



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)  
FACULDADE DE ENGENHARIA (FENG)  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

MURILO CARNEIRO RODRIGUES

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DEPENDENTE DO TEMPO DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO AFETADAS PELA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO**

CATALÃO (GO)  
2025



## UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO

### FACULDADE DE ENGENHARIA

Av. Dr. Lamartine Pinto de Avelar, número 1120, - Bairro Setor Universitário, Catalão/GO, CEP 75704-020  
Telefone: - - <https://www.ufcat.edu.br>

#### TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA)

#### **TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DE TESES E DISSERTAÇÕES DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE CATALÃO (UFCAT)**

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Catalão (UFCAT) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFCAT), sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a Lei 9.610/98, o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFCAT é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o(a) autor(a) e o(a) orientador(a) Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

#### 1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação ou Tese? **Dissertação**

2. Nome completo do autor: MURILO CARNEIRO RODRIGUES

Nome completo do orientador: WANDERLEI MALAQUIAS PEREIRA JUNIOR

#### 3. Título do trabalho

Título: **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DEPENDENTE DO TEMPO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO AFETADAS PELA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO**

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento: [ X ] SIM [ ] NÃO<sup>1</sup>

[<sup>1</sup>] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);

b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.

**O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.**

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

**Obs.: Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor**



Documento assinado eletronicamente por **WANDERLEI MALAQUIAS PEREIRA JUNIOR, Orientador(a)**, em 19/11/2024, às 08:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **MURILO CARNEIRO RODRIGUES, Usuário Externo**, em 28/11/2024, às 14:00, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0135936** e o código CRC **B3017F95**.

MURILO CARNEIRO RODRIGUES

**ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DEPENDENTE DO TEMPO DE VIGAS DE  
CONCRETO ARMADO AFETADAS PELA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, da Faculdade de Engenharia, da Universidade Federal de Catalão (UFCAT), como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Estruturas e Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira Júnior.

Coorientador: Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo.

Coorientador: Prof. Dr. André Teófilo Beck.

CATALÃO (GO)  
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFCAT.

Rodrigues, Murilo Carneiro

Análise da confiabilidade dependente do tempo de vigas de concreto armado afetadas pela corrosão por carbonatação / Murilo Carneiro Rodrigues. - 2025.

69 f.: il.

Orientador: Prof. Dr. Wanderlei Malaquias Pereira Júnior; co-orientador Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo; co-orientador Prof. Dr. Daniel de Lima Araújo.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Catalão, Faculdade de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Catalão, 2025.

Bibliografia.

Inclui siglas, abreviaturas, símbolos, gráfico, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Confiabilidade estrutural. 2. Método de Monte Carlo (MMC). 3. Confiabilidade dependente do tempo. 4. Corrosão por carbonatação. I. Pereira Júnior, Wanderlei Malaquias, orient. II. Título.

CDU 624.01

## ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Ata nº 22 da sessão de Defesa de Dissertação de **MURILO CARNEIRO RODRIGUES**, que confere o título de Mestre em Engenharia Civil, na área de concentração em Estruturas e Construção Civil.

Aos oito dias do mês de outubro de dois mil e vinte e quatro a partir das 14 horas, na ala virtual do *Google Meet*, realizou-se a sessão pública de Defesa de Dissertação intitulada “**CONFIABILIDADE DEPENDENTE DO TEMPO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO AFETADAS PELA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO**”. Os trabalhos foram instalados pelo Orientador, **Professor Doutor WANDERLEI MALAQUIAS PEREIRA JUNIOR (PPGEC/UFSC)** com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: **Professor Doutor WELLINGTON ANDRADE DA SILVA (PPGEC/UFSC)**, membro titular interno; e do **Professor Doutor RAFAEL HOLDORF LOPEZ (UFSC)**, membro titular externo. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Dissertação, tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pelo Professor Doutor Wanderlei Malaquias Pereira Junior, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos oito dias do mês de outubro de dois mil e vinte e quatro.

### TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA

### **ANÁLISE DA CONFIABILIDADE DEPENDENTE DO TEMPO DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO AFETADAS PELA CORROSÃO POR CARBONATAÇÃO**



Documento assinado eletronicamente por **WELLINGTON ANDRADE DA SILVA, Professor(a) do Magistério Superior**, em 27/03/2025, às 09:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **WANDERLEI MALAQUIAS PEREIRA JUNIOR, Orientador(a)**, em 27/03/2025, às 12:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rafael Holdorf Lopez, Usuário Externo**, em 27/03/2025, às 12:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://sei.ufcat.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0179251** e o código CRC **1D273A6D**.

À minha família, pelo apoio incondicional,  
e à minha fé, que me guiou e fortaleceu em  
cada etapa desta jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço a Deus e à Nossa Senhora do Rosário, que são minhas fontes de fé durante toda minha caminhada. A toda minha família, que sempre foi suporte incondicional em minha vida. Aos amigos, pelo apoio e compreensão. A estes e a todos os outros que, direta ou indiretamente fizeram parte desta minha trajetória, meu muito obrigado!

Agradeço também a todos os professores que contribuíram para minha formação. Vocês foram peças fundamentais na conclusão de mais esta etapa da minha vida. Em especial, agradeço ao Professor Wanderlei Malaquias, pela orientação e ensinamentos, e aos professores Daniel Araújo e André Beck, pelo suporte sempre que requisitados.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

## RESUMO

Neste trabalho, é apresentada uma abordagem para avaliar o índice de confiabilidade ao longo do tempo de uma viga de concreto armado submetida a condições climáticas que promovem o processo de corrosão das armaduras devido à carbonatação. O método de avaliação proposto combina um modelo matemático capaz de prever o avanço da frente de carbonatação na peça em função do seu tempo de exposição a vários fatores climáticos, juntamente com modelos analíticos para determinar a capacidade de carga de vigas corroídas e técnicas de simulação de Monte Carlo (MCS). Os eventos aleatórios gerados por meio da MCS permitiram a criação de diversos cenários relacionados às características do elemento estrutural, como taxas de carregamento (permanente e variável) e resistência, bem como condições ambientais relacionadas à localização da estrutura. A geração de amostras de variáveis relacionadas ao ambiente (temperatura e umidade) foi viabilizada por meio da análise estatística dos parâmetros climáticos registrados por estações meteorológicas da região, possibilitando a definição do tipo de distribuição dos dados, média e desvio. O efeito da espessura do revestimento da viga na variação do índice de confiabilidade da viga ao longo do tempo foi avaliado. Os resultados indicam que vigas com taxas de armadura entre 0,15 e 0,50% tendem a manter o valor do índice de confiabilidade acima dos valores normativos mínimos exigidos por 50 anos. Além disso, por meio da análise da frente de carbonatação, observou-se que o avanço do processo de corrosão devido à carbonatação é mais agressivo nos primeiros 30 anos de vida útil da estrutura.

**Palavras-chave:** confiabilidade estrutural, método de Monte Carlo (MMC), confiabilidade dependente do tempo, corrosão por carbonatação

## ABSTRACT

In this work, an approach is presented to evaluate the reliability index over time for a reinforced concrete beam subjected to climatic conditions that promote the corrosion process of reinforcement due to carbonation. The proposed evaluation method combines a mathematical model capable of predicting the advance of the carbonation front in the piece as a function of its exposure time to various climatic factors, along with analytical models for determining the load-bearing capacity of corroded beams and Monte Carlo simulation (MCS) techniques. The random events generated using MCS allowed for the creation of various scenarios related to the structural element's characteristics, such as loading rates (permanent and variable) and strength, as well as environmental conditions related to the structure's location. The generation of samples of variables related to the environment (temperature and humidity) was made possible through statistical analysis of the climatic parameters recorded by meteorological stations in the region, enabling the definition of the data distribution type, mean, and deviation. The effect of the beam cover thickness on the variation of the reliability index of the beam over time was evaluated. The results indicate that beams with reinforcement ratios between 0.15 and 0.50% tend to maintain the reliability index value above the minimum normative values required for 50 years. Furthermore, through the analysis of the carbonation front, it was observed that the advancement of the corrosion process due to carbonation is more aggressive in the first 30 years of the structure's lifespan.

**Keywords:** structural reliability, Monte Carlo method, time-dependent reliability, corrosion due to carbonation.

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Figura 1:</b> Diagrama esquemático de curvas de durabilidade de estruturas durante a vida útil de serviço. ....     | 1  |
| <b>Figura 2:</b> Evolução das publicações acerca da temática.....  | 6  |
| <b>Figura 3:</b> Quantidade de publicações dos últimos dez anos por país. ....   | 6  |
| <b>Figura 4:</b> Número de publicações por fonte. ....   | 7  |
| <b>Figura 5:</b> Número de publicações por autor. ....   | 7  |
| <b>Figura 6:</b> Exemplo de falha de primeira barreira .....   | 18 |
| <b>Figura 7:</b> Representação do avanço da profundidade de carbonatação em peça de concreto armado. ....              | 21 |
| <b>Figura 8:</b> Evolução no tempo da degradação devido a carbonatação.....  | 22 |
| <b>Figura 9:</b> Equilíbrio de forças em uma seção transversal retangular.....   | 27 |
| <b>Figura 10:</b> Configuração do pite.....  | 33 |
| <b>Figura 11:</b> Cenários de evolução da concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera .....                           | 36 |
| <b>Figura 12:</b> Conjunto de dados de temperatura e umidade relativa, respectivamente. ....                           | 37 |
| <b>Figura 13:</b> Distribuições cumulativas de temperatura e umidade relativa .....                                    | 39 |
| <b>Figura 14:</b> Histograma (a) Temperatura e (b) Umidade relativa.....   | 39 |
| <b>Figura 15:</b> Gráfico de convergência da probabilidade de falha .....  | 42 |
| <b>Figura 16:</b> Histograma com início do processo corrosivo (a) e evolução da profundidade de carbonatação (b) ..... | 44 |
| <b>Figura 17:</b> Evolução de $\beta$ ao longo do tempo para as seções analisadas. ....                                | 46 |
| <b>Figura 18:</b> Evolução da frente de carbonatação na seção transversal da viga.....                                 | 47 |
| <b>Figura 19:</b> Frequência dos valores de beta para os cobrimentos analisados em diferentes períodos .....           | 48 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| <b>Tabela 1:</b> Coeficientes do modelo de acordo com cimento e condições ambientais. ...                        | 26 |
| <b>Tabela 2:</b> Resultados apresentados referentes à avaliação da resistência de vigas em concreto armado. .... | 31 |
| <b>Tabela 3:</b> Taxas de corrosão <i>icor</i> – 20 para carbonatação em diferentes exposições..                 | 34 |
| <b>Tabela 4:</b> Seções de concreto analisadas .....   | 35 |
| <b>Tabela 5:</b> Estatísticas do teste de aderência.....   | 38 |
| <b>Tabela 6:</b> Parâmetros das variáveis aleatórias .....   | 40 |

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACI – American Concrete Institute

CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CEB – Comité Européen du Béton

COV – Coeficiente de variação

CPU – Central Processing Unit

Eurocode – European Committee for Standardizations

JCSS – Joint Committee on Structural Safety

JSON – JavaScript Object Notation

MMC – Método de Monte Carlo

MCS – Método de Monte Carlo Simples

NBR – Norma Brasileira Regulamentadora

PDF – Função de densidade de probabilidade

RCP – Relative Concentration Pathway

WoS – Web of Science

## LISTA DE SÍMBOLOS

- $\alpha$  – Fator de relevância do ano
- $A_{s0}$  – Área de aço original
- $A_{s,corr}$  – Área de aço corroída
- $A_r(T)$  – Área residual devido ao dano por pite
- $\beta$  – Índice de confiabilidade
- $b_w$  – Largura da viga
- $C_i$  – Número de citações do artigo
- $C_f$  – Fator de correção
- $cob$  – Cobrimento do concreto
- $d$  – Altura útil da seção
- $D_b$  – Diâmetro original da armadura
- $d_{corr}$  – Diâmetro corroído da armadura
- $D_\mu$  – Índice de redução da confiabilidade
- $f_{bd}$  – Resistência de adesão de projeto
- $f_{ck}$  – Resistência característica do concreto
- $f_c$  – Resistência do concreto
- $f_y$  – Resistência do aço
- $f_{yd}$  – Resistência de cálculo do aço
- $f_{yk}$  – Resistência característica do aço
- $f_{y,corr}$  – Resistência do aço com corrosão
- $f_x(x)$  – Função de probabilidade
- $G(x)$  – Função de estão limite
- $I[X]$  – Função indicadora
- $i_{corr}$  – Taxa de corrosão
- $i_{cor-20}$  – Taxa de corrosão para uma temperatura de 20°C
- $IF$  – Fator de impacto da revista
- $k$  – Número de iterações do método de Newton-Raphson
- $K$  – Coeficiente para o cálculo da taxa de corrosão
- $l_d$  – Comprimento de desenvolvimento da armadura
- $M_R$  – Momento resistente

$M_{res}$  – Momento resistente com o efeito da perda de adesão  
 $M_{res,corr}$  – Momento resistente devido a perda de seção transversal  
 $M_{Sd}$  – Momento solicitante de cálculo  
 $N$  – Número total de amostras  
 $p_f$  – Probabilidade de falha  
 $p(T)$  – Profundidade de dano por pite no tempo  
 $Q_{corr}$  – Perda média de seção transversal  
 $R$  – Função de estado limite para resistência  
 $S$  – Função de sollicitação  
 $T$  – Tempo de despassivação  
 $T_{req}$  – Tensão de aderência requerida  
 $\mu$  – Média  
UR – Umidade relativa  
 $w/c$  – Fator água / cimento  
 $X_p$  – Nível de corrosão  
 $x$  – Profundidade da linha neutra  
 $Y$  – Ano de publicação do artigo  
 $Y_{map}$  – Ano de realização da pesquisa  
 $\sigma$  – Desvio padrão  
 $\gamma_c$  – Coeficiente de minoração da resistência do concreto  
 $\gamma_s$  – Coeficiente de minoração da resistência do aço  
 $\lambda$  – Fator relativo à resistência do concreto

# SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1- APRESENTAÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| 1.1. Introdução e Justificativa .....                                | 1         |
| 1.2. Estado da Arte.....   | 4         |
| 1.3. Objetivos.....  | 9         |
| 1.3.1. Objetivo geral .....  | 9         |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                                   | 9         |
| 1.4. Estrutura do texto.....   | 10        |
| <b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                                | <b>10</b> |
| 2.1. Confiabilidade Estrutural.....                                  | 10        |
| 2.2. Método de Monte Carlo.....                                      | 14        |
| 2.3. Corrosão da armadura e seus efeitos no momento resistente ..... | 20        |
| <b>3- METODOLOGIA.....</b>   | <b>35</b> |
| 3.1. Dados de temperatura e umidade relativa .....                   | 37        |
| 3.2. Variáveis aleatórias e simulação de Monte Carlo.....            | 39        |
| 3.3. Ferramenta de análise de confiabilidade no tempo .....          | 42        |
| <b>4- RESULTADOS .....</b>   | <b>44</b> |
| 4.1. Abordagem de confiabilidade no tempo .....                      | 45        |
| <b>5- CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>                                  | <b>50</b> |
| <b>6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>                           | <b>51</b> |

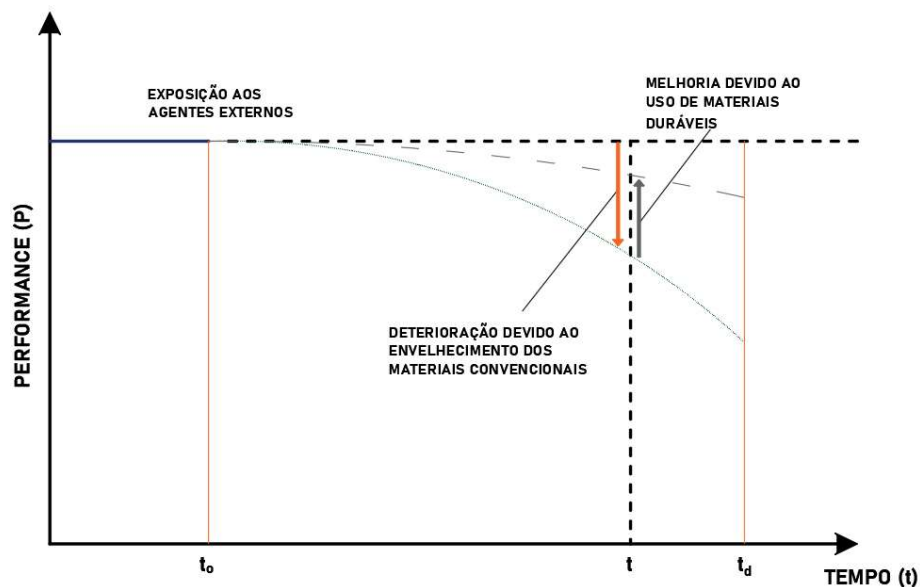
## 1- APRESENTAÇÃO

### 1.1. Introdução e Justificativa

A concepção de uma estrutura busca como premissa básica atender as necessidades estabelecidas em projeto de forma que a mesma seja segura, durável, ambientalmente legal e economicamente viável.

Dentro desta perspectiva de segurança e durabilidade, conhecer a influência que os agentes externos têm sobre uma estrutura é uma importante etapa para a tomada de decisões em relação a manutenção ou reparo de uma estrutura. A Figura 1 apresenta um desenho esquemático da performance de uma estrutura de concreto armado em relação ao seu tempo de vida útil.

**Figura 1:** Diagrama esquemático de curvas de durabilidade de estruturas durante a vida útil de serviço.



FONTE: Adaptado de (Hao *et al.*, 2023)

Das diversas consequências das ações destes agentes externos que colaboram para tal fato, (Chung *et al.*, 2004) define a corrosão das armaduras como principal fator para deterioração de estruturas de concreto, podendo acarretar sérios danos as mesmas. (Castel, François e Arliguie, 2000a) aborda que a corrosão, além de reduzir a seção transversal das barras de aço, provocando a perda da capacidade resistente do elemento, gera produtos que exercem esforços de tração dentro do concreto, cujos quais induzem

fissuras no material ao longo das armaduras e ocasionam a exposição das mesmas. Ademais, a formação desses produtos da corrosão também diminui a tensão responsável por garantir a transferência de esforços entre o aço e concreto, denominada tensão de aderência, ocasionando perda de resistência (Vu et al. 2016).

Sobre o olhar da durabilidade, a comunidade técnico-científica tem constantemente buscado métodos para aumentar a vida útil do ambiente construído como também investido em tecnologias para a manutenção deste ambiente. Monitoramento das estruturas (Kumar Sah *et al.*, 2022); (Wang, Mukherjee e Castel, 2023), manutenção preditiva de peças estruturais (Cortés *et al.*, 2019); (Benítez *et al.*, 2020), e novos tipos de concreto (Solahuddin e Yahaya, 2023); (Zhang *et al.*, 2023) são exemplos de inovação no setor no que diz respeito a durabilidade.

Em termos de manutenção preditiva e preventiva, as ferramentas numéricas podem desempenhar um papel fundamental neste campo de pesquisa, visto que o ambiente de simulação computacional é um importante aliado na etapa de experimentação de modelos mecânicos que representam respostas macroscópicas de estruturas.

Na maioria dos casos, a simulação é feita de forma determinística e considerando apenas a redução da seção transversal a partir de uma determinada taxa de corrosão. Entende-se então que as análises determinísticas não refletem de maneira completa a realidade relacionada à variabilidade dos valores que estas podem assumir em termos de resistência e desempenho. Em uma estrutura de concreto armado, fatores como variações na qualidade dos materiais, imprecisões na construção, ação de agentes externos, fatores ambientais e os valores de carregamento as quais a mesma estará submetida durante seu período de serviço, por exemplo, podem levar a uma ampla gama de possíveis cenários de falha. Desta forma, tanto na avaliação dos parâmetros necessários na concepção do projeto quanto na avaliação daqueles oriundos do monitoramento do comportamento de estruturas existentes, as variáveis envolvidas possuem valores que trazem consigo incertezas que afetam o objeto final desejado.

