90%) risk of corrosion))
< -0.426 V	Severe corrosion

Fonte: ASTM C-876/91

O seguinte procedimento é determinado para a realização do ensaio de Potência de Corrosão de acordo com a ASTM (Preparing, cleaning, and evaluating corrosion test specimens): Primeiramente faz-se a limpeza da barra de aço em solução de ácido clorídrico 1:1 contendo 3,5g /L de hexametilenotetramina, para retirada da carepa de laminação, de presença comum na superfície de aços CA -50, além das remoções do óxidos presentes, sem atacar o metal. Posteriormente a lavagem e escovação com cerdas plásticas em água corrente, complementando o procedimento anterior. Logo após, faz-se a limpeza com acetona, para limpeza de gorduras e melhor evaporação da água. A seguir, secagem com jato de ar quente. Em seguida faz-se o aferimento do Potencial de Corrosão tendo como referência o eletrodo de calomelano saturado.

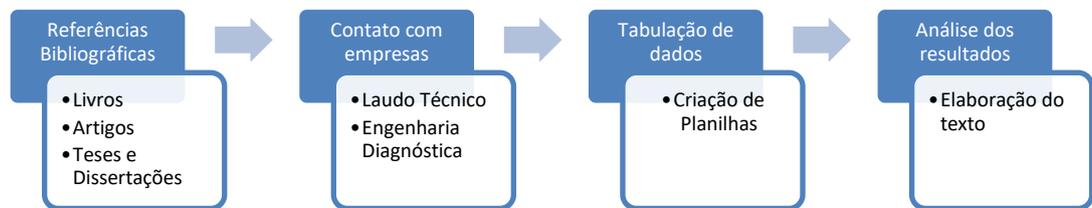
2.4 Orçamentação envolvida no processos de diagnóstico de detecção de corrosão em estruturas de concreto armado por Potencial de Corrosão

A NBR 5674 (2012) preconiza que os custos envolvidos no processo de diagnóstico de processos corrosivos se referem aos custos de elaboração de laudo técnico e na manutenção da edificação. Coêlho, (2001) descreve que para a elaboração do laudo técnico, além dos honorários dos técnicos alocados, pode ser necessária a realização de ensaios in loco ou de laboratório para auferir as medidas necessárias. Cardoso, (1999) mostra que os parâmetros observados em campo, são aqueles descritos nas normas técnicas além de procedimentos padrões de análise. Para edificações, escopo desse trabalho, será discriminada apenas uma viga com sua forma própria de manutenção. Além dos custos dos honorários e ensaios, os custos de manutenção são variáveis de acordo com a extensão do dano. De acordo com a NBR 12721 (2006), para fins de abordagem quantitativa, deve ser feita abordagem unitária dos valores.

3. Metodologia

Os procedimentos metodológicos utilizados neste trabalho estão relacionados nas seguintes etapas: Levantamento do material bibliográfico para sistemas de corrosão e recuperação de estrutura e concreto armado; Contato com empresas para pesquisa econômica dos custos do diagnóstico de corrosão por Potencial de Corrosão em estágio inicial e usual; Tabulação dos dados; Análise dos resultados e elaboração do texto. As etapas desenvolvidas encontram-se apresentadas na figura 10.:

