

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Letícia Maria de Oliveira Nascimento

**ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: Corrosão das armaduras**

Belo Horizonte

2021

Letícia Maria de Oliveira Nascimento

**ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM
ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: Corrosão das armaduras**

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Produção e Gestão do Ambiente Construído, área de Sustentabilidade e Gestão do Ambiente Construído.

Orientadora: Prof. Dra. Cristiane Machado Parisi Jonov

Belo Horizonte

2021

N244a

Nascimento, Letícia Maria de Oliveira.

Análise de manifestações patológicas em estruturas de concreto armado [recurso eletrônico]: corrosão das armaduras / Letícia Maria de Oliveira Nascimento. – 2021.

1 recurso online (57 f. : il., color.) : pdf.

Orientadora: Cristiane Machado Parisi Jonov.

“Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Produção e Gestão do Ambiente Construído da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais”.

Bibliografia: f. 56-57.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Concreto armado. 3. Concreto armado-corrosão. 4. Construção de concreto – Manutenção e reparos. I. Parisi Jonov, Cristiane Machado. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 69



ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: LETÍCIA MARIA DE OLIVEIRA

MATRÍCULA: 2018718260

RESULTADO

Aos 10 dias do mês de março de 2021 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

“ANÁLISE DE MANIFESTAÇÕES PATOLÓGICAS EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO: CORROSÃO DAS ARMADURAS”

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

X APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 94

CONCEITO: A

BANCA EXAMINADORA:

Nome

Assinatura

Prof.^a. Dr.^a. Cristiane Machado Parisi Jonov

Nome

Prof. Dr. Adriano de Paula e Silva

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA NA ÁREA DE "SUSTENTABILIDADE E GESTÃO DO AMBIENTE CONSTRUÍDO"

Belo Horizonte, 10 de março de 2021

Antonio Neves de
Carvalho
Junior:78724104604

Assinado de forma digital por
Antonio Neves de Carvalho
Junior:78724104604
Dados: 2021.05.10 22:26:18 -03'00'

Coordenador do Curso

A Deus, pelo dom da vida. A meus pais, Valter e Maria Aparecida (ambos *in memoriam*), pela educação e valores passados. A meu marido, Wesley, pela paciência e incentivo para que eu finalizasse este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho tem por objetivo estudar causas, processos de deterioração e soluções de reparação para estruturas de concreto armado danificadas por corrosão de armaduras. Com o rápido desenvolvimento da construção civil, o aperfeiçoamento construtivo e métodos de cálculo, houve um aumento significativo de danos causados pela deterioração das estruturas de concreto armado a partir da segunda metade do século XX, aumentando, portanto, os gastos com reparos. Neste sentido, torna-se primordial o estudo da sistemática das manifestações patológicas nestas estruturas. Para tanto, foi realizada uma pesquisa bibliográfica, contemplando os principais agentes causadores de despassivação de armaduras, os principais métodos para medição dos níveis de avanço no processo de deterioração das estruturas, os procedimentos para recuperação das mesmas, e também um comparativo entre técnicas de recuperação e reforço de estruturas. Identificou-se que independentemente da causa da manifestação patológica, é de suma importância que sejam analisados todos os seus sintomas, mecanismos, origens, causas e consequências, a fim de que, através de um diagnóstico e prognóstico, a melhor técnica de reparo ou reforço seja escolhida, com base em vários critérios, sendo o principal deles, a viabilidade técnica-econômica.

Palavras-chave: Manifestações patológicas. Estruturas de concreto armado. Corrosão de armaduras. Reparo de estruturas.

ABSTRACT

The present work aims to study causes, deterioration processes and structural solutions for reinforcement structures damaged by reinforcement corrosion. With the rapid development of civil construction, the improvement of construction and calculation method, there was a significant increase in damage caused by the deterioration of reinforced concrete structures from the second half of the 20th century, thus increasing expenses with repairs. In this sense, it is essential to study the systematics of pathological structures. For that, a bibliographic research was carried out, contemplating the main agents that cause depassivation of reinforcements, the main methods to improve the levels of progress in the process of deterioration of the structures, the data for their recovery, and also a comparison between recovery techniques and reinforcement of structures. It was identified that regardless of the cause of the pathological manifestation, it is the importance of the sum that all its components, origins, causes and consequences are, so that, through a diagnosis and prognosis, the best repair or reinforcement technique is chosen, based on several criteria, the main one being a technical-economic viability.

Keywords: Pathological manifestations. Reinforced concrete structures. Corrosion of armatures. Structural repair.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Gráfico 1: Análise da VUP com ou sem manutenções periódicas	19
Figura 1: Processo de corrosão dos compostos metálicos	22
Figura 2: Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica	24
Figura 3: Representação esquemática do processo de carbonatação	27
Fotografia 1: Corpos de prova com uso de fenolftaleína	36
Fotografia 2: Uso da timolftaleína	36
Gráfico 2: A “Lei dos cinco”	50
Fotografia 3: Vista da rampa de acesso ao local periciado (garagem do edifício)	52
Fotografia 4: Vista parcial da área periciada (fundos da garagem)	52
Fotografia 5: Pilar P10	53
Fotografia 6: Pilar P11 após retirada do revestimento comprometido	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classe de agressividade ambiental	16
Tabela 2: Qualidade do concreto em relação à classe de agressividade ambiental	16
Tabela 3: Cobrimento nominal em relação à classe de agressividade ambiental	17
Tabela 4: Vida útil de projeto (VUP) mínima e superior	18
Tabela 5: Características dos principais tipos de sais de sulfatos	31
Tabela 6: Métodos de análise para determinação da concentração dos íons cloreto	38
Tabela 7: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto	39
Tabela 8: Valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão do concreto segundo a CEB-192 e o boletim europeu COST 509	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	11
2. OBJETIVOS.....	13
3. REFERENCIAL TEÓRICO	14
3.1. O CONCRETO ARMADO	14
3.2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DO CONCRETO ARMADO.....	15
3.3. PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES	20
3.4. CORROSÃO DAS ESTRUTURAS.....	21
4. ESTUDO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO	26
4.1. AGENTES CAUSADORES DE DESPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS	26
4.1.1. CARBONATAÇÃO.....	26
4.1.2. AÇÃO DE CLORETOS.....	29
4.1.3. REAÇÕES ÁLCALIS-AGREGADO (RAA).....	30
4.1.4. ATAQUE POR SULFATOS	30
4.1.5. CORROSÃO NEGRA.....	32
4.1.6. BIODEGRADAÇÃO	32
4.1.7. CORROSÃO POR CORRENTES DE FUGA.....	33
4.1.8. ATAQUE POR ÁCIDOS	33
4.2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO	34
4.2.1. INSPEÇÃO VISUAL	34
4.2.2. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO	35
4.2.3. TEOR DE CLORETOS	37
4.2.4. TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO.....	39
4.2.5. TEOR DE SAIS SOLÚVEIS.....	40
4.2.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA.....	40

4.3. PROCEDIMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS QUE APRESENTAM CORROSÃO DE ARMADURAS.....	41
4.3.1. REPARO CONVENCIONAL.....	43
4.3.2. PROTEÇÃO CATÓDICA.....	44
4.3.3. DESSALINIZAÇÃO.....	46
4.3.4. REALCALINIZAÇÃO	47
4.4. COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS.....	48
5. ESTUDO DE CASO.....	51
6. ANÁLISES E CONCLUSÕES.....	55
REFERÊNCIAS.....	56

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material bastante utilizado na construção civil. É composto por agregados graúdos (pedras britadas e seixos rolados), agregados miúdos (areia natural ou artificial), aglomerantes (cimento), água, adições minerais e aditivos (aceleradores, retardadores, fibras, corantes). Apresenta boa resistência a compressão, mas não a tração, e este fato limita muito sua utilização como concreto simples. (PORTO; FERNANDES, 2015)

Quando se faz necessário que a estrutura suporte esforços de tração e compressão, o concreto é associado a materiais com alta resistência a tração, como o aço. Desta forma, tem-se o concreto armado (concreto + armadura passiva) e o concreto protendido (concreto + armadura ativa).

O concreto armado, objeto de estudo deste trabalho, é o método construtivo mais utilizado no mundo na atualidade. Sua versatilidade e desempenho o fazem se destacar dentre os demais métodos. Porém, mesmo com sua utilização elevada, é cada vez mais frequente os casos em que a estrutura sofre com deteriorações, devido a causas diversas.

Um dos processos de deterioração mais encontrados em estruturas de concreto armado é a corrosão de armaduras. Este fenômeno pode ser incidente em todas as classes de agressividade ambientais em que a estrutura é inserida, embora seja ainda mais comum em ambientes de severa agressividade, como atmosfera marinha ou industrial.

Com o avanço tecnológico dos últimos anos, e o crescente número de estudos na área de Patologia das Construções, é bem provável que se tenha o diagnóstico correto para a maioria das manifestações patológicas. O ambiente em que a estrutura se encontra afeta diretamente o método a ser escolhido para seu reparo e/ou reforço. Portanto, é de suma importância que suas origens, causas, mecanismos e consequências sejam identificados, para que uma correta terapia seja aplicada e o problema seja solucionado.

Este trabalho se inicia por meio de uma fundamentação teórica, onde serão abordados temas como o histórico do concreto armado e sua utilização desde os primórdios, e

conceitos básicos como o de durabilidade e vida útil do concreto armado, manifestações patológicas da construção e corrosão das estruturas.

A seguir, será de fato estudada a corrosão em estruturas de concreto, onde serão explanados os agentes causadores de despassivação de armaduras, os níveis de avanço no processo de deterioração das estruturas, os procedimentos para recuperação dessas estruturas, e um comparativo entre técnicas de recuperação e reforço das estruturas.

Ao final, serão apresentados um estudo de caso real, onde foi encontrada a corrosão de armaduras em pilares de uma edificação, com uma breve análise sobre a solução adotada, e as conclusões obtidas por meio deste trabalho.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral estudar causas, processos de deterioração e soluções de reparação para estruturas de concreto armado danificadas pelo processo de corrosão das armaduras.

Os objetivos específicos são verificar agentes causadores de corrosão das armaduras de concreto armado, levantar e mensurar níveis de avanço no processo de deterioração das estruturas de concreto armado, estudar procedimentos para recuperação de estruturas danificadas e estabelecer comparativo entre técnicas de recuperação/reforço de estruturas.

3. REFERENCIAL TEÓRICO

3.1. O CONCRETO ARMADO

Para um bom entendimento de como o concreto armado é um método construtivo que consegue ser presente em nossas vidas quando se fala em construção atualmente, é necessário primeiramente conhecer um pouco de sua história.

O cimento Portland foi desenvolvido pelo escocês Josef Aspdin, em 1824. O nome Portland adveio da semelhança da cor do cimento com as pedras calcárias da ilha de Portland, Inglaterra. (PORTO; FERNANDES, 2015)

O concreto teve sua primeira utilização fora da construção civil. Em 1849, o engenheiro francês Joseph-Louis Lambot desenvolveu um barco, fazendo uso de argamassa de cimento, areia e fios de arame. Naquele momento, ele não conseguiu convencer as pessoas a usarem seu material, por ter sido considerado impróprio para a construção de barcos. (PORTO; FERNANDES, 2015)

No entanto, em 1861, o paisagista e horticultor francês Joseph Monier conheceu o produto de Lambot e ficou muito interessado nos possíveis campos de ação deste material em contato com a água (vasos, tubos e tanques, reservatórios, pontes, etc.). Ele expandiu seus usos e os patenteou. Foi considerado por muitos, o pai do concreto armado. (PORTO; FERNANDES, 2015)

A partir deste momento, o uso do concreto armado ficou cada vez mais popular e comum. Em 1904 surge a primeira norma sobre projeto e construção de estruturas de concreto armado na Alemanha. (PORTO; FERNANDES, 2015)

Em relação ao Brasil, não se sabe ao certo quando foi iniciada a utilização do concreto armado. O documento mais antigo em que se tem notícia do seu uso, foi uma publicação do professor Antônio de Paula Freitas, da Escola Politécnica do Rio de Janeiro em 1904. Em 1924, uma associação entre a empresa alemã Wayss & Freytag e a Companhia Construtora em Cimento Armado, possibilitou o desenvolvimento do uso deste novo método construtivo e formação de vários engenheiros brasileiros, difundindo, portanto, este novo tipo de estrutura no país. (PORTO; FERNANDES, 2015)

3.2. DURABILIDADE E VIDA ÚTIL DO CONCRETO ARMADO

A Durabilidade e a vida útil do concreto armado são dois conceitos intimamente ligados. A durabilidade das construções depende de vários fatores importantes, como os materiais utilizados, o seu ambiente de exposição e a sua utilização. Com o passar do tempo, as condições ambientais podem alterar os materiais, e o seu desempenho diante desta situação, determina a vida útil da estrutura ou de partes dela.

