

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO TEMPO DE INÍCIO DA  
FISSURAÇÃO DEVIDO À CORROSÃO EM CONCRETO  
ARMADO**

**GABRIELA LIMA PEREIRA DE ARAÚJO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ENGENHARIA  
CIVIL**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

BRASÍLIA / DF: JULHO/2019

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**  
**FACULDADE DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E**  
**AMBIENTAL**

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO TEMPO DE INÍCIO DA**  
**FISSURAÇÃO DEVIDO À CORROSÃO EM CONCRETO**  
**ARMADO**

**GABRIELA LIMA PEREIRA DE ARAÚJO**

**ORIENTADOR: FRANCISCO EVANGELISTA JUNIOR**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL EM ESTRUTURAS**

**BRASÍLIA / DF: JULHO/2019**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL**

**ANÁLISE PROBABILÍSTICA DO TEMPO DE INÍCIO DA  
FISSURAÇÃO DEVIDO À CORROSÃO EM CONCRETO  
ARMADO**

**GABRIELA LIMA PEREIRA DE ARAÚJO**

**MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA  
CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS  
NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.**

**APROVADA POR:**

---

**Francisco Evangelista Junior (Universidade de Brasília)  
(ORIENTADOR)**

---

**Claudio Henrique de Almeida Feitosa Pereira, DSc (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR INTERNO)**

---

**Iago Freitas de Almeida, MSc (Universidade de Brasília)  
(EXAMINADOR EXTERNO)**

**DATA: BRASÍLIA/DF, 15 de JULHO de 2019.**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

LIMA PEREIRA DE ARAÚJO, GABRIELA

Análise probabilística do tempo de início da fissuração devido à corrosão em concreto armado, 2019.

xi 73p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Bacharel, Engenharia Civil, 2019)

Monografia de Projeto Final - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental.

1. CORROSÃO

2. VIDA ÚTIL

3. ZONA POROSA

4. PROCESSO ESTOCÁSTICO

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

ARAÚJO, G. L. P. (2019) Análise probabilística do tempo de início da fissuração devido à corrosão em concreto armado. Monografia de Projeto Final. Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF. 86p

## **CESSÃO DE DIREITOS**

NOME DO AUTOR: Gabriela Lima Pereira de Araújo

TÍTULO DA MONOGRAFIA DE PROJETO FINAL: Análise probabilística do tempo de início da fissuração devido à corrosão em concreto armado

GRAU / ANO: Bacharel em Engenharia Civil / 2019

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir cópias desta monografia de Projeto Final e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia de Projeto Final pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

## RESUMO

Em estruturas de concreto armado, a fissuração excessiva do revestimento é um dos principais fatores considerados para determinar o estado limite de serviço da estrutura e a necessidade de intervenção. Com o intuito de contribuir para o estudo da durabilidade de tal sistema construtivo, este trabalho apresenta um modelo probabilístico para a previsão do tempo entre o início da corrosão da armadura ocasionada por cloretos e a fissuração do revestimento. A derivação matemática do modelo utiliza a relação entre a massa de aço degradada pela corrosão e a pressão radial interna no revestimento devida aos produtos da corrosão. Considera-se, para isso, uma zona porosa circundante à armadura que é preenchida pelos produtos de corrosão antes que estes comecem a induzir pressão expansiva sobre o concreto. O concreto circundante à armadura foi modelado como um cilindro maciço cujas paredes possuem espessura igual ao menor revestimento considerado. Assumiu-se que o cilindro de concreto fissuraria quando os esforços tensores na direção circunferencial da sua face se igualassem a resistência à tração do concreto. A pressão radial interna correspondente é então determinada e relacionada à perda de massa de aço. Finalmente, o tempo é introduzido no modelo pela relação da Lei de Faraday entre densidade de corrente e perda de massa de aço, sendo que o valor da densidade da corrente de corrosão neste trabalho é calculada em função do cloreto à profundidade da armadura e da temperatura, para qual utilizou-se as temperaturas médias de Brasília de 1969 a 2019. Com exceção da espessura da armadura, todos os outros parâmetros do modelo são considerados variáveis aleatórias. No modelo se aplica uma simulação de Monte Carlo para prever o tempo de serviço útil de estruturas em concreto armado, além da corrente de corrosão, dano causado ao revestimento e perda de área de aço da seção transversal em função do tempo. Os resultados indicam que o tempo útil de estruturas em concreto armado é prioritariamente dependente do conteúdo de cloreto à profundidade da armadura e apresenta maior variabilidade quanto maior o valor médio conteúdo de cloreto à profundidade da armadura.

