



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO-AÇO
AFETADAS PELA CORROSÃO

São Luís
2025

Davidson José Alencar da Silva - 2021071474

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO-AÇO
AFETADAS PELA CORROSÃO

Projeto apresentado a cadeira de conclusão de curso II (TCC II) para à coordenação do curso de Engenharia Mecânica como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Vilson Souza Pereira

São Luís

2025

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Silva, Davidson José Alencar.

CARACTERIZAÇÃO DINÂMICA DE ESTRUTURAS DE CONCRETO-AÇO
AFETADAS PELA CORROSÃO / Davidson José Alencar Silva. -
2025.

65 f.

Coorientador(a) 1: Maria Eliziane Pires Souza.

Orientador(a): Vilson Souza Pereira.

Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Maranhão, São Luis - Ma, 2025.

1. Concreto-aço. 2. Corrosão. 3. Elementos Finitos.
4. Análise Modal. 5. Resposta Em Frequência. I.
Pereira, Vilson Souza. II. Souza, Maria Eliziane Pires.
III. Título.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr Dalmo Inacio Galdez Costa
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
Coordenação de Engenharia Mecânica - CCEM

Prof. Dr. Edilson Dantas Nobrega
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
Coordenação de Engenharia Mecânica - CCEM

Prof. Dra Maria Eliziane Pires de Souza (Co-orientadora)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
Coordenação de Engenharia Mecânica - CCEM

Prof. Dr. Vilson Souza Pereira (Orientador)
Universidade Federal do Maranhão - UFMA
Coordenação de Engenharia Mecânica - CCEM

Candidato: Davidson José Alencar da Silva

Título da dissertação: “Caracterização dinâmica de estruturas de concreto-aço afetadas pela corrosão”

Data da defesa: 04/08/2025

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por me conduzir até aqui e me permitir chegar a este momento tão importante. Durante todos esses anos de graduação, enfrentei inúmeros desafios, mas também vivi intensos aprendizados. Foi um período de crescimento, de superação e, sem dúvidas, de realização pessoal e profissional.

Aos meus pais, **Selma Alencar da Silva** e **Antônio José Viana da Silva**, agradeço profundamente por todo o amor, apoio incondicional e incentivo em cada etapa da minha vida. Dedico a vocês esta conquista, como reconhecimento de todo o esforço, dedicação e sacrifícios que fizeram por mim. Sem vocês, nada disso seria possível.

Ao meu orientador, **Prof. Dr. Vilson Souza Pereira**, registro minha sincera gratidão pela paciência, dedicação e constante disponibilidade. Agradeço por compartilhar não apenas seu vasto conhecimento técnico, mas também sua visão humana e comprometida com a pesquisa, contribuindo de forma essencial para que este trabalho fosse possível.

A todos os amigos que conquistei ao longo desta jornada, deixo meu sincero agradecimento. Em especial, à **Bruna Cristina Santos Sousa**, minha parceira inseparável em todos os trabalhos; à **Glaucia Gabriella Rodrigues** e ao **Gabriel Felipe Carvalho Silva**, verdadeiros “conselheiros master”, por todo o apoio, companheirismo e por estarem sempre presentes quando mais precisei. Ao meu amigo **Thadeu Nascimento**, pela ajuda, apoio e incentivo nos momentos de incerteza.

RESUMO

O concreto armado é um dos materiais estruturais mais comumente utilizados no mundo e é empregado em vários tipos de construções. No entanto, a presença de vergalhões de metal torna o material suscetível à corrosão, um fenômeno responsável por uma parte significativa dos danos às estruturas de concreto armado, esse fato se deve ao maior volume de produtos de corrosão que induzem pressão nas proximidades do concreto, gerando tensões em sua cobertura e o surgimento de fissuras na interface entre os vergalhões e o concreto, reduzindo a rigidez local e alterando a resposta vibracional da estrutura. Além disso, a corrosão só pode ser percebida quando a estrutura já está danificada, o que pode ocasionar fraturas abruptas das estruturas. Nesse sentido, este trabalho investiga os efeitos da corrosão em corpos de provas de concreto armado por meio de ensaios experimentais e simulações numéricas. Foram moldados corpos de prova prismáticos de concreto armado, submetidos a um processo de corrosão eletroquímica controlado, com o objetivo de avaliar alterações em suas propriedades dinâmicas. A caracterização foi realizada com base na norma ASTM C215-19, utilizando o método de ressonância por impacto para obtenção das frequências de ressonância relacionadas aos modos longitudinal e torcional. Com os dados obtidos, foram construídos modelos numéricos no software ANSYS com auxílio do método dos elementos finitos, permitindo simular a resposta dinâmica da estrutura antes e após a corrosão. A análise comparativa entre os resultados experimentais e numéricos possibilitou avaliar a variação dos parâmetros modais, como frequências naturais e rigidez, em função da deterioração provocada pela corrosão nas armaduras. Os resultados demonstram o potencial do método como ferramenta não destrutiva para monitoramento estrutural de elementos de concreto-aço.

Palavras Chaves: Concreto-aço; Corrosão; Elementos finitos; Análise modal; Resposta em frequência; Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

Reinforced concrete is one of the most widely used structural materials in the world, applied in various types of construction. However, the presence of steel rebars makes it susceptible to corrosion—a phenomenon responsible for a significant portion of damage to reinforced concrete structures. This occurs due to the increased volume of corrosion products, which induce pressure on the surrounding concrete, generating stresses in the cover layer and causing cracks at the rebar–concrete interface. These effects reduce local stiffness and alter the vibrational response of the structure. Furthermore, corrosion often becomes noticeable only after significant structural damage has occurred, potentially leading to abrupt failures. In this context, this study investigates the effects of corrosion on reinforced concrete specimens through experimental tests and numerical simulations. Prismatic reinforced concrete specimens were cast and subjected to a controlled electrochemical corrosion process to evaluate changes in their dynamic properties. Characterization was performed in accordance with ASTM C215-19, using the impact resonance method to obtain resonance frequencies related to the longitudinal and torsional modes. Based on the collected data, numerical models were developed in ANSYS using the finite element method to simulate the dynamic response of the structure before and after corrosion. A comparative analysis between experimental and numerical results allowed for the evaluation of variations in modal parameters, such as natural frequencies and stiffness, as a function of reinforcement deterioration caused by corrosion. The results demonstrate the potential of this approach as a non-destructive tool for structural health monitoring of reinforced concrete elements.

Palavras Chaves: Reinforced concrete; Corrosion; Finite elements; Modal analysis; Frequency response; Mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.	15
Figura 2 - Diferentes formas de corrosão	19
Figura 3 - Representação dos compostos oriundos da corrosão	23
Figura 4 - Deterioração da corrosão das armaduras..	24
Figura 5 - Representação do modelo Kiani e Shodja	26
Figura 6 - Discretização de uma viga por elementos finitos	28
Figura 7 - Sólido tridimensional. Vetor deslocamento em um ponto.....	29
Figura 8 - Elementos hexaédricos	31
Figura 9 - Ensaio para modo longitudinal, ASTM C215-19.	38
Figura 10 - Ensaio para modo Torcional	39
Figura 11 - Corpo de prova de concreto	40
Figura 12 - Vergalhões recobertos com resina epóxi com uma região isolada	41
Figura 13 - Ensaio de indução de corrente	42
Figura 14 - Bancada de ensaio dinâmico	42
Figura 15 - Esquema de montagem dos instrumentos.....	43
Figura 16 - Exemplo de pulso de excitação.....	43
Figura 17 - Ensaio para modo longitudinal	44
Figura 18 - Ensaio para modo Torcional	45
Figura 19 - Modelo numérico de corpo de prova	45
Figura 20 - Caracterização dos materiais para cada ensaio	46
Figura 21 - Malha Resultante	47
Figura 22 - Análise modal	48
Figura 23 - Ensaio experimental (FRF), teste 1.....	49
Figura 24 - Ensaio experimental (FRF), teste 2.....	50
Figura 25 - Ensaio experimental (FRF), teste 3.....	50
Figura 26 - Ensaio experimental (FRF), teste 4.....	51
Figura 27 -Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 1	53
Figura 28 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 2.....	54
Figura 29 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 3.....	55
Figura 30 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 4.....	56
Figura 31 - Comparação entre os ensaios experimentais	58
Figura 32 - Comparação entre os ensaios numéricos	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valor do coeficiente de aderência.	17
Tabela 2 - Coordenadas naturais para elementos hexaédrico linear.....	31
Tabela 3 - Resultados de diferentes frequências para configurações de malhas distintas.....	47
Tabela 4 - Frequências naturais capturadas pelo ensaio de ressonância.	51
Tabela 5 - Propriedades dinâmicas.....	52
Tabela 6 - Amortecimento dinâmicos (ζ).	52
Tabela 7 - Frequências de ressonância obtidas pelo ensaio numérico.	57
Tabela 8 - Erro associado aos ensaios experimentais e numéricos.	60

Sumário

1.	Introdução	11
2.	Justificativa.....	12
3.	Objetivos.....	13
3.1	Objetivo Geral	13
3.2	Objetivo Específicos.....	13
4.	Revisão Bibliográfica	14
4.1	Composição e propriedades do concreto armado	14
4.1.1.	Definição do concreto como um material compósito	14
4.1.2.	Propriedades do aço em estruturas de concreto armado	16
4.2	Fundamentos da corrosão	17
4.2.1.	Formas de corrosão.....	16
4.3	Corrosão em estruturas de concreto armado	20
4.3.1.	Mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto	20
4.3.1.1	Permeabilidade	21
4.3.1.2.	Absorção capilar.....	21
4.3.1.3.	Difusão	21
4.3.2.	Corrosão por carbonatação	22
4.3.3	Corrosão nas armaduras.....	22
4.4	Modelagem da propagação da corrosão	24
4.4.1.	Modelo Kiani e Shodja	25
4.4.2.	Modelo de Rodriguez e Andrade	16
4.5	Método dos elementos finitos (MEF).....	27
4.5.1.	Campo de deslocamentos.....	29
4.5.2	Campo de deformações específicas	14
4.5.3.	Campo de tensões	34

4.6	Modelagem Computacional utilizando ANSYS	35
4.7	Análise modal	36
4.8	Normas Utilizadas	37
5.	Metodologia.....	39
5.1.	Preparação dos corpos de prova.....	40
5.2.	Ensaio dinâmico	42
5.3.	Modelo numérico.....	45
6.	Resultados e discussão	49
7.	Conclusão	60
8.	Referências Bibliográficas.....	62

1. INTRODUÇÃO

Os materiais metálicos estão suscetíveis a corrosão devido aos mais diferentes fatores, sendo esse um processo espontâneo. A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, aliada ou não a esforços mecânicos (GENTIL, 1994). Esse fenômeno é responsável por causar danos e prejudicar a eficiência de materiais, equipamentos e estruturas, causando efeitos indesejáveis. Em 2015, foi realizado um levantamento pela *International Zinc Association*, que mostrou que no Brasil 4% do produto interno bruto (PIB) foi utilizado com perdas associados a ação da corrosão (DALLAGO, 2019).

Em regiões costeiras com atmosfera marinha, a corrosão dos materiais agrava-se devido à exposição aos sais e à umidade, resultando em rápida deterioração dos materiais em geral. Em virtude de fatores como concentração de sais, velocidade do vento e umidade as regiões costeiras são caracterizadas como ambientes extremos, onde a combinação desses fatores intensifica a corrosão (Roberge et al., 2008). Em razão disso há uma preocupação intensa com a integridade e durabilidade dos materiais, estruturas e equipamentos presentes nessas regiões, tais como os elementos estruturais dos portos, formados principalmente pelo concreto armado (Felix et al., 2018).

O concreto armado é amplamente usado em estruturas em todo o mundo, superando materiais como aço, madeira e bloco cerâmico. As estruturas de concreto armado são formadas por armaduras de aço circundadas por concreto, aliando as propriedades de ambos os materiais, como os altos índices de resistência a compressão e tração, do concreto e do aço, respectivamente (Bastos, 2023). Nos portos o concreto armado é empregado em infraestruturas que apoiam as operações portuárias tais como cais, docas e quebra mares, que por estarem em ambientes propensos a corrosão necessitam constantemente de inspeções e manutenção, gerando altos custos (Guilherme da Silva; Rego Monteiro Da Hora; Erthal Junior, 2018).

Assim, as estruturas de concreto armado localizadas em regiões portuárias são bastante suscetíveis a corrosão, onde o emprego de recursos destinados a combater seus efeitos tendem ser elevados. Estes recursos se baseiam principalmente em atividades de inspeção, manutenção e reposição de materiais, que geralmente ocorrem após instalação da corrosão, uma vez que seus sinais não são perceptíveis. Isso acontece uma vez que a fase inicial da corrosão ocorre internamente ao material afetando a armadura de aço dentro do concreto, o que dificulta a avaliação das estruturas e por consequência encarece o processo de combate a corrosão (Yanaka; Hooman Ghasemi; Nowak, 2016).

Portanto estudar e analisar a corrosão antes do destacamento do concreto da estrutura metálica se torna um desafio. Dentre as principais limitações relacionadas ao estudo e análise da corrosão estão a dificuldade de se detectar isoladamente os diferentes fatores que influenciam no processo de corrosão, bem como os custos elevados e o tempo necessário para a realização dos ensaios experimentais. Com o avanço da tecnologia várias ferramentas numéricas foram criadas, como método dos elementos finitos (MEF), que pode ser utilizado para desenvolver modelos numéricos para simular os fenômenos da corrosão, representando uma alternativa para superar essas limitações (Felix et al., 2018).

Assim esse projeto tem o objetivo de desenvolver um modelo numérico para análise de estruturas de concreto armado sob efeito de corrosão. Esse tipo de análise é utilizado para avaliar a integridade de um material ou estrutura sem prejudicar sua funcionalidade física, isso porque as técnicas numéricas permitem realização de simulações computacionais para prever o comportamento de materiais e estruturas sob diferentes condições de carga e ambiente. Para isso, esse projeto se baseia na literatura disponível nos meios de circulação científicas para o desenvolvimento da teoria base do projeto conciliando dados obtidos experimentalmente junto com ferramentas de simulação computacionais.

2. JUSTIFICATIVA

O presente projeto foi desenvolvido para encontrar artifícios que viessem promover meios de análises mais eficientes para o fenômeno da corrosão, contextualizadas em estruturas expostas em ambientes severos, como os portos. Sabe-se que esse ambiente possui inúmeras intempéries que agravam os efeitos da corrosão, que pode ser definida como a deterioração de materiais causada por reações químicas ou eletroquímicas com o meio ambiente (GENTIL, 1994).

Uma das justificativas desse estudo são os prejuízos econômicos gerados pela corrosão, estimados em 4% do PIB de um país (DALLAGO, 2019). Os setores de construção civil são os mais impactados por esse fenômeno, que utilizam como principal material o concreto armado, em virtude da maior durabilidade dos seus componentes, uma vez que o aço está protegido pelo concreto da agressividade do ambiente. Em virtude de as regiões portuárias possuírem um ambiente mais severo os efeitos da corrosão são bastantes amplificados, necessitando de maior atenção (Guilherme da Silva; Rego Monteiro Da Hora; Erthal Junior, 2018).

Os avanços na computação e no aprendizado de máquina abriram portas para o uso da análise por elementos finitos (MEF) no estudo da corrosão em estruturas de concreto armado. Essa abordagem permite criar modelos computacionais detalhados, simulando os efeitos

corrosivos ao longo do tempo. Portanto o MEF aprimora a precisão dos modelos, oferecendo uma visão preditiva mais abrangente dos danos causados pela corrosão, possibilitando estratégias de manutenção mais eficazes, reduzindo custos e melhorando o controle da deterioração em estruturas expostas a ambientes marítimos.

3. OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

O objetivo central deste projeto consiste na elaboração e implementação de um modelo numérico por análise de elementos finitos (MEF) de um corpo de prova construído com concreto-aço. Este modelo permitirá uma análise dos efeitos da corrosão nas propriedades mecânicas do concreto contribuindo para a compreensão do seu comportamento estrutural em diferentes níveis de degradação.

3.2 Objetivos Específicos

- Obtenção do módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson de acordo com norma ASTM C215-19.
- Caracterização do corpo de prova concreto-aço no ambiente computacional.
- Desenvolver um modelo numérico para um corpo de prova construído de concreto-aço utilizando análise de elementos finitos.
- Reproduzir o teste experimental no ambiente computacional, através da análise modal e resposta harmônica do ANSYS.
- Avaliar numericamente o comportamento dinâmico do corpo de prova concreto-aço para vários estágios de corrosão.
- Compreender melhor a evolução da corrosão medida através da resposta em frequência (FRF) e das frequências de ressonâncias.
- Realizar a validação do modelo computacional com base nos resultados experimentais, avaliando a proximidade entre os valores obtidos nas simulações e nos ensaios físicos.

4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, tipicamente metálico, devido à ação química ou eletroquímica do ambiente, frequentemente acompanhada ou não por esforços mecânicos. A corrosão é, em geral, um processo espontâneo baseada em reações químicas e eletroquímicas que se passam na superfície do metal e obedecem a princípios bem estabelecidos. Considerando como reações de oxirredução como todos as reações que envolvem a ação de ceder ou receber elétrons entre os materiais pode-se considerar a corrosão entre metais como sendo, em sua maioria, reações essencialmente de oxirredução. Assim um metal age como redutor, cedendo elétrons, que são recebidos pelo outro metal que é o oxidante (GENTIL, 1994).

4.1 Composição e propriedades do concreto armado

O concreto armado é um material compósito que se destaca por unir as melhores propriedades de dois materiais distintos: o concreto simples (mistura de cimento, agregados e água) e o aço. Essa combinação estratégica resulta em um sistema estrutural altamente eficiente conhecido como concreto armado (Sérgio Bastos, 2023). O concreto apresenta alta resistência à compressão, sendo ideal para elementos estruturais submetidos a esse tipo de esforço, como pilares. No entanto, sua baixa resistência à tração e a fragilidade frente a tensões fletoras limitam seu uso isolado em componentes como vigas, lajes, tirantes e outros elementos sujeitos à tração ou flexão.