A maneira com que as incertezas do processo são incorporadas em cada uma das etapas de construção de uma estrutura, varia conforme três métodos distintos: o método determinístico, os semi-probabilísticos e os probabilísticos. No método determinístico, também chamado de método das tensões admissíveis, as incertezas inerentes as variáveis de resistência e carregamento, por exemplo, não são tratadas. Este tipo de análise é considerada obsoleta, por conduzir o dimensionamento das peças limitado pela tensão de

escoamento do material. (Val, Stewart e Melchers, 1998) definem que abordagens determinísticas não são eficientes para decisões que devem ser tomadas sobre incertezas. O método semi-probabilístico consiste na adoção de coeficientes de majoração dos carregamentos e minoração da resistência, onde estes podem variar conforme o estado limite em análise. Este, por sua vez, é o método empregado nas normas brasileiras para projeto de estruturas, onde as incertezas são tratadas de maneira indireta. No entanto, já é amplamente aceito pela comunidade científica que a maneira mais prudente de se avaliar a segurança de uma estrutura é por meio de uma abordagem probabilística.

Neste contexto, a confiabilidade estrutural é o parâmetro probabilístico utilizado para mensurar a capacidade de uma estrutura em resistir as cargas as quais está submetida em serviço sem falhar, dada a natureza aleatória dos parâmetros que definem o sistema estrutural e principalmente sua variabilidade, respeitadas as condições de operação e projeto. O conceito de confiabilidade estrutural está diretamente relacionado ao conceito de probabilidade de falha. A mesma pode ser classificada como uma medida quantitativa da confiabilidade estrutural, que representa a probabilidade de que a estrutura atinja um limite de desempenho inaceitável durante sua vida útil. A avaliação da probabilidade de falha geralmente é realizada por meio de métodos estatísticos, como a análise de Monte Carlo, que permitem a simulação de uma grande quantidade de cenários possíveis para as variáveis de entrada do problema. Entende-se, então, que a análise probabilística em estruturas de concreto armado acometidas de processos corrosivos é fundamental, devido à forma em que a mesma afeta a capacidade resistente da peça e devido as variações nas condições de exposição e nos materiais envolvidos.

Segundo (Hao *et al.*, 2023), o estudo de durabilidade em estruturas de concreto armado tem sido observado de perto pelos autores envolvidos neste campo do conhecimento. Destaca-se aqui que o envelhecimento das estruturas tem sido um assunto de interesse global, visto que muitas vezes esse desgaste operacional pode acarretar custos excessivos de manutenção e até mesmo finalizar a operação de um sistema estrutural quando uma manutenção não é realizada ou feita de maneira incorreta.

Exclusivamente em países subdesenvolvidos e emergentes, a etapa de manutenção corretiva é realizada na maioria dos casos de forma emergencial. Logo, a aplicação de técnicas numéricas que possam antever os problemas estruturais que ampliam o risco de colapso de uma estrutura são aliados importantes para a área de manutenção e conservação de sistemas estruturais.

Em relação a temática da pesquisa desenvolvida neste trabalho, pretende-se aplicar um modelo probabilístico de análise do comportamento estrutural de vigas de concreto armado sujeitas a corrosão. Na maioria das vezes, o modelo mecânico é analisado na perspectiva da modelagem determinística, sendo assim, até certo ponto, inviável a análise quando considerados cenários com determinada probabilidade de ocorrência.

A relevância deste trabalho se dá pelo fato de que a determinação do grau de confiança de uma estrutura acometida de processos corrosivos através de métodos probabilísticos é fundamental para se avaliar de maneira adequada o potencial de dano causado por uma manifestação patológica, podendo então orientar de maneira otimizada as decisões acerca da necessidade de intervenções no sistema estrutural.

Além disso, pretende-se que essa investigação numérica possa, em um futuro, contribuir para construção de um conceito normativo que envolva a confiabilidade e a tomada de decisão em relação ao reparo estrutural.

## 1.2. Estado da Arte

Para compreender quais as vertentes das publicações relacionadas ao tema proposto, foi realizado um mapeamento sistêmico dos trabalhos científicos disponíveis e relevantes sobre essa temática. Neste trabalho, o método de seleção de trabalhos utilizado foi o método *InOrdinatio*. Inicialmente proposto por (Pagani, Kovaleski e Resende, 2015), tal método visa classificar as publicações de acordo com sua relevância na comunidade científica. A Equação 1 representa o índice de ordenamento *InOrdinatio* dos trabalhos, que leva em consideração o fator de impacto da revista ( $IF$ ), o ano da publicação ( $Y$ ) no veículo de divulgação científica, o ano em que o levantamento de dados foi realizado ( $Y_{map}$ ) e  $\sum C_i$  que é o número de vezes que o artigo foi citado. O índice  $\alpha$  é um ponderador que varia entre 1 e 10 e é atribuído pelo pesquisador de acordo com a relevância que o ano da publicação terá na seleção de trabalhos. Valores mais próximos de 1 significam menor relevância atribuída pelo pesquisador ao critério ano. Caso os valores se aproximem de 10, maior é a relevância do ano para a seleção de trabalhos. Neste trabalho o valor adotado de  $\alpha$  foi igual a 1.

$$InOrdinatio = \left(\frac{IF}{100}\right) + \alpha \cdot [10 - (Y_{map} - Y)] + \sum C_i \quad 1$$

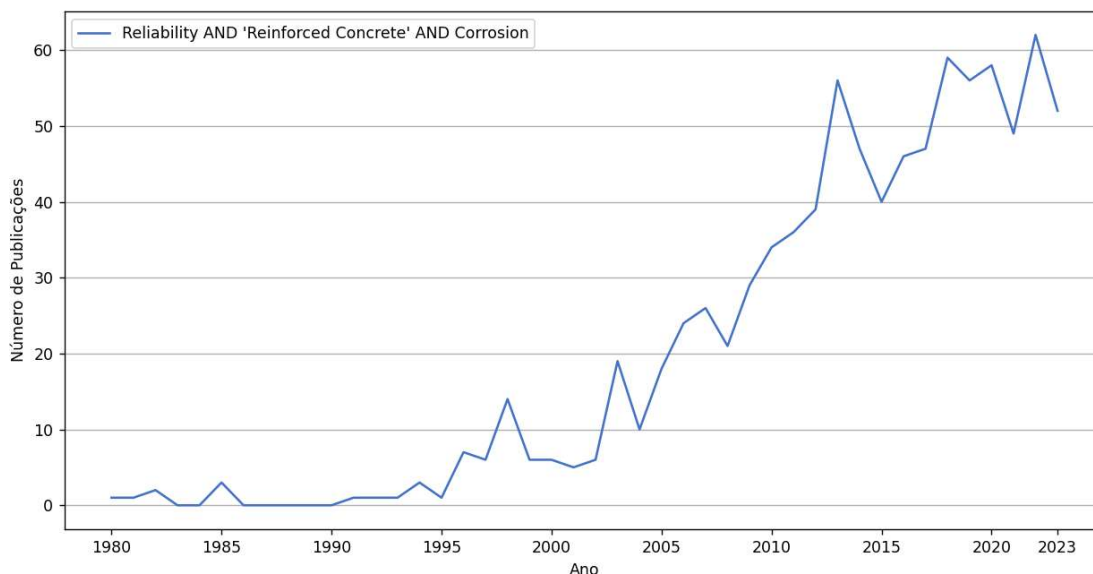
Após a determinação das variáveis dispostas na Equação 1, o *InOrdinatio* de cada publicação é definido, onde valores maiores significam maior relevância do trabalho nessa metodologia. Classificados os trabalhos, faz-se necessário ao pesquisador definir quais deverão ser lidos. (Pagani, Kovaleski e Resende, 2015) recomenda que a forma de seleção dos artigos a serem lidos após a classificação seja uma decisão do pesquisador. Neste trabalho, os trabalhos lidos foram aqueles que apresentaram o *InOrdinatio* acima da mediana dos valores de todos os trabalhos encontrados.

Para a aplicação do método, foram aplicados os seguintes filtros: trabalhos do tipo “artigo”, que possuem registro de ano de publicação, que possuem *link* DOI e ISSN e que não sejam repetidos entre as bases de dados utilizadas.

As buscas foram realizadas nas bases *Scopus* e *Web of Science* por meio do repositório CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoa de Nível Superior). Ademais, utilizou-se o *software* VOSViewer para auxílio no estabelecimento do protocolo de busca inicial.

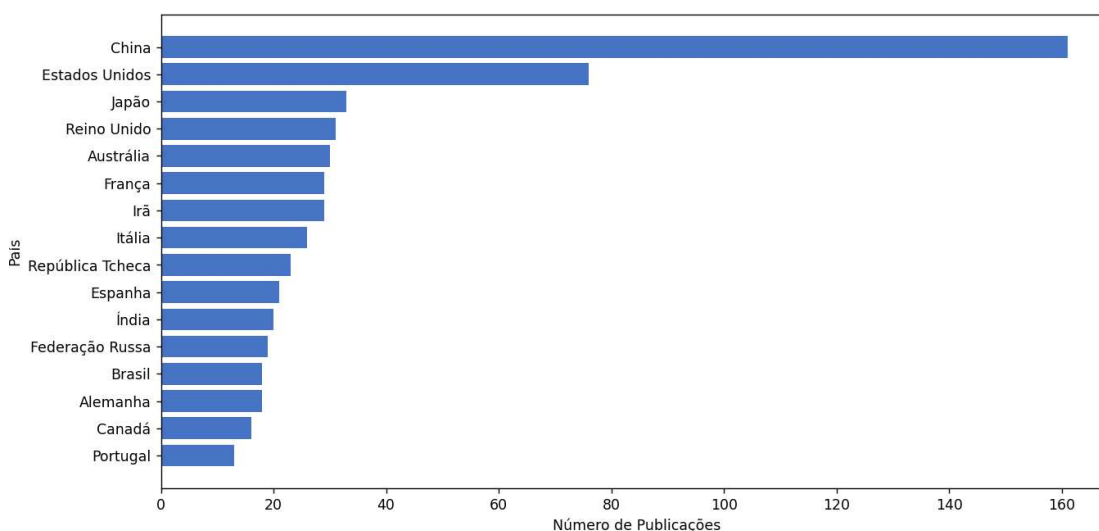
Neste tópico serão abordadas as análises qualitativas e quantitativas das referências encontradas, juntamente com a discussão daquelas mais relevantes acerca do assunto abordado.

No estágio inicial da pesquisa, as seguintes palavras-chave foram utilizadas (todas via operador lógico “AND”) para a verificação de um panorama inicial: (a) “*reinforced concrete*”; (b) “*reliability*” e (c) “*corrosion*”. Nesta primeira etapa foram obtidos 897 resultados. Para fins de entender o panorama geral e realizar a análise da evolução temporal de todas as publicações a respeito do estudo de confiabilidade em estruturas de concreto armado, nenhum filtro foi aplicado. Na Figura 2 é mostrado a quantidade de publicações de acordo com o ano.

**Figura 2:** Evolução das publicações acerca da temática.

FONTE: Autoria própria.

Através da análise da Figura 2 é possível identificar que apesar de haver trabalhos datados do início dos anos 80, o número de publicações teve uma ascensão maior a partir dos anos 2000, tendo tendência de aumento até os dias atuais. Ainda tratando da análise quantitativa, é possível também destacar os países que detêm o maior volume de publicações da última década, conforme apresentado na Figura 3. Neste caso, China e Estados Unidos lideram o *ranking*.

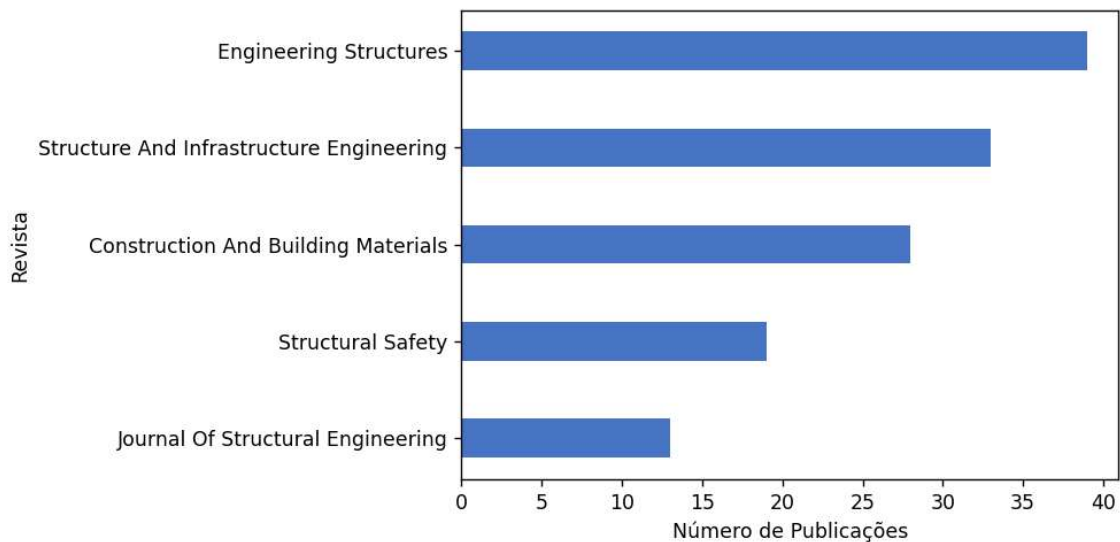
**Figura 3:** Quantidade de publicações dos últimos dez anos por país.

FONTE: Autoria própria.

De forma semelhante, a análise também pode ser feita para as principais revistas e principais autores. Nesta etapa, aplicou-se os seguintes filtros: artigos, revisados por

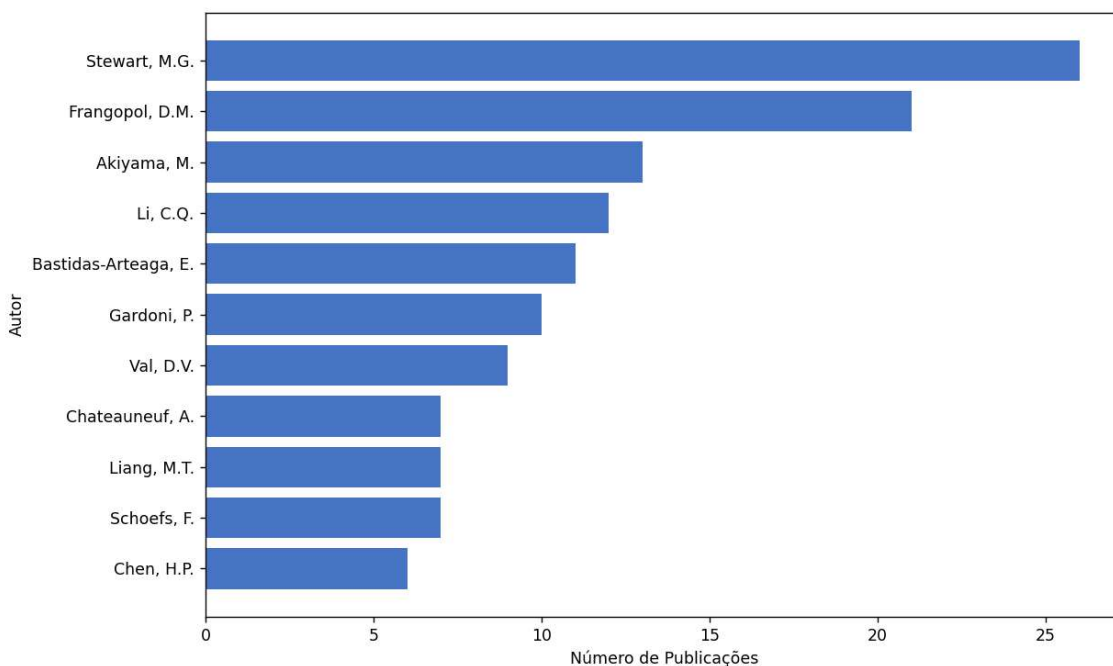
pares e língua inglesa. Nesta etapa, a quantidade de documentos resultantes da busca foi de 443. Os resultados são apresentados na Figura 4 e Figura 5, respectivamente.

**Figura 4:** Número de publicações por fonte.



FONTE: Autoria própria.

**Figura 5:** Número de publicações por autor.



FONTE: Autoria própria.

Definido o protocolo de busca inicial e após a aplicação dos filtros, foi possível identificar, através do *software* VosViewer, a correlação entre as palavras-chave

utilizadas dos artigos selecionados com outras palavras-chave que se repetem nos artigos de interesse, a fim de se definir o protocolo de busca final.

Uma análise realizada nos resultados apresentados permite definir novas palavras-chaves que se adequam à temática em estudo, excluindo aquelas redundantes as já utilizadas. O novo protocolo de busca adotado foi composto pela seguinte *string* de busca: *reliability* AND “*reinforced concrete*” AND *corrosion* AND *beam* AND “*Monte Carlo Methods*”. A busca utilizando o novo protocolo adotado, mas específico do assunto abordado neste trabalho, retornou 26 documentos, aplicando os mesmos filtros utilizados anteriormente. No entanto, após a aplicação dos filtros utilizados para o método de sistematização de busca, restaram 19 documentos.

Dentre os trabalhos encontrados, nota-se que o estudo de confiabilidade estrutural em estruturas de concreto armado está em constante evolução. Um dos principais motivos que permitiu um acentuado crescimento nas publicações relacionadas a estudos probabilísticos foi o desenvolvimento e, principalmente, a popularização de ferramentas computacionais, possibilitando com que simulações com uma gama variada de amostras fossem realizadas em curtos períodos de tempo.

Outro aspecto relevante a respeito destes trabalhos é que os estudos acerca da redução da capacidade resistiva de vigas de concreto armado devido a perda de adesão entre o aço e o concreto ainda não são tão difundidos, principalmente no que diz respeito a análises probabilísticas. Observa-se que estudos relativos ao momento resistivo residual considerando somente a perda da seção transversal das armaduras corroídas só terão resultados fidedignos até determinada porcentagem de corrosão, onde, a partir dela, outros efeitos serão preponderantes, exigindo uma análise mais detalhada. No entanto, (Val e Melchers, 1997) definem que para estágios iniciais de corrosão localizada, a perda de aderência não causa mudanças significativas na perda de resistência da estrutura.

Grande parte dos trabalhos de confiabilidade estão direcionados ao estudo de peças de concreto armado sujeitas a corrosão por ação de íons cloreto. Uma das justificativas passível de ser deduzida é o fato de que corrosão por difusão de íons cloreto geralmente ocorre em ambientes agressivos (alta concentração do agente agressor), de forma localizada e conseqüentemente possui maior taxa de difusão, conforme será abordado nas próximas seções deste trabalho. Maiores valores nas taxas de corrosão representam uma perda de seção transversal mais rápida e, por conseqüência, uma queda acentuada na perda de capacidade resistiva da peça. Em processos corrosivos por carbonatação, as taxas de corrosão são geralmente bastante inferiores àquelas relativas a

ação de íons cloreto, fazendo com que o processo de deterioração ocorra de forma mais lenta. No entanto, mesmo apresentando uma perda de seção transversal mais lenta, estruturas sujeitas à corrosão generalizada podem apresentar um decaimento do índice de confiabilidade mais rápido, justamente devido à influência da perda de aderência entre os materiais.

### 1.3. Objetivos

#### 1.3.1. Objetivo geral

Avaliar o índice de confiabilidade ao longo do tempo de uma viga de concreto armado submetida com diferentes taxas de armadura a condições climáticas que promovem a corrosão das armaduras por carbonatação, utilizando um modelo matemático para prever o avanço da frente de carbonatação e técnicas de simulação de Monte Carlo (MCS).