## ABSTRACT

Excessive cracking in reinforced concrete structures is one of the main factors in determining service limit state and the need for intervention. As a means of contributing to the research on durability and reliability of said constructive system, this project presents a probabilistic model for the time from corrosion initiation due to chloride penetration and cracking of the concrete cover. The model is mathematically derived from the relationship between the steel mass lost to corrosion and the internal radial pressure on the concrete cover due to corrosion products. This relationship considers the existence of a porous zone along the reinforcement bars, which must be filled with corrosion products before these can begin to exert expansive pressure on the concrete. The concrete involving the reinforcement bars is modeled as a thick walled cylinder, of wall thickness equal to the thinnest concrete cover available. The concrete cylinder is assumed to crack when the tensile stresses in the circumferential direction along its ring section have reached the tensile strength of concrete. The corresponding internal radial pressure is then determined and related to the steel mass loss. Time is introduced into the model by the application of Faraday's Law, which relates corroded steel mass loss and time through corrosion current density. Corrosion current density is calculated as a function of chloride content at depth of reinforcement and temperature, for which the mean monthly temperatures of the city of Brasilia from 1969 to 2019 were used. All parameters except reinforcement diameter are considered random variables. The model applies a Monte Carlo simulation for prediction of service life of reinforced concrete structures, alongside the time-dependent calculation of corrosion current, damage to concrete cover and steel mass loss. Results indicate that service life is predominantly dependent on the chloride content at depth of reinforcement, for which greater mean values also lead to greater variability of service life.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Evangelista, por ter aceitado me orientar ao longo do último ano, ter compartilhado comigo seu tempo e conhecimento e ter me ajudado a concretizar este trabalho. Agradeço à Universidade de Brasília pela sua contribuição inestimável à minha formação acadêmica e pessoal nos últimos anos. Agradeço aos professores que estão tomando seu tempo para ler este trabalho e participar da banca da minha defesa.

Agradeço aos meus pais, Antônio Francisco e Cleonice Maria, pelo amor incondicional e por todo o suporte que me deram ao longo da minha vida, sem o qual eu definitivamente não estaria aqui agora. Destaco o meu agradecimento por no último mês terem me deixado quieta no meu quarto escrevendo, contra seus mais fortes instintos parentais. Obrigada, pai, por ter ficado preocupado com a minha saúde e obrigada, mãe, por ter passeado com a Flora por mim.

Agradeço à minha irmã Raquel pela atenção, carinho e bom senso que sempre posso contar com ela para receber, mesmo que à distância. Agradeço aos meus sobrinhos Antônia e Gabriel por existirem e só por isso me lembrarem que a vida é ótima e complicar o simples é besteira.

Obrigada a todos os meus amigos, de perto e de longe, que me tornaram a pessoa que sou através de seus ensinamentos e das nossas memórias. Dentre eles incluo meus primos, que são a família que não escolhi mas que se pudesse escolher, teria escolhido. Agradeço em particular pela paciência, compreensão e encorajamento que recebi em relação às diversas dificuldades enfrentadas ao longo do curso.

Finalmente, agradeço ao meu namorado Gabriel pelos serviços de edição de imagem, pelo apoio moral, pelo companheirismo e por se fazer de âncora nos momentos em que perco a realidade de vista.