Para compensar a baixa resistência do concreto à tração, utiliza-se o aço em seu interior, formando uma estrutura conjunta. O aço é posicionado nos pontos onde ocorrem maiores tensões, contribuindo também na resistência à compressão. Essa combinação estratégica entre concreto e aço cria o concreto armado. Nesse sistema, o aço suporta os esforços de tração enquanto o concreto resiste à compressão. A união dos dois materiais resulta em um componente estrutural forte, durável e eficiente. O concreto armado é amplamente utilizado na construção civil por sua versatilidade e desempenho. Ele tornou-se essencial em obras modernas (Sérgio Bastos, 2023).

4.1.1. Definição do concreto como um material compósito

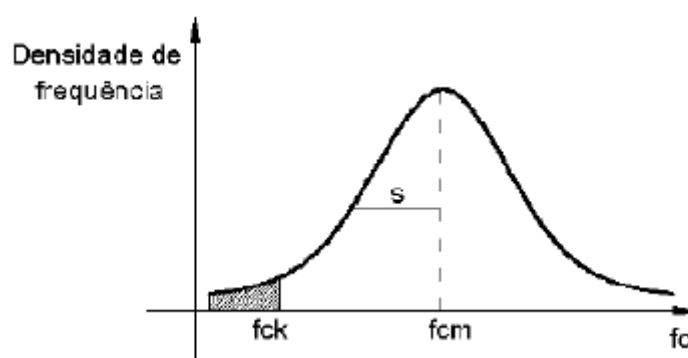
O concreto é classificado como um material compósito, de estrutura heterogênea e complexa. O concreto é composto pela mistura de agregados graúdos e miúdos, além de água. Opcionalmente, podem ser incorporados aditivos químicos ou adições minerais que modificam ou melhoram suas propriedades. Estruturalmente, o concreto é constituído por três fases distintas: o agregado, a pasta de cimento e a zona de transição interfacial entre esses dois

elementos de tal forma que sua principal vantagem é a alta resistência à compressão (Brito; Almeida; Oliveira, 2019).

A alta capacidade de resistência aos esforços de compressão é influenciada por inúmeros fatores, tais como a relação de concentração de água/cimento, a qualidade dos agregados e sua porosidade (Monteiro; Mehta, 1986). A capacidade de resistência a compressão do concreto é umas das propriedades mais valorizada no controle de qualidade do compósito no estado endurecido. Pode ser definida como a capacidade de resistir às tensões sem o rompimento, sendo considerada pelo cálculo estrutural para dosagem do concreto e, após fabricado, para análise do controle de qualidade da mistura obtida (Brito; Almeida; Oliveira, 2019).

Essa propriedade, caracterizada como *resistência à compressão simples* (f_c), é obtida por meio de ensaios de ruptura de corpos de prova (CP), moldados e curados conforme a NBR 5738, e ensaiados segundo a NBR 5739. Utiliza-se um equipamento que aplica carga até a ruptura do CP, registrando a força máxima suportada. Esse valor permite calcular a resistência individual a compressão (f_{ci}). Para determinar a resistência característica (f_{ck}) consideram-se os maiores resultados entre os pares de CP de diferentes amostras. Com um número elevado de amostragens (n), os dados seguem uma tendência de distribuição normal, conforme previsto pelo Teorema do Limite Central (TLC). A Figura 1 representa graficamente esse comportamento estatístico, representado por uma curva de Gauss (Brito; Almeida; Oliveira, 2019).

Figura 1 - Curva de Gauss para a resistência do concreto à compressão.



Fonte: (Libânio M. Pinheiro, 2007).

Assim a caracterização do concreto apresenta desafios significativos devido à sua natureza complexa e heterogênea. Sendo um material compósito, formado por fases distintas: agregados, pasta cimentícia e zona de transição interfacial. O concreto não possui uma estrutura uniforme, o que dificulta a obtenção de propriedades homogêneas ao longo de toda a sua massa.

Além disso, a variabilidade dos materiais constituintes, como a granulometria e qualidade dos agregados, a relação água/cimento, a presença de aditivos e as condições de cura, influenciam diretamente suas propriedades mecânicas e durabilidade. Dessa forma, compreender e caracterizar o concreto exige não apenas domínio técnico das normas e ensaios laboratoriais, mas também uma leitura crítica sobre as variáveis que interferem em seu desempenho, o que torna o estudo desse material desafiador, porém essencial para a engenharia estrutural.

4.1.2. Propriedades do aço em estruturas de concreto armado

Os vergalhões de aço utilizados em estruturas de Concreto Armado no Brasil são estabelecidos pela NBR 7480. Essa norma define que os aços utilizados em concreto armado podem ser fornecidos sob a forma de barras ou fios, conforme o processo de fabricação e o diâmetro final. As barras, conhecidas como vergalhões, possuem diâmetro nominal igual ou superior a 5 mm e são produzidas por laminação a quente. Já os fios apresentam diâmetro de até 10 mm e são obtidos por meio de trefilação ou processos similares, como estiramento e laminação a frio, que conferem características mecânicas específicas (Sérgio Bastos, 2023).

O aço é um material metálico amplamente empregado na construção civil, fabricado a partir da liga de ferro com teores de carbono de até 2%. A introdução de elementos adicionais como manganês, silício, níquel e enxofre permite a modificação de propriedades mecânicas e químicas, de acordo com os requisitos da aplicação. Para uso em concreto armado, os aços geralmente apresentam teores de carbono entre 0,4% e 0,6%, garantindo boa resistência mecânica e soldabilidade adequadas para o ambiente estrutural (REGO; MORAIS, 2005).

As estruturas de concreto armado utilizam aços que são classificados conforme o valor característico da resistência ao escoamento f_{yk} , sendo divididos nas categorias CA-25, CA-50 e CA-60. A sigla “CA” refere-se a “Concreto Armado”, e os números correspondem ao valor de f_{yk} em kgf/mm² ou kN/cm². Os aços CA-25 e CA-50 são produzidos por laminação a quente, enquanto o aço CA-60 é obtido por trefilação a frio. O processo de laminação envolve a conformação de tarugos de aço aquecidos, submetidos à redução de seção por meio da passagem entre cilindros rotativos. Esse procedimento ocorre em gaiolas de laminação, que proporcionam as nervuras e o perfil final dos vergalhões (Sérgio Bastos, 2023).

Já os vergalhões da classe CA-60 são obtidos a partir de um produto conhecido como fio-máquina, que passa por um processo de trefilação a frio. Nessa etapa, o fio é tracionado mecanicamente através de orifícios calibrados, resultando na redução do seu diâmetro e no aumento da resistência mecânica devido ao encruamento. Esse tipo de conformação não exige aquecimento, o que caracteriza o processo como “a frio”. A trefilação proporciona ao aço CA-

60 um comportamento mecânico mais rígido e elevado f_{yk} , tornando-o ideal para situações em que se exige maior resistência (Sérgio Bastos, 2023).

Em comparação com os aços laminados a quente, os trefilados apresentam maior limite elástico, porém menor ductilidade. A escolha entre essas classes de aço depende do tipo de estrutura e das exigências de desempenho. Todos esses aços devem atender às normas técnicas vigentes, como a NBR 7480, garantindo segurança e durabilidade estrutural (NBR 7480, 2024).

Por indicação da NBR 6118 (item 8.3) os seguintes valores podem ser considerados para os aços de armadura passiva (NBR 6118, 2024):

- a) Massa específica: 7.850 kg/m³;
- b) Coeficiente de dilatação térmica: $10 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ para intervalos de temperatura entre -20 e 150 $^\circ\text{C}$;
- c) Módulo de elasticidade: $E_s = 210 \text{ GPa}$ (210.000 MPa) na falta de ensaios ou valores fornecidos pelo fabricante.

A superfície dos fios e barras pode conter nervuras e entalhes, ou ser lisa. A capacidade de aderência entre o concreto e o aço depende da rugosidade da superfície do aço, sendo medida pelo coeficiente de aderência (η_1), como indicado na Tabela 1, (NBR 6118, 2024).

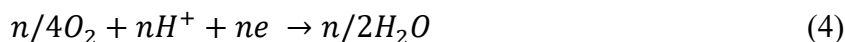
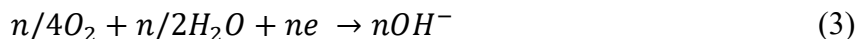
Tabela 1 - Valor do coeficiente de aderência.

Categoria do aço	η_1
CA-25	1,00
CA-50	2,25
CA-60	1,00

Fonte: (NBR 6118, 2024).

4.2 Fundamentos da corrosão

Os materiais metálicos ao longo de sua vida estão propensos a sofrerem degradação por corrosão, que está estritamente ligado ao processo de perda massa do material em consequência das reações químicas de redução e oxidação. Nesse sentido os elétrons que são perdidos pela oxidação (na região anódica) são transportados e doados para a reação de redução (região catódica), tornando o meio metálico um agente de transferência de elétrons, configurando-se como uma pilha eletroquímica. De maneira geral, para um caso de um metal M qualquer, pode-se apresentar as possíveis reações no anodo e na área catódica (GENTIL, 1994):



A Equação 1 descreve a reação anódica de um metal (M) em um processo eletroquímico, na qual ocorre a oxidação do metal com a liberação de elétrons e a formação de íons positivos (M^{n+}). Esse fenômeno caracteriza o início do processo corrosivo, no qual o metal perde massa ao passar para o estado oxidado. Em uma célula eletroquímica, essa reação ocorre no ânodo, enquanto no cátodo ocorre a reação de redução, que consome os elétrons liberados. A diferença de potencial entre os eletrodos gera uma corrente elétrica que flui no meio externo do ânodo para o cátodo, enquanto os íons se movimentam no eletrólito. Esse sistema estabelece as condições fundamentais para que a corrosão eletroquímica se desenvolva (GENTIL, 1994).

Já as Equações 2-4 representam reações catódicas, onde ocorre a captura de elétrons, resultando na redução de íons eletropositivos. Na Equação 2 a redução do íon de hidrogênio em meio ácido enquanto nas Equações 3 e 4 ilustram alguns processos de reduções do oxigênio: Na Equação 3 tem-se a reação em meio neutro ou meio básico, na Equação 4 a reação é definida em meio ácido (GENTIL, 1994).

Em uma superfície metálica se encontram muitas microrregiões anódicas e catódicas, que levam à geração de uma grande quantidade de pilhas eletroquímicas (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015). Essas regiões catódicas e anódicas são formadas pela influência da composição do meio em que o material metálico se encontra, onde meios heterogêneos contribuem para a formação de regiões polarizadas. Assim, certas áreas da superfície metálica podem se tornar anódicas ou catódicas, dependendo de fatores ambientais como, distribuição desigual de eletrólitos (como água salgada ou ambiente úmido), variação de temperatura, composição química do ambiente, entre outros (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Esses fatores ambientais influenciam diretamente os quatro elementos básicos necessários para a formação de corrosão: o eletrólito, a pilha eletroquímica, oxigênio e agentes agressivos. O eletrólito é uma substância que quando dissolvidas em água ou outro meio são capazes de conduzir corrente elétrica, enquanto a pilha é um dispositivo que converte energia química em energia elétrica baseada em dois eletrodos com diferença de potencial elétrico (Anodo e Catodo). Já o oxigênio e os agentes corrosivos atuam diretamente na velocidade em

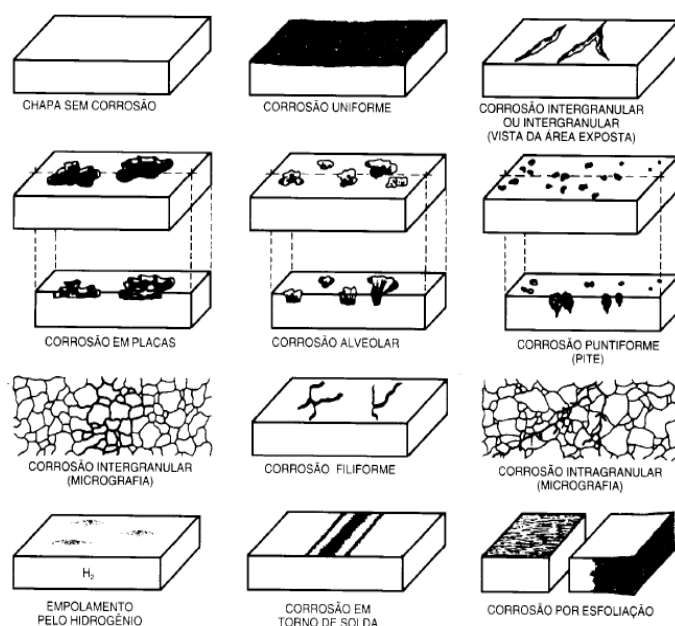
que a reação de corrosão acontece, devido a oxidação do metal e aumento da condutividade elétrica, alguns exemplos de agente corrosivos são Sulfetos, Dióxido de Carbono e Cloretos (Felix; Carlos, 2018).

4.2.1. Formas de Corrosão

Existem diferentes formas que a corrosão pode acontecer, podendo variar em termos de morfologia, agentes de ataque ou mecanismos. Dentre as características de morfologia a corrosão podem ser classificadas de inúmeras maneiras, de forma que a sua identificação auxilia bastante no esclarecimento dos mecanismos e na aplicação de medidas adequadas de proteção. A seguir são apresentadas algumas classificações, representadas na Figura 2 (GENTIL, 1994).

- A corrosão uniforme ou corrosão generalizada desenvolve de maneira uniforme em toda a extensão da superfície, com taxa constante de degradação de espessura do material.
- A corrosão por placas se restringe em regiões específicas ao longo da superfície do metal e não em toda sua região, formando placas com escavações.
- A corrosão alveolar consiste na degradação do material em forma de sulcos ou escavações em forma de alvéolos na superfície metálica.
- A corrosão puntiforme ou por pite se processa em pontos ou em pequenas áreas localizadas nas superfícies metálicas produzindo pites, que são cavidades que apresentam o fundo em forma angulosa.

Figura 2 - Diferentes formas de corrosão.



Fonte: (GENTIL, 1994).

4.3 Corrosão em estruturas de concreto armado

O concreto armado é um material compósito que alia as propriedades de resistência a compressão do concreto e a capacidade do aço relacionadas a flexão. Em virtude dessas propriedades o concreto armado tem sido utilizado como o principal material construtivo na produção de estruturas em todo o mundo. Apesar disso o concreto armado está sujeito à deterioração, em consequência da ação de diferentes mecanismos de degradação, por exemplo a corrosão, a reação álcali-agregado e o ataque de sulfatos e cloretos (Felix; Carlos, 2018).

A corrosão da armadura do concreto é um caso específico de corrosão eletroquímica em meio aquoso, no qual o eletrólito apresenta uma considerável resistividade elétrica (CASCUDO, 1997). Em geral o concreto oferece uma proteção natural as armaduras contra corrosão, por conta de sua alta alcalinidade, porém essa proteção é perdida ao longo do tempo pela ação constante de agentes agressivos, como os íons de cloreto e dióxido de carbono. Assim, a principal propriedade do concreto que confere a proteção das armaduras é sua impermeabilidade, ou seja, o desempenho do concreto armado em relação a corrosão é uma função direta da distribuição e dos tamanhos de poros do concreto (Mehta; Monteiro, 2014).

A distribuição de poros, que podem ser definidos como vazios, está diretamente relacionada a constituição do concreto. O concreto é formado por três constituintes distintos: partículas de agregados, pasta de cimento endurecida e a zona de transição. A região de transição possui características diferentes do restante da pasta sendo mais porosa e apresenta as primeiras incidências de fissuras. Assim, essa região é constituída de vazios que podem gerar caminhos microscópicos dentro do concreto, que facilitam a penetração de diferentes agentes agressivos presentes no ambiente (PAULON; VLADIMIR; ANTÔNIO, 2005).

4.3.1. Mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto

A existência de rotas internas na estrutura pasta-agregados requer um entendimento aprofundado dos diversos mecanismos de transporte de líquidos e gases no concreto. Este texto enfatiza a relevância da permeabilidade, absorção capilar e difusão de CO_2 , destacando sua influência crucial no fenômeno da corrosão por carbonatação (Felix; Carlos, 2018).

4.3.1.1 Permeabilidade

A permeabilidade refere-se à capacidade de um líquido fluir através de um sólido poroso sob um gradiente de pressão. No caso do concreto, os gases apresentam diferentes taxas de penetração. Por exemplo, o dióxido de carbono parece limitar sua penetração ao concreto à profundidade carbonatada, e seu avanço é gradual devido à redução da permeabilidade à medida que o concreto se carbonata e preenche os poros capilares ao longo do tempo. Em contraste, a difusão de cloretos no concreto é um processo indireto, ocorrendo através da penetração da água na qual estão dissolvidos (Santos, 2006)

4.3.1.2 Absorção capilar

O processo de transporte de fluidos através da tensão nos poros capilares do concreto é conhecido como absorção capilar (Santos, 2006). No contexto do concreto, a absorção de água representa um desafio significativo de controle. Em linhas gerais, à medida que o diâmetro dos capilares diminui, as pressões capilares tendem a ser mais elevadas, resultando em uma absorção mais rápida e intensa (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

4.3.1.3 Difusão

Os agentes agressivos, como cloreto, dióxido de carbono e oxigênio afetam as armaduras do concreto através da difusão. Esse processo ocorre devido a diferenças de concentração de substâncias entre áreas, seguindo duas fases de difusão: uma constante, representada pela primeira lei de Fick, Equação 5, e outra variável com o tempo e a profundidade, descrita pelas Equações 6 e 7, conhecidas como coeficiente de difusão aparente (Santos, 2006).

$$q_m = -D \nabla C \quad (5)$$

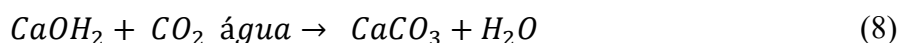
$$\frac{\partial C}{\partial t} = -D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (6)$$

$$C(x, t) = C_s \left(1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \quad (7)$$

Em que q_m representa o fluxo de massa, x é a profundidade onde deseja-se conhecer a quantidade da substância que penetrou, C é a concentração superficial em difusão, D é o coeficiente de difusão, $C(x, t)$ é a concentração de uma substância a uma dada profundidade (x) e em um determinado tempo (t).