#### 1.3.2. Objetivos específicos

- a) Investigar qual o panorama atual das pesquisas em relação ao contexto da confiabilidade de estruturas de concreto armado sujeitas a corrosão da armadura;
- b) Avaliação dos modelos de cálculo para processos corrosivos em armaduras de peças de concreto armado e sua influência no momento resistente da peça;
- c) Utilização de simulações de Monte Carlo (MCS) para gerar cenários probabilísticos com base nas variáveis estruturais e ambientais, como taxas de carregamento (permanente e variável), resistência e dados climáticos (temperatura e umidade);
- d) Avaliar o impacto da corrosão por carbonatação através da análise da variação do índice de confiabilidade de uma viga de concreto armado sob flexão simples ao longo do tempo.

#### 1.4. Estrutura do texto

O presente trabalho está dividido em seis partes principais. A primeira parte aborda a apresentação do tema, englobando a introdução e justificativa da pesquisa, o estado da arte, os objetivos gerais e específicos, além de uma visão geral do conteúdo do trabalho.

Na segunda parte, referente à revisão bibliográfica, são discutidos os conceitos de confiabilidade estrutural, a abordagem probabilística para análise estrutural, o método de Monte Carlo e a corrosão das armaduras, com foco nos seus efeitos sobre o momento resistente.

A terceira parte trata da metodologia e análise dos resultados, onde são apresentados os métodos de coleta dos dados referentes à temperatura e umidade relativa utilizados, além da definição das variáveis aleatórias utilizadas na simulação de Monte Carlo, com suas respectivas distribuições probabilísticas.

Na quarta parte são apresentados os resultados obtidos a partir das análises realizadas, seguida pela conclusão, que sintetiza as principais descobertas do trabalho, juntamente com a sugestão para trabalhos futuros.

## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta os conceitos técnicos fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho, fornecendo embasamento teórico necessário para compreender os métodos e abordagens utilizados. Nele, são discutidos temas essenciais como a confiabilidade estrutural, incertezas associadas a projetos de engenharia, o uso de variáveis aleatórias na avaliação de risco, além de apresentar métodos probabilísticos como o Método de Monte Carlo para a análise de estruturas, abordando a determinação da probabilidade de falha e o índice de confiabilidade.

### 2.1. Confiabilidade Estrutural

No contexto de segurança estrutural, as fontes de incerteza são um dos principais fatores a serem entendidos, estudados e quantificados, dentro de determinadas limitações impostas pela natureza de cada uma. De maneira simplificada, as incertezas podem ser classificadas, de acordo com (Beck, 2019a), em incertezas aleatórias ou intrínsecas, epistêmicas e erro humano. Segundo o autor, as incertezas epistêmicas podem ser reduzidas, e em teoria, eliminadas, caso se conheça as informações necessárias do problema em estudo. Como exemplo, pode-se citar incertezas relativas à modelagem da

estrutura e possíveis aproximações teóricas utilizadas para simplificação da aplicação de cargas e definição de propriedades de materiais. Já as incertezas aleatórias ou intrínsecas são aquelas que fazem parte do processo envolvido, podendo ser reduzidas, porém não eliminadas como por exemplo a natureza aleatória de propriedades dos materiais e efeitos climáticos.

As incertezas e as variáveis aleatórias estão intimamente relacionadas no campo da probabilidade e estatística. Uma variável aleatória é uma variável que pode assumir diferentes valores com diferentes probabilidades em um experimento aleatório. Essas probabilidades representam a incerteza associada aos possíveis resultados desse experimento. Em suma, variáveis aleatórias são ferramentas empregadas para representar e avaliar incertezas em uma ampla variedade de situações. Elas podem ser classificadas como discretas ou contínuas, dependendo da natureza dos valores que podem assumir. Quando se manipula variáveis aleatórias, se está, em essência, abordando a incerteza associada a eventos que têm um componente aleatório. Entretanto, para que seja possível entender o comportamento dessas variáveis e como elas refletem a incerteza, é essencial considerar a distribuição de probabilidade associada a cada uma delas. A ciência relacionada ao estudo dessas variáveis aleatórias no contexto de estrutura é denominada confiabilidade estrutural.

O termo confiabilidade pode ser definido como a capacidade de um sistema, dispositivo, máquina ou processo realizar suas funções de maneira consistente e previsível, sem falhas, ao longo de um período específico e sob condições determinadas. Em outras palavras, é a medida da confiança de que algo irá funcionar conforme o esperado, mantendo um desempenho estável ao longo do tempo e em situações específicas.

A popularização da utilização de estruturas em concreto armado juntamente com o progresso do conhecimento da mecânica estrutural possibilitou que ideias predecessoras do conceito atualmente difundido de segurança estrutural surgissem, através de abordagens baseadas, por exemplo, em tentativa e erro. Desta forma, os riscos começaram a ser associados a situações que deveriam ser evitadas. Com as consequências advindas da falta de conhecimento aprofundado, de procedimentos e de requisitos mínimos de segurança padronizados, iniciou-se o processo de normatização para projetos, execução e ensaios em estruturas de concreto armado.

Até a inserção do Método dos Estados Limites como base para o dimensionamento de elementos estruturais, os métodos determinísticos balizaram o desenvolvimento de

diversas normas. (Castro, 1997) aborda que a partir de 1960 surgiu-se a necessidade da aplicação dos cálculos em estados limites e a ideia de que os parâmetros de cálculo poderiam ser racionalmente quantificados através da teoria da probabilidade. (Henriques, 1998) define os estados limites (ou situações a serem evitadas) como um dos pilares dos critérios de verificação de segurança com base probabilística.

No ano de 1971, foi fundado o *Joint Committee on Structural Safety* (JCSS), representando um marco significativo no cenário internacional da engenharia civil e na busca pela segurança estrutural. Este comitê emergiu como uma resposta à necessidade premente de estabelecer padrões harmonizados e diretrizes abrangentes para a avaliação e o projeto de estruturas civis, especialmente aquelas sujeitas a riscos substanciais.

O contexto internacional que antecedeu a criação do JCSS era caracterizado pela diversidade de normas e práticas de projeto adotadas por diferentes países, muitas vezes divergentes e incompatíveis entre si. Tal disparidade impunha desafios significativos à engenharia civil, especialmente em projetos complexos e críticos, como pontes, edifícios de grande altura e infraestruturas essenciais. Nesse cenário, a necessidade de uma entidade central que harmonizasse abordagens e promovesse a segurança estrutural tornou-se evidente. Sua influência abrangeu, de maneira relevante, a criação do *Comité Euro-International du Béton* (CEB) e a subsequente elaboração dos Eurocódigos.

O desenvolvimento e a adoção das normas, como os Eurocódigos, desempenharam um papel crucial na melhoria da segurança das estruturas de concreto armado e na popularização de sua utilização. Ao padronizar os projetos e as práticas de execução, essas normas estabeleceram diretrizes precisas para garantir a confiabilidade e a durabilidade das estruturas. Além disso, ao incorporar critérios detalhados para a determinação e avaliação da segurança, as normas ofereceram uma base sólida para engenheiros e profissionais da construção civil projetarem e manterem estruturas de concreto armado que resistem eficazmente às influências ambientais.

Até então, as diretrizes de projeto para estruturas de concreto armado eram respaldadas de maneira técnica, mas havia um desafio evidente. Com o passar do tempo, muitas estruturas estavam envelhecendo e, junto com isso, surgiam patologias associadas à falta de normatização quando foram originalmente concebidas. A ausência de padrões uniformes e a falta de consideração abrangente da durabilidade deixavam as estruturas vulneráveis a fatores ambientais. Isso destacou a necessidade premente de métodos e normas que não apenas abordassem a segurança estrutural em termos de resistência, mas também considerassem a longevidade e a capacidade das estruturas de concreto armado

em enfrentar os desafios de manutenção a longo prazo. O desenvolvimento dessas normas representou um avanço significativo ao estabelecer diretrizes claras para garantir que as estruturas não apenas fossem seguras no momento da construção, mas também permanecessem assim ao longo de suas vidas úteis, consolidando a aceitação generalizada e o uso eficaz do concreto armado na engenharia civil.

A abordagem probabilística de uma análise estrutura parte-se da premissa de uma equação denominada de “Equação de Estado Limite”. A função de estado limite  $g(\mathbf{X})$  é a representação matemática utilizada para descrever o comportamento da estrutura segundo critérios de segurança e desempenho previamente definidos para determinada condição. De maneira geral, tal função pode ser representada conforme Equação 2.

$$g(\mathbf{X}) = g(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n) \quad 2$$

A interpretação da Equação 2, permite identificar que o domínio de falha ocorre para valores em que  $g(\mathbf{X}) \leq 0$ . Por outro lado, quando  $g(\mathbf{X}) > 0$  a estrutura permanece segura, significando que sua capacidade é superior às demandas que atuam sobre ela. É válido ressaltar, no entanto, que a ocorrência de falha nem sempre está relacionada ao colapso da estrutura. Nestes casos, a ocorrência está relacionada tão somente ao não cumprimento de determinada verificação definida pela função de falha, onde seus valores podem ter sido alcançados ou excedidos. A equação de Estado Limite quando avaliada no contexto de um Estado Limite Último (ELU) pode ser representada pela margem de segurança da estrutura, ou seja, a Equação 3, onde  $R$  representa a resistência da estrutura e  $S$  a variável solicitação.

$$g(\mathbf{R}, \mathbf{S}) = R - S \quad 3$$

Portanto a partir dessa Equação de Estado Limite é possível determinar a probabilidade de falha e sobrevivência do elemento estrutural.

De acordo com (Beck, 2019a), a probabilidade de falha de um elemento ou sistema estrutural é determinada a partir da integração de uma função de densidade de probabilidade  $f_x(\mathbf{X})$  sobre o domínio de falha ( $g(\mathbf{X}) \leq 0$ ), conforme apresentado na Equação 4.

$$p_f = P[g(\mathbf{X}) \leq 0] = \int_{g(\mathbf{X}) \leq 0} f_x(\mathbf{X}) dx \quad 4$$

De posse do resultado na probabilidade de falha ( $p_f$ ), o índice de confiabilidade ( $\beta$ ) pode ser definido a partir da Equação 5:

$$p_f = \Phi(-\beta) = 1 - \Phi(\beta) = 1 - \int_{-\infty}^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad 5$$

$$p_f = 1 - \left( \int_{-\infty}^0 \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx + \int_0^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \right) \quad 6$$

$$p_f = 0,5 - \int_0^{\beta} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} dx \quad 7$$

(Beck, 2019a) define o índice de confiabilidade como uma medida geométrica da probabilidade de falha, sendo este a mínima distância entre a equação de estado limite e a origem do espaço normal padrão.

Portanto o problema de análise de confiabilidade de um elemento estrutural parte da premissa inicial de determinação do valor da probabilidade de falha do sistema ou do índice de confiabilidade. Como no contexto deste trabalho será empregado um método de amostragem a determinação das variáveis será primeiramente feita para probabilidade de falha e depois para o índice de confiabilidade ( $\beta$ ).

## 2.2. Método de Monte Carlo

O Método de Monte Carlo (MC) é uma técnica estatística e computacional amplamente aplicada em várias disciplinas, incluindo na engenharia. Sua abordagem se baseia na utilização de números aleatórios para estimar soluções numéricas em problemas complexos, especialmente aqueles de natureza probabilística. Essa abordagem se destaca pela sua capacidade de lidar com sistemas intrincados, nos quais as relações entre variáveis podem ser complexas e as soluções analíticas podem ser difíceis de obter.

O MC opera através da geração de números aleatórios extraídos de distribuições conhecidas, sendo estes então utilizados para realizar simulações individuais do problema em questão. Cada simulação produz um resultado que pode ser interpretado como um cenário possível, considerando as incertezas e aleatoriedades inerentes ao sistema.

Uma das principais vantagens do método é a sua capacidade de incorporar a incerteza nas análises de forma abrangente. Ao repetir as simulações várias vezes, cada vez com diferentes números aleatórios, é possível obter um conjunto variado de resultados que refletem a ampla gama de situações possíveis. Esse enfoque probabilístico

permite avaliar não apenas um único resultado determinístico, mas também compreender a variabilidade inerente ao sistema.

Entende-se assim que a partir da análise de tais variabilidades do sistema seja possível determinar e avaliar cenários em que as solicitações às quais a estrutura está submetida sejam superiores à sua capacidade resistiva, oferecendo assim uma visão abrangente das situações em que a estrutura pode ser mais vulnerável. Esse tipo de análise faz referência a determinação da probabilidade de falha ( $p_f$ ).

A determinação da probabilidade de falha a partir do Método de Monte Carlo está associada a amostragem da função Estado Limite e então avaliação de uma situação de falha ou segurança conforme descrito anteriormente.

Na Equação 3,  $g(\mathbf{X})$  corresponde a equação de estado limite para o  $i$ -ésimo modo de falha e o status de sobrevivência e falha será dado por uma função indicadora  $I[X]$  que é utilizada como componente auxiliar a fim de se possibilitar a integração da Equação 4 sobre todo o domínio.

$$p_f = \int_{\mathbf{v}_X} I[X] f_x(X) dX \quad 8$$

$$I[X] = \begin{cases} 1 & \text{se } g(\mathbf{X}) \leq 0 \\ 0 & \text{se } g(\mathbf{X}) > 0 \end{cases} \quad 9$$

Assim, a Equação 8 pode ser reescrita conforme apresentado na Equação 10, sendo este um valor médio da probabilidade de falha em função da amostragem adotada.

$$p_f = \sum_{i=1}^N I[g(X^i) \leq 0] \cdot \frac{1}{N} \quad 10$$

onde  $X^i$  representa a  $i$ -ésima amostra do vetor das variáveis  $X$  geradas a partir da função densidade de probabilidade  $f_x(X)$ . Desta forma, a determinação de  $p_f$  passa a ser realizada a partir da Equação 11:

$$p_f = \frac{N^{\circ} \text{ de simulações em que } G_x(X) \leq 0}{N} \quad 11$$

A variância da estimativa da probabilidade de falha ( $p_f$ ) é uma medida importante para avaliar a precisão de resultados obtidos em análises de confiabilidade estrutural, especialmente quando se utilizam métodos de simulação numérica, como o método de Monte Carlo. A incerteza associada a essa estimativa está diretamente relacionada à variância do estimador  $\hat{p}_f$ , a qual é influenciada pelo número de simulações realizadas

( $n_s$ ). Portanto, compreender como essa variância se comporta em função de  $n_s$  é essencial para controlar a acurácia da estimativa de  $p_f$ . A formulação matemática que descreve essa relação permite determinar a magnitude das incertezas e, conseqüentemente, a precisão dos resultados obtidos a partir dos métodos de simulação.

A variância do estimador  $\hat{p}_f$  está associada à incerteza estatística inerente ao processo de simulação. Conforme apresentado por Beck (2019), a incerteza tende a diminuir conforme o número de simulações ( $n_s$ ) aumenta. Sendo o estimador  $\hat{p}_f$  não tendencioso, conclui-se que a variância de  $\hat{p}_f$  também é equivalente ao erro quadrático médio (EQM), conforme apresentado na Equação 12.

$$Var(\hat{p}_f) = E[(\hat{p}_f - p_f)^2] \quad 12$$

A identidade de Bienaymé é utilizada para demonstrar que a variância da soma de variáveis aleatórias não correlacionadas é igual à soma das variâncias de cada uma dessas variáveis. Desta forma, a determinação da variância da probabilidade de falha é apresentada na Equação 14 (Rubinstein e Kroese, 2016).

$$Var(\hat{p}_f) = \frac{p_f(1 - p_f)}{n_s} \quad 13$$

Esse resultado evidencia que, à medida que o número de simulações aumenta, a variância do estimador diminui proporcionalmente, o que contribui para uma maior precisão na estimativa da probabilidade de falha  $p_f$ .

A formulação inicial da probabilidade de falha, que tem o valor de  $\beta$  como incógnita pode ser reduzida para uma integral definida conforme apresentado na Equação 5. Uma das simplificações adotadas faz referência ao fato de que, em uma distribuição normal padrão, conforme mostrado anteriormente, a área abaixo da curva é dada como 1. Como a curva é simétrica, a probabilidade entre  $-\infty$  e 0 pode ser simplificada como 0.5. Entretanto, apesar destas simplificações adotadas, a integral não admite uma abordagem analítica, de modo a se fazer necessário a aplicação de métodos numéricos de integração. O método adotado neste trabalho para a solução foi a quadratura de Gauss-Legendre. Nele, uma integração sem solução analítica é aproximada por uma série utilizando polinômios num domínio conhecido, conforme mostrado na Equação 14.

$$\int_a^b f(x) dx = \frac{b-a}{a} \int_{-1}^1 f(t) dt$$

$$I_k = \frac{b-a}{a} \sum_{i=1}^k w_i f(x_i), \text{ sendo } x_i = a + \frac{b-a}{a}(t_i + 1)$$
14

Na Equação 14,  $k$  é o número de pontos de integração adotados,  $t_i$  são os valores das coordenadas dos pontos de integração e  $w_i$  os valores dos pesos de integração. Neste tópico a formulação será desenvolvida para o cálculo de  $\beta$  considerando dois pontos de integração ( $k = 2$ ). As coordenadas  $t_i$  serão  $\pm 1/\sqrt{3}$  e os pesos  $w_i$  terão o valor de 1. Substituindo os valores na Equação 14, tem-se:

$$x_1 = \frac{\beta}{2} \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} + 1 \right); x_2 = \frac{\beta}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + 1 \right)$$

$$I_2 = \frac{\beta}{2} \left[ 1 \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[ \frac{\beta}{2} \left( -\frac{1}{\sqrt{3}} + 1 \right) \right]^2 / 2} \right) + 1 \left( \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\left[ \frac{\beta}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{3}} + 1 \right) \right]^2 / 2} \right) \right]$$
15

A Equação 15 pode ser simplificada por:

$$p_f = 0.5 - I_2 = 0,5 - \frac{\beta}{2\sqrt{2\pi}} \left( e^{-\left( \frac{2-\sqrt{3}}{12} \right) \beta^2} + e^{-\left( \frac{2+\sqrt{3}}{12} \right) \beta^2} \right)$$
16

Os valores referentes a probabilidade de falha  $p_f$  são conhecidos, de acordo com a formulação desenvolvida na seção anterior. Os valores de  $\beta$  são definidos como a raiz não nula da função representada na Equação 17.

$$f(\beta) = \frac{\beta}{2\sqrt{2\pi}} \left( e^{-\left( \frac{2-\sqrt{3}}{12} \right) \beta^2} + e^{-\left( \frac{2+\sqrt{3}}{12} \right) \beta^2} \right) + (p_f - 0,5)$$
17

A raiz apresentada na Equação 17 pode ser determinada pelo método de Newton-Raphson, conforme apresentado na Equação 18:

$$\beta_{k+1} = \beta_k - \frac{f(\beta_k)}{f'(\beta_k)}$$
18

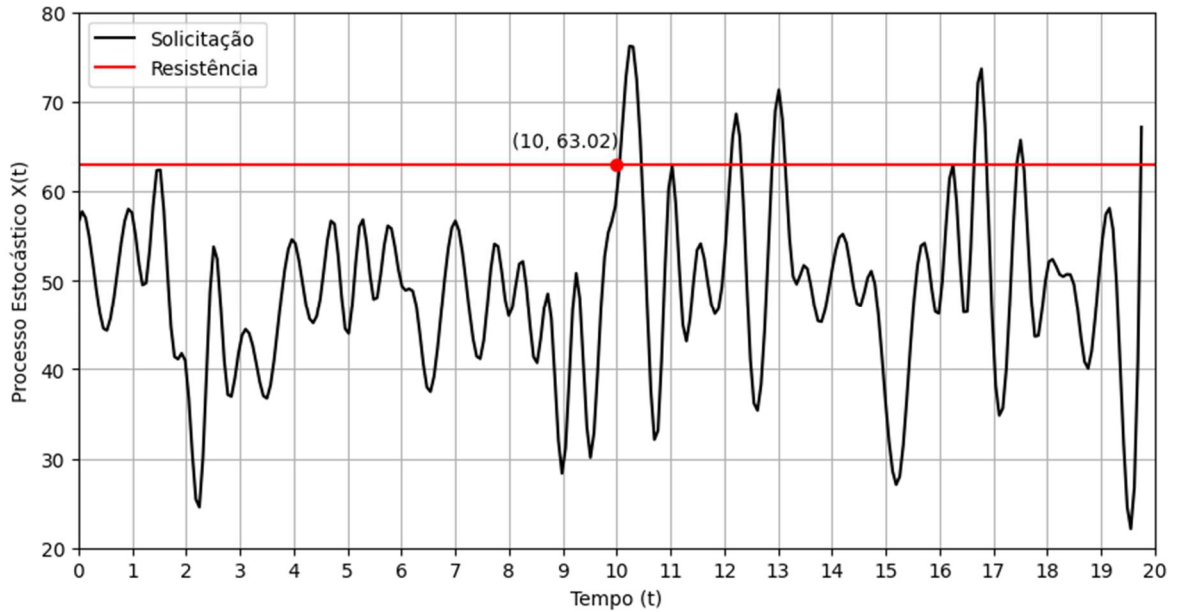
Na Equação 18,  $k$  é o número de iterações do método de Newton-Raphson e  $f'(\beta_k)$  é a primeira derivada da função  $f(\beta_k)$ . Considerando no exemplo um valor de  $p_f = 0,006210$  e uma tolerância do método igual a  $10^{-6}$ , com 7 iterações ( $k = 7$ ), obtém-se um valor de  $\beta = 2,249879$ . Consultando a tabela de distribuição acumulada da normal padrão, disponível em (Beck, 2019) – Apêndice E, tem-se um valor de  $\beta = 2,50$ . Desta forma, as aproximações realizadas pelos métodos numéricos utilizados resultaram em uma diferença percentual de aproximadamente 11%. Valores mais próximos podem ser alcançados aumentando o número de pontos de integração e a quantidade de iterações realizadas.