Segundo Ribeiro e Cascudo (2020), o conceito de durabilidade pode ser entendido por:

capacidade do material em suportar as solicitações para as quais foi concebido ao longo de determinado período, em decorrência de um ou mais processos patológicos instalados de natureza físico-mecânica, química, biológica ou eletroquímica. Os mecanismos de degradação/deterioração ou de envelhecimento comprometem o desempenho do material, componente ou sistema, reduzindo ou anulando sua aptidão ao uso nas condições de serviço.

Já para a NBR 6118 (2014), durabilidade pode ser entendida apenas por “capacidade de a estrutura resistir às influências ambientais previstas e definidas em conjunto pelo autor do projeto estrutural e pelo contratante, no início dos trabalhos de elaboração do projeto.”

Desta forma, o concreto é considerado durável desde que mantenha o desempenho que lhe foi atribuído, a resistência e utilidade esperada, durante determinado tempo previsto.

Já o conceito de vida útil, é definido pela NBR 6118 (2014) como sendo o período de tempo durante o qual se mantêm as características das estruturas de concreto, sem intervenções significativas, desde que atendidos os requisitos de uso e manutenção prescritos pelo projetista e pelo construtor, bem como de execução dos reparos necessários decorrentes de danos acidentais.

Ou seja, a vida útil é um tempo determinado, onde a estrutura ainda mantém suas características de desempenho e utilização determinados em projeto, sem elevados custos de manutenção e reparo.

Não é à toa que uma das premissas para o cálculo de estruturas de concreto, conforme previsto na NBR 6118 (2014), é a escolha da Classe de agressividade ambiental onde a construção será inserida. A partir deste dado, podemos definir a relação água/cimento máxima a ser utilizada, a classe do concreto mínima e o cobrimento nominal das partes da estrutura, como podemos verificar nas tabelas 1, 2 e 3 a seguir:

Tabela 1: Classe de agressividade ambiental

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
	I	Fraca	Rural Submersa
II	Moderada	Urbana ^{a, b}	Pequeno
III	Forte	Marinha ^a Industrial ^{a, b}	Grande
IV	Muito forte	Industrial ^{a, c} Respingos de maré	Elevado

^a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

^b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (uma classe acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade média relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos ou regiões onde raramente chove.

^c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes, indústrias químicas.

Fonte: NBR 6118, 2014.

Tabela 2: Qualidade do concreto em relação à classe de agressividade ambiental

Concreto ^a	Tipo ^{b, c}	Classe de agressividade (Tabela 6.1)			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40

^a O concreto empregado na execução das estruturas deve cumprir com os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 12655.

^b CA corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto armado.

^c CP corresponde a componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: NBR 6118, 2014.

Tabela 3: Cobrimento nominal em relação à classe de agressividade ambiental

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

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

^b Para a face superior de lajes e vigas que serão revestidas com argamassa de contrapiso, com revestimentos finais secos tipo carpete e madeira, com argamassa de revestimento e acabamento, como pisos de elevado desempenho, pisos cerâmicos, pisos asfálticos e outros, as exigências desta Tabela podem ser substituídas pelas de 7.4.7.5, respeitado um cobrimento nominal ≥ 15 mm.

^c Nas superfícies expostas a ambientes agressivos, como reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto, condutos de esgoto, canaletas de efluentes e outras obras em ambientes química e intensamente agressivos, devem ser atendidos os cobrimentos da classe de agressividade IV.

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

Fonte: NBR 6118, 2014.

Além da NBR 6118-2014, temos também a NBR 15575-2013, que estabelece alguns critérios para a vida útil das edificações. Nesta norma, temos a definição de vida útil de projeto (VUP), que pode ser entendida por:

Período estimado de tempo para o qual um sistema é projetado a fim de atender aos requisitos de desempenho estabelecidos nesta norma, considerando o atendimento aos requisitos das normas aplicáveis, o estágio do conhecimento no momento do projeto e supondo o cumprimento da periodicidade e correta execução dos processos de manutenção especificados no respectivo Manual de Uso, Operação e Manutenção (a VUP não deve ser confundida com tempo de vida útil, durabilidade, prazo de garantia legal e certificada). Nota: A VUP é uma estimativa teórica de tempo que compõe o tempo de vida útil. O tempo de VU pode ou não ser confirmado em função da eficiência e registro das manutenções, de alterações no entorno da obra, fatores climáticos, etc.

Dentro da análise de vida útil de projeto, tem-se os limites a serem atendidos em todos os elementos da construção, dependendo do nível de desempenho a ser adotado, podendo ser mínimo ou superior. Na tabela 4 a seguir há um exemplo desta divisão:

Tabela 4: Vida útil de projeto (VUP) mínima e superior

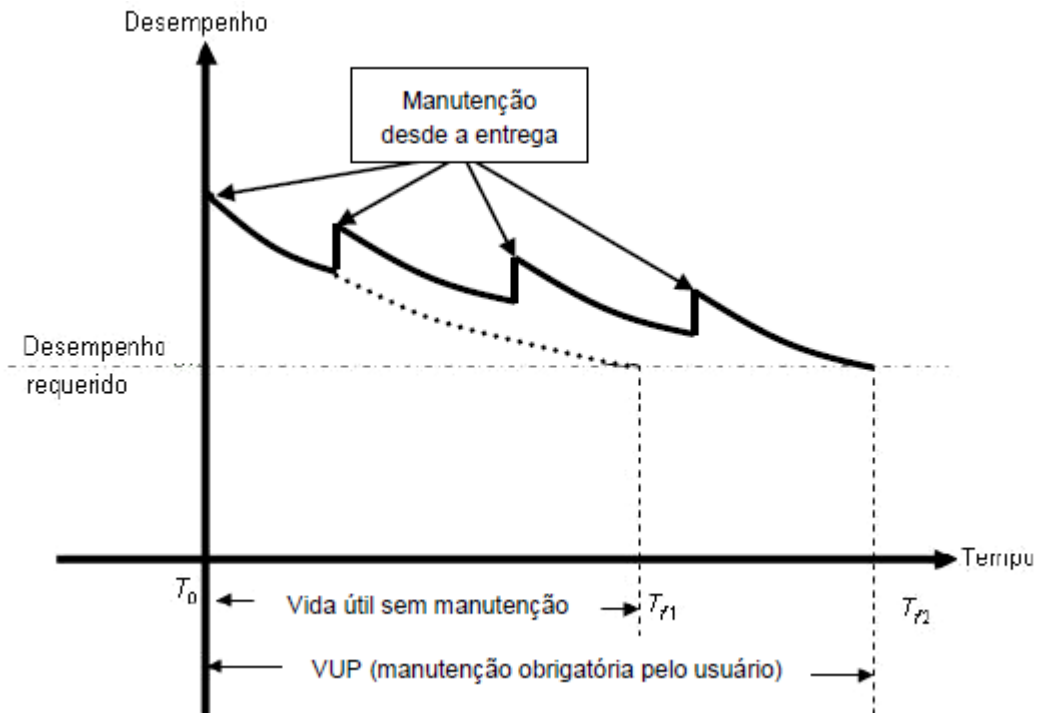
Sistema	VUP anos	
	Mínimo	Superior
Estrutura	≥ 50	≥ 75
Pisos internos	≥ 13	≥ 20
Vedação vertical externa	≥ 40	≥ 60
Vedação vertical interna	≥ 20	≥ 30
Cobertura	≥ 20	≥ 30
Hidrossanitário	≥ 20	≥ 30

Fonte: NBR 15575, 2013.

De acordo com NBR 15575-1, juntamente com a VUP, devem ser definidas também ações de manutenção que devem ser realizadas de modo que esta VUP seja atendida. Caso as mesmas não sejam realizadas, corre-se o risco de a VUP ser seriamente comprometida.

No gráfico 1 a seguir, é possível visualizar melhor como as manutenções são importantes para cumprimento da VUP.

Gráfico 1: Análise da VUP com ou sem manutenções periódicas



Fonte: NBR 15575, 2013.

Conforme dito por Possan e Demoliner (2013), as manutenções periódicas necessárias as edificações se assemelham muito a indústria automobilística. Ao comprar um veículo, o proprietário recebe junto com o mesmo um manual do usuário, que indica a quilometragem ou o tempo necessário a cada manutenção. Caso o proprietário descumpra estes prazos, perde a garantia do automóvel, pois a indústria entende que sem as manutenções periódicas, não é possível garantir a vida útil do produto.

Portanto, percebe-se que sem as manutenções periódicas, fica muito difícil atingir a VUP estabelecida previamente. Estruturas de concreto não são indestrutíveis e eternas, como muitos pensam. Elas necessitam de intervenções como qualquer outro material, produto ou estrutura. A falta de manutenção entre outros problemas, pode causar também manifestações patológicas, que muitas vezes são associadas a uma construção falha, e não pelo uso inadequado da estrutura, como de fato pode ser.

3.3. PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES

Devido ao rápido desenvolvimento da construção civil, o aperfeiçoamento construtivo e métodos de cálculo, houve um aumento significativo dos danos causados pela deterioração das estruturas de concreto armado a partir da segunda metade do século XX, o que gerou muitos gastos com reparos. Nesta época, os concretos possuíam baixas resistências e alta relação água/cimento, que consequentemente traziam mais porosidade aos mesmos. No entanto, o cobrimento era bem maior do que o praticado atualmente, o que era um ponto positivo a se considerar. A partir dos anos 1980 até início dos anos 2000, os cobrimentos eram muito reduzidos, e este fato colaborou para que os problemas relacionados durabilidade das estruturas se acentuassem. (RIBEIRO; CASCUDO, 2020)

De acordo com Souza e Ripper (2009), para que estes problemas fossem estudados e solucionados, um novo campo da engenharia das construções surgiu: a Patologia das Estruturas.

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

Ainda de acordo com Helene (1992), para um completo diagnóstico do problema, é necessário que se esclareçam todos os aspectos do mesmo, que são: sintomas, mecanismo, origem, causas e consequências.