4.3.2. Corrosão por carbonatação

A carbonatação no concreto ocorre quando o CO_2 do ar reage com sua pasta, causando mudanças na estrutura, afetando a permeabilidade, o pH e contribuindo para sua deterioração (Neville, 2016). O dióxido de carbono é um gás não reativo, porém em contato com a umidade presente no concreto hidratado reage com o hidróxido de cálcio ($CaOH_2$) produzindo carbonato de cálcio $CaCO_3$, Equação 8. Tal reação desequilibra o pH do sistema ao diminuir a disponibilidade de hidróxido de cálcio, que é responsável pela alta alcalinidade da pasta de concreto, diminuindo o pH através de reações de neutralização, que transforma esses compostos em carbonatos (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).



A carbonatação em si não causa a deterioração do concreto, mas tem severas consequências na durabilidade. A importância da carbonatação está no fato de ela reduzir o pH da água de poros da pasta de cimento endurecida, de um valor entre 12,6 e 13,5 para um valor próximo de 9 (Neville, 2016). O pH do sistema é alterado pois $CaCO_3$ precipita com um pH de 9,4 (à temperatura ambiente) que altera as condições de estabilidade química da capa ou película passivadora do aço (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Normalmente armadura de aço no concreto armado possui uma película de proteção na superfície que o protege da ação da corrosão, diz que o aço está em um estado de passivação. A manutenção desse estado é condicionada a um pH adequadamente elevado da água de poros em contato com a camada de passivação. Desse modo, quando o pH baixo atinge a região próxima à armadura, o filme de óxido protetor é removido, possibilitando a ocorrência da corrosão desde que haja o oxigênio e a umidade necessários para as reações (Neville, 2016).

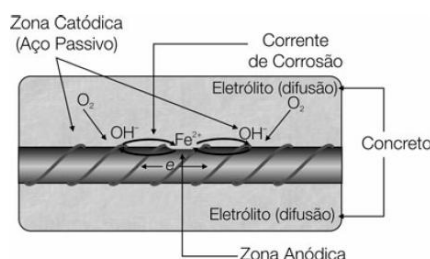
4.3.3. Corrosão nas armaduras

Na armadura do concreto é comum a utilização dos aços de baixo teor de carbono para os vergalhões. Desse modo a corrosão dos metais pode ser vista como o inverso da metalurgia extrativa, onde há uma tendência para que o ferro metálico, caso não tenha proteção, regresse espontaneamente a óxido de ferro, em virtude do patamar enérgico do estado metálico, em comparação aos compostos formados pelo ferro, tais como os óxidos, serem mais elevados. Por exemplo, os óxidos de ferro encontram-se vulgarmente na natureza e, com o auxílio de energia térmica, podem ser reduzidos a ferro metálico, o qual está numa energia superior (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Na maioria das situações de deterioração de materiais por corrosão, o cerne do problema reside no desgaste químico dos metais, geralmente desencadeado por processos eletroquímicos. Isso se deve à presença de elétrons livres nos metais, os quais têm a capacidade intrínseca de gerar células eletroquímicas nas interfaces, originando uma disparidade de potencial. Basicamente, são dois os processos principais de corrosão que podem sofrer as armaduras de aço para concreto armado: a oxidação e a corrosão eletroquímica. A oxidação é a corrosão causada pela reação entre gás e metal, formando uma película de óxido. Geralmente é lenta em temperatura ambiente e não danifica muito os metais, a menos que haja gases agressivos na atmosfera (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Já a corrosão eletroquímica é o principal fenômeno na corrosão das estruturas de concreto armado. A corrosão das armaduras ocorre preponderantemente em meio aquoso onde a formação de uma película de eletrólito sobre a superfície da barra de aço, que é originada pela presença de umidade no concreto. A corrosão conduz à formação de óxidos e hidróxidos de ferro, produtos de corrosão avermelhados, pulverulentos e porosos, denominados ferrugem, Figura 3 (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Figura 3 - Representação dos compostos oriundos da corrosão.



Fonte: (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

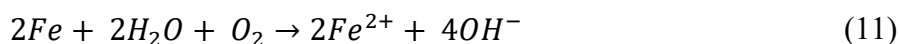
Assim, a corrosão da armadura pode ser resumida da seguinte forma: Nas zonas anódicas, o ferro perde elétrons, ocasionando a dissolução do metal (oxidação), Equação 9:

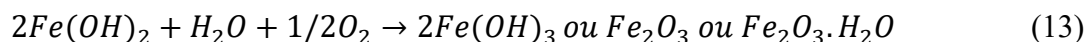
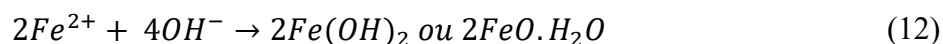


Nas zonas catódicas, em meios neutros e aerados, ocorre a redução:



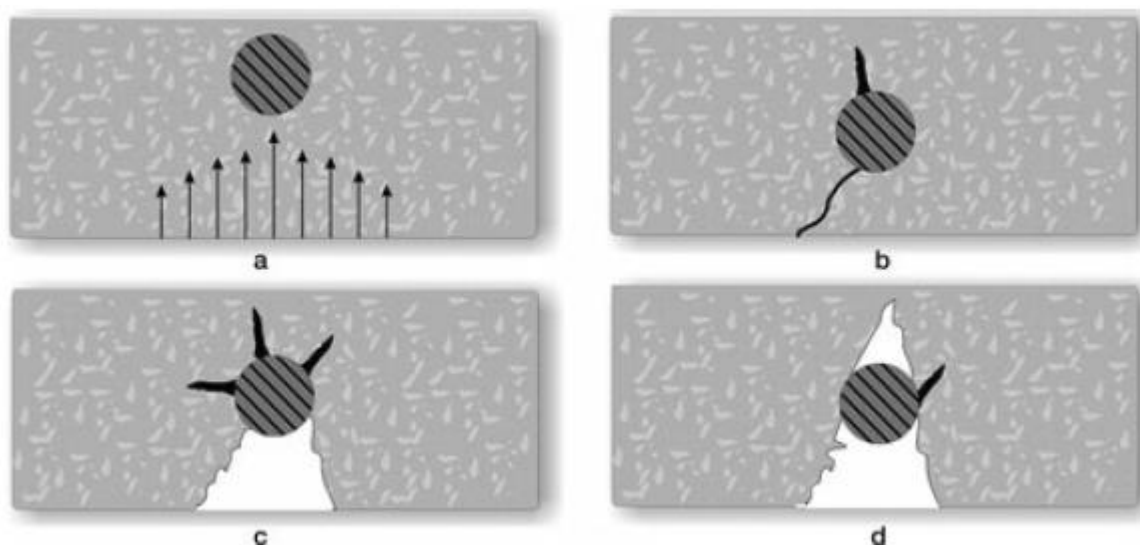
Acarretando, assim, as seguintes reações de corrosão, com formação de ferrugem:





Sendo o $2FeO.H_2O$ (óxido ferroso hidratado), Fe_2O_3 o (hidróxido férrico) e o $Fe_2O_3.H_2O$ (óxido férrico hidratado, goetita) compostos expansíveis que passam a ocupar volumes de 3 a 10 vezes superiores ao volume original do aço da armadura, podendo causar pressões de expansão superiores a 15 MPa. Essas tensões provocam, inicialmente, a fissuração do concreto na direção paralela à armadura corroída, o que favorece a carbonatação e a penetração do CO_2 e agentes agressivos, podendo causar o lascamento do concreto, Figura 4 (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

Figura 4 - Deterioração da corrosão das armaduras. (A) Penetração dos agentes agressivos; (B) Fissuração devido as forças de expansão dos produtos de corrosão; (C) lascamentos do concreto e corrosão acentuados e; (D) redução significativa da seção da armadura.



Fonte: (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

4.4 Modelagem da propagação da corrosão

A determinação da velocidade de corrosão do aço usado nas estruturas de concreto é essencial para prever a propagação da corrosão. No entanto, essa avaliação é influenciada por uma variedade de fatores relacionados ao concreto e ao ambiente externo. Elementos como temperatura, umidade, capacidade de passagem, resistência elétrica, cobertura do aço, carga aplicada, presença de oxigênio nos poros do concreto e outros elementos desempenham papéis fundamentais nesse contexto (Muthulingam; Rao, 2014).

Um dos métodos comuns para estimar a velocidade de corrosão é o modelo proposto por Vu e Stewart (2000), centrado-se na disponibilidade de oxigênio na superfície do aço como o principal fator. Sua aplicação é simplificada pela dependência de apenas dois fatores: a relação entre água e cimento e o nível de cobertura. No entanto, esse modelo é construído considerando uma umidade relativa de cerca de 75% e temperaturas ambiente em torno de 20°C para a pasta de concreto. Ele presume que a taxa de corrosão diminui exponencialmente com o tempo, sugerindo um processo mais acelerado no início. A Equação 14 representa o cálculo específico para determinar a taxa de corrosão nesse modelo

$$i_{corr}(t) = \left[\frac{37,8(1 - a/c)^{-1,64}}{x_c} \right] 0,85 t_p^{-0,29} \quad (14)$$

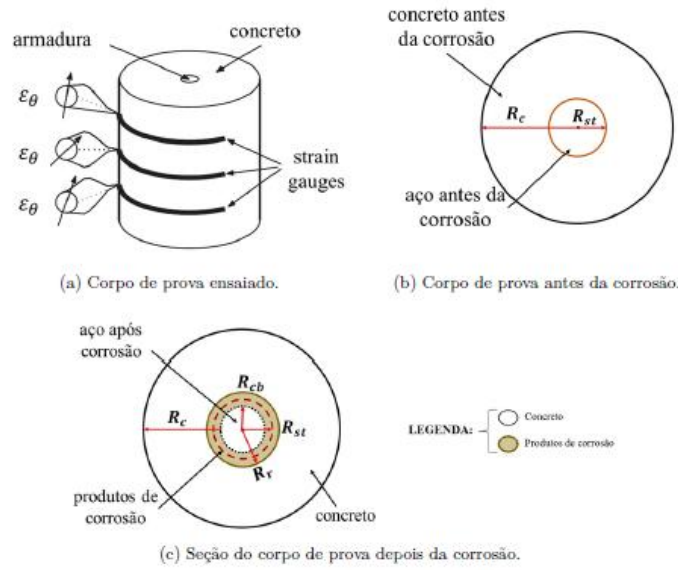
Em que i_{corr} representa a taxa de corrosão $\mu A/cm^2$, t_p refere-se ao tempo de progressão da corrosão (anos), a/c corresponde à relação água/cimento e x_c é o cobrimento do concreto (cm).

Compreender a formação e disseminação dos produtos de corrosão em torno da armadura permite a criação de modelos e ferramentas capazes de descrever as áreas de deformação e tensão que surgem em estruturas de concreto armado quando sofrem corrosão. Esses modelos são essenciais para investigar os efeitos da corrosão no comportamento mecânico, durabilidade e vida útil dessas estruturas (Felix; Carlos, 2018). Neste trabalho, são apresentados dois modelos que pressupõem uma distribuição homogênea dos produtos de corrosão. A escolha desses modelos deve-se à sua facilidade de implementação, manipulação e obtenção dos parâmetros necessários.

4.4.1 Modelo Kiani e Shodja

Esse modelo pressupõe uma formação uniforme dos produtos de corrosão em estruturas de concreto armado. Esse modelo foi construído com base em dados experimentais obtidos de corpos de prova cilíndricos de concreto que incluíam, em seu interior, uma armadura com diâmetro e características físicas específicas. A Figura 5 esquematiza o modelo concebido pelos autores (Kiani; Shodja, 2011).

Figura 5 - Representação do modelo Kiani e Shodja.



Fonte: (Kiani; Shodja, 2011).

Na Figura 5(a) é apresentado um modelo dos corpos de prova padrão. Na figura 5(b) pode-se observar a seção transversal do concreto antes de iniciar o processo de corrosão. Com o desenvolvimento da corrosão os produtos são formados no entorno da armadura reduzindo o seu diâmetro, como mostra a Figura 5(c). O modelo se concentra em calcular o raio residual de aço, chamado R_{cb} , e o raio da frente de avanço dos produtos de corrosão, representado por R_r . Esses valores podem ser encontrados usando as Equações 15 e 16, respectivamente. Para calcular esses parâmetros, é essencial determinar o volume gerado pelos produtos de corrosão, Equação 17, e a perda volumétrica do aço das armaduras, Equação 18, (Kiani; Shodja, 2011).

$$R_{cb} = \sqrt{R_{st}^2 - \frac{V_s}{\pi}} \quad (15)$$

$$R_r = \sqrt{R_{cb}^2 - \frac{V_r}{\pi}} \quad (16)$$

$$V_r(t) = \frac{\alpha}{pst} \sqrt{\int_0^t 13,56 \times 10^{-10} \times \pi \times R_{st} \times i_{corr} dt} \quad (17)$$

$$V_s(t) = \frac{r_m}{pst} \sqrt{\int_0^t 13,56 \times 10^{-10} \times \pi \times R_{st} \times i_{corr} dt} \quad (18)$$

Em que R_{st} refere-se ao raio inicial da armadura (m), α é a razão entre a densidade do aço e dos produtos de corrosão, p_{st} é a densidade do aço (kg/m^3), i_{corr} é a densidade da corrente de corrosão (A/m^2), r_m é a proporção de massa de ferro para a massa molecular dos produtos de corrosão e t (s) refere-se ao tempo de análise, sendo dado a partir do momento em que ocorre a despassivação da armadura.

4.4.2 Modelo de Rodriguez e Andrade

O modelo de Rodriguez e Andrade representado pela Equação 19, destina-se a calcular a redução na seção transversal do aço em estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão uniforme. Esse modelo foi desenvolvido a partir da análise de dados experimentais e descreve o diâmetro remanescente do aço durante a evolução do processo de corrosão (Felix; Carlos, 2018).

$$D_{cb} = D_{st} - 0,023 \times i_{corr} \times t \quad (19)$$

Onde D_{st} representa o diâmetro inicial da armadura (em milímetros), D_{cb} é o diâmetro remanescente do aço no momento da análise (em milímetros), i_{corr} é a densidade da corrente de corrosão (em $\mu\text{A/cm}^2$) e t é o tempo de progressão da corrosão (em anos).

Dessa maneira, ao conhecer o diâmetro remanescente do aço em um determinado momento após o início da corrosão, e considerando que a camada de produtos de corrosão que se forma na interface entre o aço e o concreto está ligada à relação entre o volume de óxidos e o volume de ferro presente no aço estabelecem a progressão dos produtos de corrosão por meio da Equação 20, (Felix; Carlos, 2018).

$$R_r = R_{st} + \left(\frac{V_{ox}}{V_{Fe}} \right) (R_{st} - R_{cb}) = R_{st} + (R_{st} - R_{cb}) V_{exp} \quad (20)$$

Onde R_{st} representa o raio inicial da armadura (em milímetros), R_{cb} é o raio restante do aço (em milímetros), R_r é o raio de avanço dos produtos de corrosão (em milímetros), V_{ox} denota o volume de óxido, V_{Fe} indica o volume de ferro, e V_{exp} corresponde à relação volumétrica da expansão dos produtos de corrosão.

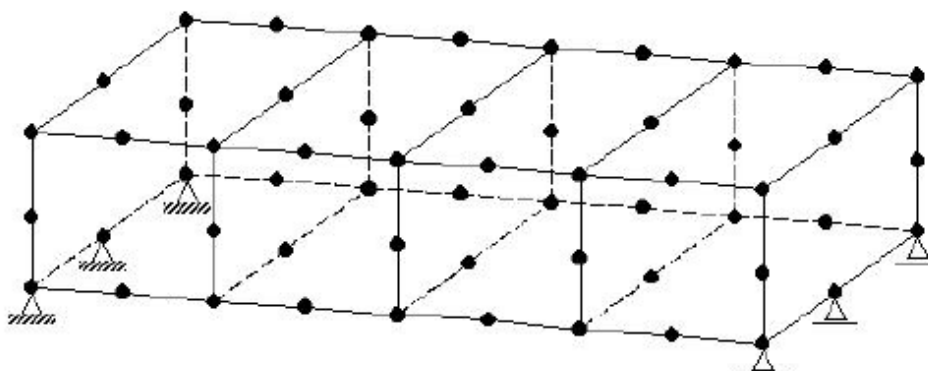
4.5 Método dos elementos finitos (MEF)

O método dos elementos finitos (MEF), concebido na década de 50, tem sido utilizado com grande sucesso principalmente na indústria aeronáutica e mecânica, no entanto, tem sido

pouco aplicado na resolução de problemas envolvendo o concreto estrutural no meio prático (Souza, 2006). Isso porque, enquanto o meio acadêmico oferece ferramentas sofisticadas de análise, como softwares avançados de elementos finitos com recursos complexos e modelos constitutivos modernos para o concreto armado, o mercado exige soluções rápidas e com baixo custo (Souza, 2006).

O princípio fundamental do MEF consiste na discretização do meio contínuo, ou seja, na divisão de uma geometria complexa em um número finito de subdomínios menores chamados elementos finitos (Carlos; Ayala, 2017). Cada elemento é conectado a outros por nós, que são pontos específicos onde as variáveis físicas são calculadas. Dentro de cada elemento, essas variáveis são aproximadas por meio de funções de interpolação, que descrevem como o comportamento do elemento se distribui entre os nós, Figura 6. A malha formada por todos os elementos e nós representa a estrutura ou componente analisado (Carlos; Ayala, 2017).

Figura 6 - Discretização de uma viga por elementos finitos.



Fonte: Adaptado de (Bono, 2008).

Durante a resolução do problema, são construídas matrizes de rigidez para cada elemento, que expressam a relação entre os deslocamentos aplicados e as forças resultantes. Essas matrizes são calculadas por meio de integração numérica sobre a área ou volume do elemento. Para realizar essa integração, utiliza-se geralmente a técnica da Quadratura de Gauss, que consiste em calcular a função em pontos específicos do domínio chamados de pontos de Gauss (Carlos; Ayala, 2017). Cada ponto de Gauss tem uma posição fixa e associada a um coeficiente de peso, que determina sua contribuição na soma total da integral (Bono, 2008).