## SUMÁRIO

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1     | Introdução.....  | 1  |
| 1.1   | Relevância do tema.....  | 1  |
| 1.2   | Justificativa.....   | 3  |
| 1.3   | Objetivos.....   | 3  |
| 1.3.1 | Objetivo geral.....  | 4  |
| 1.3.2 | Objetivos específicos.....   | 4  |
| 1.4   | Estrutura do trabalho.....   | 4  |
| 2     | Fundamentação Teórica.....   | 6  |
| 2.1   | Mecanismo de corrosão.....   | 6  |
| 2.2   | Modelos de vida de serviço de estruturas corroídas.....  | 10 |
| 2.3   | Período do início da corrosão à fissuração.....  | 13 |
| 2.3.1 | Pressão interna causada por corrosão.....  | 14 |
| 2.3.2 | Critério para a pressão interna para fissuração.....   | 18 |
| 2.3.3 | Tempo para fissuração.....   | 20 |
| 2.4   | Corrente de corrosão.....  | 21 |
| 3     | Metodologia.....   | 24 |
| 3.1   | Definição do Objeto de Estudo.....   | 25 |
| 3.2   | Corrente de corrosão.....  | 26 |
| 3.3   | Perda de área de aço da seção transversal.....   | 27 |
| 3.4   | Tempo do início da corrosão à fissuração.....  | 28 |
| 3.5   | Dano causado ao revestimento.....  | 29 |
| 3.6   | Influência da espessura da zona porosa e do conteúdo de cloreto sobre a<br>previsão da vida útil.....            | 30 |
| 4     | Resultados.....  | 32 |
| 4.1   | Análise dependente do tempo.....   | 32 |
| 4.2   | Análise da influência da espessura da zona porosa e do conteúdo de cloreto<br>sobre a previsão da vida útil..... | 38 |
| 5     | Conclusão.....   | 60 |
| 5.1   | Propostas para trabalhos futuros.....  | 61 |
|       | Referências bibliográficas.....  | 62 |

## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 - Variáveis aleatórias utilizadas .....  | 26 |
| Tabela 2 - Variações dos parâmetros de $\delta_\theta$ utilizadas para o cálculo de $T_u$ ..... | 31 |
| Tabela 3 - Variações dos parâmetros de $C_{rb}$ utilizadas para o cálculo de $T_u$ .....        | 31 |

## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Deterioração do concreto armado por corrosão .....   | 2  |
| Figura 2: Reações de oxirredução do aço .....  | 8  |
| Figura 3: Volumes relativos do ferro puro e de seus óxidos .....   | 9  |
| Figura 4: Modelo de vida de serviço de Tuutti.....   | 10 |
| Figura 5: Processo de corrosão e fissuração de concreto armado .....   | 11 |
| Figura 6: Modelo de vida de serviço de Weyers .....  | 12 |
| Figura 7: Alterações no diâmetro da armadura devido à corrosão .....   | 15 |
| Figura 8: Modelo do anel de concreto .....   | 19 |
| Figura 9: Densidade de corrente $i$ em função do tempo .....   | 33 |
| Figura 10: Perda da área de aço da seção transversal $\alpha$ em função do tempo .....   | 34 |
| Figura 11: Previsão do tempo do início da corrosão do aço à fissuração do cobrimento, $T_{cr}$ , em função do tempo .....  | 35 |
| Figura 12: Dano acumulado causado ao cobrimento, $D_{am}$ , em função do tempo.....  | 36 |
| Figura 13: Dano acumulado causado ao cobrimento, $D_{am}$ , em função do tempo.....  | 37 |
| Figura 14: Direita: histograma da vida útil $T_u$ . Esquerda: histograma da perda da área de aço ao final de 50 anos.....  | 38 |
| Figura 15: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}}=0,25$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....               | 39 |
| Figura 16: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}}=0,25$ . .....                                   | 39 |
| Figura 17: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} =0,25$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                 | 40 |
| Figura 18: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} =0,25$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ ..... | 40 |
| Figura 19: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} =0,1$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                                   | 41 |
| Figura 20: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} =0,25$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                                  | 41 |
| Figura 21: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} =0,5$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                                   | 42 |
| Figura 22: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,3 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}}=0,1$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                                   | 43 |
| Figura 23: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}}=0,25$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ .....                                  | 43 |
| Figura 24: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,02 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}}=0,35$ . $C_{rb} \sim N$ , $\delta_0 \sim N$ ....                                  | 44 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 25: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$<br>LN, $\delta_0 \sim N$ .....              | 44 |
| Figura 26: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$<br>e $V_{C_{rb}} = 0,25$ .....                                    | 45 |
| Figura 27: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ LN,<br>$\delta_0 \sim N$ .....                 | 45 |
| Figura 28: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e<br>$V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ ..... | 46 |
| Figura 29: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,1$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                      | 46 |
| Figura 30: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                     | 47 |
| Figura 31: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,5$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                      | 47 |
| Figura 32: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,3 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,1$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                     | 48 |
| Figura 33: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                    | 49 |
| Figura 34: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,02 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,35$ . $C_{rb} \sim$ LN, $\delta_0 \sim N$ .....                                   | 49 |
| Figura 35: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ N,<br>$\delta_0 \sim$ LN.....               | 50 |
| Figura 36: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$<br>e $V_{C_{rb}} = 0,25$ .....                                    | 50 |
| Figura 37: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0$<br>$\sim$ LN.....                | 51 |
| Figura 38: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e<br>$V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....  | 51 |
| Figura 39: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,1$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                       | 52 |
| Figura 40: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                      | 52 |
| Figura 41: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}$ e $V_{\delta_0} = 0,5$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                       | 53 |
| Figura 42: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,3 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,1$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                      | 53 |
| Figura 43: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                     | 54 |
| Figura 44: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,02 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,35$ . $C_{rb} \sim$ N, $\delta_0 \sim$ LN.....                                    | 54 |
| Figura 45: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$ e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim$<br>LN, $\delta_0 \sim$ LN.....              | 55 |
| Figura 46: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $\delta_0$ . $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$<br>e $V_{C_{rb}} = 0,25$ .....                                    | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 47: Médias $\mu_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25$ mm e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ ..... | 56 |
| Figura 48: Coeficientes de variação $V_{T_u}$ para diferentes parâmetros de $C_{rb}$ . $\mu_{\delta_0} = 25$ mm e $V_{\delta_0} = 0,25$ .....                         | 56 |
| Figura 49: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 40$ mm e $V_{\delta_0} = 0,1$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ .....                   | 57 |
| Figura 50: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 25$ mm e $V_{\delta_0} = 0,25$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ .....                  | 57 |
| Figura 51: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{\delta_0} = 15$ mm e $V_{\delta_0} = 0,5$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ .....                   | 58 |
| Figura 52: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,3$ kg/m <sup>3</sup> e $V_{C_{rb}} = 0,1$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ ...         | 58 |
| Figura 53: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,1$ kg/m <sup>3</sup> e $V_{C_{rb}} = 0,25$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$ ..         | 59 |
| Figura 54: Histogramas de $T_u$ e $\alpha$ (50 anos). $\mu_{C_{rb}} = 0,02$ kg/m <sup>3</sup> e $V_{C_{rb}} = 0,35$ . $C_{rb} \sim LN$ , $\delta_0 \sim LN$           | 59 |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|              |   |
|--------------|---|
| $A_b$        | Área original da seção transversal da barra de aço              |
| $a_s$        | Área superficial da barra de aço                                |
| $C$          | Espessura do revestimento de concreto                           |
| $C_{rb}$     | Conteúdo de cloreto à profundidade da armadura                  |
| $D$          | Diâmetro da barra de aço  |
| $D_0$        | Diâmetro original da barra de aço                               |
| $D_{am}$     | Dano acumulado causado ao revestimento                          |
| $D_f$        | Diâmetro final da barra de aço                                  |
| $E_c$        | Módulo elástico do concreto                                     |
| $E_{ef}$     | Módulo de elasticidade efetivo                                  |
| $E_v$        | Expectativa de vida   |
| $F$          | Constante de Faraday  |
| $f_{ct}$     | Resistência à tração do concreto                                |
| $I$          | Corrente  |
| $i$          | Densidade de corrente   |
| $k$          | Constante de flexibilidade                                      |
| $M$          | Massa atômica   |
| $m_l$        | Perda percentual da massa de aço                                |
| $M_l$        | Massa de aço consumida por unidade de comprimento               |
| $M_{loss}$   | Massa de aço consumida para produzir $M_r$                      |
| $M_r$        | Massa de ferrugem por unidade de comprimento                    |
| $M_{st}$     | Massa original do aço por unidade de comprimento                |
| $P$          | Pressão radial interna  |
| $P_{cor}$    | Pressão radial devida à corrosão                                |
| $R_c$        | Resistência elétrica do revestimento de concreto                |
| $T$          | Tempo   |
| $T_0$        | Período de início de corrosão                                   |
| $T_{cr}$     | Período de propagação da corrosão                               |
| $T_{free}$   | Período de ocupação da zona porosa pelos produtos da corrosão   |
| $T_{mp}$     | Temperatura   |
| $T_{stress}$ | Período em que os produtos da corrosão geram tensão no concreto |