Os sintomas, também denominados de manifestações patológicas, podem orientar um primeiro diagnóstico, a partir de minuciosas e experientes observações visuais. As manifestações mais comuns em estruturas de concreto são: fissuras, eflorescências, flechas excessivas, manchas no concreto aparente, corrosão de armaduras e nichos de concretagem (segregação de materiais). (HELENE, 1992)

O mecanismo é o processo pelo qual o problema patológico passa. E é imprescindível que seja conhecido para que haja uma terapia adequada. Por exemplo, quando uma viga possui fissuras de momento fletor, é necessário que sejam limitadas as suas sobrecargas ou seja realizado reforço na mesma, pois somente injeção das fissuras não será suficiente para resolução do problema. (HELENE, 1992)

A origem seria a identificação de etapa do processo construtivo em que o problema teve procedência. São elas: planejamento, projeto, escolha de materiais, execução e uso. A descoberta deste aspecto é muito importante, pois permite identificar de quem foi a falha. (HELENE, 1992)

As causas dos problemas patológicos podem ser várias, por exemplo: cargas, variações de umidade, variações térmicas intrínsecas e extrínsecas, agentes biológicos, incompatibilidade de materiais, agentes atmosféricos, etc. Com a identificação da causa correta, a terapia poderá ser mais duradoura. (HELENE, 1992)

As consequências seriam um prognóstico referente ao comportamento da estrutura com o passar do tempo, pois os problemas patológicos são evolutivos e tendem a se agravar. Em geral, as considerações podem ser de 2 tipos: as que afetam a segurança da estrutura (associadas ao estado de limite último) e as que afetam a higiene, estética, e fatores correlatos (associadas ao estado de limite de utilização). Quando mais cedo as correções são feitas, mais fáceis e baratas elas serão, além de serem mais efetivas e duráveis. (HELENE, 1992)

Deste modo, com toda a análise dos dados coletados, é possível dar um diagnóstico ao problema, partindo então para a escolha da terapia adequada.

A terapia pode ser tanto um reparo simples, localizado, quanto um reparo completo da estrutura ou até mesmo reforço de elementos estruturais. E é sempre recomendado que após a intervenção, sejam tomadas medidas para um programa de manutenções periódicas, a fim de evitar o retorno do problema. (HELENE, 1992)

3.4. CORROSÃO DAS ESTRUTURAS

A corrosão das armaduras é um dos problemas mais comuns em estruturas de concreto. Apesar de ser uma manifestação patológica comum, por muitas vezes é desafiador encontrar a razão deste problema estar ocorrendo.

De acordo com Helene (2020), corrosão pode ser entendida como:

a interação destrutiva de um material com o meio ambiente, nas temperaturas ambientes usuais, acima de 5°C e abaixo de 65°C, como resultado de

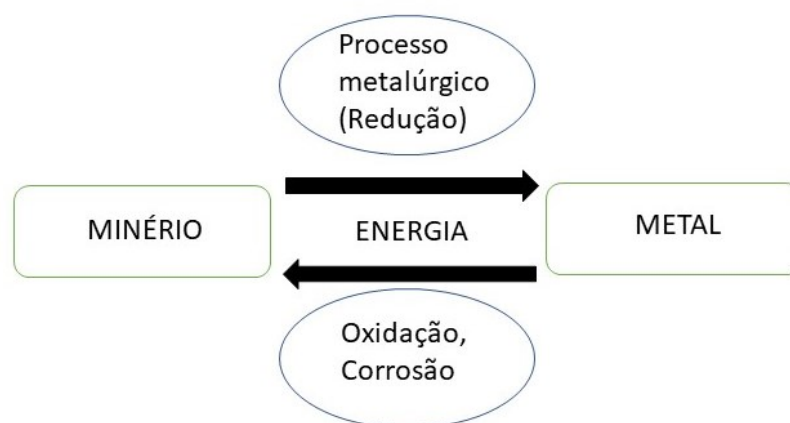
reações elétricas de natureza química ou eletroquímica, associadas ou não a ações físicas ou mecânicas de deterioração.

O metal tem tendência a sempre retornar ao seu estado original, como se encontrava na natureza antes de passar pela metalurgia ou siderurgia. Seu estado natural, é formando compostos estáveis na forma de óxidos e hidróxidos. Quando ele é processado, recebe energia para adquirir o estado metálico. No entanto, ao entrar em contato com o meio ambiente, o metal reage com o meio espontaneamente, se tornando um composto mais estável novamente. O Ferro, por exemplo, quando reage com o meio ambiente, se transforma em Fe_2O_3 , conhecido como ferrugem, que é mais estável que o ferro metálico. (SOUSA, 2020)

Este fenômeno, em que acontece uma perda de elétrons por parte do metal, é chamado de oxidação. No entanto, em estruturas de concreto é preferível chamá-lo de corrosão, pois sempre ocorre em presença de água e nas condições ambientes, enquanto a oxidação é um processo comum, que se dá mesmo sem água. (HELENE, 2020)

Na figura 1 a seguir, há um diagrama para melhor entendimento do processo de corrosão dos compostos metálicos.

Figura 1: Processo de corrosão dos compostos metálicos



Fonte: Próprio autor, 2020.

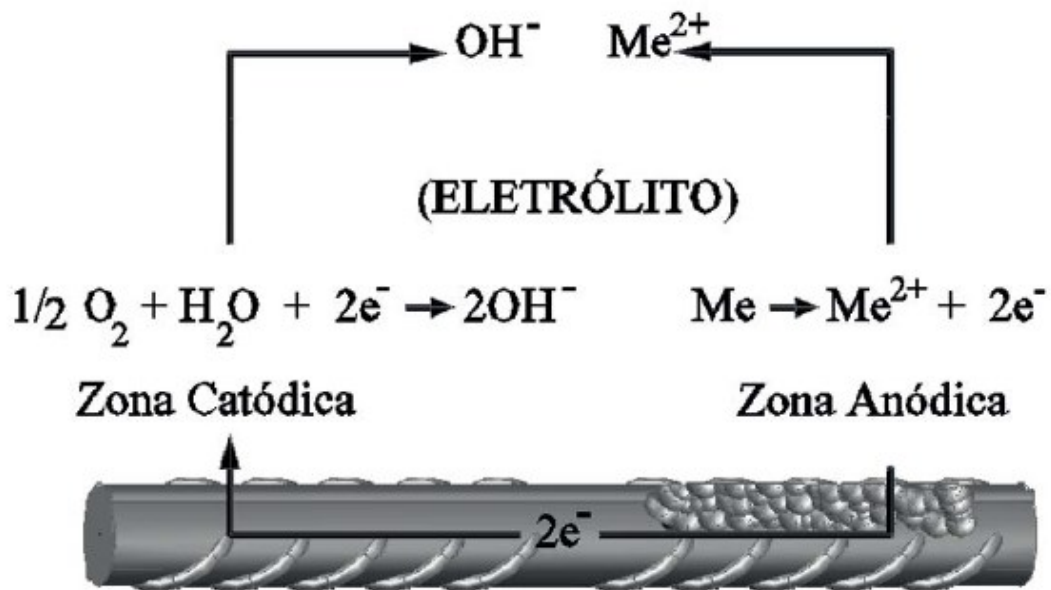
O processo de oxidação pode ocorrer de duas formas: por meio de corrosão química ou eletroquímica. Esta última, é a forma de corrosão mais importante e preocupante para a construção civil, pois pode atingir graus de deterioração bastante significativos.

Na corrosão química, o metal reage diretamente com os gases presentes no meio, formando uma película uniforme e contínua de óxido de ferro. Este tipo de reação é muito lenta e só é significativa a altas temperaturas. No caso das armaduras, esta película que se forma através da corrosão química, pode ser chamada de carepa. Normalmente, a carepa ocorre ainda durante a fabricação das barras de aço, e como não há a presença de água, a mesma se torna uma película uniforme, compacta e pouco permeável, protegendo o aço até mesmo contra a corrosão úmida. (HELENE, 1993)

Quanto a corrosão eletroquímica, nesta o metal sofre um processo de oxidação e redução simultâneos (oxirredução), com circulação de íons através de um eletrólito (água, umidade ou solução aquosa). Na reação de oxidação, o metal libera elétrons e se transforma em cátion. Na reação de redução, o metal recebe elétrons e se transforma em ânodo. Este processo implica a formação de uma pilha eletroquímica, onde a região do ânodo sofre oxidação e a região do cátodo sofre redução. Desta forma, estabelece-se uma diferença de potencial entre as regiões, onde a região do ânodo tem potencial mais eletronegativo. (MEIRA, 2017)

Na figura 2 a seguir há uma representação esquemática sobre o processo de corrosão eletroquímica, para melhor entendimento.

Figura 2: Representação esquemática do processo de corrosão eletroquímica



Fonte: Meira, 2017.

Segundo Meira (2017), a corrosão pode ainda ser classificada quanto ao seu tipo de apresentação, podendo ser generalizada uniforme ou irregular, localizada, por pites e com formação de fissuras.

Na corrosão generalizada, o metal sofre o ataque em uma grande superfície, formando vários ânodos e cátodos que mudam a todo o tempo, formando micro pilhas. A perda de seção pode ser uniforme ou irregular. (MEIRA, 2017)

Na corrosão localizada, o ataque ocorre em zonas não muito extensas do metal que por alguma razão, como heterogeneidade da composição química do material ou do eletrólito que o circunda, são mais anódicas que as demais. (MEIRA, 2017)

A corrosão por pites pode ser considerada um tipo de corrosão localizada, porém o ataque tem a característica de romper um filme passivo que circunda o metal, causando sua dissolução. Um pite é uma cavidade com elevada relação entre seu comprimento e diâmetro, e geralmente apresenta uma alta taxa de crescimento. Este tipo de corrosão é causada por agentes agressivos, e o mais comum dentre eles é o cloreto. (SOUSA, 2020)

Na corrosão com formação de fissuras, o metal está submetido a tensões de tração além de outras condições que facilitam o processo da corrosão. Neste caso surgem

as fissuras, e através delas são produzidas rupturas com níveis baixos de tensão. (MEIRA, 2017)

No caso do concreto armado, enquanto as armaduras estão inseridas dentro do concreto, estão protegidas e passivadas contra o risco da corrosão. Esta proteção advém de 2 fatores principais: a alta alcalinidade presente nos poros do concreto e ao cobrimento, que forma uma barreira física para o ingresso de agentes externos. (HELENE, 2020)

No entanto, quando esta proteção é perdida, parcial ou completamente, a corrosão pode começar causando um processo de deterioração progressiva. Os fenômenos mais comuns desta perda de passividade são a carbonatação do concreto e presença de cloretos. Porém, ela também pode se dar por fissuração, execução inadequada, ciclos de molhagem e secagem, atmosferas agressivas, dentre outros. (HELENE, 2020)

Para uma melhor exemplificação, quando há corrosão, o potencial eletroquímico da armadura torna-se mais negativo, formando áreas anódicas. Já as áreas que permanecem com a passividade intacta, farão a captação do oxigênio e se tornarão catódicas. Havendo uma resistividade elétrica (iônica) do concreto baixa, desenvolve-se um fluxo de elétrons (fluxo de corrente) entre elas. É a intensidade deste fluxo de corrente que determina a taxa de corrosão. (GJØRV, 2015)

Portanto, é necessário que sejam tomadas todas as medidas possíveis a fim de se evitar que o processo de corrosão ocorra nas armaduras. A conscientização dos profissionais é difícil, pois este problema geralmente aparece quando a estrutura já está em uso a alguns anos, passando a falsa impressão que nada tem a ver com o projeto e execução da mesma. De toda forma, é muito importante que o estudo do processo de corrosão das armaduras seja amplo, pois só assim a terapia poderá mais assertiva.

4. ESTUDO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO

4.1. AGENTES CAUSADORES DE DESPASSIVAÇÃO DE ARMADURAS

As armaduras do concreto armado, em um primeiro momento, estão protegidas da corrosão, devido a barreira física fornecida pelo mesmo e pela sua alta alcalinidade. Em geral, a perda dessa proteção se dá através da ação agentes agressivos, oriundos de fontes externas à estrutura. De acordo com Helene (1993), a passivação pode até mesmo nem ser alcançada, devido ao fato de que altos teores de elementos agressivos podem ser involuntariamente incorporados ao concreto durante o processo de dosagem e amassamento.