Assim um sólido contínuo passa a ser descrito como uma associação de elementos discretos onde será possível escrever equações de compatibilidade e equilíbrio entre esses elementos (Bono, 2008). A precisão da integração (e, conseqüentemente, da análise numérica)

depende diretamente da quantidade de pontos de Gauss utilizados. Embora o uso de mais pontos aumente a precisão da solução, também implica em um maior tempo de processamento computacional, exigindo mais recursos da máquina e maior tempo de simulação (Carlos; Ayala, 2017).

4.5.1 Campo de deslocamentos

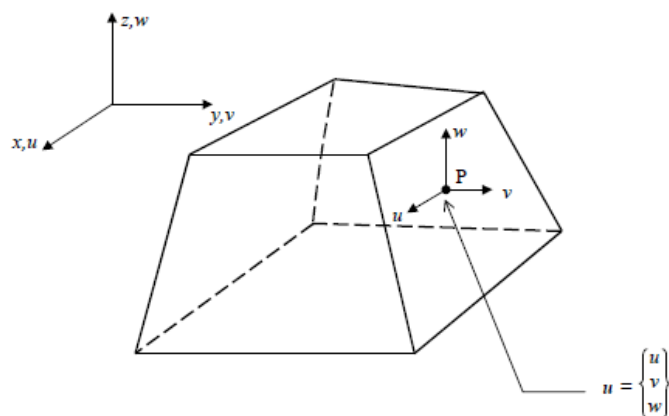
Em um corpo tridimensional, o movimento de cada ponto pode ser completamente descrito pelas três componentes do vetor de deslocamento. Essas três componentes definem o comportamento cinemático de qualquer ponto do sólido sob ação de cargas. No contexto do Método dos Elementos Finitos (MEF) aplicado a sólidos 3D, Figura 7, esse vetor de deslocamento é fundamental para o cálculo das deformações, que são derivadas espaciais desses deslocamentos, e das tensões internas, obtidas a partir da constituição do material e das equações de equilíbrio (Bono, 2008). Esse vetor é normalmente representado pela Equação (21):

$$U = (u \ v \ w) \quad (21)$$

onde:

- u representa o deslocamento na direção do eixo x (longitudinal)
- v representa o deslocamento na direção do eixo y (transversal)
- w representa o deslocamento na direção do eixo z (vertical)

Figura 7 - Sólido tridimensional. Vetor deslocamento em um ponto.



Fonte: Adaptado de (Bono, 2008).

Nas formulações do método dos elementos finitos, o campo de deslocamentos dentro de cada elemento é determinado a partir dos deslocamentos nos nós, utilizando-se para isso funções de interpolação. No caso específico do elemento hexaédrico linear, os deslocamentos internos podem ser descritos com base na Equação (23), (Bono, 2008).

$$U = (u \ v \ w) = \begin{Bmatrix} N_1 u_1 & N_1 v_1 & N_1 w_1 & N_2 u_2 & N_2 v_2 & N_2 w_2 & N_3 u_3 & N_3 v_3 & N_3 w_3 & N_4 u_4 & N_4 v_4 & N_4 w_4 \\ N_5 u_5 & N_5 v_5 & N_5 w_5 & N_6 u_6 & N_6 v_6 & N_6 w_6 & N_7 u_7 & N_7 v_7 & N_7 w_7 & N_8 u_8 & N_8 v_8 & N_8 w_8 \end{Bmatrix} \quad (23)$$

Escrevendo esta equação de uma maneira geral para um número genérico de pontos nodais np de um elemento, tem-se a Equação (24), (Bono, 2008):

$$u = \sum_{i=1}^{np} N_i U_i^e = N U^e \quad (24)$$

Onde N é representado pela Equação (25),

$$N = [N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_{np}]; \quad N_i = [N_i \ 0 \ 0 \ 0 \ N_i \ 0 \ 0 \ 0 \ N_i] \quad (25)$$

As Equações (24) e (25) correspondem, respectivamente, à matriz das funções de forma e ao vetor de deslocamentos associado a um determinado nó i do elemento finito (Bono, 2008). O número de nós do elemento, representado por np , depende do tipo de elemento utilizado: no caso do hexaedro linear, $np=8$; já para o hexaedro quadrático, $np=20$. As funções de forma são definidas em função das coordenadas naturalizadas (ξ, η, ζ) e podem ser formuladas conforme descrito por (OÑATE, 1995) segundo a Equação (26), para elemento hexaédrico linear, Figura 8.

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8} (1 + \xi_o)(1 + \eta_o)(1 + \zeta_o) \text{ para } i = 1, 2, 3, \dots, 8 \quad (26)$$

Onde,

$$\xi_o = \xi \xi_i, \eta_o = \eta \eta_i, \zeta_o = \zeta \zeta_i;$$

ξ_i, η_i, ζ_i são as coordenadas naturais dos nós em consideração, apresentando valores iguais a -1 ou 1, conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Coordenadas naturais para elementos hexaédrico linear.

Nº Local do nó	ξ_i	η_i	ζ_i
1	-1	-1	-1
2	1	-1	-1
3	1	1	-1
4	-1	1	-1
5	-1	-1	1
6	1	-1	1
7	1	1	1
8	-1	1	1

Fonte: Adaptado de (Bono, 2008).

Para o elemento hexaédrico quadrático, conforme a Figura 8, tem-se:

Nós de canto, Equação (27):

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{8}(1 + \xi_o)(1 + \eta_o)(1 + \zeta_o)(\xi_o + \eta_o + \zeta_o - 2) \text{ para } i = 1, 3, 5, 7, 13, 15, 17, 19 \quad (27)$$

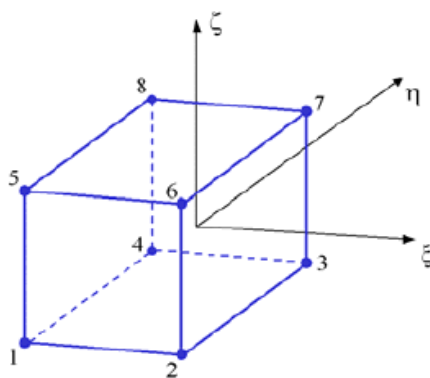
Nós intermediários, Equações (28) a (30):

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 - \xi^2)(1 + \eta_o)(1 + \zeta_o) \text{ para } i = 2, 6, 14, 18 \quad (28)$$

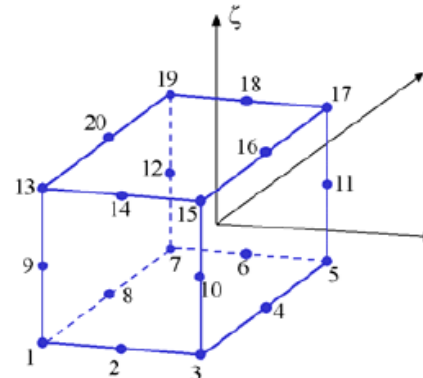
$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 - \eta^2)(1 + \zeta_o) \text{ para } i = 4, 8, 16, 20 \quad (29)$$

$$N_i(\xi, \eta, \zeta) = \frac{1}{4}(1 + \xi)(1 + \eta)(1 - \zeta^2) \text{ para } i = 9, 10, 11, 12 \quad (30)$$

Figura 8 - Elementos hexaédricos.



(a) Linear



(b) Quadrático

Fonte: (Bono, 2008).

Observa-se que, no caso do elemento hexaédrico linear, o campo de deslocamentos apresenta variação linear, o que implica que os campos de tensões e deformações permanecem constantes ao longo das bordas do elemento. Em contrapartida, quando se utiliza um elemento hexaédrico quadrático, o campo de deslocamentos apresenta uma variação de ordem quadrática, e, conseqüentemente, os campos de tensões e deformações variam de forma linear, permitindo maior refinamento na representação do comportamento interno do elemento (Bono, 2008).

Além disso, ao se atribuírem as coordenadas naturalizadas a um determinado nó do elemento, as funções de interpolação assumem valor igual a um nesse nó específico e zero nos demais, garantindo assim a condição de compatibilidade nodal. Essa propriedade assegura que os deslocamentos calculados sejam contínuos entre elementos adjacentes, respeitando a conectividade da malha (Bono, 2008), Equação (31).

$$N_i(\xi_i, \eta_i, \zeta_i) = \{1, \quad i = j \quad 0, \quad i \neq j \quad (31)$$

Além disso, em qualquer ponto localizado no interior do elemento, a soma das funções de interpolação, avaliadas nas coordenadas naturalizadas correspondentes a esse ponto, deve resultar em valor unitário. Em outras palavras, a contribuição total das funções de forma em um ponto interno é igual a 1, o que garante a consistência da interpolação no domínio do elemento (Bono, 2008).

Nos elementos isoparamétricos, a geometria do elemento é construída utilizando as mesmas funções de forma empregadas para interpolar os deslocamentos (OÑATE, 1995). Esse conceito permite que tanto o campo de deslocamentos quanto a geometria do elemento sejam representados por funções de interpolação definidas no sistema de coordenadas naturalizadas. Dessa forma, as coordenadas cartesianas (x, y, z) de qualquer ponto interno ao elemento são calculadas a partir da combinação ponderada das coordenadas dos nós do elemento, conforme Equação (32), (OÑATE, 1995).

$$(x \ y \ z) = \sum_{i=1}^{np} [N_i \ 0 \ 0 \ 0 \ N_i \ 0 \ 0 \ 0 \ N_i] \{x_i \ y_i \ z_i \} \quad (32)$$

Nessa formulação,

- N_i representa a função de forma associada ao nó i do elemento.
- (x_i, y_i, z_i) são as coordenadas cartesianas do nó i .

- np indica o número total de nós do elemento.

Esse procedimento garante que o ponto no espaço tridimensional seja obtido por uma interpolação entre os nós, respeitando a forma e as dimensões reais do elemento físico, mesmo que ele não tenha formato regular. A técnica isoparamétrica é essencial para a aplicação do MEF em geometrias complexas, pois assegura compatibilidade geométrica e continuidade entre elementos vizinhos (OÑATE, 1995).

4.5.2 Campo de deformações específicas

Segundo (Bono, 2008), pela teoria clássica da elasticidade tridimensional, o vetor de deformações específicas em um ponto do contínuo está definido por seis componentes, conforme Equação (33) e (34).

$$\varepsilon = [\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}]^T \quad (33)$$

Tal que,

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\partial u}{\partial x}; & \varepsilon_y &= \frac{\partial v}{\partial y}; & \varepsilon_z &= \frac{\partial w}{\partial z}; \\ \gamma_{xy} &= \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}; & \gamma_{xz} &= \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}; & \gamma_{yz} &= \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}; \end{aligned} \quad (34)$$

Onde;

$\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – São as deformações específicas normais

$\gamma_{xy}, \gamma_{xz}, \gamma_{yz}$ – São as deformações específicas tangenciais

Substituindo a Equação (24) nas formulações (33) e (34), e obtendo a seguinte expressão para um elemento genérico com np nós, obtém-se a Equação (35):

$$\varepsilon = \sum_{i=1}^{np} \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} u_i \frac{\partial N_i}{\partial y} v_i \frac{\partial N_i}{\partial z} w_i \frac{\partial N_i}{\partial y} u_i + \frac{\partial N_i}{\partial x} v_i \frac{\partial N_i}{\partial z} u_i + \frac{\partial N_i}{\partial x} w_i \frac{\partial N_i}{\partial z} v_i + \frac{\partial N_i}{\partial y} w_i \right\} = \sum_{i=1}^{np} N_i U_i^e = B U^e \quad (35)$$

Onde,

B – é a matriz deformação específica do elemento, dada pela Equação (36).

$$B = [B_1, B_2, \dots, B_i, \dots, B_{np}] \quad (36)$$

Sendo, B_i , a matriz de deformação específica do nó i , expressa pela Equação (37).

$$B_i = \left\{ \frac{\partial N_i}{\partial x} \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{\partial N_i}{\partial y} \ 0 \ 0 \ 0 \ \frac{\partial N_i}{\partial z} \ \frac{\partial N_i}{\partial y} \ \frac{\partial N_i}{\partial x} \ 0 \ \frac{\partial N_i}{\partial z} \ 0 \ \frac{\partial N_i}{\partial x} \ 0 \ \frac{\partial N_i}{\partial z} \ \frac{\partial N_i}{\partial y} \right\} \quad (37)$$

4.5.3 Campo de tensões

Em cada ponto de um elemento tridimensional, o estado de tensões é composto por seis componentes independentes, que descrevem completamente as tensões internas atuantes naquele ponto. Essas componentes são organizadas em um vetor de tensões da seguinte forma (Bono, 2008), segue Equação (38).

$$\sigma = [\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}]^T \quad (38)$$

Onde,

$\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$, são as tensões normais.

$\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$, são as tensões tangenciais.

De tal forma que a relação entre as tensões e deformações específicas pode ser representada pela Equação (39).

$$\sigma = D \varepsilon \quad (39)$$

Sendo D a matriz constitutiva do material. Substituindo a Equação (35) na Equação (39), obtém-se a Equação (40).

$$\sigma = DBU^e \quad (40)$$

4.6 Modelagem Computacional utilizando ANSYS

A modelagem computacional de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão é uma abordagem fundamental para compreender os efeitos da degradação estrutural ao longo do tempo. Utilizando o Método dos Elementos Finitos (MEF), é possível simular fenômenos como a redução da seção transversal das armaduras ou a diminuição da rigidez dos materiais, efeitos comuns da corrosão em ambientes agressivos (Felix et al., 2018b).

O software ANSYS é amplamente utilizado nessa abordagem, permitindo a construção de modelos tridimensionais detalhados, por meio da definição da geometria, malha, propriedades do material e condições de contorno. Elementos específicos, como o SOLID185 (ou SOLID65) e o LINK180, são especialmente empregados para representar o concreto e o aço, possibilitando a análise de falhas progressivas em função da perda de desempenho estrutural (ANSYS INC., 2023; FELIX et al., 2018).

A base matemática do MEF está na formação da matriz de rigidez global $[K]$, que é construída a partir da soma das matrizes de rigidez elementares, cada uma associada a um elemento finito da malha. O comportamento interno de cada elemento é descrito por meio de funções de interpolação, ou funções de forma, que dependem das coordenadas naturalizadas (ξ, η, ζ) . Para o elemento hexaédrico linear, os deslocamentos variam de forma linear, e os campos de tensões e deformações se mantêm constantes dentro do elemento. Já no elemento hexaédrico quadrático, os deslocamentos possuem variação quadrática, permitindo que tensões e deformações apresentem variações lineares, aumentando a fidelidade do modelo (BONO, 2008; OÑATE, 1995).

As funções de forma obedecem a propriedades fundamentais: assumem valor 1 no nó correspondente e 0 nos demais nós, respeitando a condição de compatibilidade nodal. Além disso, em qualquer ponto interno do elemento, a soma das funções de forma deve resultar em 1, garantindo a interpolação exata dentro do domínio. No caso dos elementos isoparamétricos, essas funções também definem a geometria do elemento, possibilitando que coordenadas cartesianas (x, y, z) de pontos internos sejam obtidas diretamente por interpolação a partir das coordenadas nodais (BATHE, 1996).

No ANSYS, a resolução do modelo segue a equação matricial clássica, Equação (41):

$$[K]\{u\} = \{F\} \quad (41)$$

Onde u representa o vetor de deslocamentos nodais, e F o vetor de forças externas aplicadas. Após a obtenção dos deslocamentos, o programa calcula os campos de deformações ε por meio de relações de derivada espacial das funções de forma, enquanto as tensões σ são obtidas utilizando as relações constitutivas do material, como a Lei de Hooke generalizada (ANSYS INC., 2023). O vetor de tensões em um ponto do elemento possui seis componentes independentes, sendo três normais ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$) e três de cisalhamento (τ_x, τ_y, τ_z), que caracterizam completamente o estado tensional, (ANSYS INC., 2023).

A comparação entre modelos íntegros e corroídos permite avaliar impactos como redução da rigidez, redistribuição de esforços internos, aumento de deslocamentos e identificação de regiões críticas de colapso potencial. Além disso, com o uso da análise modal, também é possível verificar como a corrosão altera as frequências naturais da estrutura, uma vez que a matriz de rigidez influencia diretamente o comportamento dinâmico do sistema (FELIX et al., 2018; GONZÁLEZ et al., 2012).

4.7 Análise modal

A análise modal é uma técnica fundamental da engenharia estrutural que tem como objetivo determinar as propriedades dinâmicas naturais de uma estrutura, ou seja, suas frequências naturais, modos de vibração e respectivos fatores de amortecimento. Esses parâmetros são essenciais para compreender o comportamento da estrutura quando submetida a ações dinâmicas, como cargas cíclicas, impactos, vibrações ambientais ou mesmo eventos sísmicos (Anil K. Chopra, 2017).

No contexto de estruturas de concreto armado, a análise modal permite prever como a estrutura responderá a excitações externas antes que qualquer dano ocorra. Ela é particularmente importante quando se trata de estruturas degradadas por corrosão, uma vez que a perda de rigidez devido ao comprometimento das armaduras altera significativamente os modos de vibração e pode indicar redução da segurança estrutural (Felix et al., 2018). A formulação matemática da análise modal baseia-se na Equação (42), que descreve o movimento sem amortecimento:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0 \quad (42)$$

Onde,

- $[M]$ é a matriz de massa da estrutura,
- $[K]$ é a matriz de rigidez,
- $\{u\}$ é o vetor de deslocamentos nodais,
- $\{\ddot{u}\}$ é o vetor de acelerações nodais.

Resolução desse sistema resulta em um problema de autovalores, cuja solução fornece as frequências naturais (f_n) e os modos de vibração (ϕ_n) da estrutura. Cada modo representa uma forma distinta de vibração, e sua respectiva frequência está relacionada à rigidez e à distribuição de tensões. No software ANSYS, a análise modal pode ser realizada utilizando diferentes métodos numéricos, como a solução por autovalores diretos, método de subespaço ou Lanczos, dependendo da complexidade do modelo. Essa ferramenta é especialmente útil para comparar o comportamento dinâmico de modelos íntegros e estruturas com corrosão avançada, permitindo avaliar a influência da deterioração sobre o desempenho dinâmico global (ANSYS INC, 2023).