Figura 10 - Fluxograma metodológico para a elaboração do trabalho de pesquisa



Fonte: O autor

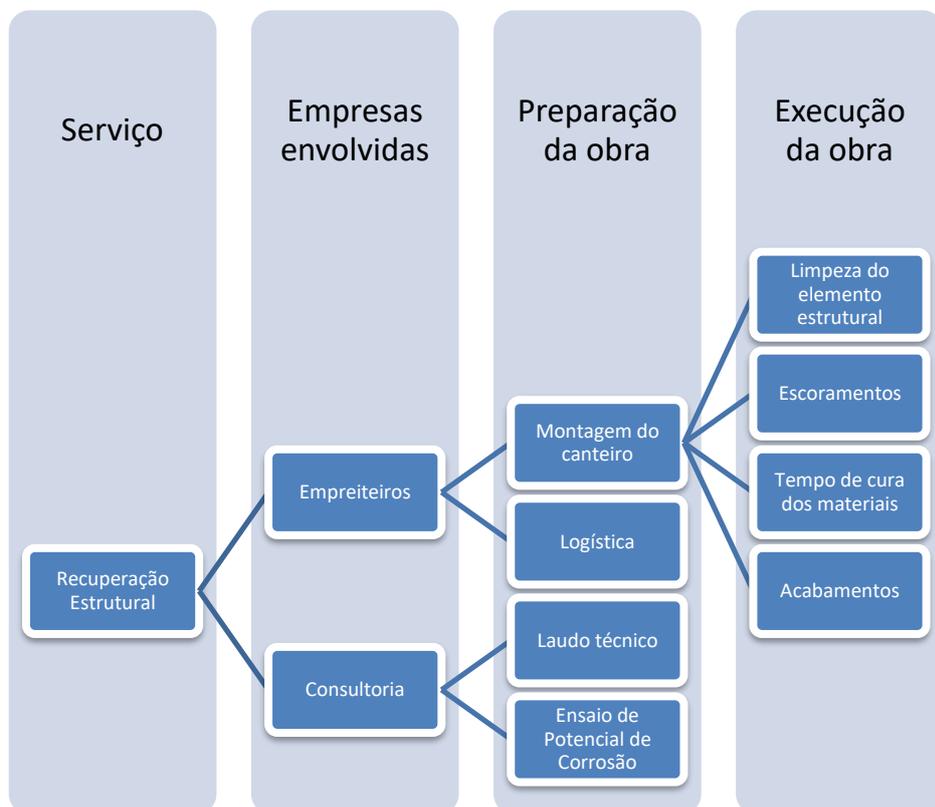
4. Resultados e Discussões

Orçamentação é o processo no qual se somam custos diretos e indiretos envolvidos na composição do preço final de um serviço. Para se criar a comparação orçamentária, objeto desse estudo, analisando as vantagens em se usar o monitoramento da corrosão em estágios iniciais, serão definidos dois orçamentos hipotéticos com base na teoria da orçamentação. Um para o estágio monitorado a curto prazo, outro para o estágio não monitorado a longo prazo. Para o diagnóstico e composição de custo será considerada apenas a corrosão por processos de carbonatação.

4.1 Estudos das Condicionantes

Para o estudo das condicionantes foram consideradas as etapas envolvidas na obra de recuperação da estrutura que evoluem a delimitação do serviço, as empresas envolvidas, a preparação da obra de recuperação e a execução da obra. Essas etapas são descritas na Figura 11.:

Figura 11 - Fluxograma de eventos para a obra de recuperação estrutural



Fonte: O Autor

4.1.1 Delimitação da atividade de diagnóstico e manutenção

Para fins de comparação de valores para recuperação em estágios iniciais com pequenas deteriorações até estágio de deteriorações maiores, para um mesmo elemento, será feita nesse trabalho suposição empírica para ambos os casos em relação ao dano. O estudo considerou as situações para orçamentação de uma viga real não monitorada vistoriada, bem como, para a hipótese caso tivesse sido monitorada.

a) Estudo monitorado

- O estudo monitorado da corrosão consiste na análise da ocorrência de corrosão na viga do edifício A (Figura 12) caso tivesse sido constatada, por hipótese, através do monitoramento de potencial de corrosão a d.d.p = $<-0,276V$;
- A data contratual considerada é de 7 dias de obra (aproximadamente 10 horas de trabalho);
- É necessária 1 visita técnica;

b) Estudo não monitorado

- O estudo não monitorado consiste na análise da viga descrita no laudo técnico do edifício onde se constatou a viga bastante deteriorada com potencial de corrosão d.d.p = $<-0,426V$;
- A data contratual é de 7 dias de obra (aproximadamente 15 horas de trabalho);
- É necessária 1 visita técnica;