Os principais agentes causadores da corrosão são o dióxido de carbono (CO_2) e os cloretos (Cl^-). No entanto, outros fatores também contribuem para a deterioração das estruturas de concreto, como as reações álcali-agregado, ataques por sulfato, biodegradação, ataques por ácidos, dentre outros. Cada um deles apresenta uma forma deterioração, com consequências diferentes.

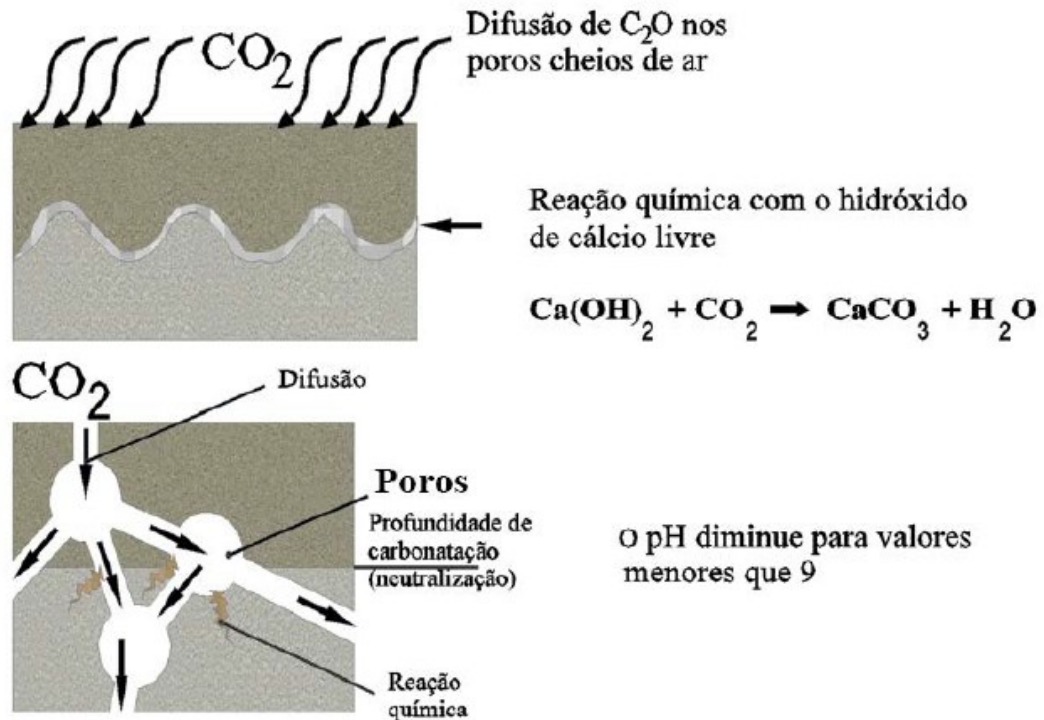
4.1.1. CARBONATAÇÃO

O concreto tem uma elevada alcalinidade devido a presença do hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), oriundo das reações de hidratação do cimento. Porém, quando ele é exposto a gases como o dióxido de carbono (CO_2), dióxido de enxofre (SO_2) e o gás sulfídrico (H_2S), seu pH pode ser reduzido, transformando os compostos do cimento em carbonatos. Este fenômeno é chamado de carbonatação. (RIBEIRO, 2020)

Como o concreto é um material poroso, o CO_2 presente no ar penetra facilmente em seu interior, causando a reação com o hidróxido de cálcio e conseqüentemente a carbonatação. Na representação esquemática da figura 3, é possível visualizar este processo.

Desta forma, ocorrendo esta reação, um concreto com alta alcalinidade ($\text{pH} > 12,0$), passa a ter seu pH diminuído a valores abaixo de 9,0, o que faz com que a armadura fique ativa. Assim que a armadura fica ativa, é iniciado o processo de corrosão.

Figura 3: Representação esquemática do processo de carbonatação



Fonte: Meira, 2017.

Caso haja presença de água, juntamente com o excesso de CO_2 , outra reação pode ocorrer, levando a formação de bicarbonato de cálcio, conforme equação 1 abaixo, que é um composto ácido e pode reduzir o pH do concreto a valores quase neutros. Neste caso, a corrosão do aço pode ser catastrófica. (RIBEIRO, 2020)



Portanto, a carbonatação, apesar de não causar diretamente o processo de corrosão, contribui decisivamente para a degradação do concreto, pois no momento em que o pH baixo atinge a superfície da armadura, a película passivadora é rompida, e o processo de corrosão começa. (RIBEIRO, 2020)

De acordo com Ribeiro (2020), alguns fatores podem influenciar no processo de carbonatação, como segue:

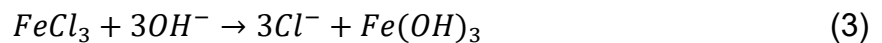
- a) Relação água/cimento: como a penetração do CO_2 ocorre por meio dos poros do concreto, quanto mais poroso, mais facilmente essa penetração ocorre; ou

- seja, quanto maior a relação água/cimento utilizada, mais rápida será a penetração do CO₂ no concreto;
- b) Consumo e tipo do cimento: cimentos com adição pozolânica, tem menor reserva alcalina, devido a sua composição química, se comparado ao cimento Portland puro. Com a alcalinidade menor, mais rápido será o avanço da carbonatação;
 - c) Presença de adições minerais: as características e composições químicas e mineralógicas dos materiais empregados nas adições do concreto, determinam o seu comportamento. Sua incorporação, principalmente de materiais de origem pozolânica, melhoram a microestrutura do concreto, diminuindo a porosidade, porém, apresentam menor reserva alcalina;
 - d) Condições de cura: a medida em que o processo de cura for mais eficiente, e o cimento for mais hidratado, menor será a sua porosidade e permeabilidade, e conseqüentemente a taxa de carbonatação será menor;
 - e) Presença de fissuras: a presença de fissuras facilita a entrada de CO₂ no concreto, e aumenta a taxa de carbonatação;
 - f) Concentração de CO₂: quanto maior a concentração de CO₂ no ambiente, maior será a taxa de carbonatação, principalmente em concretos com alta relação água/cimento;
 - g) Umidade relativa do ar e grau de saturação dos poros: o grau de saturação dos poros do concreto está associado a umidade relativa do ar. Quando os poros estão totalmente saturados, praticamente não há passagem de CO₂ entre eles. Quando estão secos, o CO₂ passa facilmente, porém sem a água, a reação da carbonatação não acontece. No entanto, quando os poros estão parcialmente preenchidos com água, o CO₂ penetra facilmente e há água para reação. Este é a situação mais favorável e rápida para o avanço da carbonatação;
 - h) Temperatura: em temperaturas muito altas, a velocidade de carbonatação aumenta. A temperatura e a umidade influenciam diretamente na existência de vapor ou saturação dos poros, variando a velocidade de carbonatação.

4.1.2. AÇÃO DE CLORETOS

Dentre os agentes causadores de deterioração das estruturas concreto, o cloreto é o mais comum. Ele pode ser incorporado involuntariamente durante o seu preparo, por meio de aceleradores de pega, agregados e água contaminados e tratamentos de limpeza. (RIBEIRO, 2020)

Os cloretos, quando penetram no concreto, parte deles ligam-se quimicamente com compostos que tem aluminatos (C_3A e C_4AF), formando o sal de Friedel ($3CaO.Al_2O_3.CaCl_2.10H_2O$), parte é adsorvida pelo gel amorfo de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e outra parte fica livre para agir nos processos corrosivos. Esta parte livre é que pode destruir a película passivadora fornecida pelo meio alcalino do concreto e acelerar a corrosão sem consumir-se, conforme equações 2 e 3. (RIBEIRO, 2020)



Segundo Ribeiro (2020), o uso de aditivos minerais, como metacaulim ou escórias de aciaria, podem aumentar a resistência contra a ação dos cloretos, devido a maior formação de sal de Friedel. Partículas de elevada finura (filler) podem interromper a conectividade entre os poros, impedindo o transporte dos cloretos. Concretos com elevada resistividade ou secos, não terão água suficiente em seus poros para transportar íons cloreto até a armadura, e o processo corrosivo tenderá a não ocorrer. Do contrário, quando a umidade do concreto atinge um valor crítico, o processo de corrosão acontece de forma mais acentuada, e tende a piorar caso existirem também outras substâncias poluentes.

Estruturas de concreto que se localizam em ambientes com alto teor de cloretos, como o marinho, tem a tendência de absorver com mais facilidade os sais, como o cloreto de sódio, devido aos seus ciclos de molhagem e secagem. Este fenômeno pode agravar o problema de corrosão das armaduras, pois propicia a cristalização do sal no interior do concreto, dando origem a manifestação patológica conhecida por “pele tipo cebola cortada”. (HELENE, 1993)

4.1.3. REAÇÕES ÁLCALIS-AGREGADO (RAA)

Segundo Ribeiro (2020), as reações álcalis-agregado são “reações químicas que se desenvolvem entre constituintes reativos dos agregados e íons alcalinos e hidroxilos presentes na solução intersticial da pasta de cimento, podendo ter um efeito altamente prejudicial ao concreto.” O produto da reação química é um gel expansivo que ocupa os poros do concreto, e quando há presença de água, a sua expansão é ainda maior e causa fissurações, na maioria das vezes acompanhadas do aparecimento de eflorescências e exsudações na superfície do concreto.

Para a ocorrência de RAA, são necessárias 3 condições: presença de fases reativas no agregado, elevado teor de umidade e elevada concentração de hidróxidos alcalinos. Com a falta de uma dessas condições, não haverá degradação do concreto. A temperatura e a granulometria dos materiais também interferem na reação. Quanto maior a temperatura, maior a força de expansão, e à medida que diminui a superfície específica (aumenta a reatividade) do material, maior a força de expansão. (RIBEIRO, 2020)

Percebe-se desta forma, que esta reação está intimamente ligada a escolha dos materiais que vão compor a estrutura, como o cimento, agregados miúdos e graúdos, água e aditivos. Dificilmente o colapso de uma estrutura terá sua causa primária como esta reação. No entanto, a fissuração gerada por ela facilita e muito, outros processos para deterioração do concreto, como a corrosão das armaduras.

4.1.4. ATAQUE POR SULFATOS

Os sulfatos são extremamente agressivos quando em contato com o concreto armado. Seu ataque envolve a formação de cristais com elevada capacidade expansiva, que por consequência podem causar fissuração.

Segundo Ribeiro (2020), o ataque por sulfatos pode ser caracterizado pela formação de etringita tardia $[\text{Ca}_6\text{Al}_3(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26\text{H}_2\text{O}]$, que ocorre quando o concreto já está endurecido. Outros fatores que contribuem para este fenômeno são as características físico-químicas do cimento utilizado, um ambiente altamente úmido, e presença de íons sulfatos dissolvidos, que ingressam no concreto por meio da microestrutura de seus poros.

Para Souza (2006), o processo completo de deterioração do concreto por ataques de sulfetos se dá em 3 etapas, que são:

1ª: difusão dos íons agressivos para o interior da matriz cimentícia, que ocorre por meio da porosidade e permeabilidade;

2ª: reações químicas entre o íon sulfato e certos constituintes hidratados do cimento, como a portlandita, monossulfoaluminato e outros aluminatos hidratados, formando compostos químicos que resultam em expansão (etringita e gipsita);

3ª: fissuração da matriz, algumas vezes associada à reação química de descalcificação do C-S-H, resultando perda da resistência e desintegração.

Os sulfatos podem ser encontrados tanto em ambientes naturais quanto industriais. Suas fontes podem ser águas, solo, agregados e esgoto. Na tabela 5, há alguns dos principais tipos de sais de sulfatos encontrados, com suas características.