4.8 Normas Utilizadas

O delineamento experimental deste trabalho fundamenta-se em um arcabouço normativo que garante rastreabilidade metrológica e comparabilidade internacional dos resultados. A determinação das propriedades dinâmicas do concreto armado foi conduzida segundo a ASTM C215-19, que prescreve o ensaio de ressonância por impacto para a obtenção das frequências fundamentais transversal, longitudinal e torcional de prismas ou cilindros, bem como das equações que permitem converter esses valores em módulo dinâmico de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson dinâmico (ASTM E2001-18, 2018).

Segundo a norma ASTM C215-19 é possível calcular as propriedades dinâmicas de módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (p), Equações (43), (44) e (45).

$$E = DM(n')^2 \quad (43)$$

Onde E corresponde ao módulo de elasticidade dinâmico para as frequências fundamentais longitudinais, M é igual a massa do corpo de prova, n' é a frequência fundamental e D caracteriza o fator geométrico.

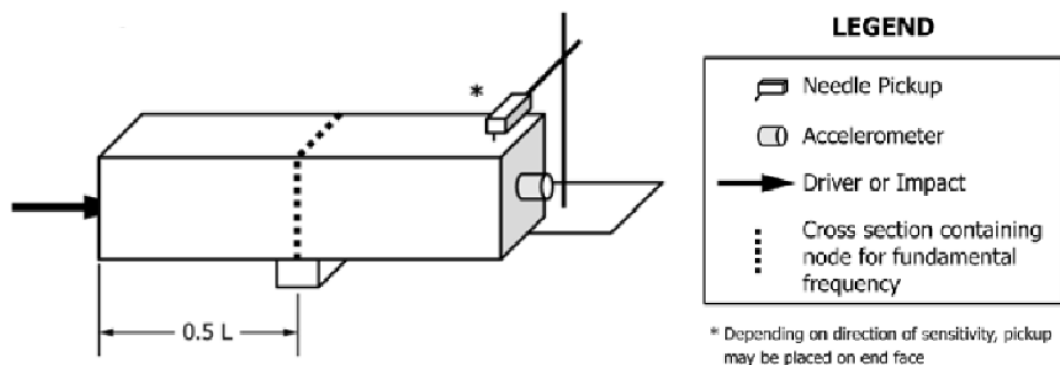
$$G = BM(n'')^2 \quad (44)$$

A Equação (44) caracteriza o módulo de cisalhamento (G), onde M é igual a massa do corpo de prova, n'' é a frequência fundamental torcional e B é o fator geométrico.

$$\mu = \left(\frac{E}{2G} \right) - 1 \quad (45)$$

Já na Equação (45) mostra a forma de cálculo para o coeficiente de Poisson, onde E é o módulo dinâmico de elasticidade e G o módulo dinâmico de cisalhamento obtidos nas etapas anteriores do ensaio de ressonância. A norma ASTM C215-19 também descreve a montagem dos corpos de provas para a realização dos ensaios. Na Figura 9 está representado a montagem para a captura das frequências fundamentais longitudinais, onde na ilustração o martelo de impacto (seta) golpeia o centro da face de topo do prisma, aplicando a força na direção do eixo longitudinal. O acelerômetro é colado no topo oposto, também alinhado axialmente (*pickup* com eixo sensível paralelo ao impacto), (ASTM 215-19, 2019).

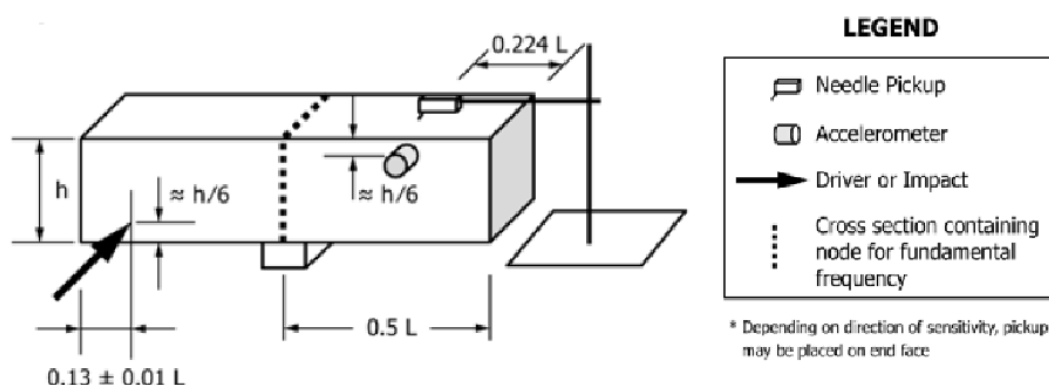
Figura 9 - Ensaio para modo longitudinal, ASTM C215-19.



Fonte: Adaptado de (ASTM 215-19, 2019).

Para o modo torcional fundamental, Figura 10, a montagem altera-se: o impacto é tangencial, aplicado a aproximadamente $0,13 L \pm 0,01 L$ da extremidade e a $h/6$ abaixo da aresta superior, de modo a gerar um momento torsor quase puro; o acelerômetro é transferido para a seção a $0,224 L$ – ponto nodal da flexão – e fixado também a $h/6$ da face, mas com eixo sensível tangente à superfície, para captar a rotação sem interferência de deslocamentos lineares

Figura 10 - Ensaio para modo Torcional.



Fonte: Adaptado de (ASTM 215-19, 2019).

Para sustentar a interpretação física dos espectros e compreender fenômenos como a divisão de picos decorrente de assimetrias ou trincas, recorreu-se ao guia ASTM E2001-18, o qual descreve a espectroscopia de ultrassom ressonante (RUS), discute modos degenerados e apresenta critérios de aceitação/rejeição baseados no deslocamento ou alargamento dos picos de ressonância (ASTM E2001-18, 2018).

5. METODOLOGIA

Este trabalho investiga, de forma quantitativa e numérica, a influência da corrosão nas propriedades dinâmicas de corpos de prova concreto-aço. Para isso, combina-se ensaio experimental de ressonância por impacto, conduzido conforme a norma ASTM C215-19, com um modelo numérico em ambiente CAE/CAD (ANSYS Workbench) baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), com o objetivo de construir um modelo com uma solução aproximada do problema proposto.

A metodologia inicia-se pela investigação experimental, na qual corpos de prova são moldados, curados e submetidos a corrosão eletroquímica controlada para representar diferentes estágios de deterioração. Em cada estágio, aplicam-se ensaios de ressonância por

impacto segundo os procedimentos normalizados, registrando-se as frequências de ressonância experimentais.

A partir dos dados obtidos em laboratório seguiu-se para a etapa numérica. Nessa etapa utilizou-se o ANSYS Workbench, software baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF), para reconstruir a geometria dos corpos de prova, atribuindo propriedades mecânicas compatíveis com cada nível de corrosão, para então gerar a malha de elementos sólidos e definir condições de contorno livres que reproduzam o ensaio de impacto.

Por fim, executaram-se duas análises no ambiente numérico: a análise modal, da qual se extraíram as frequências naturais dos corpos de prova, e a análise de resposta harmônica, que permitiu avaliar a amplitude da resposta vibratória em função da frequência de excitação aplicada. Espera-se que a comparação entre os resultados experimentais e numéricos viabilize a validação do modelo computacional desenvolvido, além de permitir a quantificação dos efeitos progressivos da corrosão sobre o comportamento dinâmico do concreto armado.

5.1 Preparação dos corpos de provas

Para caracterizar de forma controlada o comportamento dinâmico de elementos de concreto armado submetidos à corrosão acelerada, foi preparado um lote piloto com quatro corpos de prova prismáticos, denominados ST_1, CI2_B, CI2_A e CI1_A. Cada bloco apresenta seção transversal quadrada de 100 mm $\times$ 100 mm e comprimento total de 350 mm, Figura 11. Em cada amostra foi embutido um único vergalhão CA-60 de diâmetro nominal de 8 mm e comprimento 400 mm.

Figura 11 - Corpo de prova de concreto.



Fonte: Autores, 2025.

Os vergalhões de aço CA60 foram devidamente preparados conforme a NBR 6118 de procedimentos para projetos de estruturas de concreto. Para isolar uma área específica de aproximadamente 100 mm no vergalhão, utilizou-se uma fita, garantindo que essa região não fosse coberta pela proteção. Após o isolamento, a barra foi revestida com uma resina epóxi como mostrado na figura 12. Antes de inserir a barra no concreto, a fita foi removida, permitindo a análise do desenvolvimento da corrosão na área exposta.

Figura 12 - Vergalhões recobertos com resina epóxi com uma região isolada.

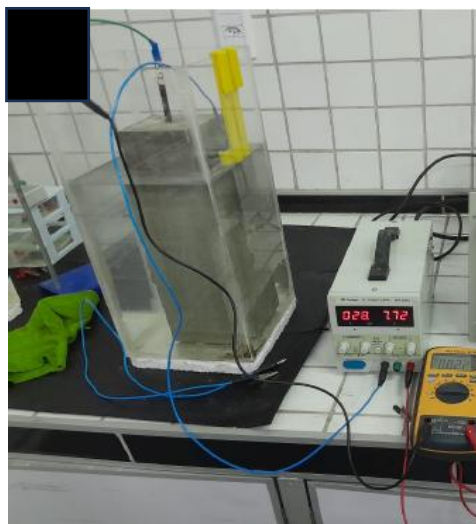


Fonte: Autores, 2025.

Foi escolhido amostra CI2_A para a realização dos testes, servindo de referência para os demais corpos de provas, uma vez que todos compartilham da mesma geometria. O concreto empregado possui uma composição de: Cimento CPIII4, areia natural cava fina, brita (granito N° 0 e N° 1), aditivo poli 1 SPX, com tensão máxima de compressão igual 40 MPa. Para reproduzir, o estágio de corrosão que normalmente se desenvolveria em ambiente marinho ao longo de vários anos, adotou-se o método de corrente impressa, isto é, uma técnica de aceleração eletroquímica da corrosão, na qual aplica-se uma diferença de potencial entre a armadura e um contra eletrodo externo submerso em solução eletrolítica

O corpo de prova (CI2_A) foi totalmente imerso em cubas de PVC contendo água, onde a barra CA-60 interna foi conectada ao polo positivo de uma fonte CC (ânodo), enquanto uma placa de aço, atuou como cátodo externo, posicionada a cerca de 5 mm da superfície do concreto. Uma fonte foi ajustada para fornecer densidade de corrente na faixa de 0,5 mA. Esses valores aceleram a dissolução anódica sem provocar reações secundárias significativas, Figura 13. A corrosão foi interrompida em três instantes de tempo, T_0 (13 dias de imersão), T_1 (15 min de indução de corrente) e T_2 (30 min de indução de corrente), onde em cada marco o bloco foi retirado da cuba para secar e equalizar a umidade interna para então ser submetido aos ensaios de dinâmicos experimentais.

Figura 13 - Ensaio de indução de corrente.



Fonte: Autores, 2025.

5.2 Ensaio dinâmico

Para caracterizar as propriedades dinâmicas do corpo de prova (CI2_A) em diferentes estágios de corrosão, foi adotado o ensaio ressonância por impacto segundo a norma ASTM C215-19. A bancada de ensaio, ilustrado na Figura 14, segue estritamente os requisitos da norma, mas com uma modificação: em vez de apoiar o corpo de prova, o mesmo foi suspenso por duas linhas de nylon presos a um cavalete metálico, configurando condição de contorno livre-livre (free-free).

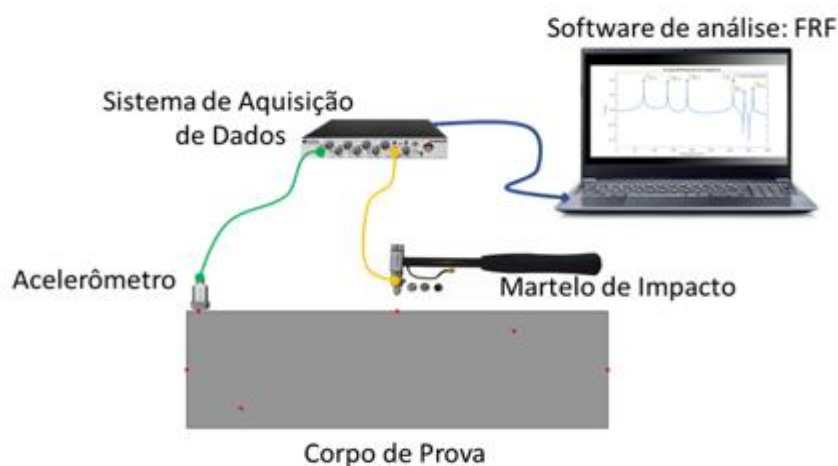
Figura 14 - Bancada de ensaio dinâmico.



Fonte: Autores, 2025.

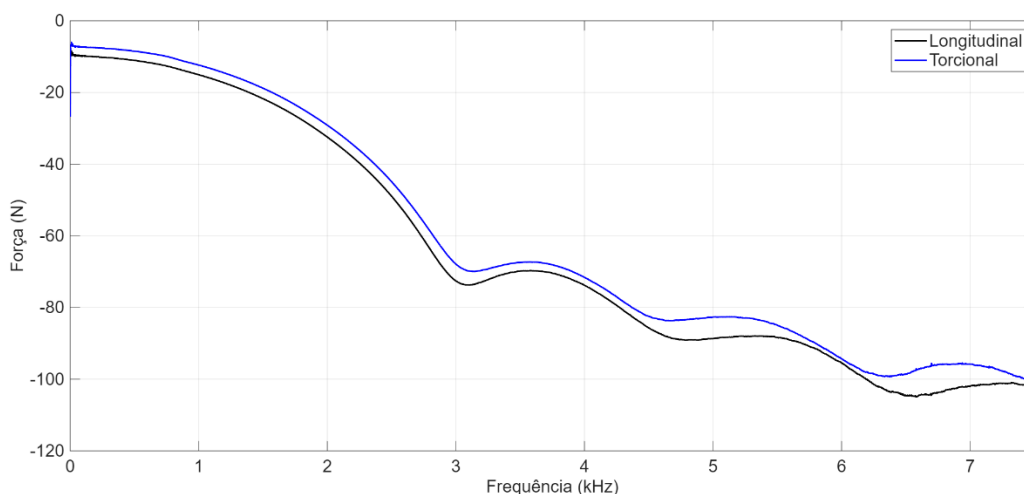
O ensaio de impacto baseou-se no princípio impulso (entrada) / resposta (saída): Assim, no experimento foi utilizado um martelo de impacto, com ponta de nylon, para aplicação de um golpe quase instantâneo no corpo de prova enquanto um acelerômetro captava a vibração resultante, Figura 15. Os sinais do martelo e acelerômetro são captados pelo sistema de Aquisição de Dados (DAQ), onde cada medição é convertida em uma Função de Resposta em Frequência (FRF), Figura 16. Os ensaios foram organizados da seguinte forma: para cada momento de estágio de corrosão T_0 (13 d), T_1 (15 min) e T_2 (30 min), foram realizados os ensaios dinâmicos de acordo com norma ASTM C215-19, para obtenção dos módulos de elasticidade e coeficiente de Poisson da amostra em análise.

Figura 15 - Esquema de montagem dos instrumentos.



Fonte: Autores, 2025.

Figura 16 - Exemplo de pulso de excitação.



Fonte: Autores, 2025.

Para determinar as propriedades de módulo de elasticidade, módulo de cisalhamento e coeficiente de Poisson é preciso determinar no mínimo duas frequências de ressonância. Nesse trabalho utilizamos as frequências de ressonância longitudinal e torcional, extraídos dos corpos de prova na condição de contorno livre–livre. As dimensões do corpo de prova possuem $100 \times 100 \times 350$ mm, forma estabelecidas conforme norma ASTM C215-19.

Para a obtenção da frequência de ressonância no modo longitudinal, a montagem do ensaio foi realizada conforme o procedimento estabelecido na norma ASTM C215-19, sendo ilustrada na Figura 17, considerando a condição livre-livre. O acelerômetro foi fixado no centro geométrico da face lateral de uma das extremidades do corpo de prova, próximo ao eixo longitudinal da armadura. A excitação foi aplicada axialmente, no centro da face oposta, por meio de um impacto controlado, de forma a garantir que a força gerada fosse colinear ao eixo longitudinal. Essa configuração tem por objetivo excitar predominantemente o modo fundamental de vibração por extensão/encurtamento, associado ao comportamento longitudinal do corpo de prova.

Figura 17 - Ensaio para modo longitudinal.



Fonte: Autores, 2025.

Para a obtenção da frequência de ressonância no modo torcional fundamental (T_1), o ensaio foi montado conforme as orientações descritas na ASTM C215-19, como ilustrado na Figura 18. O impacto foi aplicado de forma perpendicular à superfície lateral do corpo de prova, a uma distância de aproximadamente $0,13 L \pm 0,01 L$ da extremidade e a $h/6$ do bordo inferior, impondo assim um momento torsor puro sobre a seção transversal.

O acelerômetro foi fixado na extremidade oposta, também de forma tangencial à superfície, posicionado sobre uma região em que a aceleração angular é máxima e o deslocamento linear é mínimo. Essa configuração tem como objetivo minimizar a excitações não desejadas, conforme indicado pela própria norma, que recomenda esta disposição para reduzir interferências de vibrações transversais que podem ocorrer conjuntamente à torção.

Figura 18 - Ensaio para modo Torcional.

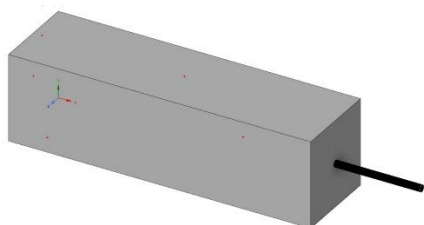


Fonte: Autores, 2025.

5.3 Modelo numérico

Para a realização da simulação computacional, foi necessário inicialmente modelar geometricamente o corpo de prova no ambiente virtual do ANSYS Workbench, respeitando as mesmas dimensões e proporções dos corpos utilizados nos ensaios experimentais. Nessa modelagem, foram realizadas marcações virtuais nas regiões correspondentes aos pontos de excitação mecânica (impacto do martelo) e de posicionamento do acelerômetro, de modo a replicar com fidelidade as condições de ensaio físico, como representado na Figura 19.