### 2.2.1. Confiabilidade dependente do tempo

O problema de confiabilidade estrutural dependente do tempo consiste na avaliação da probabilidade de que um processo estocástico  $\mathbf{S}$  (ação) exceda a resistência  $\mathbf{R}$  da estrutura, à qualquer instante durante o período de vida útil da mesma [Beck (2019)]. No caso das estruturas de concreto armado estudadas neste trabalho, a confiabilidade estrutural é impactada devida a exposição do elemento estrutural a fatores ambientais que agredem a estrutura de forma geral, sendo neste caso a exposição da peça a uma situação de carbonatação.

Para determinar a confiabilidade no tempo, técnicas probabilísticas são usadas para modelar tanto a resistência residual da estrutura quanto o carregamento variando ao longo do tempo. Uma abordagem comum é o uso de métodos de amostragem considerando a falha de primeira de primeira barreira onde a probabilidade de falha é estimada com base na transição da estrutura de um estado seguro para um estado de falha, à medida que o tempo avança (Medeiros, 2022). . Um exemplo de falha de primeira barreira é apresentado na Figura 6.

**Figura 6:** Exemplo de falha de primeira barreira



FONTE: Adaptado de (Medeiros, 2022).

A Figura 6 poderia ser utilizada para exemplificar o comportamento estocástico da força de vento atuando em uma estrutura hipotética onde a linha vermelha indica o limite de carregamento suportado pelo elemento estrutural.

A Equação (19) é a equação fundamental para problemas de confiabilidade dependente do tempo dado um tempo  $t_D$  que corresponde a vida útil em que a estrutura foi avaliada.

$$p_f(t_d) = P \left[ \min_{0 \leq t \leq t_d} g(\mathbf{R}, \mathbf{S}, t) \leq 0 \right] \quad 19$$

Usando o processo de Monte Carlo Simples com um solver, o primeiro passo é a discretização do tempo, realizada no intervalo de tempo  $[0, t_D]$  em  $n$  instantes. O segundo passo seria avaliação da equação Estado Limite  $g$  em tempo discreto. O primeiro evento de ultrapassagem, ou seja,  $g(\mathbf{R}, \mathbf{S}, t) \leq 0$ , define o estado de falha na estrutura, onde pode-se definir um tempo correspondente a este estado de falha, aqui definido por  $t_f$ . Logo a Equação 20 define a equação do estado limite subdividindo o domínio em falha e sobrevivência.

$$\begin{cases} g(\mathbf{R}, \mathbf{S}, t) > 0 \text{ para } 0 \leq t \leq t_f \\ g(\mathbf{R}, \mathbf{S}, t) < 0 \text{ para } t_f \leq t \leq t_d \end{cases} \quad 20$$

A probabilidade de falha é estimada através da Equação 21:

$$p_f(0, t_i) \approx \tilde{p}_f(0, t_i) = \frac{k_j}{n_{s_i}} \quad 21$$

Onde  $k_j$  é o contador de número de passagens a barreira de resistência na idade  $t_i$ .  $n_{s_i}$  é o número de amostras.

### 2.3. Corrosão da armadura e seus efeitos no momento resistente

Um desafio contínuo que afetava a durabilidade e a integridade estrutural de elementos de concreto armado é a corrosão. A corrosão é dita como a principal causa de degradação em estruturas de concreto armado, representando uma ameaça significativa para a segurança dessas construções, comprometendo sua vida útil. Para (Wang e Liu, 2010), aprimorar o entendimento sobre o efeito desta manifestação patológica na capacidade resistente residual de estruturas de concreto armado pode otimizar os procedimentos de inspeção e colaborar para o planejamento estratégico de métodos de reabilitação.

Em um dos primeiros trabalhos publicados relacionados ao estudo da corrosão em elementos de concreto armado, (Magnusson e Smith, 1911) abordaram como o processo de corrosão estaria relacionado as falhas em estruturas de concreto armado. Entretanto, os estudos associados à deterioração de elementos de concreto armado tiveram ascensão em meados dos anos 50, sendo inicialmente destinados a investigar o comportamento de estruturas expostas às condições de ambientes marinhos.

O desenvolvimento acentuado das ferramentas computacionais abriu portas para que novas formas de análise na segurança de vigas de concreto armado, utilizando métodos probabilísticos, por exemplo, surgissem e fossem aprimoradas. Em um dos primeiros trabalhos publicados nesta temática, Enright; Frangopol (1998) utilizaram conceitos de confiabilidade estrutural, através do método de Monte Carlo, para definir a probabilidade de falha a partir da definição de dois tipos de casos de carregamento, estatisticamente independentes

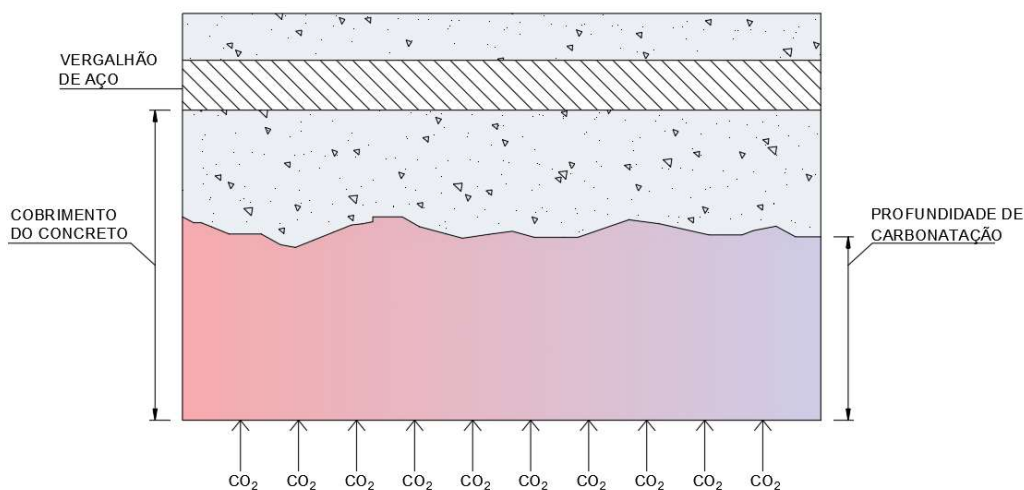
#### 2.3.1. Processo de corrosão das armaduras em peças de concreto armado

Em estruturas de concreto armado, o concreto proporciona uma defesa em duas frentes diferentes para o aço. Em primeiro lugar, oferece uma salvaguarda física, criando uma barreira que impede o aço de entrar em contato direto com o ambiente externo. Em segundo lugar, fornece uma proteção química, graças à solução alcalina contida nos poros

do concreto, que desencadeia a criação de uma camada protetora (ou passivadora) que envolve o aço. Entende-se que, sob a proteção da camada passivadora, as taxas de corrosão são desprezíveis, dada sua alta resistência ôhmica e à capacidade de impedir o acesso de umidade, oxigênio e agentes agressivos à superfície do aço (PAZZINI e MEIRA, 2013). Tal proteção é conferida em ambientes que a alcalinidade do concreto possa ser mantida. Entretanto, em casos de perda da película passivadora (despassivação do aço), a corrosão já pode ser iniciada.

A despassivação do aço acontece devido a ação de dois diferentes mecanismos: a carbonatação e a penetração de íons cloreto. Na carbonatação, a penetração de moléculas de dióxido de carbono induz a redução do pH do concreto de seus valores normais (valores acima de 12) para valores que aproximam da neutralidade, os quais são inferiores àqueles necessários para manter a estabilidade da camada passivante. A partir da difusão gasosa do dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) em contato o concreto e com o aço depassivado, o produto desta reação entra em contato com os componentes do concreto, dando início ao processo de corrosão. A Figura 7 mostra uma representação esquemática da carbonatação em uma peça de concreto armado.

**Figura 7:** Representação do avanço da profundidade de carbonatação em peça de concreto armado.



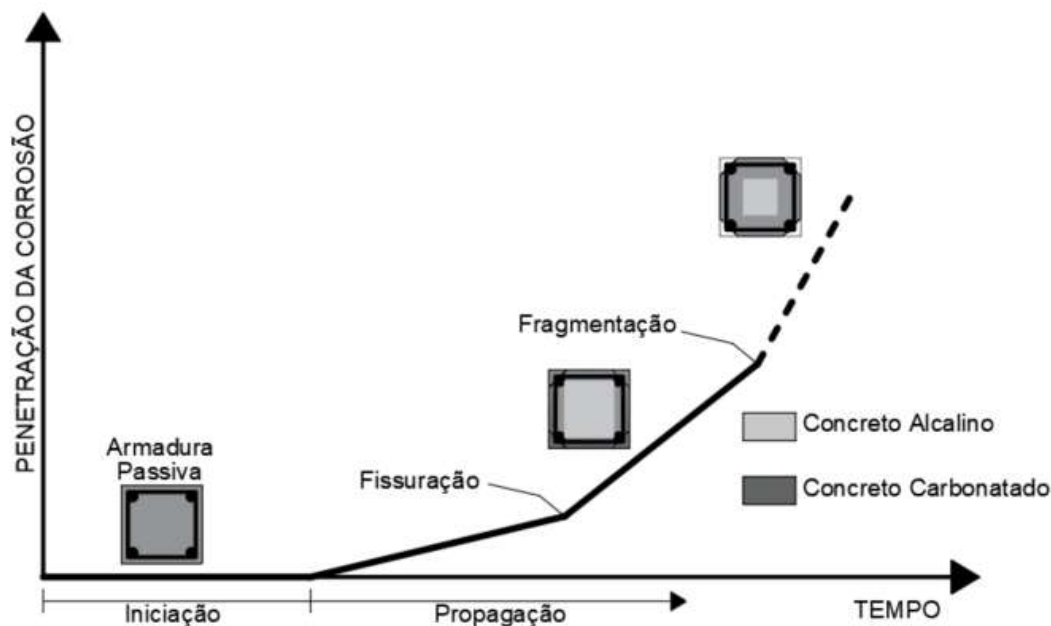
FONTE: Autoria própria.

(Tuutti, 1982) define a vida útil de uma estrutura, sob a ótica da corrosão, como a soma do tempo de iniciação e o tempo de propagação. O tempo de iniciação pode ser definido como o tempo necessário para a profundidade de carbonatação se igualar ao cobrimento da viga. O tempo de propagação tem início quando o aço é depassivado, e termina quando a estrutura atinge o estado limite onde as consequências da corrosão já

não são mais toleráveis (BERTOLINI, 2008). A Figura 8 mostra um gráfico com a evolução temporal da degradação de uma peça de concreto armado devido à carbonatação.

Outra característica importante da corrosão por carbonatação é o desgaste da armadura de forma generalizada. Neste caso, a definição da propagação da corrosão é fator preponderante na análise de elementos de concreto armado.

**Figura 8:** Evolução no tempo da degradação devido a carbonatação.



FONTE: Adaptado de (Bertolini, 2008).

No que tange pesquisas relacionadas a carbonatação em peças de concreto armado, (Bastidas-Arteaga *et al.*, 2013) abordaram como os diferentes cenários climáticos relacionados ao aumento da emissão de CO<sub>2</sub> podem afetar a durabilidade de uma estrutura de concreto armado. (Han, Park e Yang, 2013) avaliaram a durabilidade de estruturas de concreto armado sujeitas a carbonatação, comparando também modelos normativos internacionais utilizados para determinar a profundidade da frente de carbonatação com resultados experimentais obtidos. (Mlčoch e Sýkora, 2020) determinaram critérios para avaliação de estruturas de concreto armado sujeitas a carbonatação criando índices de degradação baseados no índice de confiabilidade da peça.

(Possan, Felix e Thomaz, 2016) abordam o fenômeno da absorção de CO<sub>2</sub> pela carbonatação do concreto durante o ciclo de vida das estruturas. O estudo utiliza modelagem matemática para avaliar a profundidade de carbonatação, com concretos de resistências variando de 20 a 40 MPa, produzidos com diferentes tipos de cimento. O modelo utilizado pelos autores permite definir a profundidade de carbonatação em função

do tempo e das condições ambientais às quais a estrutura está exposta. A aplicação do modelo considera diversas variáveis, como a resistência à compressão do concreto, o tipo de cimento utilizado, a umidade relativa do ambiente, o teor de CO<sub>2</sub> e o nível de adições pozolânicas no concreto. O diferencial do modelo proposto é o fato deste possibilitar a simulação de diferentes cenários, como variações no tipo de cimento e nas condições de exposição do elemento (interna ou externa), permitindo prever a evolução da profundidade de carbonatação com mais precisão. A equação geral utilizada para estimar a profundidade de carbonatação ( $y(t)$ ) é expressa como função do tempo e inclui fatores que capturam essas variáveis, conforme mostrado na Equação 22.

$$y(t) = k_c \cdot \left(\frac{20}{f_c}\right)^{k_{f_c}} \cdot \left(\frac{t}{20}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \exp\left[\left(\frac{k_{ad} \cdot ad^{\frac{3}{2}}}{40 + f_c}\right) + \left(\frac{k_{CO_2} \cdot CO_2^{\frac{1}{2}}}{60 + f_c}\right) - \left(\frac{k_{UR} \cdot (UR - 0.58^2)}{100 + f_c}\right)\right] \cdot k_{ce} \quad 22$$

Onde ( $y(t)$ ) é a profundidade de carbonatação em função do tempo (mm), ( $f_c$ ) é a resistência característica à compressão do concreto (MPa), ( $k_c$ ) é um fator relacionado ao tipo de cimento, ( $k_{f_c}$ ) é o fator relacionado à resistência à compressão do concreto, ( $t$ ) é o tempo de exposição (anos), ( $ad$ ) é o percentual de adições pozolânicas presentes no concreto, ( $k_{ad}$ ) é o fator relacionado às adições (como sílica ativa e metacaulim), ( $CO_2$ ) é a concentração de CO<sub>2</sub> no ambiente, ( $k_{CO_2}$ ) é o fator relacionado ao conteúdo de CO<sub>2</sub> no ambiente, ( $UR$ ) é a umidade relativa média do ambiente, ( $k_{UR}$ ) é o fator relacionado à umidade relativa e ( $k_{ce}$ ) é o fator de exposição à proteção da estrutura contra a chuva (interno, externo exposto ou externo protegido). A Tabela 1 apresenta os valores dos coeficientes do modelo de acordo com o tipo de cimento utilizado.

Um dos principais desafios enfrentados em estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão é a previsão do momento exato em que o processo corrosivo se inicia, especialmente em função da carbonatação. Em vigas de concreto, a espessura do cobrimento da armadura desempenha um papel crucial nesse processo, pois é a barreira que retarda a penetração de dióxido de carbono e, por consequência, o início da corrosão. No entanto, as variáveis envolvidas, como a heterogeneidade do concreto, as condições ambientais e a variabilidade nos métodos de construção, tornam complexa a tarefa de determinar com precisão o tempo necessário para que a corrosão comece e seu impacto no desempenho estrutural. Além disso, a progressão da corrosão ao longo do tempo pode comprometer a capacidade resistente da estrutura, afetando diretamente sua segurança e

funcionalidade. Diante disso, é fundamental uma abordagem que leve em consideração a variabilidade desses fatores para a avaliação da vida útil da estrutura.

A problemática central está na falta de previsibilidade confiável acerca do avanço da carbonatação e da corrosão nas vigas de concreto armado, o que pode resultar em uma subestimação dos riscos associados à perda de integridade estrutural. Métodos convencionais muitas vezes não consideram a incerteza inerente ao processo corrosivo, o que pode levar a decisões inadequadas em termos de manutenção e reparo. Assim, torna-se necessário o uso de um método que permita a quantificação dessas incertezas, possibilitando uma avaliação mais precisa da segurança estrutural. A aplicação do método de confiabilidade estrutural é uma resposta direta a essa necessidade, pois possibilita uma análise probabilística do desempenho das vigas, considerando a variabilidade nos parâmetros de projeto e nas condições ambientais. Com isso, torna-se possível não apenas prever o tempo de início da corrosão, mas também compreender como sua progressão afetará a estrutura ao longo do tempo, fornecendo informações para a tomada de decisões em termos de durabilidade e segurança.

Diversos modelos têm sido desenvolvidos na comunidade científica com a finalidade de se identificar o comportamento do avanço da frente de carbonatação em peças de concreto armado. (Papadakis, Vayenas e Fardis, 1991) e (Yang, Seo e Tae, 2014) apresentam modelos focados nas características físico-químicas que afetam a durabilidade do concreto armado, relativo à carbonatação e difusão de gases. Os modelos desenvolvidos pelos autores se baseiam na primeira lei de Fick e consideram aspectos como porosidade do concreto, distribuição do tamanho dos poros e grau de saturação dos mesmos. Entretanto, os dados de entrada necessários nos modelos supracitados são de difícil acesso para estudos feitos em campo, o que gera limitações para uso prático.

Em pesquisas mais recentes, (Ta *et al.*, 2016) abordam o desenvolvimento de um meta modelo para calcular a profundidade da frente de carbonatação em estruturas de concreto armado, também baseado na solução analítica da primeira lei de Fick. O modelo em questão tem como variáveis de entrada o tipo de cimento, temperatura ambiente, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub>. Como o modelo em questão utiliza a primeira lei de Fick como base do desenvolvimento da formulação analítica, é considerado um processo de difusão constante e homogêneo, o que pode não representar a complexidade real da microestrutura do concreto ao longo do tempo, especialmente em cenários com variação significativa de umidade.

Desta forma, o modelo proposto por (Possan, Felix e Thomaz, 2016) (Equação 22), utilizado neste trabalho, destaca-se em relação aos de (Papadakis, Vayenas e Fardis, 1991) e (Yang, Seo e Tae, 2014) pela qualidade e precisão dos dados utilizados em sua formulação. A abordagem deste modelo incorpora variáveis essenciais, como o tipo de cimento, resistência à compressão e condições ambientais de exposição, o que resulta em uma maior representatividade dos fenômenos reais de carbonatação. Em comparação com Papadakis, que utiliza um modelo mais simplificado com foco na difusão de CO<sub>2</sub> pela primeira lei de Fick, o modelo de (Possan, Felix e Thomaz, 2016) se baseia em um número maior de parâmetros que refletem de forma mais detalhada a variabilidade das condições concretas, como a influência das adições de materiais cimentícios. Quando comparado ao modelo de (Yang, Seo e Tae, 2014), o de (Possan, Felix e Thomaz, 2016) se sobressai pela precisão dos resultados obtidos ao cruzar os dados experimentais com uma formulação mais direta e menos dependente de correções complexas. Os resultados validados pelo modelo de (Possan, Felix e Thomaz, 2016) apresentaram uma melhor correlação com dados experimentais, especialmente em diferentes condições ambientais e tipos de concreto, oferecendo maior confiabilidade e aplicabilidade prática em cenários diversos.