Tabela 5: Características dos principais tipos de sais de sulfatos

TIPO	CÁTION	COR	SOLUBILIDADE	ORIGEM	AGRESSIVIDADE
K ₂ SO ₄	Potássio	Branca	Baixa	Água do mar ou subterrânea	Elevada
NH ₄ SO ₄	Amônia	Branca	Alta	Fábricas de explosivos, coque, indústria química	Elevada
Na ₂ SO ₄	Sódio	Branca	Alta	Indústria química, leite e água do mar	Elevada
CaSO ₄	Cálcio	Branca	Baixa	Águas subterrâneas, escória	Elevada
MgSO ₄	Magnésio	Branca	Alta	Água do mar e subterrânea	Elevada
CuSO ₄	Cobre	Branca	Alta	Conservação de madeira, galvanotecnia	Elevada
FeSO ₄	Ferro	Verde	Alta	Desinfetante, tinturaria	Elevada
Fe ₂ (SO ₄)	Ferro	Branca	Alta	Tratamento de água	Elevada
ZnSO ₄	Zinco	Branca	Baixa	Tinturaria, indústrias químicas	Média
KAlSO ₄	Potássio	Branca	Baixa	Indústria química	Média
PbSO ₄	Chumbo	Branca	Muito Baixa	Indústria química	Reduzida
CoSO ₄	Cobalto	Vermelha	Baixa	--	Reduzida
NiSO ₄	Níquel	Verde	Baixa	Indústria química	Reduzida

Fonte: Ribeiro, 2020. Adaptado.

O uso de adições minerais ao concreto, em substituição parcial do cimento, como a escória de alto forno, as cinzas volantes e a sílica ativa, alteram a microestrutura do concreto e interferem na porosidade do mesmo. Esta substituição tem melhorado o desempenho do material quando submetido a ataques por sulfatos. (RIBEIRO, 2020)

4.1.5. CORROSÃO NEGRA

A corrosão é um processo eletroquímico que normalmente precisa de oxigênio e água para acontecer. O produto desta corrosão geralmente ocupa um volume algumas vezes maior que o aço não corroído, gerando fissuras no concreto. Porém, há casos em que o concreto está submerso, ou possui sistema de impermeabilização, gerando falta de oxigênio dentro de seus poros. Neste caso, pode ocorrer um processo corrosivo ainda mais preocupante que o habitual, pois não há sinais exteriores desta corrosão. Este fenômeno é chamado de corrosão anaeróbica ou corrosão negra. (RIBEIRO, 2020)

Na corrosão anaeróbica, quando há restrição de oxigênio em ânodos ativos, pode ser originada a ferrugem negra, que não é expansiva. Desta forma a corrosão ocorre, porém não apresenta nenhum sinal visível, sendo, portanto, de difícil detecção. Para que ela ocorra, são necessárias algumas condições: disponibilidade de oxigênio no cátodo, deficiência de oxigênio no ânodo e existência de um meio para o livre fluxo de elétrons entre as áreas anódicas e catódicas. (RIBEIRO, 2020)

4.1.6. BIODEGRADAÇÃO

Segundo Ribeiro 2020, a biodegradação pode ser entendida como qualquer interação não desejada nas propriedades de um material, devido a ações de organismos vivos. Alguns exemplos de mecanismos de biodegradação podem ser: formação de biofilme, ataque de ácidos e tensões provocadas pela cristalização de sais. Estes mecanismos promovem a redução da vida útil do concreto.

Os organismos vivos quando se integram ao concreto, podem usar seus componentes como alimento, ou apenas o usam como substrato. Ambas as formas são nocivas para o concreto. Alguns efeitos que estes organismos vivos podem causar no são: diminuição do pH, ganho de umidade, formação de biofilme ou mudanças internas,

como reações químicas adversas ou rachaduras devido a inchaço ou encolhimento. (RIBEIRO, 2020)

O processo corrosivo neste caso, é semelhante aos demais. As bactérias causam reações químicas que diminuem o pH do concreto, causando despassivação da armadura. Como reação em cadeia, são formados também compostos que se expandem, causando fissuração com posterior exposição da armadura ao meio exterior.

4.1.7. CORROSÃO POR CORRENTES DE FUGA

A corrosão por correntes de fuga, também chamada de correntes parasitas ou erráticas, ocorre em locais onde as estruturas estão muito próximas de fontes de corrente contínua, como metrô e trens, adutoras, subestações transformadoras de corrente, dentre outras.

Este processo ocorre quando uma parte da corrente utilizada nos trilhos, por exemplo, escapa e passa a fluir por entre as armaduras. Até este ponto, não há danos a estrutura. O problema acontece no ponto em que a corrente deixa a armadura para aterrar-se em um local do solo onde há baixa resistividade elétrica. Nestes locais, a corrente não é mais transportada por elétrons, e sim por íons, o que causa perda de massa do aço, gerando a corrosão. (HELENE, 1993)

4.1.8. ATAQUE POR ÁCIDOS

Devido ao fato do concreto ser um material extremamente alcalino, qualquer contato com ácidos é preocupante. A agressividade das soluções ácidas depende do tipo de sais formados e da solubilidade iônica. Quanto maior a solubilidade, mais agressiva é a solução ácida.

A ação dos ácidos sobre o concreto altera o equilíbrio químico dentro dos seus poros, causando a desagregação da matriz cimentícia. Em ambientes industriais, os gases poluentes entram em contato com o hidrogênio e o vapor de água da atmosfera, formando a chuva ácida, que causará a desagregação da matriz cimentícia devido ao baixo pH. Em ambientes que tem presença de esgoto, há muitas bactérias que são

responsáveis pela formação do ciclo do enxofre, onde há formação do ácido sulfúrico, que também degradará o concreto. (RIBEIRO, 2020)

4.2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Nem sempre o estudo do processo de corrosão das armaduras de concreto armado está somente ligado a deterioração das armaduras em si. As condições do concreto e da proteção que este oferece também são muito importantes para uma análise mais assertiva do problema, fornecendo o melhor diagnóstico possível.

A avaliação e o monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado podem ocorrer de diversas formas. Geralmente o primeiro passo é a inspeção visual. Não sendo este suficiente para a formação de um diagnóstico, passa-se a uma anamnese do problema, ou seja, a coleta de informações orais e recuperação de todos os dados disponíveis da obra. Caso ainda não seja suficiente, o próximo passo possível é a inspeção detalhada, efetuada tanto em campo, diretamente sobre a estrutura, quando em laboratório, em amostras coletadas da estrutura. (HELENE, 1993)

A inspeção detalhada realiza ensaios como a profundidade de carbonatação, teor de cloretos, teor de umidade, teor de sais solúveis, resistividade elétrica, dentre outros.

Os ensaios de profundidade de carbonatação e determinação do teor de cloretos são os dois únicos imprescindíveis para determinação das causas da corrosão. Os demais são complementares e ajudam a julgar a qualidade da estrutura do concreto, a qualidade do processo corrosivo, a velocidade de propagação, dentre outros. (HELENE, 1993)

4.2.1. INSPEÇÃO VISUAL

A inspeção visual, realizada a olho nu ou por meio de fotos e vídeos, é a técnica mais usada para avaliação do estado de corrosão em estruturas de concreto armado. Nesta etapa, deve-se procurar por regiões com deterioração aparentes e locais onde há possibilidade que sejam encontradas anomalias, mesmo que não sejam aparentes.

Também é possível avaliar as áreas onde pode ser necessário a inspeção detalhada, e quais ensaios e medições deverão ser realizados. (HELENE, 1993)

Geralmente, os sinais mais frequentes indicadores de corrosão são manchas acastanhadas sobre a superfície do concreto, fissuração, desagregação e eflorescências. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

A inspeção visual confirma o processo corrosivo, e em raros momentos consegue antecipar outros problemas corrosivos que estejam em formação. Desta forma, em alguns casos é de extrema necessidade que a inspeção detalhada seja planejada e realizada, a fim de que se tenha um diagnóstico mais preciso, com um custo de reparação menor.

4.2.2. PROFUNDIDADE DE CARBONATAÇÃO

A profundidade de carbonatação ou frente de carbonatação é um dos ensaios mais simples para verificação do fenômeno que pode favorecer a corrosão. Tradicionalmente são usados indicadores a base de fenolftaleína ou timolftaleína, que indicam mudança de pH da estrutura.

A solução de fenolftaleína geralmente é composta por 49% de álcool, 50% de água e 1% de fenolftaleína. Já a solução de timolftaleína, é composta por 99% de álcool e 1% de timolftaleína. (HELENE, 1993)

A fenolftaleína apresenta coloração róseo-avermelhada em valores de pH maiores ou iguais a 9,5 e incolor abaixo deste valor. Já a timolftaleína, apresenta coloração azulada em valores de pH maiores ou iguais a 10,5 e incolor abaixo deste valor. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

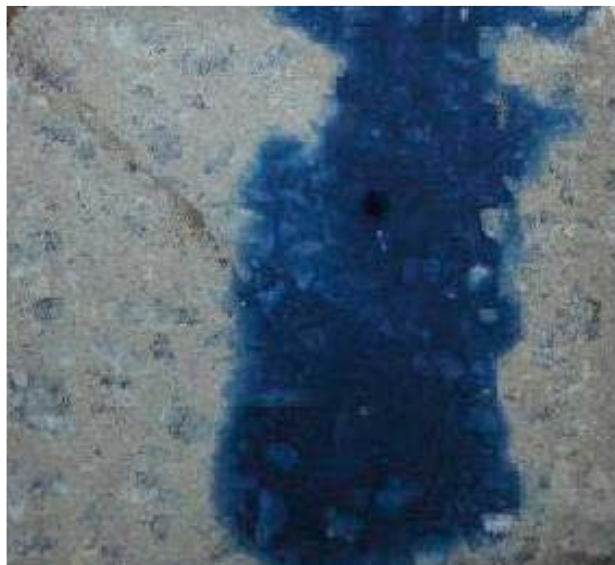
Nas fotografias 1 e 2 a seguir, é possível verificar a ação dos indicadores para a frente de carbonatação.

Fotografia 1: Corpos de prova com uso de fenolftaleína



Fonte: Próprio autor, 2018.

Fotografia 2: Uso da timolftaleína



Fonte: Meira, 2017.

Para realização correta deste ensaio, deve-se fraturar a região desejada e imediatamente aplicar a solução do indicador, pois superfícies expostas carbonatam-se rapidamente, alterando e comprometendo o objeto de estudo. (HELENE, 1993)

O objetivo principal deste ensaio é determinar se a profundidade de carbonatação chegou ou não até a armadura. Caso chegue, significa que contribuiu para a sua despassivação. Caso contrário, é possível estimar a vida útil residual desta estrutura. (HELENE, 1993)

Como o indicador varia sua coloração com o pH 9,5, e a armadura despassiva-se para valores de pH inferiores a 11,0, há casos em que a frente de carbonatação nem chegou à armadura, mas a mesma já sofre com o ataque, que pode ser agressivo. Portanto, deve-se ter cuidado ao analisar todos os dados disponíveis. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

4.2.3. TEOR DE CLORETOS

Os íons cloretos podem ser encontrados nas estruturas de concreto de 2 formas: como cloretos livres e como cloretos combinados. A soma dos cloretos livres e combinados é denominada cloretos totais ou teor de cloreto. A forma perigosa a corrosão são os cloretos livres. No entanto, é interessante determinar os cloretos totais, pois cloretos combinados podem vir a ficar disponíveis para relações deletérias devido a fenômenos como a carbonatação ou a temperatura. O teor de cloreto total também é o parâmetro para avaliação do grau de contaminação do concreto, pois praticamente todas as normas o estabelecem como parâmetro. (HELENE, 1993)

O método mais conveniente para medir o teor de cloretos seria a montagem do perfil de cloretos, onde são retiradas amostras do concreto em diferentes profundidades, pelo menos 3, até chegar ao seu interior. Com este perfil, é possível verificar qual o teor de cloretos ao nível da armadura, se já foi iniciado o processo de corrosão, ou se ainda há tempo de realização de medidas protetoras. (MEIRA, 2017)

As amostras para determinação do perfil de cloretos são amostras em pó que podem ser obtidas por meio de furos no concreto a profundidades específicas ou extração de testemunhos também com as profundidades desejadas. Neste processo é importante que não sejam utilizados nenhum tipo de fluido, pois podem interferir e remover

cloretos destas amostras. Na tabela 6 podem ser encontrados alguns métodos que podem ser empregados para analisar o teor de cloretos presentes nas amostras. As normas ASTM C1218 (ASTM, 2008) e C 1158 (ASTM, 2012) e as recomendações RILEM TC 178 (RILEM, 2002a, 2002b), apresentam procedimentos para a determinação de cloretos livres e totais. (MEIRA, 2017)

Tabela 6: Métodos de análise para determinação da concentração dos íons cloreto

Método	Funcionamento
Métodos volumétricos (Mohr, Vollard)	A quantidade de cloretos é obtida a partir do volume gasto de reagente até o ponto de viragem do indicador.
Potenciometria direta – eletrodo íon seletivo	A quantidade de cloretos é obtida a partir de uma relação direta entre o potencial do eletrodo íon seletivo e a concentração de cloretos.
Titulação potenciométrica	A quantidade de cloretos é obtida a partir do ponto de equivalência em uma curva que relaciona potencial e volume de reagente.
Fluorescência de raios X	A quantidade de cloretos é obtida a partir da emissão de raios X secundários ou fluorescentes característicos do material analisado. Não necessita de extração prévia.
Cromatografia iônica	Separa íons com base na interação com uma resina.