Figura 19 - Modelo numérico de corpo de prova.



a) Modelo numérico.

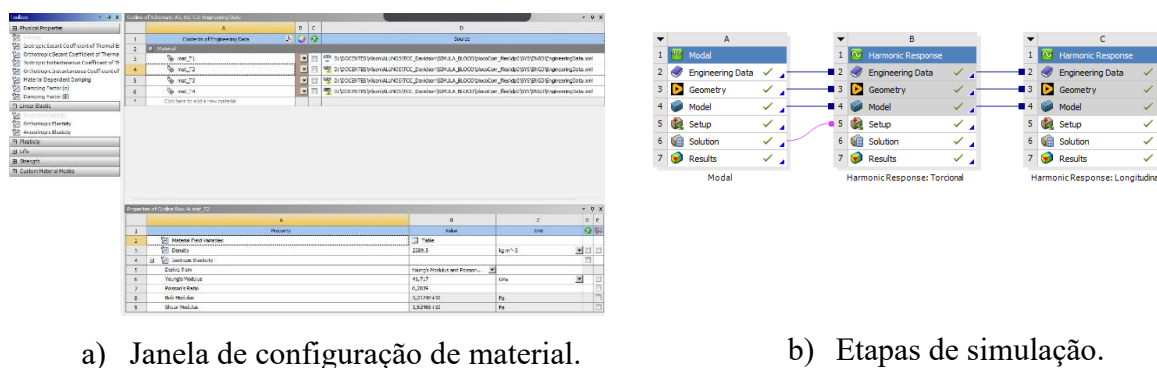


b) Corpo de prova experimental.

Fonte: Autores, 2025.

Na etapa seguinte, procedeu-se à caracterização do material, onde foi adotado um material genérico equivalente que representasse o comportamento mecânico conjunto do concreto e do aço. Os parâmetros do modelo foram definidos com base nas frequências ressonantes extraídas experimentalmente e nas equações da norma ASTM C215-19, conforme Equações (43)-(45). Essas propriedades foram inseridas no modelo como entradas para a definição do material, possibilitando simular o comportamento dinâmico do corpo de prova em diferentes estágios de corrosão, Figura 20.

Figura 20 - Caracterização dos materiais para cada ensaio.

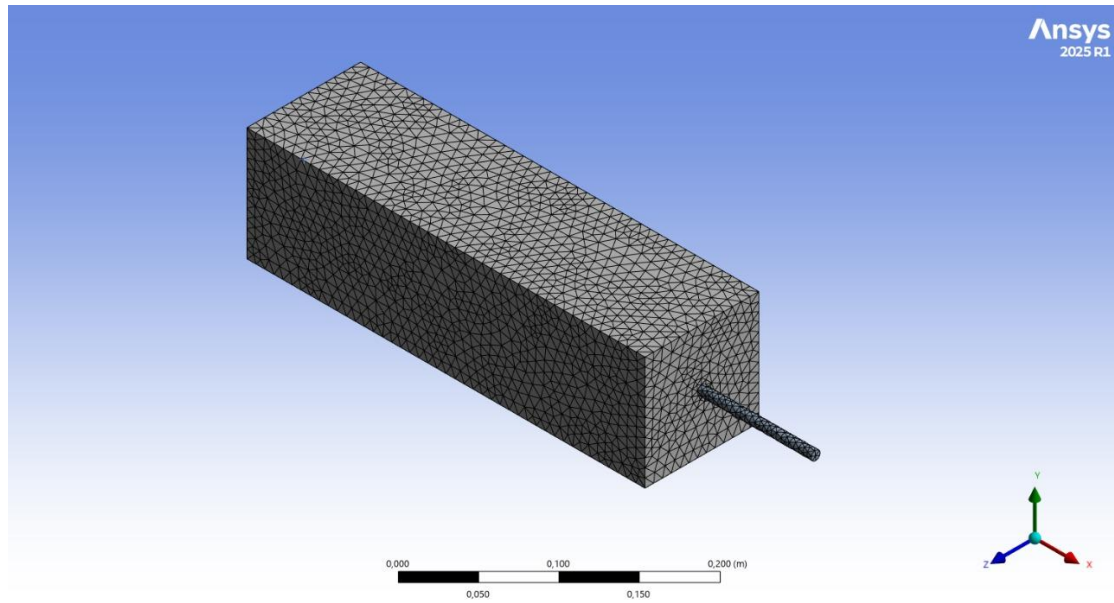


Fonte: Autores, 2025.

Na etapa seguinte, foi realizada a geração da malha de elementos finitos, composta por 11.417 nós, com tamanho médio de elemento igual a 0,008 mm, Figura 21. A fim de assegurar a precisão dos resultados numéricos, foi realizado um teste de convergência de malha, no qual se avaliou a influência da quantidade de nós e do tamanho médio dos elementos finitos sobre a resposta dinâmica do modelo. Para isso, variaram-se diferentes configurações de malha, mantendo-se constantes as condições de contorno e o carregamento.

As frequências obtidas foram analisadas para os modos 13 e 14, que representam, respectivamente, os modos longitudinais e torcional fundamentais. Observou-se que, à medida que se aumentava a densidade da malha (maior número de nós e menor tamanho de elemento), os valores de frequência tenderam à estabilização, indicando a convergência numérica dos resultados. A malha selecionada para as simulações finais foi aquela composta por 11.417 nós e elementos com tamanho médio de 0,008 mm, por apresentar equilíbrio entre tempo computacional e precisão, com variação desprezível nas frequências estimadas em relação às malhas mais refinadas, Tabela 3.

Figura 21 - Malha Resultante.



Fonte: Autores, 2025.

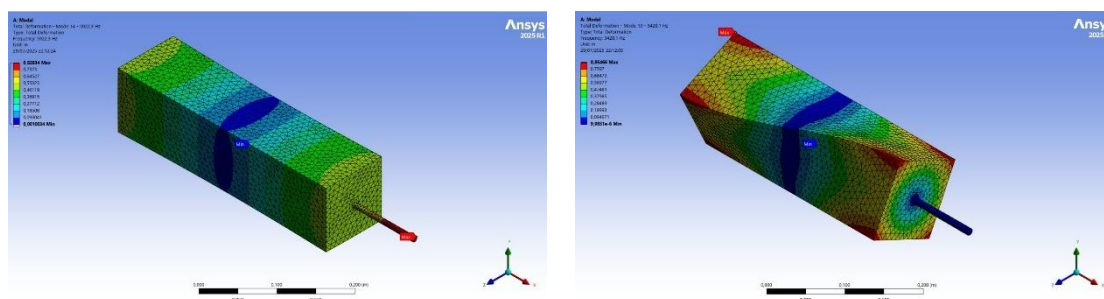
Tabela 3 - Resultados de diferentes frequências para configurações de malhas distintas.

Modos	Nº de nós/ Tam. Elem. (mm)					
	17535/Default	8743/0,01	59351/0,01	37151/0,006	11417/0,008	14614/0,007
13	3449,6	3427,5	3425,2	3425,9	3426,8	3426,2
14	5934,4	5935	5934,4	5934,3	5935	5934,7

Fonte: Autores, 2025.

Com a modelagem concluída, foram conduzidas duas etapas de simulação: primeiro, a análise modal, na qual foram extraídos as frequências naturais e os modos de vibração do corpo de prova; e, posteriormente, a análise de resposta em frequência (harmônica), com o objetivo de observar o comportamento vibratório do sistema em função de uma faixa de excitações periódicas. Essa última análise permitiu comparar a resposta dinâmica do modelo com os dados experimentais, contribuindo para a validação do modelo numérico e a compreensão dos efeitos da corrosão sobre a rigidez estrutural, Figura 22 (a) e Figura 22 (b). Para isso, o vetor força obtido nos ensaios físicos com martelo instrumentado foi exportado e aplicado na região de impacto do modelo computacional, assegurando uma equivalência entre os domínios físico e numérico, vide Figura 16.

Figura 22 - Análise modal.



(a) Modo longitudinal.

(b) Modo torcional.

Fonte: Autores, 2025.

Por fim, a análise numérica foi realizada considerando os quatro estágios de corrosão correspondentes aos diferentes tempos de exposição ao processo eletroquímico: Teste 1, Teste 2, Teste 3 e Teste 4. Para cada estágio, foram atribuídas ao modelo as propriedades mecânicas específicas obtidas experimentalmente, como o módulo de elasticidade dinâmico, o módulo de cisalhamento e o coeficiente de Poisson, recalculados a partir das frequências de ressonância medidas em cada tempo.

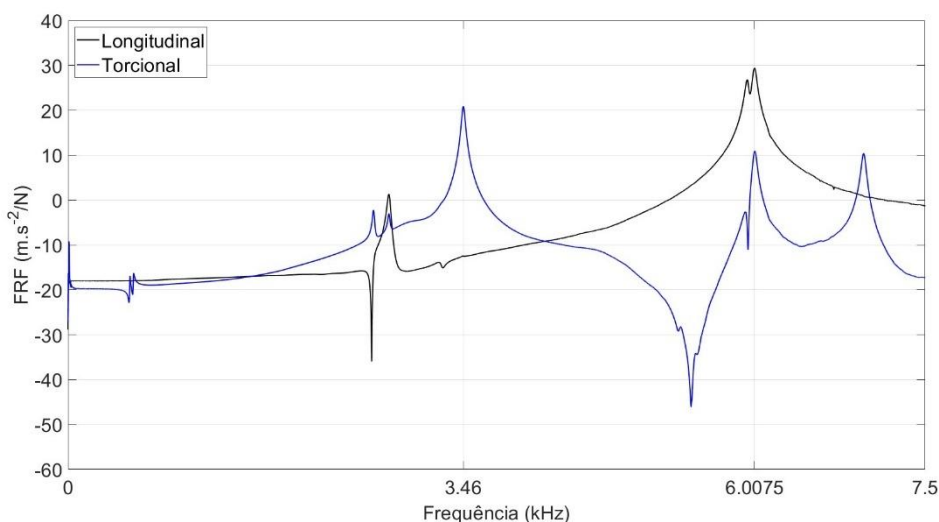
Dessa forma, para cada nível de corrosão, executaram-se tanto a análise modal quanto a análise de resposta em frequência, possibilitando uma avaliação comparativa entre os estados estruturais. Essa abordagem permitiu simular a evolução da degradação no corpo de prova ao longo do tempo e verificar a influência progressiva da corrosão sobre o comportamento dinâmico da estrutura, servindo de base para a validação do modelo e interpretação dos efeitos da perda de rigidez associada à corrosão.

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Quatro ensaios experimentais foram realizados no corpo de prova (CI2_A), onde foram avaliadas duas situações de excitação: longitudinal e torcional, ambas sob condição de contorno livre-livre, para capturar as frequências de ressonância. Os sinais foram adquiridos conforme norma ASTM C215-19.

A Figura 23 apresenta a Função de Resposta em Frequência (FRF) obtida da amostra de referência, isto é, sem presença de corrosão (Teste 1). No gráfico são evidenciadas duas frequências de ressonância: 3,46 kHz representado um possível modo torcional e 6,0075 kHz indicando um possível modo longitudinal.

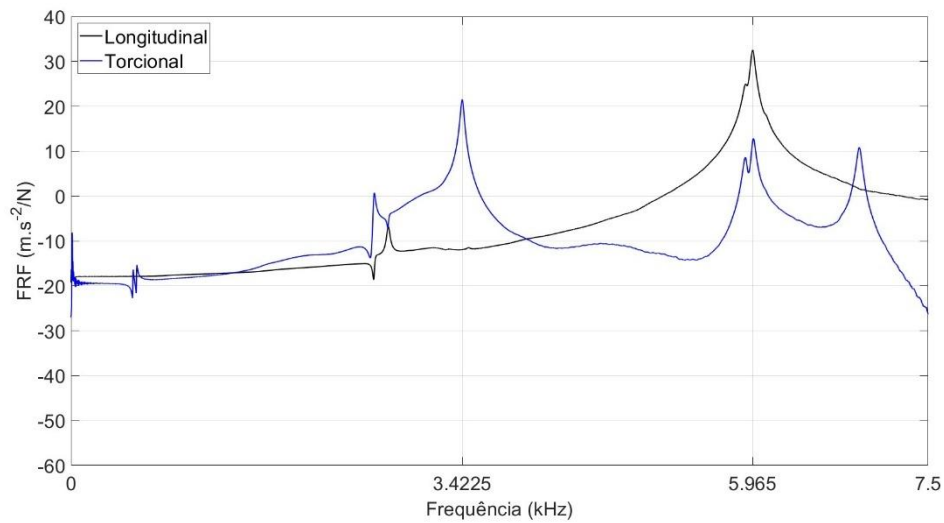
Figura 23 - Ensaio experimental (FRF), teste 1.



Fonte: Autores, 2025.

A Figura 24 refere-se ao segundo ensaio experimental, realizado com o corpo de prova exposto à corrosão por imersão em uma solução salina durante 13 dias, em tanque de PVC. A análise da Função de Resposta em Frequência (FRF) revela alterações significativas no comportamento dinâmico da amostra quando comparada à condição de referência (Teste 1). Observa-se uma leve redução nas frequências de ressonância, tanto para as frequências longitudinal quanto torcional, 5,9650 kHz e 3,4225 kHz, respectivamente.

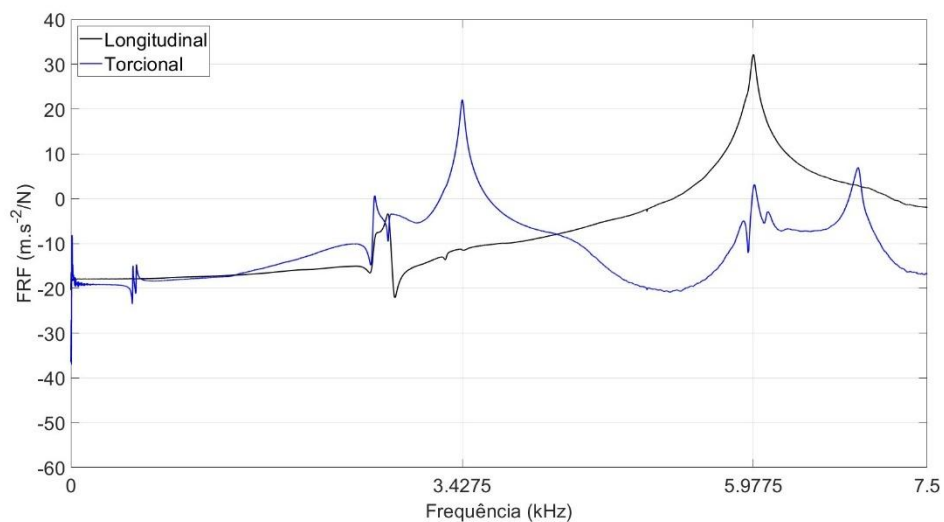
Figura 24 - Ensaio experimental (FRF), teste 2.



Fonte: Autores, 2025.

A Figura 25 ilustra o espectro da Função de Resposta em Frequência (FRF) referente ao Teste 3, cuja amostra foi submetida a um processo de corrosão acelerada por corrente contínua de 0,5 mA, durante 15 minutos, em solução eletrolítica. O método seguiu os princípios da indução eletroquímica para intensificar o processo corrosivo, antecipando os danos esperados em ambientes agressivos ao longo do tempo. Nota-se que os picos ressonantes estão levemente deslocados em relação ao corpo de prova sem corrosão. Os primeiros modos torcional e longitudinal aparece agora próximo a 3,4275 kHz e 5,9775 kHz, respectivamente.

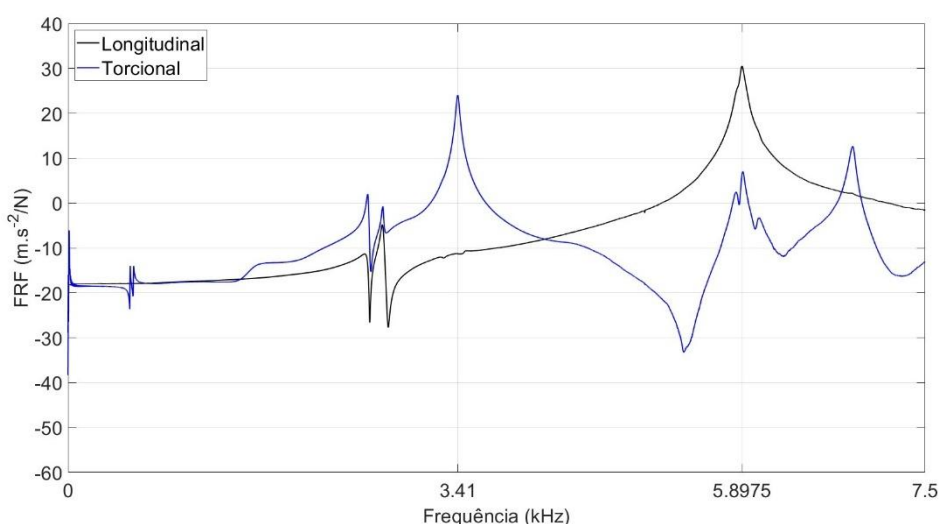
Figura 25 - Ensaio experimental (FRF), teste 3.



Fonte: Autores, 2025.

A Figura 26 exibe a Função de Resposta em Frequência (FRF) para o corpo de prova submetido ao Teste 4, realizado por meio de indução eletroquímica com corrente contínua de 0,5 mA durante 15 minutos, totalizando 30 minutos de indução de corrente (teste 3 e 4). O procedimento experimental seguiu os mesmos parâmetros adotados no Teste 3, com o objetivo de verificar a repetibilidade do efeito de corrosão acelerada sobre a rigidez dinâmica do sistema. Os resultados mostram comportamento análogo ao observado anteriormente: com pico torcional aparecendo próximo a 3,41 kHz, e o longitudinal em torno de 5,8975 kHz, representando uma leve redução em relação à condição inicial (sem corrosão).

Figura 26 - Ensaio experimental (FRF), teste 4.



Fonte: Autores, 2025.

A Tabela 4 sintetiza as frequências naturais identificadas nos quatro ensaios de ressonância por impacto, distinguindo-se os modos longitudinal e torcional. A análise conjunta desses resultados permite apreciar, de forma quantitativa, a progressão dos efeitos da corrosão sobre a rigidez dinâmica dos corpos de prova de concreto armado.