4.1.2 Composição dos custos

A composição dos custos leva em consideração os custos diretos, como a delimitação da atividade de diagnóstico, quantitativos, custo da mão de obra, custo do material, custo dos

ensaios de potencial de corrosão, bem como, custos indiretos (BDI - Bonificação de Despesas Indiretas)

4.1.2.1 Custo do material

Para a definição de qual material comprar e onde comprar é preciso levar em consideração as diferenças regionais para a formação dos preços dos insumos. Quantidade, prazo de entrega, condições de pagamento, local, condições da entrega e imposto (ICMS) refletem a realidade do preço de cada insumo e devem ser levados em consideração na elaboração do orçamento.

4.1.2.2 Levantamento de quantitativos

O levantamento dos quantitativos leva em conta a geometria das peças envolvidas na orçamentação onde se considera dados como superfície, área e volume, bem como as características próprias de cada material como sua capacidade higroscópica. Além disso também as quantidades mínimas disponibilizadas pelo mercado são levadas em consideração. Para o presente estudo serão considerados as quantidades mínimas para a hipótese monitorada de corrosão e intermediária para a obra de manutenção da situação da viga real.

4.1.2.3 Custo da mão de obra

Os custos da mão de obra são aqueles em que além do salário base do trabalhador incidem encargos sociais e trabalhista impostos pela legislação. Para o estudo da hipótese da viabilidade monitorada e não monitorada serão considerados encargos com regime de contratação horista, conforme apresentado na Tabela 2.

Para 10 horas de trabalho (hipótese monitorada)

Pedreiro: R\$ 6 + 6x1,9535 (encargos horista) = 17,721

Custo total: R\$ 17,721x10 = 177,21

Para 15 horas de trabalho (corrosão real)

Pedreiro: R\$ 6 + 6x1,9535 = 17,721

Custo total: R\$ 17,721x15 = 265,82

4.1.2.4 Custo do aluguel dos equipamentos para ensaio de potencial de corrosão

O regime de aluguel do equipamento será contratado com o técnico operador.

Os custos foram simplificados pela consulta a duas empresas do setor por ponto de medição:

- Empresa A: R\$ 800,00

- Empresa B: R\$ 3000,00

Para o diagnóstico da hipótese de corrosão monitorada será adotado 1 ponto de medição sendo escolhida a empresa A para o serviço: $1 \times R\$800,00 = R\$800,00$

Para o diagnóstico da corrosão real serão adotados 4 pontos de medição sendo escolhida a empresa A para o serviço: $4 \times R\$800,00 = R\$3200,00$

4.1.3 Composição dos custos indiretos

O custo indireto é aquele que não aparece nas composições de custo unitário ou pode aparecer diluído em porcentagem de BDI (Bonificação de Despesas Indiretas). Ele reflete despesas como administrativas, consultorias, viagens, fatores imprevistos, dentre outros. No presente estudo a complexidade de acesso para medição do potencial é um exemplo de custo indireto a ser considerado, além do consumo de água e energia para a realização dos serviços da obra de manutenção.

4.1.3.1 Custos indiretos para o canteiro nas situações da corrosão monitorada e não monitorada

Os custos indiretos referem-se às etapas para a realização da obra de manutenção. O custo de todos os processos e equipamentos referidos na Tabela 3, podem ser calculados por precificação usual do mercado, valores unitários (hora, dia, mês), bem como, podem ser contratados à terceiros ou pertencentes ao próprio contratante. Para esse trabalho será adotado média usual de 20% do valor dos custos diretos a serem acrescidos sobre cada item do custo

direto. Ressalta-se que todos os processos e equipamentos descritos na Tabela 3 podem ser ou não realizados, sendo necessário observar o andamento da obra.

Figura 12 - Viga na extremidade do fundo de garagem com destacamento de concreto sem cobrimento mínimo e armadura sob efeito severo de corrosão



Fonte: Laudo de empresa emitido para a o edifício A

Tabela 2 - Encargos sociais em sentido estrito

Encargos sociais em sentido estrito: horista (%)		
A	Encargos sociais básicos	37,8
B	Encargos trabalhistas	50,43
C	Encargos Indenizatórios	19,09
D	Incidências cumulativas	23,77
E	Encargos intersindicais	64,26
Subtotal A+B+C+D+E		195,35

Fonte: Adaptado de Matos (2020).