Fonte: Meira, 2017.

Até os dias atuais, não existe um consenso quanto ao limite de cloretos no qual é possível afirmar que não haverá despassivação das armaduras, pois este fato depende de outros fatores, como o tipo de cimento e a sua finura, relação água cimento, condições ambientais, dentro outros. Como um limite geral, considera-se que são suficientes 0,4% de cloretos totais em relação a massa de cimento ou 0,05 a 0,1% em relação ao peso do concreto para despassivar o aço. (HELENE, 1993)

A norma brasileira NBR 12655, determina os teores máximos de íons cloretos no concreto endurecido, considerando a contribuição de todos os componentes do concreto, em função da classe de agressividade do ambiente em que a estrutura se encontra, conforme tabela 7.

Tabela 7: Teor máximo de íons cloreto para proteção das armaduras do concreto

Classe de agressividade (5.2.2)	Condições de serviço da estrutura	Teor máximo de íons cloreto (Cl⁻) no concreto % sobre a massa de cimento
Todas	Concreto protendido	0,05
III e IV	Concreto armado exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,15
II	Concreto armado não exposto a cloretos nas condições de serviço da estrutura	0,30
I	Concreto armado em brandas condições de exposição (seco ou protegido da umidade nas condições de serviço da estrutura)	0,40

Fonte: NBR 12655, 2015.

4.2.4. TEOR DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO

O teor de umidade nos poros do concreto é a variável controla a entrada de oxigênio e gás carbônico até a armadura, e também a resistividade do concreto. Pode-se dizer, que indiretamente, essa é a variável que controla a velocidade da corrosão. Quando os poros estão saturados, o oxigênio tem dificuldade em penetrar no concreto e a resistividade está baixa. Quando os poros estão secos, o oxigênio chega com facilidade até a armadura e a resistividade está alta. Nestas duas situações, a velocidade de corrosão é muito baixa. No entanto, quando os poros estão parcialmente saturados, a resistividade é baixa e o oxigênio pode chegar com facilidade a armadura, aumentando a velocidade de corrosão. (HELENE, 1993)

Para determinação do teor de umidade de equilíbrio do concreto, basta calcular a diferença de massa entre a amostra submetida a umidade e a massa desta mesma amostra após passar pelo menos 24 horas em estufa a 105°C. (HELENE, 1993)

Ainda não há limites determinados para o teor de umidade de equilíbrio, porém segundo Medeiros et al (2017), é possível afirmar com 95% de significância que existe influência do teor de umidade sobre o potencial de corrosão. Maiores teores de umidade tendem a resultar em valores de potencial de corrosão mais eletronegativos devido ao aumento da condutividade elétrica do sistema.

4.2.5. TEOR DE SAIS SOLÚVEIS

Apesar de outros sais não serem tão agressivos as armaduras quanto os cloretos, eles também podem atuar como íons despassivantes, pois a presença de sulfatos, por exemplo, pode causar reações deletérias e formação de fissuras, acarretando em um aumento de permeabilidade e uma menor proteção da armadura. (HELENE, 1993)

Desta forma, pode ser conveniente determinar seu teor, para avaliar a qualidade do concreto do cobrimento das armaduras. O método descrito na norma NBR NM 19, pode ser utilizado para determinação de sulfatos no concreto. (HELENE, 1993, adaptado)

4.2.6. RESISTIVIDADE ELÉTRICA

A resistividade elétrica é uma propriedade muito utilizada para o monitoramento de estruturas de concreto armado, pelo fato de ser um processo não destrutivo e que pode ser monitorado externamente, sem a presença de eletrodos embutidos. A resistividade caracteriza a capacidade das estruturas em resistir a passagem de corrente elétrica, o que é muito importante, visto que a permeabilidade de fluidos e a difusividade de íons através dos poros do concreto, estão intimamente relacionadas com a velocidade do processo de corrosão das armaduras. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

O princípio da medida da resistividade elétrica consiste na aplicação de uma diferença de potencial entre dois ou mais eletrodos posicionados em duas faces opostas planas ou alinhados em uma mesma face, com posterior medição da corrente elétrica gerada. Desta forma, a partir da Lei de Ohm, pode-se determinar a Resistência (R), conforme demonstrado na equação 4. A resistividade (ρ) é obtida multiplicando-se o valor de R por um fator de conversão chamado constante de célula, que depende das dimensões do corpo de prova utilizado, conforme equação 5. Uma maior facilidade na passagem de corrente elétrica significa uma resistividade baixa, que pode significar uma contaminação por sais, ou maior quantidade de água retida na estrutura intersticial do concreto. A resistividade também pode ser alterada devido a natureza da corrente que atravessa o concreto. Correntes alternadas podem fornecer resultados de resistividade ligeiramente menores do que correntes contínuas. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

$$R = \frac{V}{I} \quad (4)$$

$$\rho = R \cdot k \quad (5)$$

Conforme Ribeiro e Cunha (2020), os valores de resistividade elétrica que indicam possibilidade de corrosão no concreto não são totalmente consagrados e podem variar de acordo com a pesquisa utilizada. Porém os valores da tabela 8 são comumente utilizados como referência.

Tabela 8: Valores de resistividade elétrica indicativos da probabilidade de corrosão do concreto segundo a CEB-192 e o boletim europeu COST 509

Resistividade (kΩ.cm)		Risco de corrosão
CEB-192	COST 509	
> 20	> 100	Desprezível
10 a 20	50 a 100	Baixo
---	10 a 50	Moderado
5 a 10	< 10	Alto
< 5	---	Muito alto

Fonte: Polder, 2001, apud RIBEIRO; CUNHA, 2020.

Portanto, pode-se dizer que a resistividade elétrica e a velocidade de corrosão possuem uma relação inversamente proporcional. Quanto menor a resistividade elétrica, maior a velocidade de corrosão. No entanto, este fator ainda depende do estado da armadura. Caso ela ainda esteja passiva, a velocidade de corrosão será baixa. Também ainda não há um acordo entre os limites dos intervalos que definem a relação entre a facilidade do processo corrosivo e a resistividade. (RIBEIRO; CUNHA, 2020)

4.3. PROCEDIMENTOS PARA RECUPERAÇÃO DE ESTRUTURAS QUE APRESENTAM CORROSÃO DE ARMADURAS

A necessidade de reparar ou reforçar estruturas, restaurando sua segurança e aumentando sua durabilidade tem se tornado cada vez mais comum por muitas razões, como estruturas mais esbeltas, solicitações mais intensas, ambientes mais agressivos, mudanças de uso da construção, dentre outros. (HELENE, 1992)

Para um reparo de uma estrutura de concreto armado eficiente, é necessário que anteriormente tenham sido feitos todos os estudos necessários para que se

identifiquem os sintomas, mecanismo, origem, causas e consequências da manifestação patológica apresentada, de modo que haja um diagnóstico assertivo. De posse deste diagnóstico, é possível identificar qual a melhor técnica a ser empregada para o reparo. Há casos em que o dano é tão extenso, que é necessário o reforço da estrutura.

É imprescindível também que sejam conhecidos os diferentes produtos utilizados e os métodos de reparos das estruturas, para que a melhor decisão, tanto tecnicamente quanto economicamente, seja tomada.

Com o desenvolvimento deste trabalho, é possível perceber que as causas das corrosões das armaduras, indiretamente, podem ser diversas, e uma simples fissuração do concreto pode abrir espaço para o começo do processo de corrosão. Desta forma, cada caso e cada manifestação patológica deve ser avaliada em separado, e deve ser tratada de forma diferente.

De modo a evitar um extenso estudo sobre as técnicas de reparo referentes as causas secundárias de corrosão das armaduras, nesta seção serão tratados os métodos utilizados para reparo de armaduras que sofreram com os fenômenos da carbonatação e da contaminação por cloretos.

Para a reabilitação de estruturas que sofreram contaminação por cloretos, as técnicas mais utilizadas são a proteção catódica e a dessalinização. Já para estruturas carbonatadas, é a recalinação. A proteção catódica tem o objetivo de reduzir a corrosão nas armaduras, durante toda a vida da estrutura, por meio de aplicação de corrente contínua externa. Já a dessalinização e a recalinação tem o objetivo de eliminar o agente agressor por meio da aplicação temporária de campo elétrico. (LOURENÇO, 2020)

O reparo convencional pode ser utilizado em todas as técnicas citadas anteriormente, como início do processo de tratamento, ou como única técnica empregada, dependendo do grau de deterioração da estrutura.

4.3.1. REPARO CONVENCIONAL

O reparo convencional trata-se de um processo simples, porém muito importante para a restauração da vida útil de uma estrutura de concreto armado deteriorada. Seus níveis de intervenção dependem muito da causa e do avanço do processo de deterioração que uma estrutura está sofrendo. Neste caso, para exemplificação do método, será considerado o reparo de uma estrutura que sofreu com o processo de corrosão das armaduras, com desagregação do concreto, independentemente da causa deste fenômeno.

Neste caso, de acordo com Helene (1992), o procedimento deverá ser o seguinte:

- a) Remoção cuidadosa do concreto afetado e os produtos da corrosão, limpando bem as superfícies, geralmente utilizando as técnicas de escarificação manual ou disco de desbaste;
- b) Reconstituir a seção original da armadura, quando for o caso, por meio de reforço, reconstituindo a seção das armaduras, podendo ser realizadas por transpasse, ou luva ou solda;
- c) Em casos de início de corrosão, sem comprometimento do concreto e das barras de aço, recuperar o componente estrutural, mantendo as dimensões através de argamassa polimérica base cimento, ou argamassa base epóxi, ou argamassa base poliéster, e eventualmente, aplicar argamassa em todas as superfícies para aumentar o cobrimento e proteger o componente estrutural, atingindo a espessura mínima de cobrimento especificada na NBR 6118;
- d) Em casos avançados de corrosão, reforçar o componente estrutural, aumentando as dimensões originais através de reforço em vigas, pilares e lajes;
- e) Aplicar revestimento de proteção, que podem ser: revestimentos constituídos para barreiras espessas, que são indicados em situações de elevada abrasão ou impacto quando o concreto está em contato contínuo com líquidos sob pressão, produtos químicos ou vapores agressivos; ou pinturas de proteção, que podem ser pinturas hidrofugantes, que tornam a superfície do concreto repelente a água, sem contudo, impedir a passagem de gases de vapor de água, ou pinturas impermeabilizantes, que formam uma película semiflexível e contínua, e atua como barreira de baixa permeabilidade a gases, a água e ao vapor d'água;

f) Eventualmente, demolir e reconstruir.