|       |   |
|-------|---|
| $T_u$ | Período de vida útil                              |
| $V_0$ | Volume original de aço por unidade de comprimento |

# **1 INTRODUÇÃO**

Embora o concreto armado seja o método construtivo predominante na arquitetura e engenharia civil desde o século XX, os benefícios que suas propriedades físico-mecânicas trouxeram à indústria são condicionais à sua durabilidade. A durabilidade do concreto armado, por sua vez, é dependente das propriedades físico-mecânicas de seus componentes e da adesão aço-concreto, comprometidas pela incidência da corrosão sobre a armadura e subsequente fissuração do concreto adjacente. O tempo de início para fissuração do concreto armado devido à corrosão é, portanto, de interesse para a avaliação da segurança e do bom funcionamento da maior parte das estruturas utilizadas na atualidade.

Ao longo deste trabalho é descrito e aplicado um modelo elaborado para a predição da vida de serviço de estruturas em concreto armado, com base em parâmetros estocásticos e temperaturas empíricas. Neste capítulo são apresentados a relevância do tema ao que o modelo se refere, a motivação do estudo realizado e os objetivos que o estudo se propõe a alcançar.

## **1.1 RELEVÂNCIA DO TEMA**

Concreto é o material estrutural mais utilizado pela humanidade. Com o consumo estimado de aproximadamente uma tonelada ao ano por ser humano [1], o único material consumido em maior quantidade no mundo seria a água. A concepção revolucionária do concreto armado na segunda metade do século XIX, que aliou a alta resistência à compressão do concreto com a alta resistência à tração do metal, permitiu a execução de arquiteturas antes inimagináveis a um custo acessível. Entretanto, a durabilidade destas estruturas, especialmente quando expostas a ambientes quimicamente, fisicamente ou mecanicamente agressivos, tem se provado um ponto a ser reconsiderado e aperfeiçoado, em nome principalmente da segurança dos usuários mas também da racionalidade e sustentabilidade do processo construtivo.

A durabilidade do concreto armado é garantida pelas resistências individuais de seus componentes e depende necessariamente da adesão aço-concreto para ser mantida. A corrosão da armadura do concreto armado reduz a área de aço da seção transversal do elemento, reduzindo, portanto, sua força resistente. Ela também diminui a aderência e modifica as propriedades mecânicas do aço, já que o volume dos produtos de corrosão é

muito maior que o volume do metal que corrói [2]. A Figura 1 [3] ilustra a pressão de separação entre armadura e concreto devido à corrosão. As fissuras se abrem devido ao fato que o volume dos produtos de corrosão é muito maior que o volume do metal que corroeu. Por conta disso, durabilidade de estruturas de concreto armado e corrosão de sua armadura tratam-se na realidade da mesma questão.

Além do seu grave impacto na degradação estrutural e consequentes perdas socioeconômicas [4], a corrosão do aço em concreto armado também tem recebido atenção considerável da comunidade científica ao longo dos anos devido à sua natureza extremamente complexa. O processo corrosivo como um todo envolve fenômenos como fluxo de íons através do concreto, reações eletroquímicas, fissuração e plasticidade. Apesar da extensa pesquisa a respeito, a quantificação de diversos parâmetros e mecanismos ainda permanece obscura e mal compreendida, devido a limitações que serão discutidas nos capítulos seguintes.