A análise da evolução da profundidade de carbonatação ao longo dos anos, neste trabalho, será realizada com base no modelo apresentado na Equação 22. Esse modelo permite definir o início do processo corrosivo com base na espessura do cobrimento da viga, além de estimar o tempo necessário para o início da corrosão, sua progressão e a influência desse processo na integridade da viga.

Na corrosão por ação de íons cloretos o processo de degradação da armadura acontece de forma localizada (pites), causado quando a presença de íons cloreto (Cl<sup>-</sup>) em um ambiente agressivo atinge valores altos o suficiente para quebrar a película passivadora do aço. Neste caso, o início do processo corrosivo depende da taxa de penetração dos cloretos, o valor limite de cloreto e a espessura da camada de cobertura do concreto (BERTOLINI, 2008). Neste contexto, (Frangopol, Lin e Estes, 1997) realizaram, através de técnicas para determinação do início e propagação da corrosão, modelos de inspeção para prolongar a vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão por penetração de íons cloreto. (Enright e Frangopol, 1998b) realizaram uma análise probabilística para determinar a influência de cada uma das principais variáveis que descrevem o modelo do tempo de iniciação da corrosão por difusão de íons cloreto em peças de concreto armado.

**Tabela 1:** Coeficientes do modelo de acordo com cimento e condições ambientais.

| (a) Tipo de cimento               | Propriedades do concreto |          |          | Condições ambientais |          |
|-----------------------------------|--------------------------|----------|----------|----------------------|----------|
|                                   | Cimento                  | $f_c$    | Adição   | CO <sub>2</sub>      | UR       |
|                                   | $k_c$                    | $k_{fc}$ | $k_{ad}$ | $k_{CO_2}$           | $k_{UR}$ |
| <b>CP I</b>                       | 19.80                    | 1.70     | 0.24     | 18.00                | 1300     |
| <b>CP II E</b>                    | 22.48                    | 1.50     | 0.32     | 15.50                | 1300     |
| <b>CP II F</b>                    | 21.68                    | 1.50     | 0.24     | 18.00                | 1100     |
| <b>CP II Z</b>                    | 23.66                    | 1.50     | 0.32     | 15.50                | 1300     |
| <b>CP III</b>                     | 30.50                    | 1.70     | 0.32     | 15.50                | 1300     |
| <b>CP IV</b>                      | 33.27                    | 1.70     | 0.32     | 15.50                | 1000     |
| <b>CP V ARI</b>                   | 19.80                    | 1.70     | 0.24     | 18.00                | 1300     |
| <b>(b) Condições de exposição</b> |                          |          |          |                      |          |
| Exposição à chuva                 |                          |          |          | $k_{ce}$             |          |
| Interna, protegida da chuva       |                          |          |          | 1.30                 |          |
| Externa, protegida da chuva       |                          |          |          | 1.00                 |          |
| Externa, exposta à chuva          |                          |          |          | 0.65                 |          |

FONTE: (Possan, Felix e Thomaz, 2016)

A corrosão é classificada como um fenômeno que, na maioria das vezes, tem origem através de processos eletroquímicos, sendo estes associados ao ambiente em que a estrutura está inserida. Nas pilhas eletroquímicas de corrosão tem-se a região anódica, onde se inicia o processo de oxidação; uma região catódica, onde através de um condutor metálico (própria ferrugem) os elétrons resultantes dos processos ocorridos na zona anódica são consumidos, num processo de redução; a presença de um agente oxidante (umidade, por exemplo); uma diferença de potencial e a presença de um eletrólito condutor (concreto).

Os eletrólitos podem ser definidos como minerais que carregam cargas elétricas quando dissolvidos em um líquido. No caso do concreto, a água presente no material funciona como o eletrólito da reação. Desta forma, entende-se que teores de umidade elevados no preparo do concreto influenciam de forma significativa o desencadeamento e aceleração dos processos corrosivos. Para garantir esse controle de umidade, a NBR 6118 (ABNT, 2023) trouxe em suas últimas revisões a introdução das classes de agressividade, de forma a categorizar as estruturas conforme o ambiente ao qual estão

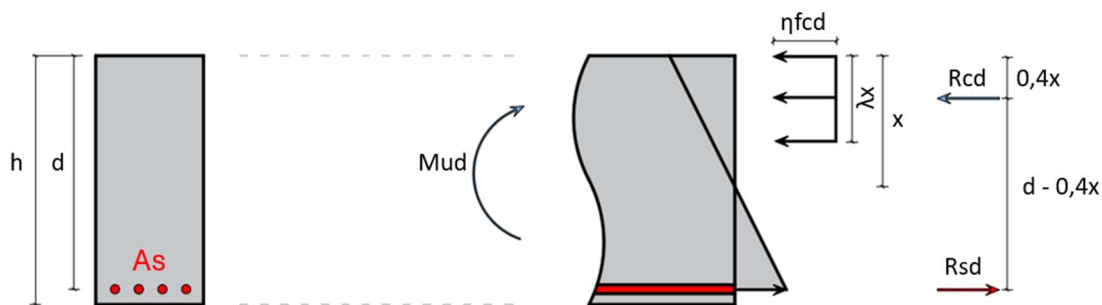
inseridas, estipulando o cobrimento e fator água/cimento mínimos conforme a agressividade ambiental do meio.

A seguir serão apresentados os métodos de cálculo do momento resistente para seções sem e com patologia de corrosão.

### 2.3.2. Momento fletor resistente de seções de concreto armado sem efeito da corrosão

O cálculo do momento fletor resistente de seções de vigas de concreto armado é realizado a partir do equilíbrio de força na seção transversal da peça. Para isso, são avaliadas as forças resultantes de compressão no concreto ( $R_{cd}$ ) e de tração nas armaduras longitudinais ( $R_{sd}$ ), conforme apresentado na Figura 9.

**Figura 9:** Equilíbrio de forças em uma seção transversal retangular



FONTE: Próprio autor

A norma NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelece que o diagrama de distribuição de tensões de compressão no concreto tem a forma de parábola-retângulo, com tensão de pico igual a  $0,85f_{cd}$ . No entanto, admite-se a possibilidade da substituição desse diagrama por um retângulo de altura  $0,8x$ , sendo  $x$  a profundidade da linha neutra.

A partir das forças resultantes de tração e compressão e utilizando as equações de equilíbrio em termos de momentos fletores, tem-se a Equação 23, que é utilizada para estimar o momento fletor resistente da seção transversal.

$$M_R = A_{s0} \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{\lambda}{2} x \right) \quad 23$$

$$x = \frac{A_{s0} \cdot f_y}{f_c \cdot b_w \cdot \alpha_c \cdot \lambda} \quad 24$$

O momento resistente  $M_R$  nessa equação parte do princípio de que a armadura longitudinal atinja a tensão de escoamento do aço antes da ruína da seção transversal.

Nesta expressão,  $A_{s0}$  representa a área de aço da seção transversal,  $f_y$  é a resistência característica de escoamento do aço,  $d$  é a altura útil da seção,  $b_w$  é a largura da seção, e  $\lambda$  e  $\alpha_c$  são fatores que dependem da resistência característica a compressão do concreto ( $f_c$ ), que podem ser consultados no item 17.2.2 da NBR 6118 (ABNT, 2023).

### 2.3.3. Momento fletor resistente de seções de concreto armado com efeito da corrosão

Conforme citado anteriormente, a análise da confiabilidade de vigas submetidas a corrosão deve ser precedida da definição da equação responsável por descrever a resistência residual a flexão da peça após a instauração da manifestação patológica. Entende-se, a partir daí, que a escolha de uma equação que descreva de maneira mais fidedigna o fenômeno físico ocorrido é de fundamental importância para a representatividade dos resultados, permitindo a aplicação do método de confiabilidade estrutural.

O mecanismo que representa o fenômeno da corrosão é complexo e normalmente dado pela junção de quatro características básicas: (i) redução da seção transversal e perda da ductilidade do aço; (ii) fissuração do concreto; (iii) redução da área de concreto devido ao lascamento da superfície do elemento e (iv) modificação nas propriedades mecânicas de aderência entre os dois materiais [(Kagermanov e Markovic, 2022)].

Este fenômeno pode ser analisado por meio de abordagens experimentais e numéricas. Neste estudo, o modelo adotado combina essas técnicas, sendo denominado como um modelo empírico. Tais modelos são tradicionais na representação de fenômenos complexos no estudo da mecânica das estruturas e são amplamente empregados em normativas de projetos. A Tabela 2 apresenta algumas referências que contribuem no estudo de equações empíricas e analíticas para modelos de momento fletor resistente com armadura em situação de corrosão.

Diversos estudos têm sido direcionados para o entendimento da atuação da tensão de aderência entre o concreto e o aço em estruturas de concreto armado com armaduras corroídas. (Mangat e Elgarf, 1999) classificam a perda de aderência como a principal causa na redução da resistência do elemento.

Em vigas de concreto armado, o aço entra como o material responsável por resistir as tensões de tração que a peça está submetida, cujas quais o concreto não é eficaz em combater. Para que essa transferência seja feita de maneira eficaz, é de suma importância a existência de uma tensão de aderência mínima entre os materiais. Em condições

normais, sem a presença de patologias, (Chen e Nepal, 2018) apresentam, segundo Eurocode 2, a tensão última de aderência e o correspondente comprimento da armadura necessário para evitar falhas de ancoragem, respectivamente, como:

$$T_{req} = \frac{f_{yd} \cdot D_b}{4l_d} \quad 25$$

$$l_d = \alpha_{bd} \cdot \frac{D_b \cdot f_{yd}}{4f_{bd}} \quad 26$$

Nas equações 25 e 26,  $f_{yd}$  é a resistência a tração de cálculo do aço, dada por  $f_{yk}/\gamma_s$ , onde  $f_{yk}$  é a resistência característica do aço e  $\gamma_s$  o coeficiente minorador de resistência;  $f_{bd}$  é resistência de adesão de projeto, definida como  $f_{bd} = 0.315f_{ck}^{0.67}$  para concretos com  $f_{ck} \leq 60 \text{ MPa}$  e diâmetro de armadura  $D_b \leq 32 \text{ mm}$ ; e  $\alpha_{bd}$  é o coeficiente relativo a forma da ancoragem, tipo de confinamento obtido pelos estribos e o cobrimento do concreto.

No entanto, o processo de corrosão das armaduras gera produtos ao longo da superfície do aço das barras que afeta diretamente a interação entre os materiais, diminuindo a tensão de aderência e induzindo tensões que geram perda da integridade do concreto, como deslocamentos e fissuras. (Polak *et al.*, 2016) conduziram estudos sobre a influência do deslocamento do concreto devido à corrosão. (Castel, François e Arliguie, 2000b) define que fissuras causadas pela corrosão em regiões onde há armaduras de compressão não tem influência significativa no comportamento das vigas em serviço. Segundo (Feng, Gong e Yang, 2014), a fissuração permite com que os agentes agressivos tenham contato direto com a armadura, acelerando a taxa de corrosão. Ainda segundo os autores, a avaliação da evolução da corrosão após a fissuração é de suma importância para a durabilidade da estrutura.

Diversos modelos têm sido desenvolvidos de forma empírica para representar a tensão de aderência entre o aço e o concreto. Durante a evolução do processo corrosivo, caso a tensão de aderência seja superior àquela necessária (Equação 25), o momento resistente residual pode ser determinado a partir dos métodos de compatibilidade.

Além disso, as tensões localizadas devido a evolução da corrosão podem resultar em um comportamento não-linear do aço. Proposta por (Cairns *et al.*, 2005), a equação empírica que apresenta a redução da resistência do aço é mostrada a seguir.

$$f_{y,corr} = (1 - \alpha_y \cdot Q_{corr}) \cdot f_y \quad 27$$

Na Equação 27,  $f_{y,corr}$  é a resistência residual do aço;  $f_y$  é a resistência inicial do aço;  $Q_{corr}$  é a perda média da seção transversal em porcentagem e  $\alpha_y$  é um coeficiente empírico [ $\alpha_y = 0.012$  segundo (Cairns *et al.*, 2005)].

No entanto, cada caso deve ser avaliado. Autores como (Allam *et al.*, 1994) concluem que corrosão por agentes agressivos presentes na atmosfera não influenciam a resistência e a ductilidade do aço.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2 e dos resultados do mapeamento de publicações realizado acerca desta temática, este trabalho empregará o modelo mecânico empírico dado por (Azad, Ahmad e Al-Gohi, 2010), visto que este apresenta um equacionamento para o momento último antes e após os efeitos de perda de aderência na interface aço-concreto em uma situação de corrosão na armadura. É válido ressaltar que este modelo apresentou um parâmetro estatístico  $R^2$  superior a 75% na representação dos fenômenos.

**Tabela 2:** Resultados apresentados referentes à avaliação da resistência de vigas em concreto armado.

| Referência   | Efeito representado   |
|--|---|
| (Azad, Ahmad e Azher, 2007)  | Modelo proposto para determinação do momento resistente baseado na perda de seção transversal de armadura e na perda de aderência entre aço e concreto.   |
| (Bhargava <i>et al.</i> , 2007)  | Modelo desenvolvido para variação da tensão de aderência em relação ao nível de corrosão com base em regressão de dados oriundos de publicações anteriores.                                     |
| (Azad, Ahmad e Al-Gohi, 2010)  | Atualização do modelo de determinação do momento resistente proposto (Azad, Ahmad e Azher, 2007).   |
| (Wang e Liu, 2010)   | Modelo simplificado proposto que visa fornecer estimativa da vida residual de estruturas de concreto armado corroídas.  |
| (Loreto <i>et al.</i> , 2011)  | Definição da relação entre corrosão do aço e degradação do concreto em peças de concreto armado submetidas ao ataque de cloretos.   |
| (Xia, Jin e Li, 2012)  | Relação proposta para estimar a capacidade residual de vigas com armaduras corroídas.   |
| (Imam, Anifowose e Azad, 2015)   | Utilizou o método de redes neurais para calibrar o fator de correção aplicado por (Azad, Ahmad e Al-Gohi, 2010).  |
| (Chen e Nepal, 2016)   | Modelo analítico proposto para determinação do momento residual de vigas de concreto armado com armadura corroída.  |
| (Imam, Abbas Kazmi, e Department of Civil Engineering, SHUATS (Formerly AAI-DU), Allahabad-211007, U.P, India, 2017) | Novo trabalho publicado com a utilização de redes neurais para ajustar o fator de correção proposto por (Azad, Ahmad e Al-Gohi, 2010). Valores de R <sup>2</sup> próximos a 0.90 foram obtidos. |
| (Soltani, Safiey e Brennan, 2019)  | Modelo de momento resistente residual proposto em função da perda de massa da armadura com banco de dados montado através de ensaios de trabalhos já publicados.                                |
| (O'Flaherty e Browne, 2019)  | Modelo que utiliza coeficiente de momento modificado baseado no Eurocode 2 para definir o momento resistivo residual de vigas de concreto armado com corrosão.                                  |

O estágio 1, considerando o modelo de (Azad, Ahmad e Al-Gohi, 2010), é relativo à perda de massa da seção transversal das barras afetadas pelo efeito da despassivação da armadura. Já o estágio 2 é relativo à redução da tensão de aderência da barra com o concreto devido ao produto resultante da corrosão. As Equações 28 e 29 representam este efeito.

$$M_{res,cor} = A_{s,cor} \cdot f_y \cdot \left( d - \frac{\lambda}{2} x \right) \quad 28$$

$$M_{res} = C_f \cdot M_{res,cor} \quad 29$$

$$C_f = \frac{5,0}{d_0^{0,54} (i_{corr} t)^{0,19}} \leq 1,0 \quad 30$$

No estágio 1, o momento fletor resistente da seção com armadura corroída ( $M_{res,cor}$ ) é estimado a partir de uma área de aço corroída ( $A_{s,cor}$ ), similar a Equação 28. Já a Equação 29 considera o efeito da perda de aderência entre aço-concreto a partir da aplicação do fator de correção referente a perda de aderência ( $C_f$ ), descrito na Equação 30., onde ( $d_0$ ) é o diâmetro original da armadura (mm), ( $i_{corr}$ ) é a taxa de corrosão (mA/cm<sup>2</sup>) e (T) é a duração do processo corrosivo (dias).

Para isso será considerada a proposta de avaliação do diâmetro corroído conforme descrito em (Pellizzer *et al.*, 2020), (Val e Melchers, 1997) e Thoft-Christensen and Hansen (1994). A Equação 31 apresenta a correção do diâmetro da armadura de referência.

$$d_{cor} = D_b - 0.0232 \cdot i_{corr} \cdot t \quad 31$$

Na Equação 31, o diâmetro residual ( $d_{cor}$ ) depende do diâmetro original da barra ( $D_b$  em mm), da taxa de corrosão ( $i_{corr}$  em  $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ) e do tempo decorrido após a despassivação da barra ( $t$  em anos). Além disso, esta equação considera a taxa de corrosão como um valor constante.

No caso da corrosão localizada (pites), a determinação da área residual da seção devido a formação dos pites foi abordada por (Val e Melchers, 1997). Os autores esclarecem que os pites podem ter formas diversas, porém uma configuração simplificada foi utilizada para definir a redução da seção transversal (Figura 10). A profundidade  $p$  do pite (em mm), em um tempo  $t$ , pode ser estimada como:

$$p(T) = 0.0116 \cdot (t - t_i) \cdot i_{corr} \cdot R \quad 32$$

Na Equação 32,  $R$  é dado como o coeficiente que representa a taxa entre penetração máxima e média da corrosão. A área da barra  $A_r$  em um tempo  $t$  pode ser definida como:

$$A_r(T) = \begin{cases} \frac{\pi D_0^2}{4} - A_1 - A_2, & \text{se } p(t) \leq \frac{\sqrt{2}}{2} D_0 \\ A_1 - A_2, & \text{se } \frac{\sqrt{2}}{2} D_0 < p(t) \leq D_0 \\ 0, & \text{se } p(t) > D_0 \end{cases} \quad 33$$

Onde:

$$A_1 = \frac{1}{2} \left[ \theta_1 \left( \frac{D_0}{2} \right)^2 - a \left| \frac{D_0}{2} - \frac{p(t)^2}{D_0} \right| \right] \quad 34$$

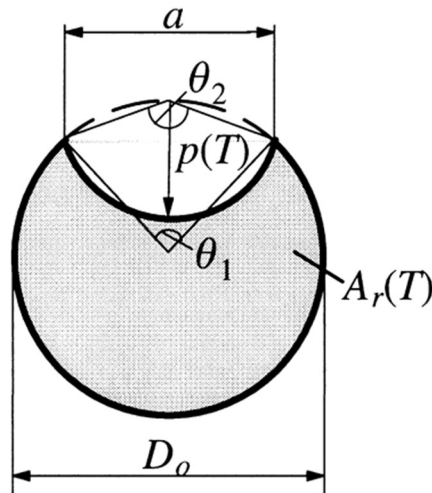
$$A_2 = \frac{1}{2} \left[ \theta_2 p(T)^2 - a \frac{p(t)^2}{D_0} \right] \quad 35$$

$$a = 2p(T) \sqrt{1 - \left[ \frac{p(t)}{D_0} \right]^2} \quad 36$$

$$\theta_1 = 2 \sin^{-1} \left( \frac{2a}{D_0} \right) \quad 37$$

$$\theta_2 = 2 \sin^{-1} \left[ \frac{a}{p(t)} \right] \quad 38$$

Figura 10: Configuração do pite.