Caso a estrutura esteja com o processo de corrosão bem avançado, e sofra com a carbonatação ou contaminação de cloretos, sendo estas causas persistentes ou não, deverão ser estudados outras técnicas complementares de reparo que sejam viáveis além desta, conforme descrito nos próximos itens deste trabalho.

4.3.2. PROTEÇÃO CATÓDICA

Para estruturas de concreto armado contaminadas com cloretos, a técnica de reparo mais utilizada é a proteção catódica. Suas primeiras aplicações ocorreram nos anos 1970, nos Estados Unidos, para controlar a corrosão das armaduras nos tabuleiros de pontes. (LOURENÇO, 2020)

Segundo Loureço (2020), em 1982 a Federal Highway Administration nos Estados Unidos, reconheceu a proteção catódica como a única técnica de reabilitação capaz de eliminar a corrosão de estruturas deterioradas, independentemente do teor de cloretos. Tem sido usada em diferentes tipos de estruturas, principalmente em estruturas expostas ao ambiente marinho e, em alguns países, em estruturas como tabuleiros de pontes e parques de estacionamento, devido a contaminação do concreto pelo sal de degelo.

A técnica da proteção catódica consiste na utilização de circulação de corrente contínua entre um eletrodo (ânodo) exposto ao ambiente e o metal a proteger (cátodo). Com a aplicação de corrente no metal, há um decréscimo do seu potencial de corrosão, para que a velocidade de corrosão se torne zero ou suficientemente reduzida. A aplicação da proteção catódica pode ser realizada de duas maneiras: por ânodos de sacrifício, onde o metal a ser protegido é ligado diretamente a um metal mais ativo, que se dissipa gradualmente libertando elétrons, gerando corrente elétrica entre os metais; ou por corrente impressa, onde utiliza-se um ânodo inerte e uma fonte exterior de alimentação de corrente contínua. (LOURENÇO, 2020)

A seguir, tem se uma explicação mais detalhada sobre cada tipo de proteção e algumas informações sobre sua instalação.

a) Proteção catódica por ânodo de sacrifício

Neste tipo de proteção catódica, também chamado de proteção galvânica, a corrente elétrica é conseguida por meio da diferença de potencial natural entre dois metais diferentes, sendo o aço carbono da armadura o cátodo, e outro metal menos nobre sendo o ânodo. Geralmente os metais mais adotados neste tipo de proteção são o zinco, alumínio, magnésio, e ligas destes metais. (ARAUJO; PANOSSIAN; LOURENÇO, 2013)

De acordo com Araújo, Panossian, Lourenço (2013), além da presença desta diferença de potencial, para que o método seja eficiente, é necessário que o meio apresente uma resistividade baixa, para que o fluxo de corrente seja contínuo. Em estruturas de concreto, esta baixa resistividade é conseguida quando a mesma está exposta a uma umidificação constante ou imersa. Caso uma destas condições não ocorra, pode haver uma queda de corrente, comprometendo a proteção da armadura.

Para instalação, os ânodos poderão ser ligados diretamente às armaduras, por meio da soldadura direta da barra de fixação (pastilha) ou por cabos elétricos. Em concretos enterrados, os ânodos geralmente são colocados a uma certa distância da estrutura a ser protegida e são inseridos materiais de enchimento, como uma mistura de gesso, bentonita e sulfato de sódio. (LOURENÇO, 2020)

b) Proteção catódica por corrente impressa

Na proteção catódica por corrente impressa, a corrente de proteção é fornecida por imposição de tensões elétricas geradas por uma fonte externa de alimentação. Normalmente esta fonte são os retificadores, que retificam a corrente alternada, sendo o polo positivo conectado a um ânodo, e o polo negativo conectado a armadura. (ARAUJO; PANOSSIAN; LOURENÇO, 2013)

O ânodo, neste caso, é um metal condutivo de tempo de vida elevado, que é embutido no concreto ou aplicado em sua superfície. Ele tem a função de distribuir a corrente nos elementos da estrutura. Neste sistema, é possível regular facilmente a corrente liberada pelos ânodos, em função das medidas dos potenciais da estrutura/meio, mediante ajuste na saída do retificador. (ARAUJO; PANOSSIAN; LOURENÇO, 2013)

Segundo Lourenço (2020), para estruturas aéreas (expostas a atmosfera), os ânodos mais resistentes e com um longo histórico de utilização são: malha de titânio ativado, revestida com óxidos de metais nobres (Ti/MMO), fitas de malha de Ti/MMO, ânodos discretos ou singulares e ânodos galvânicos. O sistema mais utilizado no Brasil atualmente é constituído por discos ou pastilhas de zinco instaladas nas zonas de reparação localizada. Os ânodos são encapsulados em argamassas especiais, condutoras e alcalinas, que mantêm o zinco ativo e acomodam os produtos de sua corrosão. São instalados nas zonas reparadas, fixos diretamente às armaduras, durante a reparação da estrutura.

Por fim, para a escolha da técnica ou material mais eficaz para a reparação dessas estruturas, é necessário que seja elaborado um projeto de um sistema de proteção, considerando a seleção do sistema de ânodo mais adequado, a determinação do número, dimensão, localização e método de instalação dos ânodos, a divisão do sistema em zonas anódicas independentes, considerando as diferentes necessidades de corrente, as variações na contaminação e na resistividade do concreto e o ambiente de exposição de cada parte da estrutura, para que ocorra a polarização adequada e uniforme em todas as suas partes. (LOURENÇO, 2020)

4.3.3. DESSALINIZAÇÃO

A dessalinização é um método eletroquímico temporário, que tem a função de remover os cloretos de estruturas de concreto contaminadas por este íon. Consiste na aplicação de corrente elétrica contínua entre a armadura do concreto (cátodo) e um ânodo externo aplicado na superfície do concreto embebido com uma solução eletrolítica. Neste processo, ocorrem simultaneamente a eletrólise e a eletromigração iônica. (LOURENÇO, 2020)

Na eletrólise, há a formação de íons hidróxido (OH^-), que torna a envoltória das armaduras um ambiente alcalino, que conduz a sua passivação. Na eletromigração, os íons cloreto são atraídos para o ânodo externo, e íons de sódio, potássio e cálcio são atraídos para o cátodo (armaduras). Deste modo, os íons cloretos são retirados da estrutura contaminada, e as armaduras encontram-se novamente passivadas. (LOURENÇO, 2020)

De acordo com Lourenço (2020), a duração do tratamento pode variar entre quatro a sete semanas, no geral, dependendo da concentração inicial de cloretos e da sua origem, da qualidade do concreto, da geometria da estrutura e da distribuição das armaduras no elemento a tratar. Para determinar a finalização do processo, podem ser utilizados vários critérios ou a combinação deles, como a medição do teor de cloretos no concreto, através de amostras retiradas da área em tratamento, e a razão Cl^-/OH^- .

Os materiais mais utilizados nessa técnica são a malha de titânio ativado, ânodo inerte e não consumível, e malha de aço carbono, consumida no processo. O eletrólito mais comum é a água, porém ela pode se acidificar, como resultado das reações anódicas, tendendo a baixar o pH. Neste caso, ela pode ser substituída por soluções aquosas de hidróxido de cálcio ou de borato de lítio. Ao fim do tratamento, o circuito elétrico é interrompido, o ânodo e o suporte são removidos, e a superfície limpa antes de aplicação do revestimento final. (LOURENÇO, 2020)

4.3.4. REALCALINIZAÇÃO

A Realcalinização é uma técnica semelhante a Dessalinização, pois também usa de um método eletroquímico temporário. Consiste na aplicação de corrente contínua entre a armadura do concreto (cátodo) e uma malha metálica externa (ânodo), encapsulada em um eletrólito. Neste processo ocorrem vários processos físico-químicos simultaneamente, mas em velocidades diferentes; a produção de íons hidróxido e o transporte do eletrólito alcalino no concreto por eletrosmose. (LOURENÇO, 2020)

A produção de íons OH^- , fornecida pela corrente elétrica, induz ao nível das armaduras o aumento do pH para valores acima de 13,5. Como o número de transporte de íons OH^- é elevado, eles acabam se afastando um pouco das armaduras, aumentando a zona realcalinizada e desta forma, garantindo a passivação por longos períodos após o tratamento. Já no processo de eletrosmose, os íons OH^- existentes na solução eletrolítica migram do exterior para o interior do concreto. (LOURENÇO, 2020)

De acordo com Lourenço (2020), a duração do tratamento pode variar ente alguns dias a algumas semanas, dependendo de alguns fatores, como a profundidade de

carbonatação, a espessura do revestimento, a qualidade do concreto e a geometria das armaduras. A finalização do processo é determinada por medições regulares de pH através de aplicação do indicador solução alcoólica de fenolftaleína em corpos de prova retirados de diferentes partes da estrutura, que possuem condições diversas.

Os materiais mais utilizados nesta técnica são a malha de aço como ânodo, visto que neste caso o tempo de tratamento é menor, e a malha não será totalmente consumida, como pode ocorrer no processo de dessalinização, e como eletrólito, são usadas soluções aquosas de metais alcalinos, como o sódio ou potássio. Ao fim do tratamento, o circuito elétrico é interrompido, o ânodo e o suporte são removidos, e a superfície limpa antes de aplicação do revestimento final. (LOURENÇO, 2020)

4.4. COMPARATIVO ENTRE TÉCNICAS DE RECUPERAÇÃO E REFORÇO DE ESTRUTURAS

De acordo com Souza e Ripper (2009), os reparos das estruturas podem ser classificados em reparos de pequena monta ou grande monta. Os reparos de pequena monta são aqueles de caráter ocasional ou manutenção rotineira, que poderão ser executados por pessoal próprio de manutenção. Alguns exemplos são selagem de juntas de dilatação com elastômeros, modificação da declividade de pisos, reconstituição de pingadeiras, pequenos trabalhos de reconstituição do revestimento das armaduras que foram expostas por erosão do concreto ou choque mecânico, dentre outros. Já os reparos de grande monta, podem ser divididos em 3 grupos básicos: renovação integral do pavimento, revisão da impermeabilização e execução de reparos estruturais. Para os três grupos, é recomendado que os trabalhos relativos aos mesmos sejam entregues a empresas especializadas, e a execução seja feita por pessoal técnico qualificado.