Tabela 4 - Frequências naturais capturadas pelo ensaio de ressonância.

Testes	Longitudinal (kHz)	Torcional (kHz)
1	6,0075	3,4600
2	5,9650	3,4225
3	5,9775	3,4275
4	5,8975	3,4100

Fonte: Autores, 2025.

A partir desses valores apresentado na Tabela 4, e aplicado as equações da norma ASTM C215-19, foram obtidas as propriedades mecânicas dinâmicas de cada bloco: módulo de elasticidade (E), módulo de cisalhamento (G) e coeficiente de Poisson (μ), dinâmico, apresentado na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades dinâmicas.

Testes	E (GPa)	G (GPa)	μ
1	42,314	16,6041	0,2742
2	41,717	16,2462	0,2839
3	41,892	16,2940	0,2855
4	40,779	16,1283	0,2642

Fonte: Autores, 2025.

A análise dos sinais experimentais permitiu ainda estimar o coeficiente de amortecimento modal (ζ) para cada condição avaliada. Os coeficientes de amortecimento dinâmico extraídos dos ensaios mostram variação discreta nos estágios iniciais de corrosão e aumento perceptível após a indução eletroquímica mais longa, indicando maior dissipação de energia, conforme Tabela 6.

Tabela 6 - Amortecimento dinâmicos (ζ).

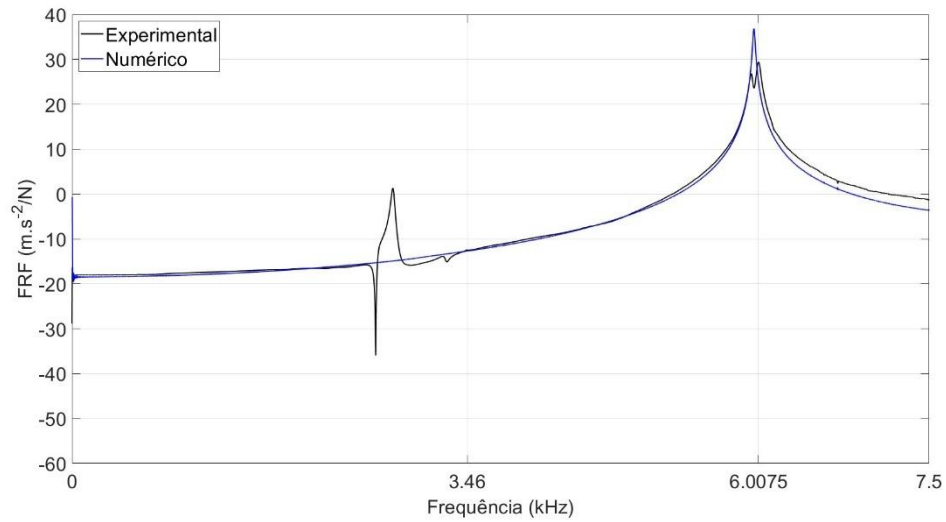
Testes	ζ (Longitudinal)	ζ (Torcional)
1	0,003514	0,0044356
2	0,0031004	0,0043062
3	0,0032916	0,0046952
4	0,0039574	0,0043573

Fonte: Autores, 2025.

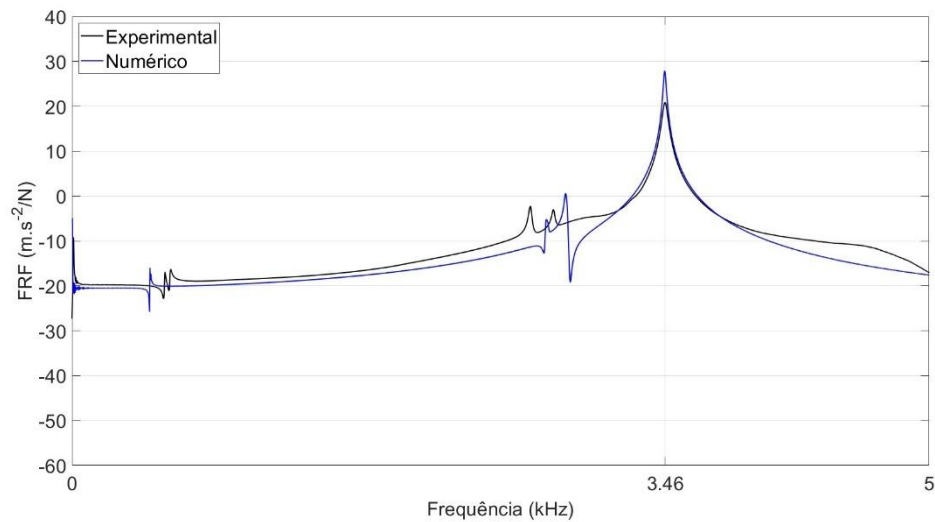
Na figura 27(a) e Figura 27(b) compara-se os espectros de resposta em frequência obtidos experimentalmente e numericamente para o corpo de prova sem corrosão (teste 1). Na Figura 26(a), referente às frequências relacionadas ao modo longitudinal, o pico calculado pelo ANSYS surge em 6,03 kHz, praticamente coincidente com o valor medido experimentalmente de 6,0075 kHz. Na Figura 27(b), relativo as frequências de ressonância para o modo torcional, o pico numérico aparece em 3,47 kHz contra 3,4600 kHz do ensaio. O erro de frequência em

ambos os ensaios, experimental e numérico, permanece abaixo de 0,5 %, demonstrando a precisão do modelo. Essa precisão é calculada pela Equação (43).

Figura 27 -Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 1.



(a) Longitudinal.



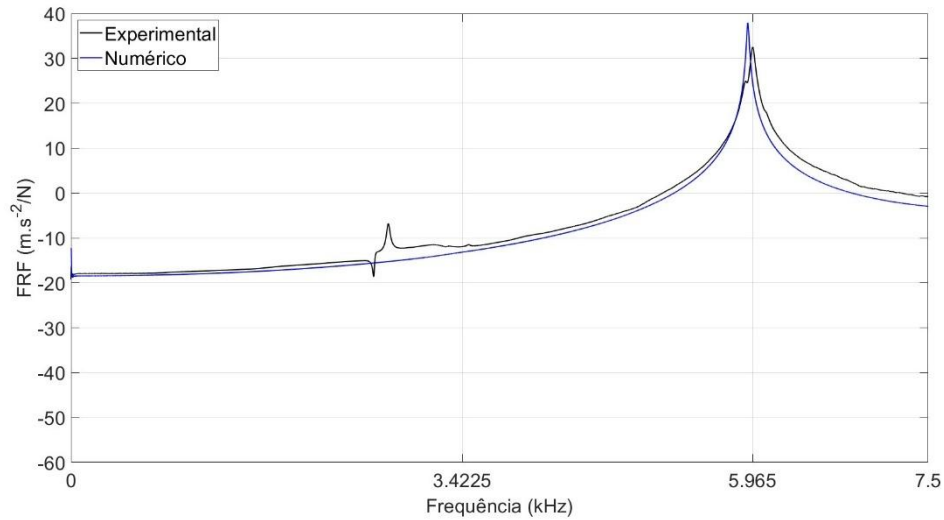
(b) Torcional.

Fonte: Autores, 2025.

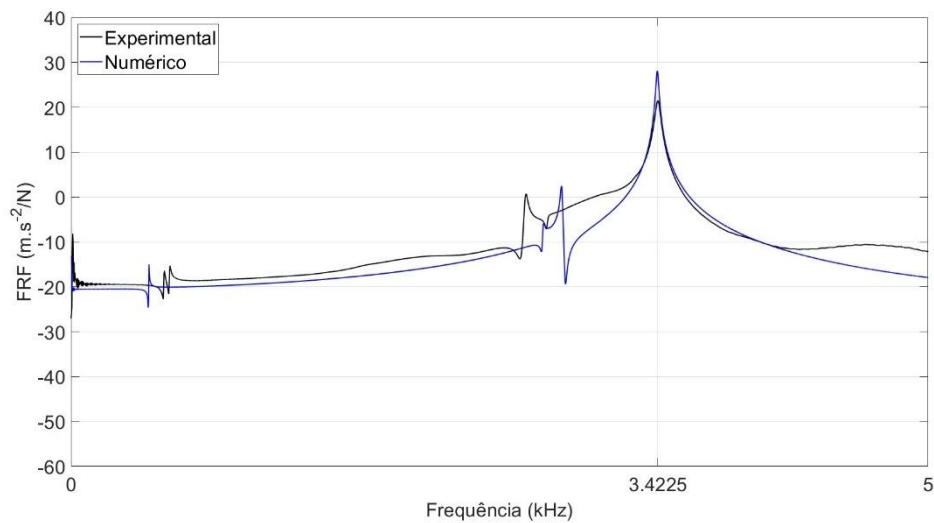
Nas Figuras 28(a) e 28(b) descreve-se as funções de resposta em frequência obtidas no ensaio com 13 dias de imersão e as calculadas no ANSYS, para o teste 2. No modo longitudinal, o pico experimental desloca-se para 5,9650 kHz, enquanto a simulação prevê 5,985 kHz; obtendo uma discrepância de apenas 0,3352 %, valor compatível com a incerteza de

discretização. Já no modo torcional o alinhamento de amplitudes é melhor, entretanto, a frequência simulada (3,4400 kHz) excede a experimental (3,4225 kHz) em 0,5113 %.

Figura 28 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 2.



(a) Longitudinal.



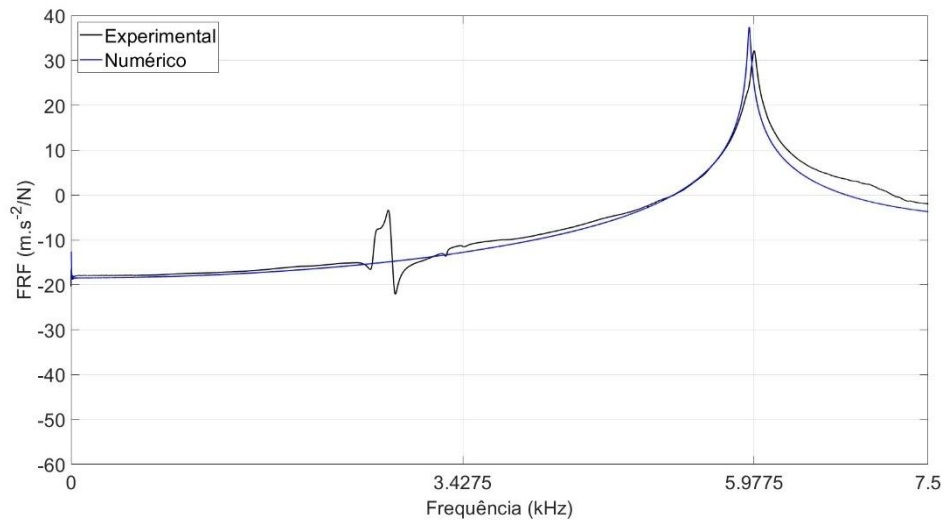
(b) Torcional.

Fonte: Autores, 2025.

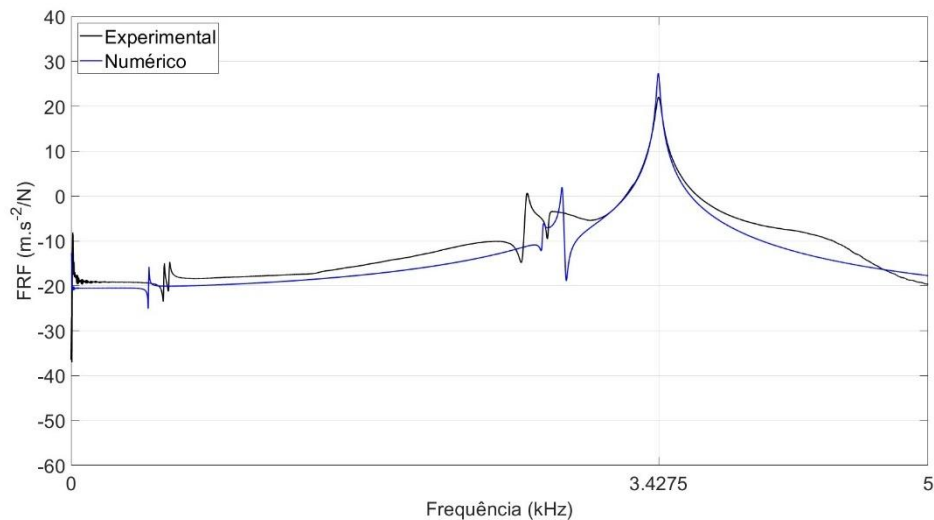
No Teste 3, correspondente a Figura 29(a) e Figura 29(b), à amostra foi submetida à corrosão eletroquímica por 15 min a 0,5 mA. A frequência correspondente ao modo longitudinal no ensaio experimental foi de 5,9775 kHz e a simulada ficou em 5,960 kHz, resultando em erro de 0,29 %. A crista calculada, como nos testes anteriores, mantém-se mais estreita e alta porque o modelo considera apenas perdas viscosas globais, tais como o

amortecimento dinâmico, Tabela 6, sem contemplar todas as dissipações microestruturais presentes no ensaio (microfissuras, atrito martelo–corpo de prova, ruído de instrumentação). Para a frequência de ressonância correspondente ao modo torcional foi medido experimentalmente um valor de 3,4275 kHz, enquanto o ensaio numérico obteve um valor de frequência de 3,450 kHz, gerando desvio de 0,66 %.

Figura 29 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 3.



(a) Longitudinal.



(b) Torcional.

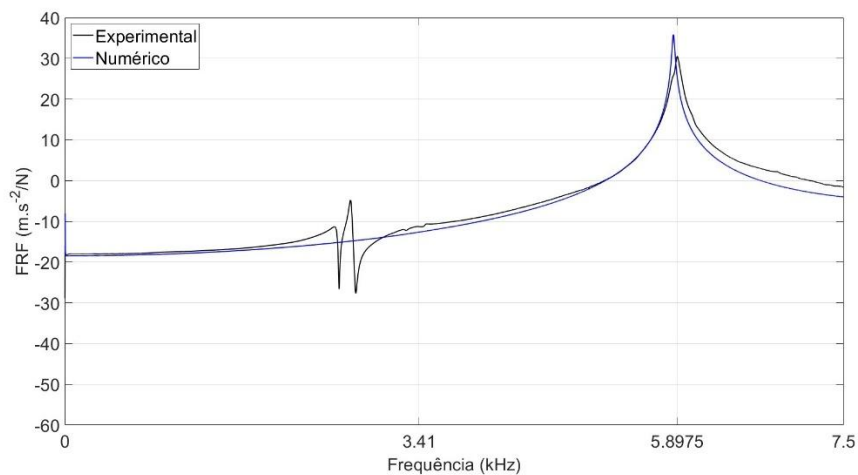
Fonte: Autores, 2025.

A Figura 30(a) e Figura 30(b) descrevem o ensaio pós nova indução eletroquímica de 15 min a 0,5 mA, indicando que o modelo numérico continua a acompanhar de perto o ensaio.

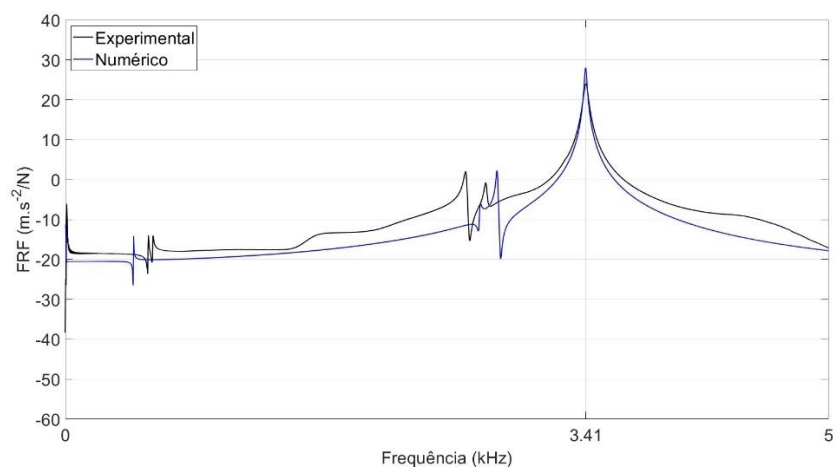
Para as frequências de ressonâncias longitudinais o pico experimental aparece em 5,8975 kHz, enquanto a simulação prevê cerca de 5,88 kHz, diferença inferior a 0,3 %. A curva calculada mantém-se mais estreita e com amplitude ligeiramente maior porque o amortecimento adotado no ANSYS é apenas proporcional; ou seja, no experimento, dissipações adicionais (microfissuras, atrito martelo–corpo de prova e ruído de instrumentação) alargam a crista e reduzem a altura.

Para a frequência de ressonância torcional, Figura 30(b), o pico medido experimentalmente situa-se em 3,4100 kHz e o valor numérico em torno de 3,43 kHz, resultando em um erro próximo de +0,6 %. O ensaio experimental apresenta um pico mais baixo e largo, refletindo perdas de energia maiores, enquanto a resposta simulada continua mais aguda pela mesma limitação de amortecimento.

Figura 30 - Comparação entre os ensaios experimentais e numéricos, teste 4.



(a) Longitudinal.



(b) Torcional.

Fonte: Autores, 2025.

A seguir a Equação (43) para calcular a erro entre os valores experimental e numérico.

$$\%erro = \frac{|f_{num} - f_{exp}|}{f_{exp}} \times 100 \quad (43)$$

A Tabela 7 sintetiza os resultados provenientes dos ensaios das simulações numéricas.

Tabela 7 - Frequências de ressonância obtidas pelo ensaio numérico.