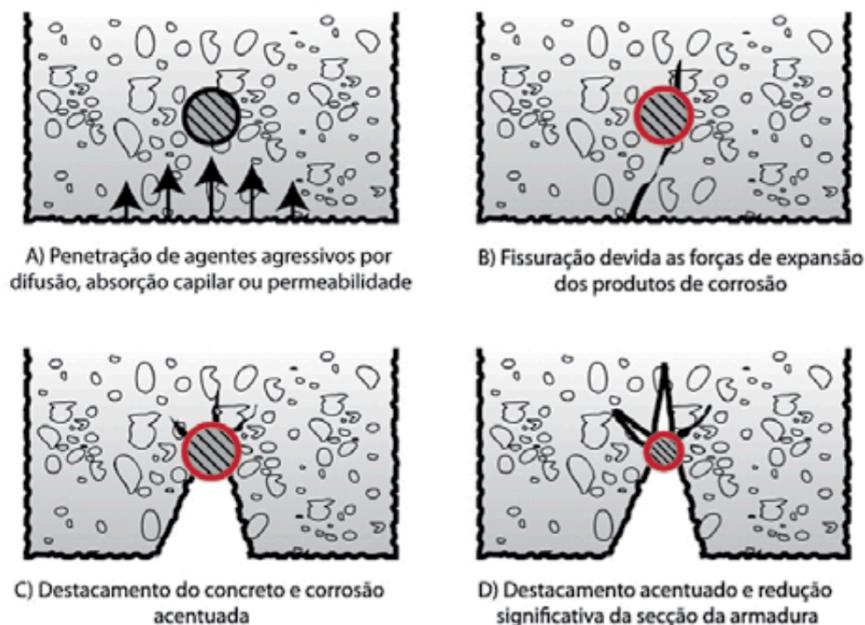


Figura 1: Deterioração do concreto armado por corrosão [3]

Uma das principais dificuldades do estudo da corrosão é a variabilidade e incerteza contidas nos parâmetros envolvidos, muitas vezes simplificados por abordagens determinísticas, como em [5], ou abordados de forma estocástica, como por exemplo [6]. Neste trabalho, limitado apenas à fase secundária da corrosão, i.e.

desconsiderando-se o tempo levado até que a corrosão se inicie, foram combinados um modelo matemático elaborado deterministicamente para o tempo levado do início da corrosão ao tempo de fissuração do concreto [7] com um modelo estocástico para a densidade de corrente de corrosão [8]. No modelo resultante, porém, todos os parâmetros são modelados como variáveis aleatórias, com exceção do diâmetro da armadura de aço de 16 mm, considerado determinístico devido a sua variação comparativamente desprezível.

## **1.2 JUSTIFICATIVA**

Aliada à predição do tempo levado ao início da corrosão, a predição do tempo do início da corrosão à fissuração do cobrimento de concreto é um elemento crucial para a avaliação da vida útil de estruturas em concreto armado sujeitas à corrosão. Apesar do modelo matemático descrito no capítulo seguinte supor algumas simplificações a serem detalhadas a seguir, sua aplicação determinística a dados experimentais evidenciou acurácia de predição [7]. A adição da consideração da incerteza e variabilidade dos parâmetros físicos envolvidos se propõe a tornar o modelo mais realista e confiável. O cálculo do parâmetro densidade de corrente em função de sua relação com a temperatura ambiente e conteúdo de cloreto na superfície da armadura substitui um parâmetro de grande incerteza e dificuldade de medição por dois de maior precisão, especialmente temperatura [9].

Com isso, o modelo resultante busca representar uma forma simplificada porém acurada de se prever o tempo entre o início da corrosão e a fissuração do cobrimento de concreto armado para fins práticos de engenharia. Como fissuras espessas no cobrimento marcam o fim da vida útil de serviço de estruturas, este trabalho foi pensado e produzido como uma ferramenta para auxiliar na predição de durabilidade estrutural e enriquecer o entendimento de questões de segurança e qualidade em estruturas de concreto armado.