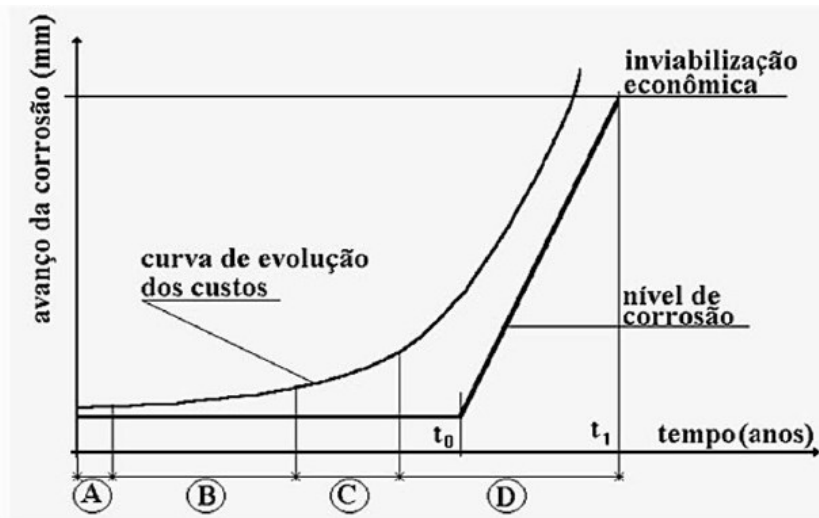
Os trabalhos de reforço podem se fazer necessários por diversas razões, como a necessidade de aumento da capacidade de carga da estrutura, correção de danos causados por agentes externos (choques, correntezas, incêndios, etc.), ou pela deterioração da obra em grau muito elevado. Nestes casos, é imprescindível que haja um projeto de reforço, realizado por engenheiro estrutural familiarizado com este tipo de serviço e para a execução, pessoal e empresas altamente especializadas. (SOUZA; RIPPER, 2009)

Há casos ainda em que após análises técnicas e econômicas, opta-se pela não intervenção, como situações de danos muito graves, de custos elevados para os trabalhos de reforço e recuperação, ou ainda casos em que o próprio propósito funcional da estrutura já ficou ou ficará ultrapassado em breve. Nestes casos, a não intervenção pode significar a demolição a curto ou médio prazo (condicionado a acompanhamento técnico), ou a utilização da estrutura para outro tipo de função, ou seu uso sob restrições. (SOUZA; RIPPER, 2009)

A decisão entre recuperar ou não uma estrutura depende de vários fatores, porém o primordial deles é o técnico-econômico. Uma análise de caso bem feita e um bom prognóstico, podem definir um plano de manutenção mais adequado a situação, a fim de que se estenda ou se mantenha a vida útil da estrutura.

No gráfico 2 a seguir, é possível a observação das fases da vida útil da estrutura em relação aos custos necessários para reparo.

Gráfico 2: A “Lei dos cinco”



t_0 - idade em que se inicia a corrosão generalizada

t_1 - fim da vida útil da estrutura

Fase A: Projeto - Construção - Cura.

Fase B: Pré-corrosão, com início da carbonatação e ataque de cloretos.

Fase C: Evidência de corrosão localizada.

Fase D: Corrosão generalizada.

“Um dólar não gasto para garantir qualidade na fase A será cinco dólares gastos em manutenção preventiva na fase B, ou vinte e cinco dólares para a manutenção corretiva na fase C, ou, por fim, cento e vinte e cinco dólares de recuperação/reforço na fase D.”

Fonte: Souza e Ripper, 2009.

A Lei dos cinco é explicada por De Sitter (C.E.B. - Design Guide for Concrete Durable Structures, e nos mostra que é sempre fundamental o estabelecimento de uma estratégia de manutenção em seu devido tempo, e quando não for possível, que seja definida a época apropriada para seguimento dos devidos reparos, a fim de que não se incorra o erro de maximizar os custos com a manutenção estrutural. (SOUZA; RIPPER, 2009)

5. ESTUDO DE CASO

A fim de exemplificação do conteúdo estudado neste trabalho, será apresentado a seguir um estudo de caso envolvendo corrosão de armaduras em estruturas de concreto armado, desenvolvido pelos professores Cristiane Machado Parisi Jonov e Adriano de Paula e Silva.

Trata-se de um parecer técnico com elaboração de plano de trabalho para correção de manifestações patológicas encontradas na garagem de um edifício situado no bairro Santa Efigênia, na cidade de Belo Horizonte, MG, no ano de 2005.

Foi realizada uma vistoria no local, e identificadas diversas manifestações patológicas nas bases de pilares e em paredes de alvenaria ali situados. Nas fotografias 3 e 4, é possível verificar algumas áreas periciadas nesta ocasião.

Após finalização da vistoria, onde cada pilar e parede de alvenaria foram avaliados individualmente, foram identificadas as 04 principais situações em que os mesmos se encontravam, conforme descrição a seguir:

Situação 1: Pilares com manifestações patológicas no revestimento e comprometimento parcial do pilar, com perda de cobrimento e armadura exposta;

Situação 2: Pilares com manifestações patológicas no revestimento argamassado (reboco), porém sem comprometimentos no corpo do pilar (concreto e armadura);

Situação 3: Pilares em situação normal, sem apresentação de manifestações patológicas;

Situação 4: Paredes apresentando manchas de umidade e revestimento argamassado sem aderência a alvenaria.

Nas fotografias 5 e 6 é possível verificar os pilares que se enquadraram na situação 1, mais crítica. Esta situação em específica será abordada neste estudo de caso, com demonstração da solução apresentada para recuperação destes elementos estruturais.

Fotografia 3: Vista da rampa de acesso ao local periciado (garagem do edifício)



Fonte: Parisi e Silva (2005)

Fotografia 4: Vista parcial da área periciada (fundos da garagem)



Fonte: Parisi e Silva (2005)

Fotografia 5: Pilar P10



Fonte: Parisi e Silva (2005)

Fotografia 6: Pilar P11 após retirada do revestimento comprometido



Fonte: Parisi e Silva (2005)

Para recuperação dos pilares enquadrados na situação 1, foi sugerida a adoção do procedimento descrito a seguir. Este procedimento foi detalhado, até mesmo com os produtos existentes na época, a fim de que fosse utilizado como plano de trabalho para pedreiro e servente na execução de reparo dos elementos deteriorados.

- a) Retirada do reboco comprometido e das partes mal aderidas de cobrimento de concreto até altura de 90 cm;
- b) Efetuar a limpeza da armadura com o produto RD-CAP (fabricante BOTAMENT);
- c) Realizar uma pintura anticorrosiva para proteção da armadura e sua aderência à argamassa com o produto BOTAFIX PRIMER (fabricante BOTAMENT);
- d) Para reconstituição do cobrimento de concreto da armadura deve ser utilizada a argamassa estrutural BOTAFIX RP50 (fabricante BOTAMENT). Esse produto é fornecido em saco de 25 Kg ao qual deve ser adicionado 3,5 l de água;
- e) Aplicar o produto BOTATOP IMPER (fabricante BOTAMENT) sobre a argamassa estrutural para impedir o acesso da água do solo. Esse produto deve ser aplicado em 3 demãos cruzadas adicionando-se à cada caixa de 18 Kg, 4,5 l de água;
- f) Para execução do reboco, utilizar o produto POLYMASSA FIBRA DE POLIPROPILENO (fabricante BOTAMENT) no traço 1(cimento):3(areia):100 g de fibra, utilizando na água de emassamento o produto BOTAMIX ADPLUS (fabricante BOTAMENT) no traço 1(ADPLUS):3(água);
- g) Efetuar a pintura com tinta NOVACOR PISO cor amarela;
- h) Aplicar o produto BOTATOPSS (fabricante BOTAMENT) em duas demãos cruzadas.

Desta forma, percebe-se que, como o processo de corrosão de armaduras neste caso não estava tão avançado, apenas o reparo convencional foi suficiente para solução do problema. Além da reconstrução do elemento estrutural, foram tomadas medidas para que a deterioração não voltasse a ocorrer, como o uso de pintura anticorrosiva na armadura, e aplicação de um produto impermeabilizante após reconstrução do cobrimento, a fim de que a água do solo não entrasse em contato com os pilares novamente e desencadeasse um novo processo corrosivo.

6. ANÁLISES E CONCLUSÕES

Após análises, verifica-se que cada caso, por mais simples ou complexo que seja, é de suma importância que sejam estudados e identificados todos os sintomas, mecanismos, origens, causas e consequências das manifestações patológicas encontrados em uma estrutura de concreto armado. A partir destes dados, é possível a definição de um diagnóstico e um prognóstico mais assertivo para definição de um plano de ação para reparo, reforço ou condenação desta estrutura.

No caso de corrosão das armaduras, as causas, o nível de deterioração e o meio em que se encontra a estrutura, definem qual o melhor tipo de tratamento para a mesma. Caso tenha ocorrido carbonatação ou contaminação por cloretos, e o meio forneça esta facilidade para sua deterioração, podem ser escolhidos métodos de tratamento temporários, como a dessalinização e a realcalinização ou permanentes, como a proteção catódica.

Dependendo do nível de contaminação da estrutura, definido através dos indicadores e ensaios, é possível determinar se um simples reparo convencional, com retirada de material deteriorado e futura reconstrução será suficiente para solução do problema, ou serão necessárias técnicas complementares.

O reforço das estruturas é indicado em casos específicos, como ocorrência de avançado estado de deterioração, correção de danos por agentes externos ou aumento de cargas em relação ao projeto. Devem ser realizadas amplas análises sobre sua viabilidade técnica-econômica, a fim de que a melhor decisão seja tomada.

REFERÊNCIAS

- ARAUJO, A.; PANOSSIAN, Z.; LOURENÇO, Z. Proteção catódica de estruturas de concreto. **Revista Ibracon de Estruturas e materiais**. São Paulo, v. 6, n. 2, p. 186-193, abr. 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento**. Rio de Janeiro, 2015.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575: Edificações Habitacionais – Desempenho. Parte 1: requisitos gerais**. Rio de Janeiro, 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro, 2014.
- GJØRV, Odd E.. **Projeto da durabilidade de estruturas de concreto em ambientes de severa agressividade**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.
- HELENE, Paulo Roberto do Lago. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. 248 f. Tese (Professor Livre Docente) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 1993.
- HELENE, Paulo. Introdução. In: RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.1-10.
- HELENE, Paulo. **Manual para reparo, reforço e proteção de estruturas de concreto**. 2.ed. São Paulo: Pini, 1992.
- LOURENÇO, M. Zita. Uso de técnicas eletroquímicas para a reabilitação de estruturas. In: RIBEIRO, Daniel Vêras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.351-370.
- MEDEIROS, M. H. F. et al. Potencial de corrosão: influência da umidade, relação água/cimento, teor de cloretos e cobrimento. **Revista Ibracon de Estruturas e materiais**. São Paulo, v. 10, n. 4, p. 875-885, ago. 2017.
- MEIRA, Gibson Rocha. **Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: Fundamentos, Diagnóstico e Prevenção**. João Pessoa: IFPB, 2017.
- PARISI, Cristiane Machado; SILVA, Adriano de Paula. **Parecer Técnico**. Belo Horizonte, 2005.
- PORTO, Thiago Bomjardim; FERNANDES, Danielle Stefane Gualberto. **Curso básico de concreto armado**. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

POSSAN, Edna; DEMOLINER, Carlos Alberto. Desempenho, Durabilidade e vida útil das edificações: Abordagem geral. **Revista técnico-científica do CREA-PR - ISSN 2358-5420**. p. 1-14, out. 2013.

RIBEIRO, Daniel Véras. Corrosão em estruturas de concreto armado como consequência da carbonatação e da ação dos cloretos. In: _____. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.125-158.

RIBEIRO, Daniel Véras. Deterioração das estruturas de concreto. In: _____. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.159-189.

RIBEIRO, Daniel Véras; CASCUDO, Oswaldo. Durabilidade e vida útil das Estruturas de Concreto. In: RIBEIRO, Daniel Véras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.33-50.

RIBEIRO, Daniel Véras; CUNHA, Manuel Paulo Teixeira. Uso de técnicas de avaliação e monitoramento da corrosão em estruturas de concreto armado. In: RIBEIRO, Daniel Véras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.291-350.

SOUSA, Carlos Alberto Caldas de. Princípios da corrosão eletroquímica. In: RIBEIRO, Daniel Véras. **Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, controle e técnicas de análise e intervenção**. 2.ed. Rio de Janeiro: GEN, 2020. p.11-32.

SOUZA, Rui Barbosa de. **Suscetibilidade de pastas de cimento ao ataque por sulfatos – Método de ensaio acelerado**. 131f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

SOUZA, Vicente Custódio Moreira de; RIPPER, Thomaz. **Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto**. São Paulo: Pini, 2009.