FONTE: (Val, Stewart e Melchers, 1998)

A taxa de corrosão ( $i_{corr}$ ) pode ser estimada pela Equação 39, proposta por (Vu e Stewart, 2000), que depende do valor da relação água/cimento ( $W/c$ ) do concreto, do valor do cobrimento da armadura ( $cob$ , em mm) e do tempo decorrido após a despassivação da armadura ( $t_c$  em anos).

$$i_{cor}(t_c) = \left[ \frac{37.8(1 - W/c)^{-1.64}}{cob} \right] 0.85t_c^{-0.29} \quad 39$$

Diversos trabalhos relacionados à confiabilidade de estruturas de concreto armado sujeitas a corrosão admitem o valor de  $i_{cor}$  como uma constante. No entanto, (Vu e Stewart, 2000) abordam que é esperado que esse valor diminua com o tempo, devido ao produto formado da corrosão do aço diminuir a difusão dos íons. Diminuições mais expressivas acontecem no início do processo, de forma que os valores tendem a ter uma magnitude de diminuição menor conforme o avanço do tempo. Em casos que  $i_{cor}$  é tomado como constante (não varia com o tempo), seu valor pode ser definido conforme a Equação 40.

$$i_{cor} = \left[ \frac{37.8(1 - W/c)^{-1.64}}{cob} \right] \quad 40$$

Para processos corrosivos oriundos de carbonatação, (Peng e Stewart, 2016a) abordam um modelo para determinação da taxa de corrosão  $i_{cor}$ , apresentado na Equação 41.

$$i_{cor}(t) = i_{cor-20} \cdot [1 + K(T(t) - 20)] \quad 41$$

Nesta equação,  $i_{cor}$  é a taxa de corrosão para 20°C, dada pela Tabela 3,  $K = 0.025$  se  $T(t) < 20^\circ C$  e  $K = 0.073$  se  $T(t) > 20^\circ C$ . O autor define ainda que a equação apresentada pode ser conservadora para valores de  $T(t) > 20^\circ C$ .

**Tabela 3:** Taxas de corrosão  $i_{cor-20}$  para carbonatação em diferentes exposições.

| Classe de exposição         | Média ( $\mu A/cm^2$ ) | Desvio Padrão ( $\mu A/cm^2$ ) | Distribuição |
|-----------------------------|------------------------|--------------------------------|--------------|
| C1 - Seco                   | 0.0                    | 0.0                            | Lognormal    |
| C2 – Úmido – raramente seco | 0.354                  | 0.259                          | Lognormal    |
| C3 – Moderadamente úmido    | 0.172                  | 0.086                          | Lognormal    |
| C4 – Cíclico                | 0.431                  | 0.259                          | Lognormal    |

FONTE: (Peng e Stewart, 2016a)

### 3- METODOLOGIA

Cinco vigas foram estudadas, e os dados de projeto estão mostrados na Tabela 4. Foi adotada uma seção transversal da viga com medidas comuns para vãos entre 5 e 6 metros: 20 cm de largura (b) e 50 cm de altura (h). As vigas empregadas são as mesmas adotadas por (Santos, Stucchi e Beck, 2014). O cobrimento padrão adotado foi de 2,5 cm, porém também foram realizadas análises para 2,0 cm e 3,0 cm. A resistência característica do concreto à compressão adotada foi de 25 MPa (parâmetros de dimensionamento  $\alpha_c = 0,85$ ;  $\lambda = 0,80$ ).

**Tabela 4:** Seções de concreto analisadas

| Seção | Armadura         | $A_s$<br>(cm <sup>2</sup> ) | b<br>(cm) | h<br>(cm) | $\rho$ (%) | d' (cm) | $x/(h-d')$ | $S_d = M_{rd}$<br>(kN.m) |
|-------|------------------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|---------|------------|--------------------------|
| S1    | 3 $\Phi$ 8 mm    | 1,5                         | 20        | 50        | 0,15       | 3,9     | 0,058      | 29,36                    |
| S2    | 4 $\Phi$ 10 mm   | 3,2                         | 20        | 50        | 0,32       | 4,0     | 0,125      | 60,81                    |
| S3    | 4 $\Phi$ 12.5 mm | 5,0                         | 20        | 50        | 0,50       | 4,1     | 0,195      | 92,00                    |
| S4    | 4 $\Phi$ 16 mm   | 8,0                         | 20        | 50        | 0,80       | 4,3     | 0,313      | 139,03                   |
| S5    | 3 $\Phi$ 20 mm   | 9,45                        | 20        | 50        | 0,95       | 4,5     | 0,327      | 159,14                   |

FONTE: (Santos, Stucchi e Beck, 2014)

O valor das cargas características permanente e variável são, respectivamente.

$$G_k = \frac{S_d}{\gamma_g + \gamma_q \cdot \chi / (1 - \chi)} \quad 42$$

$$Q_k = \frac{S_d}{\gamma_g \cdot (1 - \chi) / \chi + \gamma_q} \quad 43$$

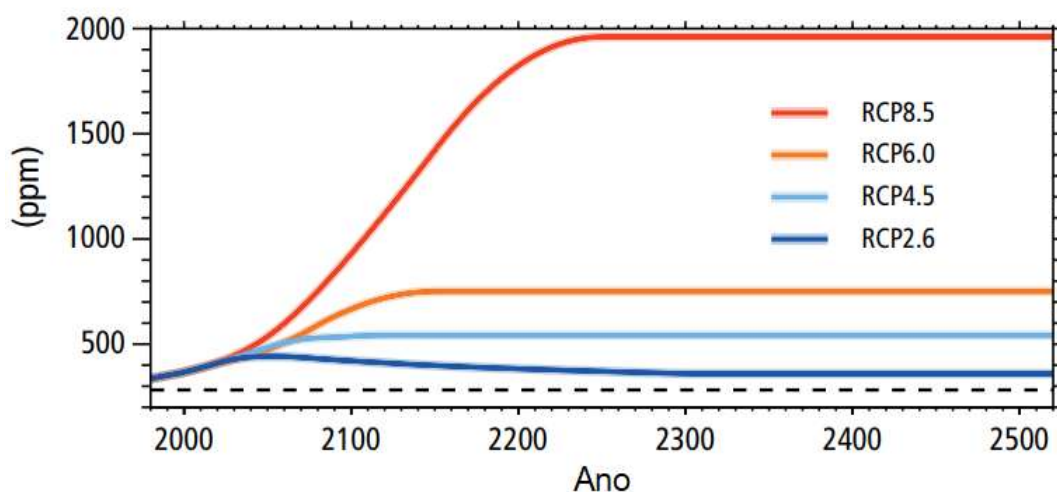
Nestas equações a variável  $\chi$  representa o fator de carregamento. De acordo com (Santos, Stucchi e Beck, 2014), o caso usual de  $\chi$  para vigas de concreto armado é entre 0,1 a 0,6 para vigas dimensionadas pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Este artigo utiliza essa faixa na análise de confiabilidade.  $\gamma_g$  e  $\gamma_q$  são coeficientes de segurança parciais (1,40 neste artigo).  $S_d$  é a carga externa total. Neste trabalho,  $S_d$  é igual a um  $M_{rd}$ .

De acordo com o apresentado na seção 2.3, para a avaliação do momento resistente de uma peça de concreto sujeita à ação da carbonatação, são necessários dados de temperatura, umidade relativa e concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera, de modo a identificar o avanço da frente corrosiva e a possível deterioração das armaduras. Para a avaliação da concentração de CO<sub>2</sub>, foi utilizado o modelo do *Representative Concentration Pathway*

(RCP) IPCC (2014). O RCP pode ser definido como o conjunto de cenários climáticos que descrevem diferentes trajetórias de concentração de gases de efeito estufa na atmosfera, utilizado em estudos de mudanças climáticas e projeções futuras. Tais cenários foram desenvolvidos para facilitar a modelagem e a análise de impactos ambientais, considerando diferentes políticas e trajetórias de concentração de gases.

Neste trabalho, foi utilizada a curva do cenário RCP 8.5 (cenário mais pessimista) como base para interpolação dos dados, resultando em uma equação capaz de estimar os valores de concentração de CO<sub>2</sub> para diferentes anos, conforme apresentado na Figura 11.

**Figura 11:** Cenários de evolução da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera.



FONTE: Adaptado de IPCC (2014)

Tal análise se fez necessária para que, em uma análise variante no tempo, os valores relativos a esta variável fossem alterados conforme a curva de projeção do cenário escolhido. A utilização dos diferentes cenários do RCP foi utilizada em trabalhos como (Peng e Stewart, 2016b). A concentração anual de CO<sub>2</sub> na atmosfera é dada pela Equação 44. Essa equação pode ser utilizada para modelagens a partir do ano 2000.

$$CCO_2 \text{ (ppm)} = 0.07278 t_{aux}^2 + 1.86385 t_{aux} + 340.93383 \quad 44$$

$$t_{aux} = \text{Ano de análise} - 2000 \quad 45$$

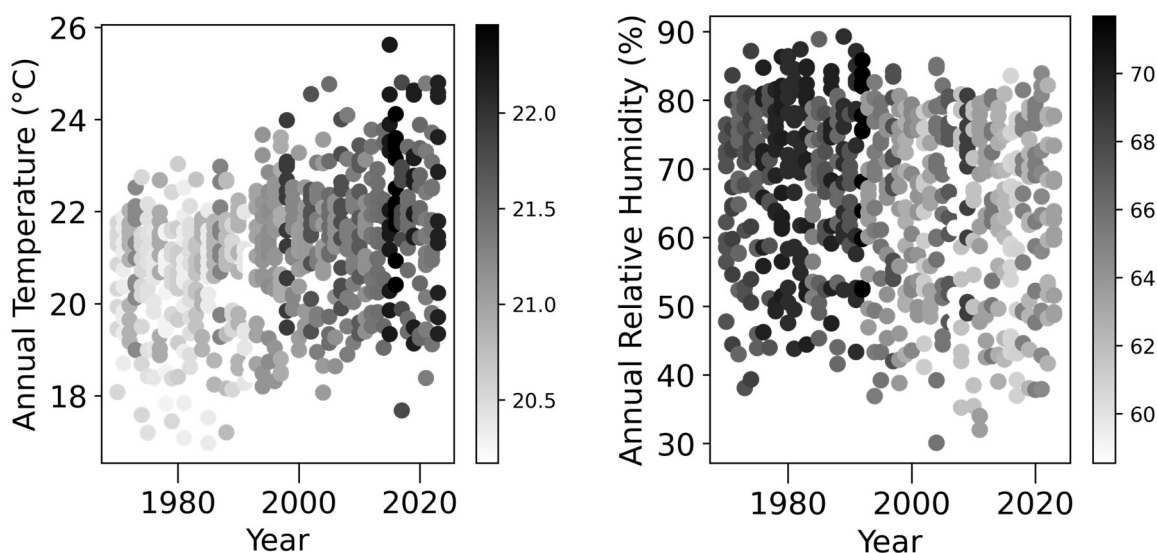
Os outros dados relativos à análise de corrosão por carbonatação são derivados da Tabela 1 e para esse trabalho foram empregadas as constantes para o cimento CPIII ( $k_c =$

30,50,  $k_{fc} = 1,70$ ,  $k_{ad} = 0,32$ ,  $k_{CO2} = 15,50$ ,  $k_{UR} = 1300$ ) e a condição de exposição como “interna protegida da chuva” com  $k_{ce} = 1,30$ .

### 3.1. Dados de temperatura e umidade relativa

Para a obtenção dos valores referentes aos parâmetros de distribuição de temperatura e umidade relativa, foi utilizada a base de dados fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Tais dados foram necessários para definir os cenários climáticos da cidade de Brasília-DF, escolhida como localização da estrutura em estudo, através do acesso à série histórica disponível no site, abrangendo o período de janeiro de 1970 a dezembro de 2023. A Figura 12 mostra o conjunto de dados oriundo da análise realizada.

**Figura 12:** Conjunto de dados de temperatura e umidade relativa, respectivamente.



De posse dos dados obtidos a partir da base do INMET e após a realização dos testes de aderência do tipo Kolmogorov-Smirnov, foi possível identificar as distribuições estatísticas mais adequadas para os parâmetros de temperatura e umidade relativa, conforme apresentado na Tabela 5.

Na Tabela 5, é possível identificar que o *Residual Square Sum* (RSS) da distribuição normal e da distribuição *t*-student apresentam valores próximos para a temperatura. No entanto, a análise do valor *p* tende a definir a distribuição *t*-student como a que melhor se ajusta aos dados. Para dados nos quais a hipótese nula não pode ser rejeitada para a distribuição normal, associada ao uso de valores médios de uma determinada variável, é comum que a distribuição *t*-student esteja entre as principais.

Neste estudo, com base na semelhança das distribuições, a variável temperatura foi considerada como sendo uma distribuição normal. Desta forma, através da análise realizada, as distribuições com melhores ajustes foram a normal para os dados de temperatura ( $\mu = 21.10^{\circ}\text{C}$ ,  $\sigma = 0.56^{\circ}\text{C}$ ) e Beta para os dados de umidade relativa ( $\mu = 57.25\%$ ,  $\sigma = 14.96\%$ ).

**Tabela 5:** Estatísticas do teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov.

| <i>Ranking</i> | <b>Distribuição</b> | <b>RSS</b>      | <i>p</i> -valor |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| <b>1</b>       | <b>Normal</b>       | <b>0.140332</b> | <b>0.6716</b>   |
| 2              | T-student           | 0.140332        | 0.6717          |
| 3              | Genextreme          | 0.1695610       | 0.6048          |
| 4              | Lognormal           | 0.181170        | 0.5932          |

(a) Temperatura

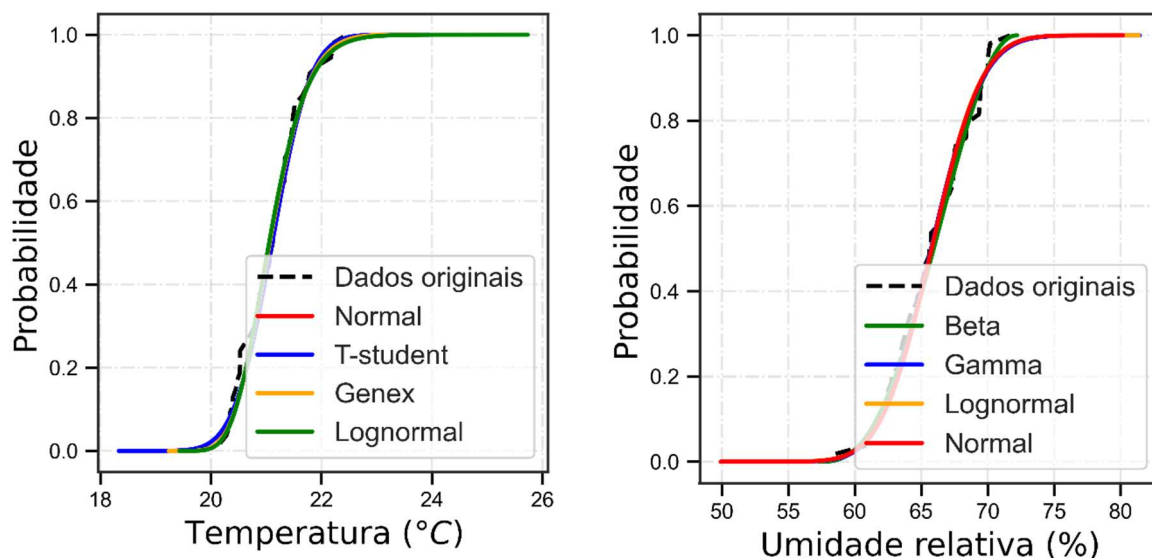
| <i>Ranking</i> | <b>Distribuição</b> | <b>RSS</b>      | <i>p</i> -valor |
|----------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| <b>1</b>       | <b>Beta</b>         | <b>0.001082</b> | <b>0.9054</b>   |
| 2              | Gamma               | 0.00169         | 0.8025          |
| 3              | Lognormal           | 0.00184         | 0.7744          |
| 4              | Normal              | 0.00184         | 0.7743          |

(b) Umidade Relativa

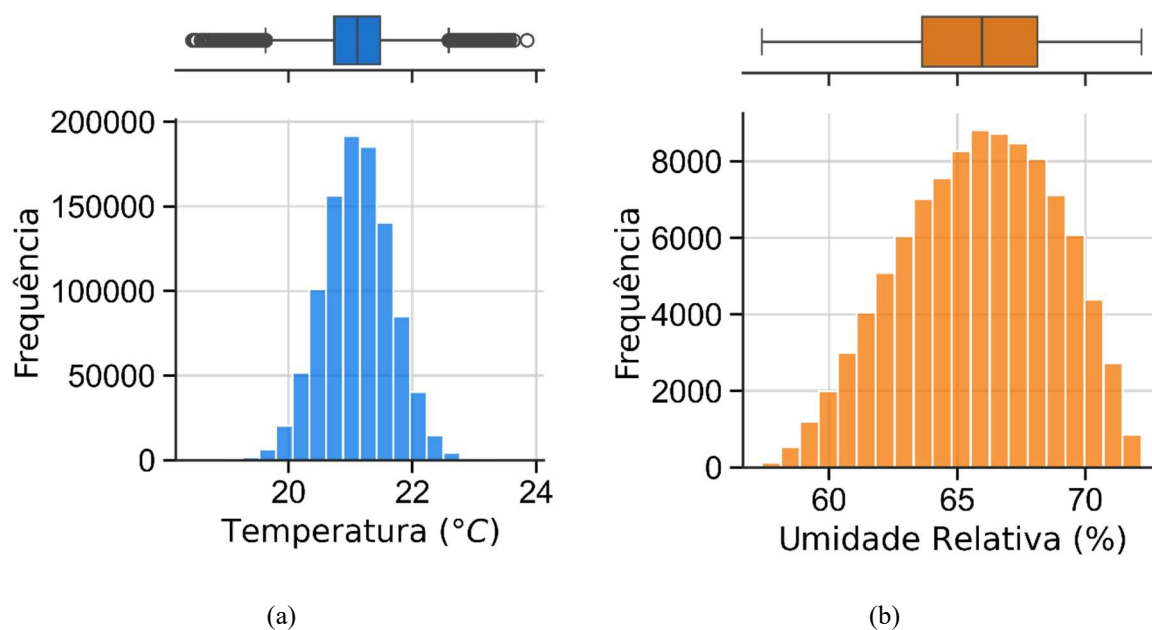
A

Figura 14 mostra os histogramas referentes aos dados de temperatura e umidade relativa utilizados para a determinação das variáveis aleatórias deste trabalho.

**Figura 13:** Distribuições cumulativas de temperatura e umidade relativa.



**Figura 14:** Histograma (a) Temperatura e (b) Umidade relativa.



### 3.2. Variáveis aleatórias e simulação de Monte Carlo

As variáveis aleatórias e os modelos probabilísticos estão listados na Tabela 6. As demais variáveis do problema do projeto de vigas ( $b$ ,  $d$ ,  $\alpha_c$ ,  $\lambda$ , and  $A_s$ ) foram consideradas como determinísticas.

Neste estudo, o modelo que representa a taxa de corrosão leva em consideração a classe de exposição da estrutura, em termos de umidade relativa, por meio da variável

térmica  $icorr_{20}$ . O valor de  $icorr_{20}$  foi definido com base no ambiente em que o elemento estrutural em análise está localizado, conforme apresentado na Tabela 3. Assim, de acordo com os dados utilizados, foi adotada a classe de exposição C4 devido às variações de umidade relativa presentes na região geográfica (Brasília-DF), que afetam diretamente o elemento estudado.