Tabela 3 - Custos indiretos considerados

Mobilização e desmobilização da obra	
Mobilização e desmobilização do canteiro	Montagem e desmontagem de andaimes e instalações
Mobilização e desmobilização de pessoal	Custo de deslocamento
Mobilização e desmobilização de equipamentos	Transporte de materiais e equipamentos
Tapumes e cercas	Construção e remoção ao final da obra
Iluminação de campo	Montagem e remoção das estruturas
Ligações provisórias de água e luz	Custo do material e instalação dos equipamentos
Placa de obra	Confecção e instalação
Equipamentos do canteiro	
Andaime	Custo de propriedade e operação
Furadeira	Custo de propriedade e operação
Serra circular	Custo de propriedade e operação
Veículo	Custo de propriedade e operação
Equipamentos de proteção coletiva e individual	
Extintor	Custo de aquisição
Sinalização	Custo de aquisição
Botas	Custo de aquisição
Capacete	Custo de aquisição
Protetor auricular	Custo de aquisição
Óculos	Custo de aquisição
Luvas	Custo de aquisição
Ferramentas	
Arco de Serra	Custo de aquisição
Balde	Custo de aquisição
Carrinho de mão	Custo de aquisição
Coher de pedreiro	Custo de aquisição
Desenpenadeira	Custo de aquisição
Escoa de aço	Custo de aquisição
Lâmina de Serra	Custo de aquisição
Lixa	Custo de aquisição
Lata	Custo de aquisição
Mangueira	Custo de aquisição
Martelo	Custo de aquisição
Prumo	Custo de aquisição
Trincha	Custo de aquisição

Fonte: Adaptado de Matos (2020).

4.1.4 Fechamento do Orçamento

O fechamento do orçamento, de acordo com a Tabela 4, mostra materiais e equipamentos básicos que são imprescindíveis para a realização do serviço de manutenção. Ressalta-se que no caso de corrosão não monitorada apenas 1 pedreiro é suficiente para realizar o serviço devido a pequena área de trabalho. Do contrário, em um processo de corrosão não

monitorada observa-se a necessidade da contratação de um servente para auxiliar o pedreiro nas diversas etapas de execução da obra. Cabe ao orçamentista em função da obra fazer as considerações de quais equipamentos serão considerados custos diretos ou indiretos.

Tabela 4 - Orçamento de custo de manutenção de uma viga monitorada e não monitorada contra corrosão

Corrosão por hipótese monitorada				
Insumo	Unidade	Índice	Custo Unitário (R\$) x1,2	Custo Total (R\$)
Sika Grout 250	Kg	25	1,488	37,2
Vedacit Pro anticorrosivo	l	0,9	261,324	235,1916
Vedacit Resina	l	0,9	18,96	17,064
Escova de aço	unidade	4	9,48	37,92
Andaime	diária	7	30	210
Pedreiro	h	10	21,2652	212,652
Ensaio de Pot. Corrosão	ponto	1	960	960
			Total	1710,0276
Corrosão real verificada				
Insumo	Unidade	Índice	Custo Unitário (R\$) x1,2	Custo Total (R\$)
Sika Grout 250	Kg	75	1,488	111,6
Vedacit Pro anticorrosivo	l	3,6	223,296	803,8656
Vedacit Resina	l	3,6	48,3	173,88
Escova de aço	unidade	12	9,48	113,76
Escora	diária	21	13,2	277,2
Andaime	diária	14	30	420
Pedreiro	h	15	21,2652	318,978
Ensaio de Pot. Corrosão	ponto	4	960	3840
			Total	6059,2836