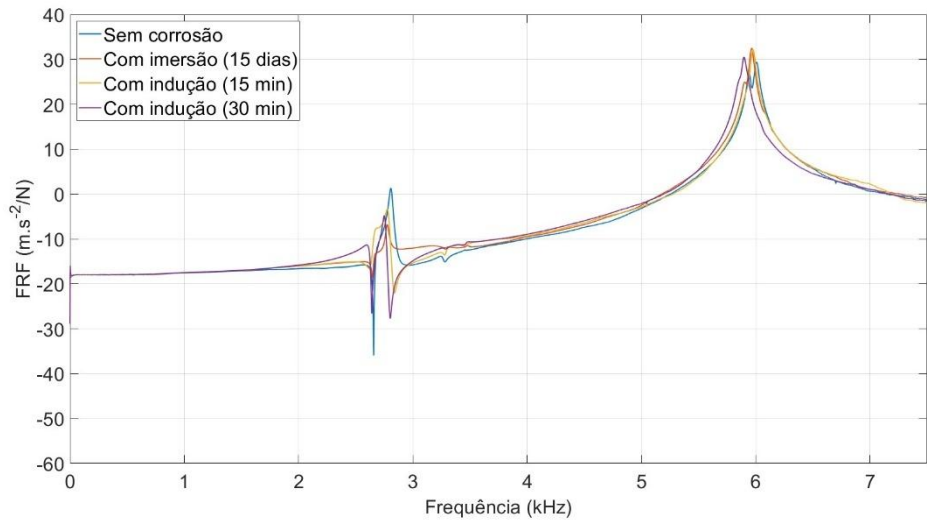
Testes	Longitudinal (kHz)	Torcional (kHz)
1	6,0300	3,4700
2	5,9850	3,4400
3	5,9600	3,4500
4	5,8800	3,4300

Fonte: Autores, 2025.

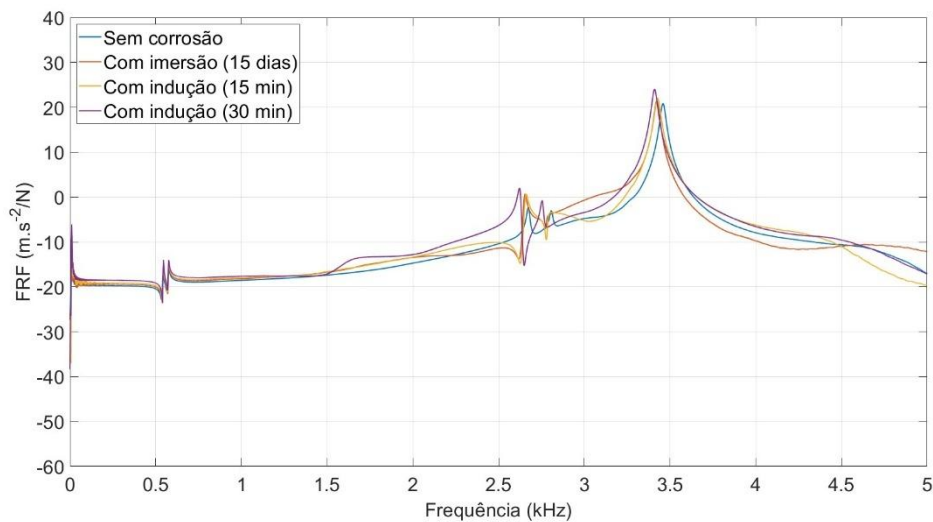
A sobreposição das curvas é mostrada na Figura 31(a) e Figura 31(b), onde evidenciam a evolução dinâmica do corpo de prova ao longo dos quatro estágios avaliados. Na Figura 30(a), correspondem às frequências de ressonância longitudinais. Observa-se que os picos ressonantes se deslocam para a esquerda à medida que ocorre o avanço da corrosão: a amostra sem corrosão apresenta a frequência mais elevada, 6,0075 kHz, seguida pela condição de 15 dias de imersão, depois pela indução de 15 min e, por fim, pela indução de 30 min, cujo pico já se encontra perto de 5,8975 kHz. Esse desvio de aproximadamente 1,8 % confirma a perda progressiva de rigidez axial resultante da corrosão. Além da migração em frequência, observa-se um ligeiro aumento da largura de banda e redução da amplitude nos estados mais degradados, indicando crescimento das fontes de dissipação interna.

No gráfico da Figura 31(b), referente ao modo torcional, o comportamento é semelhante, porém menos monotônico. O pico da amostra imersa 15 dias cai para cerca de 3,40 kHz, enquanto as amostras induzidas posicionam-se ligeiramente acima de 3,4275 kHz para 15 min e 3,4100 kHz para 30 min, com desvio de aproximadamente 1,4 % em relação a amostra sem corrosão. A amplitude do pico cresce e o contorno torna-se mais largo nos estados com maior exposição, corroborando o aumento do amortecimento estrutural devido à perda de aderência concreto-aço e às microfissuras transversais.

Figura 31 - Comparação entre os ensaios experimentais.



(a) Longitudinal.



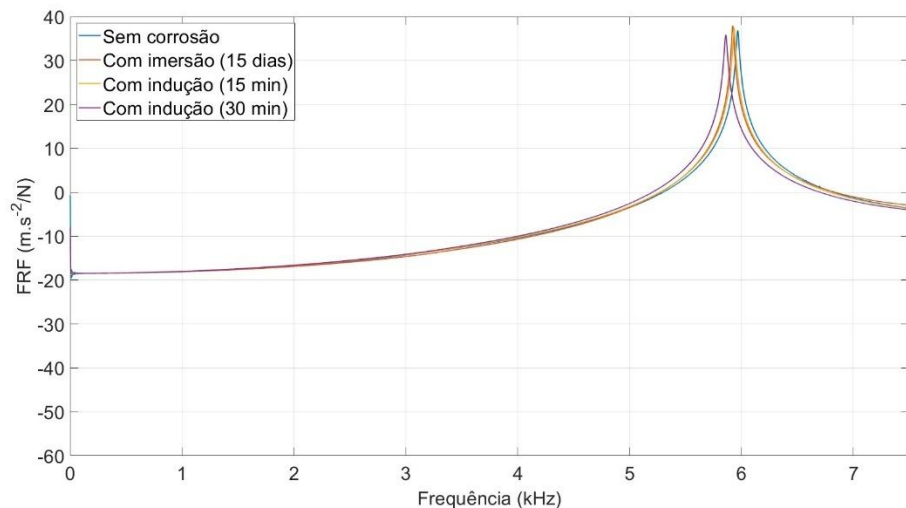
(b) Torcional.

Fonte: Autores, 2025.

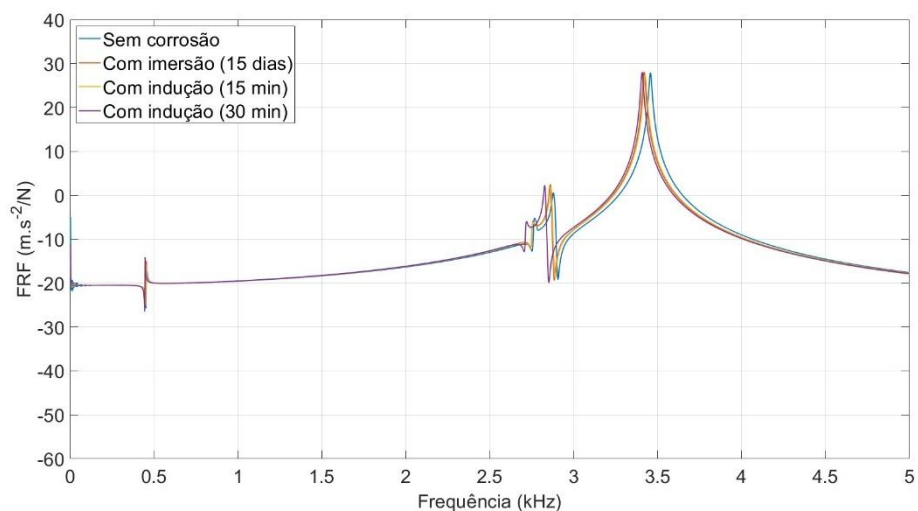
A Figura 32(a) e Figura 32(b) expõe, sobrepostas, as curvas numéricas obtidas para os quatro cenários modelados: corpo de prova sem corrosão, após quinze dias de imersão em solução salina, e após induções eletroquímicas de quinze e trinta minutos. No espectro longitudinal observa-se que o pico de referência permanece ligeiramente à direita, em torno de 6,03 kHz, enquanto as respostas degradadas recuam gradualmente: primeiro para cerca de 5,9850 kHz (imersão), depois para 5,9600 kHz (indução de quinze minutos) e, por fim, para aproximadamente 5,88 kHz (indução de trinta minutos). O deslocamento total computado é da ordem de 1 %, reproduzindo a mesma tendência de queda verificada experimentalmente, ainda que de forma um pouco mais suave.

Para o modo torcional o comportamento é análogo, com o pico inicial situado em 3,47 kHz e deslocamentos sucessivos para 3,44 kHz, 3,45 kHz e 3,43 kHz, respectivamente. Essa ligeira oscilação confirma a maior sensibilidade do torcional a detalhes da distribuição de corrosão, mas mantém a hierarquia correta entre os estados analisados, pois as condições mais expostas continuam concentradas à esquerda da curva intacta. Em ambos os modos as cristas permanecem mais estreitas e de amplitude semelhante porque, no modelo, o amortecimento proporcional foi mantido praticamente constante, não refletindo integralmente as dissipações adicionais captadas em ensaio, como microfissuras e atrito concreto-aço, refletindo um deslocamento total de 1,15%.

Figura 32 - Comparação entre os ensaios numéricos.



(a) Longitudinal.



(b) Torcional.

Na Tabela 8 encontra-se um resumo dos erros encontrados para cada um dos testes, nas etapas de ensaios experimentais e longitudinais, considerando as frequências ressonantes correspondentes aos modos longitudinais (L) e torcionais (T).

Tabela 8 - Erro associado aos ensaios experimentais e numéricos.

Testes	Experimental		Numérico		Erro	
	L (kHz)	T (kHz)	L (kHz)	T (kHz)	L (%)	T (%)
1	6,0075	3,4600	6,0300	3,4700	0,37	0,29
2	5,9650	3,4225	5,9850	3,4400	0,33	0,51
3	5,9775	3,4275	5,9600	3,4500	0,29	0,66
4	5,8975	3,4100	5,8800	3,4300	0,30	0,59

Fonte: Autores, 2025.

7. CONCLUSÃO

Este trabalho teve como objetivo analisar os efeitos da corrosão em elementos de concreto-aço por meio de ensaios não destrutivos e simulações computacionais, visando compreender as alterações nas propriedades dinâmicas do material ao longo do processo de avanço da corrosão. Para isso, foram utilizados ensaios de ressonância por impacto conforme a norma ASTM C215-19, permitindo a identificação das frequências de ressonância relacionadas aos modos longitudinal e torcional dos corpos de prova, a partir das quais se determinaram os módulos dinâmicos de elasticidade, de cisalhamento e o coeficiente de Poisson dinâmico.

Os resultados experimentais evidenciaram uma redução progressiva das frequências de ressonância conforme o avanço da corrosão, especialmente nas frequências relacionadas com os modos longitudinal e torcional, indicando perda de rigidez e mudança no amortecimento, comprometendo a integridade do corpo de prova concreto-aço. Paralelamente, os modelos numéricos desenvolvidos com o auxílio do software ANSYS, conseguimos simular adequadamente esses comportamentos, obtendo uma boa correlação entre os valores obtidos nas análises computacionais com os ensaios físicos, reforçando a confiabilidade da abordagem adotada.

A principal contribuição deste estudo reside na integração entre a experimentação e a modelagem por elementos finitos, possibilitando a representação dos efeitos da corrosão por meio de parâmetros ajustáveis, como a variação dos módulos de elasticidades e coeficiente de Poisson. Essa metodologia se mostra eficaz para prever o desempenho estrutural de elementos submetidos a ambientes agressivos, podendo ser adaptada a diferentes configurações e níveis de avanço da corrosão.

Embora os resultados tenham sido promissores, é importante reconhecer limitações inerentes ao próprio material estudado. O concreto, por ser um compósito heterogêneo, apresenta variações em sua composição e propriedades mecânicas que dificultam a padronização dos corpos de prova. Essa irregularidade impacta diretamente nos ensaios dinâmicos, onde pequenas diferenças estruturais podem alterar significativamente as respostas obtidas. Ainda assim, o modelo proposto demonstrou coerência com os dados experimentais e ofereceu uma base técnica e metodológica consistente, passível de aprimoramento em estudos futuros.

Conclui-se, portanto, que a abordagem integrada entre ensaios dinâmicos experimentais e modelagem numérica representa uma alternativa viável e eficiente para o monitoramento da integridade de estruturas de concreto armado com corrosão, contribuindo para estratégias de diagnóstico, manutenção preditiva e aumento da durabilidade das estruturas.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANIL K.CHOPRA. DYNAMICS OF STRUCTURES - Theory and Applications to Earthquake Engineering. 5. ed. HARLOW: Person Education Limited, 2017.

ANSYS INC. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference.

ASTM 215-19. Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Resonant Frequencies of Concrete Specimens. West Conshohocken, PAASTM International, , 1 dez. 2019. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?C215-19>>

ASTM E2001-18. Guide for Resonant Ultrasound Spectroscopy for Defect Detection in Both Metallic and Non-metallic Parts. West Conshohocken, PAASTM International, , 1 nov. 2018. Disponível em: <<http://www.astm.org/cgi-bin/resolver.cgi?E2001-18>>

BASTOS, Paulo. FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO. [S.l.: S.n.].

BONO, Giuliana. MODELOS CONSTITUTIVOS PARA ANÁLISE TRIDIMENSIONAL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO ATRAVÉS DO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS Giuliana Furtado Franca Bono. Porto Alegre: [S.n.].

BRITO, Luciana Rabelo de; ALMEIDA, Antônia Fabiana Marques; OLIVEIRA, Francisco Heber Lacerda de. Análise da correlação entre resistência à compressão axial e à tração na flexão em pavimentos rígidos. Revista Tecnologia, v. 40, n. 2, 26 nov. 2019.

CARLOS, Igor; AYALA, Alarcón. Universidade Federal do Rio Grande do Sul CUSTOMIZAÇÃO DO SOFTWARE ANSYS PARA ANÁLISE DE LAJES DE CONCRETO PROTENDIDO PELO MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS. [S.l.: S.n.].

CASCUDO, O. O controle da corrosão de armaduras em concreto: inspeção e técnicas eletroquímicas . [S.l.: S.n.].

DALLAGO. ANÁLISE DA RESISTÊNCIA A CORROSÃO EM AÇOS FERRAMENTA. [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://repositorio.unipampa.edu.br/jspui/handle/riu/4182>>. Acesso em: 7 dez. 2023.

FELIX, Emerson Felipe *et al.* Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 1–15, 31 jan. 2018a.

FELIX, Emerson Felipe *et al.* Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF. Revista ALCONPAT, v. 8, n. 1, p. 1–15, 31 jan. 2018b.

FELIX, Emerson Felipe; CARLOS, São. Modelagem da Deformação do Concreto Armado Devido à Formação dos Produtos de Corrosão. [S.l.: S.n.].

GENTIL. CORROSÃO. [S.l.: S.n.]. v. 3º

GUILHERME DA SILVA, Luiz; REGO MONTEIRO DA HORA, Henrique; ERTHAL JUNIOR, Milton. Efeitos da corrosão atmosférica nas empresas do Porto do Açúcar cinco anos após o início das operações. [S.l.: S.n.].

KIANI, Keivan; SHODJA, Hossein M. Prediction of the penetrated rust into the microcracks of concrete caused by reinforcement corrosion. Applied Mathematical Modelling, v. 35, n. 5, p. 2529–2543, maio 2011.

LIBÂNIO M. PINHEIRO. UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO FUNDAMENTOS DO CONCRETO E PROJETO DE EDIFÍCIOS. São Paulo: [S.n.].

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concreto Estructura, propiedades y materiales. [S.l.: S.n.].

MONTEIRO, P. J. M.; MEHTA, P. K. INTERACTION BETWEEN CARBONATE ROCK AND CEMENT PASTECEMENT and CONCRETE RESEARCH. [S.l.: S.n.].

MUTHULINGAM, S.; RAO, B. N. Non-uniform time-to-corrosion initiation in steel reinforced concrete under chloride environment. *Corrosion Science*, v. 82, p. 304–315, maio 2014.

NBR 6118. NBR6118 -Projeto de estruturas de concreto. 2024.

NBR 7480. NBR7480 - Aço destinado às armaduras para estruturas de concreto armado — Requisitos. . 2024.

NEVILLE, A. M. PROPRIEDADES DO CONCRETO. 5. ed. [S.l.: S.n.]. v. 1

OÑATE, E. Calculo de estructuras por el método de elementos finitos: Analisis estático lineal. 2. ed. Barcelona: Barcelona, España : Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, 1995. v. 1

PAULON; VLADIMIR; ANTÔNIO. A micro estrutura do concreto convencional, Concreto: Ensino, Pesquisa e Realizações. IBRACON, p. 582–604, 2005.

PETTYT, Maurice. Introduction to Finite Element Vibration Analysis. [S.l.: S.n.].

RAMOS, Éverton Souza; CARLOS, São. Modelagem numérica da propagação da corrosão por cloretos em estruturas de concreto armado. [S.l.: S.n.].

REGO, L. R. M.; MORAIS, V. R. Aços para Concreto Armado. 1. ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), 2005. v. 1

RIBEIRO, D.; CUNHA, M.; HELENE, P. Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise. Elsevier Brasil, p. 1–275, 2015.

ROBERGE, Pierre R. *et al.* Corrosion Engineering : Principles and Practice. 2008.

SANTOS, Lourdimine. AVALIAÇÃO DA RESISTIVIDADE ELÉTRICA DO CONCRETO COMO PARÂMETRO PARA A PREVISÃO DA INICIAÇÃO DA CORROSÃO INDUZIDA POR CLORETOS. [S.l.: S.n.].

SÉRGIO BASTOS, Paulo. FUNDAMENTOS DO CONCRETO ARMADO. Bauro/SP: [S.n.].

SOUZA. 2006 - Analise dimensionamento e verificacao - Rafael Alves de Sousa. v. 22, 2006.

YANAKA, Makoto; HOOMAN GHASEMI, Seyed; NOWAK, Andrzej S. Reliability-based and life-cycle cost-oriented design recommendations for prestressed concrete bridge girders. Structural Concrete, v. 17, n. 5, p. 836–847, 1 dez. 2016.