**Tabela 6:** Parâmetros das variáveis aleatórias.

| <i>Nome</i>                                    | <i>Notação</i> | <i>Tipo de distribuição</i> | <i>Tipo de distribuição</i> | <i>Desvio padrão</i>                      | <i>Referência</i>                                     |
|--|----------------|-----------------------------|-----------------------------|---|---|
| Carga permanente                               | D (kN.m)       | Normal                      | 1,06Dk                      | 0,12                                      | [(Pereira Junior et al., 2023), (Costa et al., 2023)] |
| Carga variável <sup>1</sup>                    | L (kN.m)       | Gumbel                      | 0,21Lk                      | 0,76                                      | [(Costa et al., 2023)]                                |
| Resistência característica do concreto         | $f_{ck}$ (MPa) | Normal                      | 1,22fc                      | 0,15                                      | [(Pereira Junior et al., 2023), (Costa et al., 2023)] |
| Resistência característica do aço              | $f_{yk}$ (MPa) | Normal                      | 1,22fy                      | 0,04                                      | [(Pereira Junior et al., 2023), (Costa et al., 2023)] |
| Umidade Relativa                               | UR (%)         | Beta                        | 57,25                       | Parâmetros de forma<br>a = 2,94, b = 2,21 | Presente trabalho                                     |
| Temperatura                                    | T (°C)         | Normal                      | 21,10                       | 0,03                                      | Presente trabalho                                     |
| Taxa de corrosão ( $icorr_{20}$ ) <sup>2</sup> | $\mu A/cm^2$   | Lognormal                   | 0,431                       | 0,259                                     | [(Peng and Stewart, 2016b)]                           |
| Erro de modelo de resistência                  | $E_r$          | Lognormal                   | 1,00                        | 0,05                                      | (Santos et al., 2014)                                 |
| Erro de modelo de solitação                    | $E_s$          | Lognormal                   | 1,00                        | 0,05                                      | (Santos et al., 2014)                                 |

<sup>1</sup>máxima anual

<sup>2</sup>corresponde as estatísticas da classe 4 da Tabela 3

Como apresentado na Figura 1, o processo de redução da capacidade resistente de um elemento estrutural ocorre principalmente devido a sua exposição a um ambiente agressivo. No caso deste trabalho, adotou-se a hipótese de que a estrutura estará sujeita a uma condição de carbonatação desde sua implantação.

Após a instauração da patologia no sistema estrutural em estudo, será necessário avaliar o momento fletor resistente conforme descrito na seção 2.3.3 deste trabalho. Nesta análise, as variáveis envolvidas na formulação serão tratadas como determinísticas, não havendo, portanto, variação probabilística em seus valores. A avaliação da segurança do elemento será dada por análise de confiabilidade dos elementos onde será determinada a probabilidade de falha e o índice de confiabilidade ( $\beta$ ).

Neste trabalho será utilizada uma equação que delimitará uma condição de estado limite em que o momento atuante ( $M_{sd}$ ) na peça ultrapasse o momento resistente ( $M_{d,res}$ ) definido através do modelo apresentado na seção 2.3.3, conforme apresentado na Equação 46. No entanto, tal modelo sofre variação de valores de acordo com o avanço da corrosão, processo que afeta a área de aço das armaduras, resultando em uma redução da capacidade resistente da estrutura ao longo do tempo. As variáveis  $E_r$  e  $E_s$  representam os erros de modelo das equações de resistência e sollicitação, respectivamente.

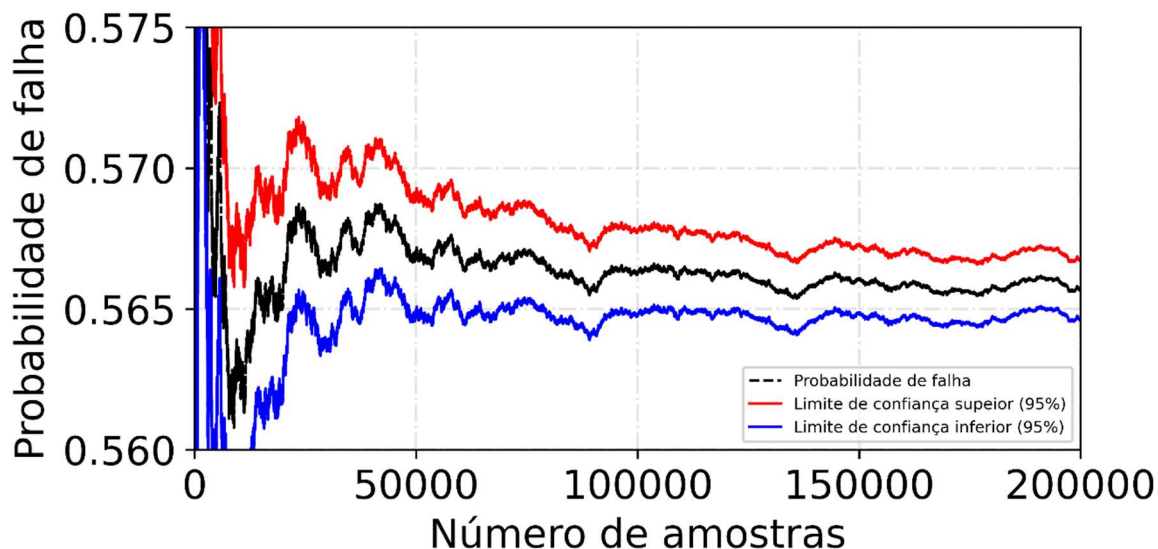
$$g = E_r \cdot M_{d,res} - E_s \cdot M_{sd} \leq 0$$

$$\text{Se } y(t) < cob \rightarrow M_{d,res} = \text{Equação 23} \quad \text{Sem corrosão} \quad 46$$

$$\text{Se } y(t) \geq cob \rightarrow M_{d,res} = \text{Equação 28} \quad \text{Com corrosão}$$

Para avaliar a precisão dos resultados obtidos nas análises de Monte Carlo, foi realizado um teste de convergência (ver Figura 15). Esse procedimento visa verificar se o número de amostras utilizado na simulação é suficiente para garantir a estabilidade dos resultados, minimizando o impacto de flutuações aleatórias inerentes ao processo de amostragem. Conforme visualizado na Figura 15 existe uma redução da variabilidade dos resultados da probabilidade de falha após 50.000 amostras, portanto adotou-se para essa pesquisa um total de 100.000 amostras.

**Figura 15:** Gráfico de convergência da probabilidade de falha.



### 3.3. Ferramenta de análise de confiabilidade no tempo

A geração das amostras das variáveis aleatórias, com análise ao longo do tempo, foi realizada através de uma função desenvolvida em linguagem de programação Python. Esta função foi projetada para lidar tanto com variáveis que não possuem variação no tempo quanto para variáveis estocásticas, que seguem diferentes distribuições probabilísticas. Na análise temporal, a função permite que essas variáveis sejam amostradas em diferentes instantes (passos de tempo), considerando o comportamento dinâmico de cada uma ao longo do tempo. O código foi parametrizado para gerar o número adequado de amostras com base nas características de cada variável, assegurando que as flutuações temporais e as incertezas associadas a essas variáveis fossem adequadamente incorporadas nas simulações. Desta forma, a função automatiza e otimiza o processo de geração das amostras, facilitando a análise dos resultados em diferentes cenários temporais.

Com os conjuntos de amostras das variáveis aleatórias de entrada do problema proposto gerados pela ferramenta supracitada, parte-se para o processamento dos dados e modelagem.

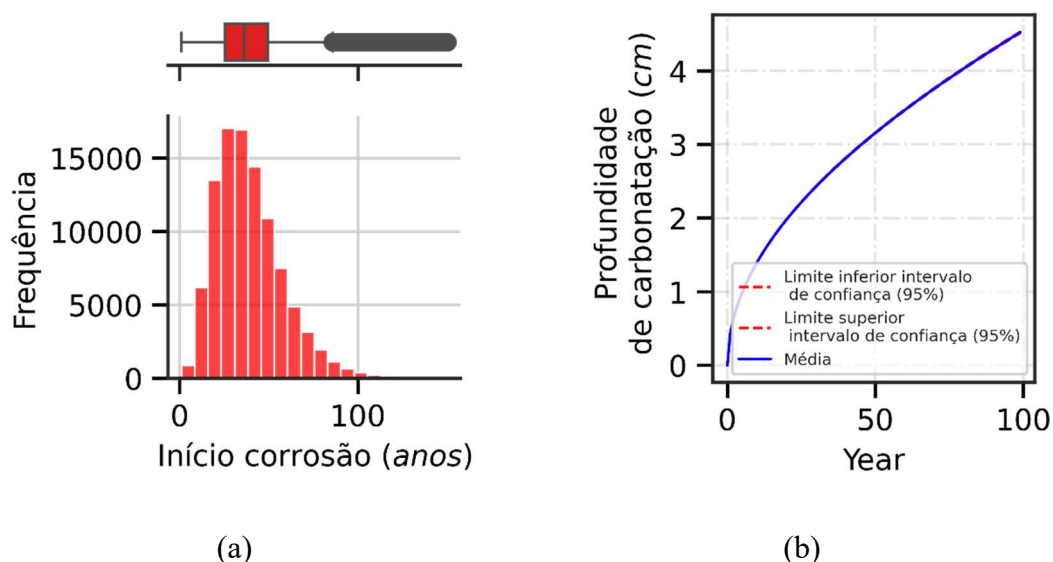
A ferramenta desenvolvida para análise denomina-se PAREpy e está disponível para a comunidade através do site: <https://wmpjrufg.github.io/PAREPY/>. A ferramenta pode ser usada em qualquer ambiente Python e conta com exemplos didáticos para que

todos possam empregar a mesma. A mesma conta com processamento paralelo para reduzir o tempo de processamento dos problemas.

#### 4- RESULTADOS

A primeira discussão trata do início do processo de corrosão por carbonatação na peça. O algoritmo de Monte Carlo foi empregado somente sobre o modelo de propagação da frente de carbonatação, expresso pela Equação 22. Na Figura 16 apresenta-se a distribuição dos valores de idade inicial da corrosão e a profundidade de carbonatação em função da idade analisada. Para a construção da curva da Figura 16b foram empregadas as variáveis aleatórias descritas na Tabela 6.

**Figura 16:** Histograma com início do processo corrosivo (a) e evolução da profundidade de carbonatação (b)



O histograma apresentado na Figura 16a ilustra a distribuição da frequência de início da corrosão ao longo dos anos nas vigas de concreto armado analisadas. Observa-se uma distribuição assimétrica, com uma maior concentração de eventos de início de corrosão nos primeiros anos após a exposição ao ambiente. O valor mais frequente da distribuição ocorre entre 30 e 40 anos, indicando que, conforme o modelo utilizado, a maioria das vigas inicia o processo de corrosão por carbonatação dentro desse intervalo de tempo. No caso deste conjunto de dados o valor médio é de 39 anos para o início do processo de corrosão por carbonatação.

A Figura 16b mostra a evolução da profundidade de carbonatação de acordo com os dados do modelo considerado. Nela, os valores das variáveis relativas à resistência do concreto a compressão e da umidade relativa foram tomados como as médias anuais. A taxa de progressão da carbonatação é mais acentuada nos primeiros anos de vida útil do

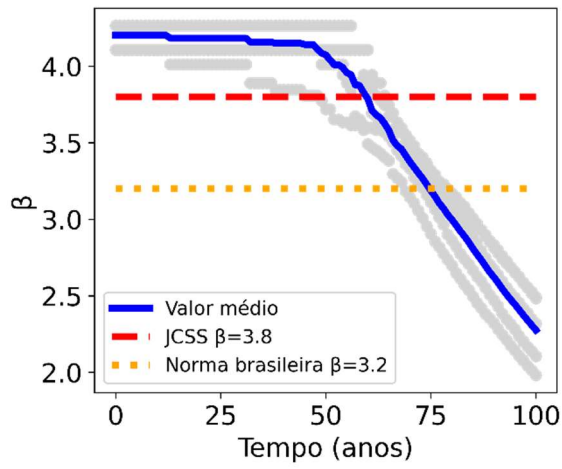
elemento estrutural. Isto pode ocorrer devido à maior concentração de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) nas camadas superficiais do concreto. Nas fases iniciais, o  $\text{CO}_2$  difunde-se rapidamente para o interior do elemento, reagindo com o hidróxido de cálcio presente no concreto, formando carbonato de cálcio e diminuindo o pH da região afetada. Esse processo é mais intenso no início porque a concentração de  $\text{CO}_2$  disponível na superfície da viga é maior, facilitando a penetração rápida da carbonatação nas camadas iniciais do material.

À medida que a frente de carbonatação avança para camadas mais profundas, a concentração de  $\text{CO}_2$  nas áreas já carbonatadas diminui, retardando o processo de difusão e reação. Essa redução na taxa de progressão ocorre porque a carbonatação cria uma barreira parcial que dificulta a penetração adicional de  $\text{CO}_2$ , tornando o concreto interno menos acessível ao gás. Como resultado, o avanço da frente de carbonatação torna-se progressivamente mais lento ao longo do tempo, reduzindo a taxa de deterioração da viga de concreto armado.

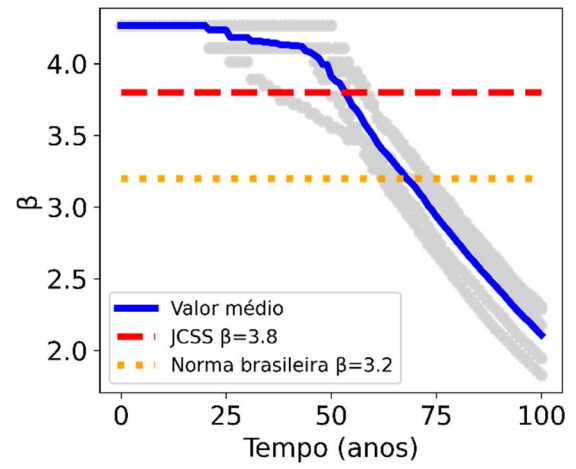
#### 4.1. Abordagem de confiabilidade no tempo

Para a determinação do índice de confiabilidade ao longo do tempo, as seções transversais com diferentes taxas de armadura, conforme apresentado na Tabela 4, foram avaliadas. As variáveis aleatórias e constantes seguem a Tabela 6. Os resultados de confiabilidade no tempo para as vigas com cobertura de 2,5 cm são apresentados na Figura 17.

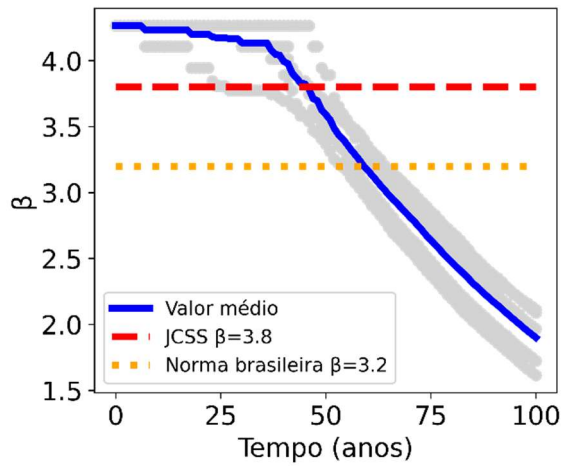
**Figura 17:** Evolução de  $\beta$  ao longo do tempo para as seções analisadas.



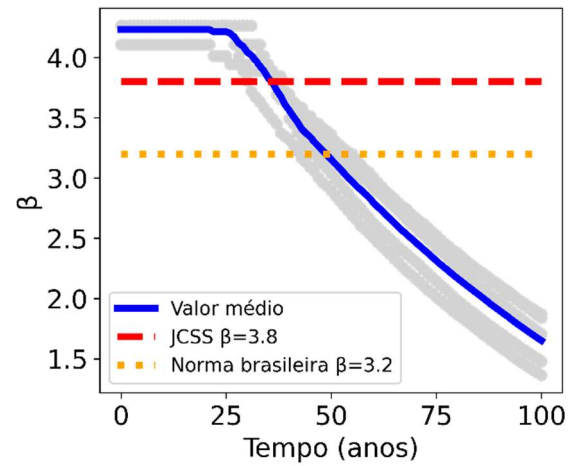
(a) S1



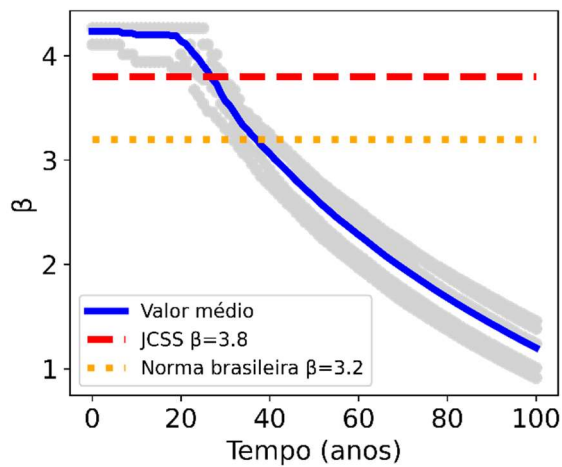
(b) S2



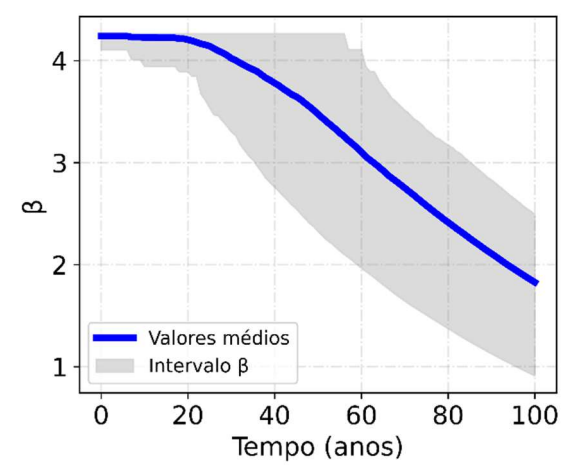
(c) S3



(d) S4



(e) S5

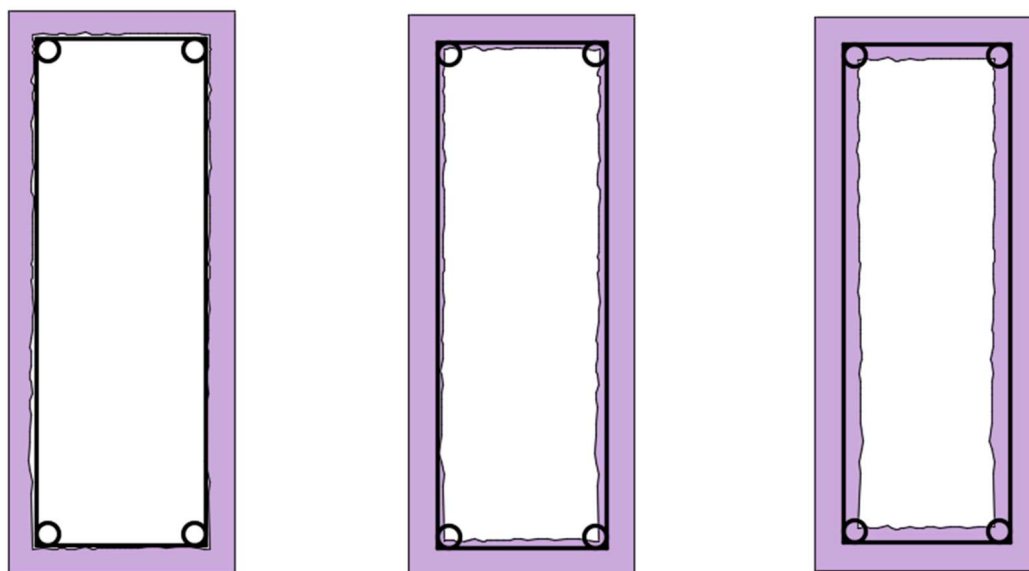


(f) Intervalo de  $\beta$  para todas as seções

Tomando como referência o índice  $\beta$  utilizado em estudos de calibração da norma brasileira de projetos de concreto, observou-se que a Figura 17a, Figura 17b, e Figura 17c apresentam um valor médio de confiabilidade superior ao valor de referência ( $\beta = 3,2$ ) até a idade de 50 anos. A Figura 17f apresenta a comparação média de todas as vigas utilizadas nesta simulação. Considerando os primeiros 10 anos de análise, conforme mostrado na Figura 17f, foi possível notar que o valor do índice de confiabilidade apresentou um desvio padrão de 0,005, com valor médio de 4,23 aos dez anos. A partir dos 39 anos, foi possível detectar um valor médio de  $\beta$  igual a 3,83. Aos 50 e 75 anos, esses valores caem para a ordem de 3,51 (8,35% menor do que aos 39 anos) e 2,61 (32% menor do que aos 39 anos), evidenciando o efeito da corrosão já atuando na estrutura.