Fonte: O autor

5. Considerações Finais

O objetivo do trabalho foi mostrar o diagnóstico e as vantagens econômicas no monitoramento preventivo da corrosão das armaduras em estruturas de concreto armado. Foi analisada uma viga real sob efeito de corrosão que não sofreu intervenção preventiva e avaliadas diferenças de custos, por hipótese, caso o usuário tivesse feito o monitoramento por Potencial de Corrosão seguida da manutenção preventiva. Os orçamentos mostraram que, independente do processo corrosivo, seja por carbonatação ou ataques de íons cloretos, há uma redução de cerca de 73% dos custos sem considerar a atualização monetária do orçamento, o que produziria uma economia ainda maior para o usuário. Estudos como esse são realizados em todo o mundo através de institutos de materiais em universidades. Apesar disso, os estudos focam na eficiência dos métodos de monitoramento e não no custo-benefício do seu uso. Um campo de estudo necessário e promissor que deve ser feito, é mostrar essa relação para que se torne cada vez mais comum o seu emprego, devido às suas vantagens.

Referências Bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5674: **Manutenção de edifícios. Procedimento**. Rio de Janeiro, 2012.

_____. NBR 12721: **Avaliação de custos unitários e preparo de orçamento de construção para incorporação de edifício em condomínio**. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ALHOZAIMY, A.; HUSSAIN, R. R.; AL-NEGHEIMISH, A., AL-ZAID, R., SINGH, D. D. N. Effect of Simulated Concrete Pore Solution Chemistry, Chloride Ions, and Temperature on Passive Layer Formed on Steel Reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 111, 2014.

HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. 4. ed. São Paulo: PINI, 1999.

MATOS, Oswaldo Cascudo. **O controle da corrosão de armaduras em concreto: Inspeção e técnicas eletroquímicas**. São Paulo: PINI, 1999.

MEHTA, Povindar Kumar; MONTEIRO, Paulo José Melaragno. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

DAL MOLIN, Denise Carpena Coitinho. **Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. 238 f. Dissertação - Escola de Engenharia, (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1988.

RIBEIRO, Daniel Vêras; et al. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção**. 2. ed. São Paulo: Elsevier, 2018.

MAGALHÃES, C.P.; Folloni, R.; FURMAN, H. (1989) **Análise das patologias das obras de arte do município de São Paul**. In: Simpósio Nacional de Reforços, Reparos e Proteção das Estruturas de Concreto, São Paulo, p. 3-17, maio 1989.

MENDEIROS, M. H. F.; Rocha, F.C.; MENDEIROS Júnior, R. A.; HELENE, Paulo. **Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de**

cloretos e cobrimento. IBRACON Structures and Materials Journal. São Paulo, , v.10, n°4, p.1-11 agosto 2017

CARDOSO, Roberto Sales. **Orçamento de obras em foco: um novo olhar sobre a Engenharia de custos.** São Paulo: PINI, 2009.

COÊLHO, Ronaldo Sérgio de Araújo. **Orçamento de Obras Prediais.** São Luís: UEMA, 2001.

ROCHA, Franciele. **Leituras de potencial de corrosión em estruturas de concreto armado: influencia da relación a/c, da temperatura, da contaminacao por cloruros, da espessura de cobrimento e do teor de humedade do concreto.** Dissertacao (Mestrado em Engenharia de Construcción Civil) -Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

VALDÉS, Analiet Calvo; et al. "**Corrosion sensor for monitoring reinforced concrete structures: Tests on reinforced concrete specimens**", Revista ALCONPAT, 11 (3), pp. 64 – 87. Curitiba, 2021.

CASCUDO, O. **Controle da corrosão de armadura em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas.** 1 ed. São Paulo: PINI. Editora UFG, Goiânia 1997

WASHER, Glenn. "**Advances in the use of thermographic imaging for the condition assessment of bridges. Bridge Structures**", V.8, No. 2, pp. 81-90. Columbia, 2012.

NIKOO, Mehdi; Sadowski, Łukasz; Nikoo, Mohammad. **Prediction of the Corrosion Current Density in Reinforced Concrete Using a Self-Organizing Feature Map.** Coatings 2017, 7, 160. Quebec, 2017.