Na Figura 18 é apresentado como a carbonatação afeta o material da estrutura, destacando o perfil e a quantidade de concreto impactado carbonatado. Os valores utilizados nessa análise são as médias da simulação apresentadas na Figura 17f. Na Figura 18c, nota-se que, sem intervenções de manutenção, o índice  $\beta$  apresenta uma queda de 19% em relação ao valor de referência da norma brasileira. Além disso, a área de concreto deteriorada aumenta em 69% quando comparada à condição da estrutura com 25 anos de idade.

**Figura 18:** Evolução da frente de carbonatação na seção transversal da viga



25 anos:  $\beta = 4.15$ , concreto carbonatado =  $0,03 \text{ m}^2$

(a)

50 anos:  $\beta = 3.51$ , concreto carbonatado =  $0,04 \text{ m}^2$

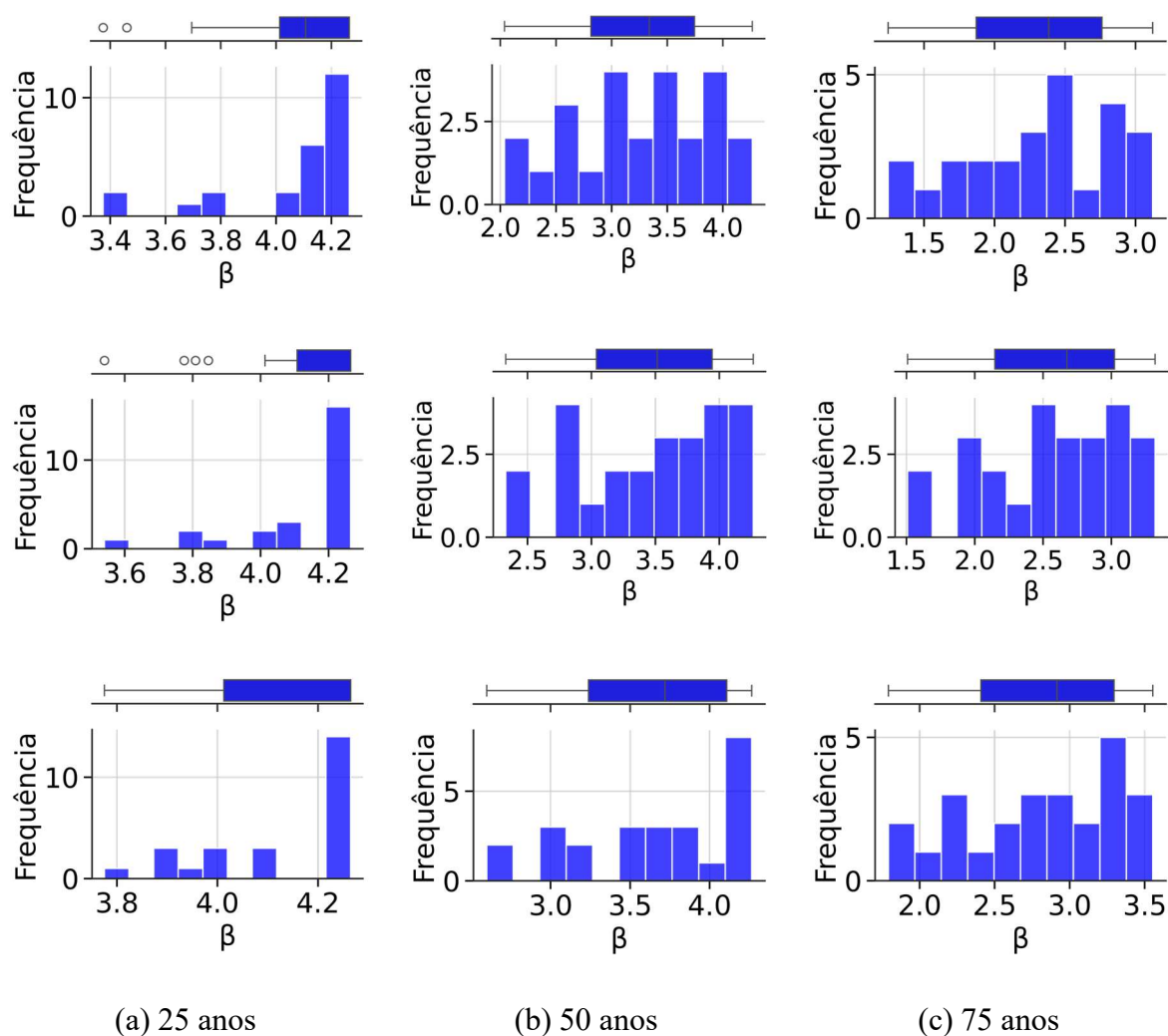
(b)

75 anos:  $\beta = 2.61$ , concreto carbonatado =  $0,05 \text{ m}^2$

(c)

Na Figura 19 apresenta-se uma análise probabilística do índice beta em função da idade do elemento estrutural para cada um dos diferentes valores de cobrimentos analisados de 2, 2,5 e 3,0 cm nas idades de 25, 50 e 75 anos.

**Figura 19:** Frequência dos valores de beta para os cobrimentos analisados em diferentes períodos



Para um cobrimento de 20 cm, aos 25 anos a chance de o índice  $\beta$  ser inferior a 3,8 é de 20%, indicando que a maioria das vigas ainda mantém uma boa confiabilidade. Aos 50 anos, essa chance aumenta significativamente para 76%, refletindo o impacto do tempo e da corrosão no desempenho estrutural das vigas. Já aos 75 anos, a chance de  $\beta$  estar abaixo de 3.8 atinge 100%, evidenciando um estágio avançado de deterioração e a necessidade crítica de intervenções para evitar falhas estruturais.

Para um cobrimento de 25 cm, a chance de o índice  $\beta$  ser inferior a 3.8 é de 8% aos 25 anos, 68% aos 50 anos e 100% aos 75 anos.

Para um cobrimento de 30 cm, a chance de o índice  $\beta$  ser inferior a 3.8 aos 25 anos é de apenas 4%, demonstrando uma menor probabilidade de redução na confiabilidade nesse período inicial, em comparação com os valores de cobrimento menores, como 20 cm e 25 cm, que apresentam 20% e 8% de chance, respectivamente. Aos 50 anos, essa probabilidade aumenta para 60%, um valor significativamente menor do que para os cobrimentos de 20 cm (76%) e 25 cm (68%), o que evidencia que um maior cobrimento proporciona uma proteção mais duradoura contra a corrosão e seus efeitos na estrutura. Aos 75 anos, a probabilidade de o índice  $\beta$  estar abaixo de 3.8 atinge 100% para todos os valores de cobrimento, sugerindo que, a longo prazo, cobrimentos maiores não impedem a degradação. Tais resultados reforçam a importância do controle das tolerâncias no cobrimento de concreto durante a execução, uma vez que variações na espessura do cobrimento influenciam diretamente o desempenho a longo prazo, especialmente em ambientes agressivos, afetando o tempo até o início da corrosão e a evolução da deterioração.

## 5- CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados obtidos, este estudo demonstrou que o índice de confiabilidade de vigas de concreto armado, expostas a condições climáticas que favorecem a carbonatação, pode ser efetivamente avaliado ao longo do tempo utilizando uma abordagem de simulação estocástica como o método de Monte Carlo (MCS). O método proposto permitiu a criação de diversos cenários probabilísticos, levando em consideração variáveis estruturais e ambientais, como as taxas de carregamento, a resistência do material e as condições climáticas da região. Essa combinação de técnicas se mostrou eficiente para prever o avanço da frente de carbonatação e identificar quais seus efeitos na corrosão das armaduras.

Os resultados indicaram que vigas com taxas de armadura entre 0,15% e 0,50% tendem a manter um índice de confiabilidade acima dos limites normativos exigidos para uma vida útil de 50 anos. Entretanto, verificou-se que o avanço da carbonatação e a corrosão subsequente são mais intensos nos primeiros 30 anos da estrutura, período em que a perda de confiabilidade é mais acentuada. Esse fato reforça a importância de adotar medidas preventivas, como a adequação da espessura do cobrimento, para mitigar os efeitos da corrosão precoce e prolongar a vida útil das estruturas.

Assim, a pesquisa contribui significativamente para o entendimento da deterioração de estruturas de concreto armado devido à carbonatação, destacando a relevância da aplicação de análises probabilísticas no planejamento da durabilidade e segurança das obras. Além disso, o estudo propõe que futuras investigações considerem outros fatores, como a variação dos materiais e novas técnicas de proteção das armaduras, para garantir a confiabilidade estrutural ao longo do tempo em diferentes condições climáticas.

## 6- REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- ALLAM, I. M. *et al.* Influence of atmospheric corrosion on the mechanical properties of reinforcing steel. **Construction and Building Materials**, v. 8, n. 1, p. 35–41, jan. 1994.
- AZAD, A. K.; AHMAD, S.; AL-GOHI, B. H. A. Flexural strength of corroded reinforced concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 62, n. 6, p. 405–414, jun. 2010.
- AZAD, A. K.; AHMAD, S.; AZHER, S. A. Residual Strength of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. **ACI Materials Journal**, v. 104, n. 1, 2007.
- BASTIDAS-ARTEAGA, E. *et al.* Influence of global warming on durability of corroding RC structures: A probabilistic approach. **Engineering Structures**, v. 51, p. 259–266, jun. 2013.
- BECK, A. T. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. São Carlos: GEN LTC, 2019a.
- \_\_\_\_\_. **Confiabilidade e Segurança das Estruturas**. São Carlos: GEN LTC, 2019b.
- BENÍTEZ, P. *et al.* A dynamic multi-criteria decision-making model for the maintenance planning of reinforced concrete structures. **Journal of Building Engineering**, v. 27, p. 100971, jan. 2020.
- BERTOLINI, L. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 4, n. 2, p. 123–137, abr. 2008.
- BHARGAVA, K. *et al.* Corrosion-induced bond strength degradation in reinforced concrete—Analytical and empirical models. **Nuclear Engineering and Design**, v. 237, n. 11, p. 1140–1157, jun. 2007.
- CAIRNS, J. *et al.* Mechanical properties of corrosion-damaged reinforcement. **ACI Materials Journal**, v. 102, p. 256–264, 1 jul. 2005.
- CASTEL, A.; FRANÇOIS, R.; ARLIGUIE, G. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 1: Experimental study of corroded beams. **Materials and Structures**, v. 33, n. 9, p. 539–544, nov. 2000a.
- \_\_\_\_\_. Mechanical behaviour of corroded reinforced concrete beams—Part 2: Bond and notch effects. **Materials and Structures**, v. 33, n. 9, p. 545–551, nov. 2000b.
- CASTRO, L. A. DE. **Análise de segurança no projeto de estruturas: Método dos estados limites**. São Carlos: Universidade de São Paulo, 1997.
- CHEN, H.-P.; NEPAL, J. Analytical Model for Residual Bond Strength of Corroded Reinforcement in Concrete Structures. **Journal of Engineering Mechanics**, v. 142, n. 2, p. 04015079, fev. 2016.
- \_\_\_\_\_. Modeling Residual Flexural Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, v. 115, n. 6, nov. 2018.
- CHUNG, L. *et al.* Correction factor suggestion for ACI development length provisions based on flexural testing of RC slabs with various levels of corroded reinforcing bars. **Engineering Structures**, v. 26, n. 8, p. 1013–1026, jul. 2004.
- CORTÉS, G. *et al.* Health monitoring of reinforced concrete structures with hysteretic dampers subjected to dynamical loads by means of the acoustic emission energy. **Structural Health Monitoring**, v. 18, n. 5–6, p. 1836–1850, nov. 2019.
- ENRIGHT, M. P.; FRANGOPOL, D. M. Service-Life Prediction of Deteriorating Concrete Bridges. **Journal of Structural Engineering**, v. 124, n. 3, p. 309–317, mar. 1998a.

- \_\_\_\_\_. Probabilistic analysis of resistance degradation of reinforced concrete bridge beams under corrosion. **Engineering Structures**, v. 20, n. 11, p. 960–971, nov. 1998b.
- FENG, Y.-F.; GONG, J.-X.; YANG, X.-Y. Probability Analysis of Corrosion Process of Corroded RC Flexural Member in Marine Environment. **Advances in Structural Engineering**, v. 17, n. 9, p. 1299–1314, set. 2014.
- FRANGOPOL, D. M.; LIN, K.-Y.; ESTES, A. C. Life-Cycle Cost Design of Deteriorating Structures. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 10, p. 1390–1401, out. 1997.
- HAN, S.-H.; PARK, W.-S.; YANG, E.-I. Evaluation of concrete durability due to carbonation in harbor concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 48, p. 1045–1049, nov. 2013.
- HAO, H. *et al.* Towards next generation design of sustainable, durable, multi-hazard resistant, resilient, and smart civil engineering structures. **Engineering Structures**, v. 277, p. 115477, fev. 2023.
- HENRIQUES, A. A. R. **Aplicação de novos conceitos de segurança no dimensionamento do betão estrutural**. Porto: Universidade do Porto, 1998.
- IMAM, A.; ABBAS KAZMI, Z.; DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING, SHUATS (FORMERLY AAI-DU), ALLAHABAD-211007, U.P, INDIA. Modified regression and ANN model for load carrying capacity of corroded reinforced concrete beam. **AIMS Materials Science**, v. 4, n. 5, p. 1140–1164, 2017.
- IMAM, A.; ANIFOWOSE, F.; AZAD, A. K. Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams Using an Adaptive Model Based on ANN. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 9, n. 2, p. 159–172, jun. 2015.
- KAGERMANOV, A.; MARKOVIC, I. An overview on finite element-modelling techniques for structural capacity assessment of corroded reinforced concrete structures. **Structure and Infrastructure Engineering**, p. 1–15, 28 fev. 2022.
- KUMAR SAH, R. *et al.* Temperature independent FBG based displacement sensor for crack detection in civil structures. **Optical Fiber Technology**, v. 74, p. 103137, dez. 2022.
- LORETO, G. *et al.* **Evaluation of corrosion effect in reinforced concrete by chloride exposure**. *Em: SPIE SMART STRUCTURES AND MATERIALS + NONDESTRUCTIVE EVALUATION AND HEALTH MONITORING*. San Diego, California, USA: 24 mar. 2011Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?doi=10.1117/12.880156>>. Acesso em: 26 set. 2023
- MAGNUSSON, C. E.; SMITH, G. H. Electrolytic Corrosion in Reinforced Concrete. **Transactions of the American Institute of Electrical Engineers**, v. XXX, n. 3, p. 2055–2079, jun. 1911.
- MANGAT, P. S.; ELGARF, M. S. Flexural Strength of Concrete Beams with Corroding Reinforcement. **ACI Structural Journal**, v. 96, n. 1, 1999.
- MEDEIROS, E. M. **Análise de confiabilidade dependente do tempo usando modelos de séries temporais**. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2022.
- MLČOCH, J.; SÝKORA, M. Determining Criteria for Assessment of RC Structures Affected by Carbonation-Induced Corrosion. **Key Engineering Materials**, v. 868, p. 3–9, out. 2020.
- O’FLAHERTY, F.; BROWNE, E. A proposal to modify the moment coefficient in Eurocode 2 for predicting the residual strength of corroded reinforced concrete beams. **Engineering Structures**, v. 193, p. 324–339, ago. 2019.
- PAGANI, R. N.; KOVALESKI, J. L.; RESENDE, L. M. Methodi Ordinatio: a proposed methodology to select and rank relevant scientific papers encompassing the impact

- factor, number of citation, and year of publication. **Scientometrics**, v. 105, n. 3, p. 2109–2135, dez. 2015.
- PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Physical and Chemical Characteristics Affecting the Durability of Concrete. **ACI Materials Journal**, v. 88, n. 2, 1991.
- PELLIZZER, G. P. *et al.* Time-Dependent Reliability of Reinforced Concrete Considering Chloride Penetration via Boundary Element Method. **Latin American Journal of Solids and Structures**, v. 17, n. 8, p. e316, 2020.
- PENG, L.; STEWART, M. G. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 4, p. 499–516, 2 abr. 2016a.
- \_\_\_\_\_. Climate change and corrosion damage risks for reinforced concrete infrastructure in China. **Structure and Infrastructure Engineering**, v. 12, n. 4, p. 499–516, 2 abr. 2016b.
- POLAK, M. A. *et al.* Assessment of Reinforced Concrete Highway Bridges. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2550, n. 1, p. 38–45, jan. 2016.
- POSSAN, E.; FELIX, E. F.; THOMAZ, W. A. CO<sub>2</sub> uptake by carbonation of concrete during life cycle of building structures. **Journal of Building Pathology and Rehabilitation**, v. 1, n. 1, p. 7, dez. 2016.
- RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo Method**. 1. ed. [s.l.] Wiley, 2016.
- SANTOS, D. M.; STUCCHI, F. R.; BECK, A. T. Reliability of beams designed in accordance with Brazilian codes. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 7, n. 5, p. 723–746, out. 2014.
- SOLAHUDDIN, B. A.; YAHAYA, F. M. Properties of Concrete and Structural Behaviour of Reinforced Concrete Beam Containing Shredded Waste Paper as An Additive. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v. 17, n. 1, p. 26, 24 abr. 2023.
- SOLTANI, M.; SAFIEY, A.; BRENNAN, A. A State-of-the-Art Review of Bending and Shear Behaviors of Corrosion-Damaged Reinforced Concrete Beams. **ACI Structural Journal**, 1 maio 2019.
- TA, V.-L. *et al.* A new meta-model to calculate carbonation front depth within concrete structures. **Construction and Building Materials**, v. 129, p. 172–181, dez. 2016.
- TUUTTI, K. **Corrosion of steel in concrete**. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- VAL, D. V.; MELCHERS, R. E. Reliability of Deteriorating RC Slab Bridges. **Journal of Structural Engineering**, v. 123, n. 12, p. 1638–1644, dez. 1997.
- VAL, D. V.; STEWART, M. G.; MELCHERS, R. E. Effect of reinforcement corrosion on reliability of highway bridges. **Engineering Structures**, v. 20, n. 11, p. 1010–1019, nov. 1998.
- VU, K. A. T.; STEWART, M. G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. **Structural Safety**, v. 22, n. 4, p. 313–333, jan. 2000.
- VU, N. S.; YU, B.; LI, B. Prediction of strength and drift capacity of corroded reinforced concrete columns. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 304–318, jul. 2016.
- WANG, X.-H.; LIU, X.-L. Simplified Methodology for the Evaluation of the Residual Strength of Corroded Reinforced Concrete Beams. **Journal of Performance of Constructed Facilities**, v. 24, n. 2, p. 108–119, abr. 2010.

WANG, Y.; MUKHERJEE, A.; CASTEL, A. Ultrasonic guided waves for monitoring incipient corrosion in reinforced concrete with top-bar defect. **Cement and Concrete Composites**, v. 141, p. 105116, ago. 2023.

XIA, J.; JIN, W.-L.; LI, L.-Y. Effect of chloride-induced reinforcing steel corrosion on the flexural strength of reinforced concrete beams. **Magazine of Concrete Research**, v. 64, n. 6, p. 471–485, jun. 2012.

YANG, K.-H.; SEO, E.-A.; TAE, S.-H. Carbonation and CO<sub>2</sub> uptake of concrete. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 46, p. 43–52, abr. 2014.

ZHANG, QIAN *et al.* Vinyl acetate polymers modified by siloxane for improving reinforced concrete: Water proofness and anticorrosion. **Construction and Building Materials**, v. 388, p. 131602, jul. 2023.