## **1.3 OBJETIVOS**

Nesta seção serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos aos quais busca-se atender com a realização deste estudo.

### **1.3.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo geral deste estudo consiste na criação e implementação de um modelo estocástico para previsão do tempo de vida útil entre o início da corrosão e a fissuração do revestimento em estruturas de concreto em função do tempo e temperatura. Em seguida, visa-se avaliar e comparar a influência de dois parâmetros particularmente incertos, o conteúdo de cloreto e a espessura da zona porosa, sobre o intervalo de tempo obtido, como índice do fator de maior sensibilidade a ser considerado e estudado para análises referentes à deterioração devido à corrosão de estruturas em concreto armado.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Aplicando-se ao modelo as temperaturas médias mensais de Brasília dos últimos 50 anos, visa-se:

- Obter histogramas do tempo de vida útil para diferentes médias, desvios e distribuições para o conteúdo de cloreto e para a espessura da zona porosa, considerando-se para isso as temperaturas médias mensais de Brasília dos últimos 50 anos
- Obter uma previsão probabilística da perda da área de aço da armadura devido à corrosão em função do tempo
- Avaliar o impacto da corrosão da armadura sobre a fissuração do revestimento em concreto armado em função do tempo
- Comparar a sensibilidade do tempo de vida útil aos parâmetros conteúdo de cloreto e espessura da zona porosa, analisando o impacto que a adoção de diferentes médias, variações e distribuições para estas causas nas previsões do modelo

## **1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO**

O trabalho é dividido em cinco capítulos, sendo eles: 1) Introdução, 2) Fundamentação Teórica, 3) Metodologia, 4) Resultados e 5) Conclusão. O primeiro capítulo apresenta a contextualização do objeto de estudo, a motivação para a realização do projeto, o que se pretende obter com a realização do projeto e a estrutura da

apresentação do trabalho realizado. O segundo capítulo trata de uma revisão bibliográfica de conceitos essenciais à compreensão do projeto. Estes conceitos são ainda subdivididos em seções referentes a 2.1) Mecanismo da corrosão, 2.2) Modelos de vida de serviço de estruturas corroídas, 2.3) Período do início da corrosão à fissuração e 2.4) Corrente de corrosão. O terceiro capítulo discrimina e explica a elaboração e funcionamento do código produzido para se chegar ao resultados obtidos, nas etapas 3.1) Definição do Objeto de Estudo, 3.2) Corrente de corrosão, 3.3) Perda da área de aço da seção transversal, 3.4) Tempo do início da corrosão à fissuração e 3.5) Dano causado ao revestimento. Estes resultados são compilados no capítulo quatro junto com uma breve análise. Por fim, o capítulo cinco apresenta uma síntese do estudo e suas conclusões, assim como sugestões de aperfeiçoamento deste para trabalhos futuros.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

A fundamentação teórica para o trabalho tratará de explicações sintéticas de conceitos e deduções necessárias à compreensão do modelo descrito no capítulo 3 e aplicado no capítulo 4. Está dividida nas seções: 2.1) Mecanismo de corrosão; 2.2) Modelos de vida de serviço de estruturas corroídas; 2.3) Período de início da corrosão à fissuração; 2.4) Corrente de corrosão.

### **2.1 MECANISMO DE CORROSÃO**

É geralmente aceito pela comunidade acadêmica que o mecanismo de corrosão do aço da armadura de estruturas em concreto armado possui natureza eletroquímica [10]. Em concreto são, o aço é protegido da corrosão por uma fina camada de óxidos que se forma em sua superfície devido à alcalinidade contida nos poros da pasta de cimento hidratado [11]. Quando esta camada passiva é removida ou danificada pela elevação do pH do meio, o aço que ela protegia torna-se passível de corrosão. As duas condições que podem comprometer a camada apassivadora sem previamente danificar o concreto, carbonatação e penetração de cloretos, são portanto as principais causas da corrosão de aço em concreto. Carbonatação é frequente em estruturas antigas e de má execução, principalmente edifícios [9]. É de rara ocorrência em estruturas modernas, como pontes rodoviárias, em que as proporções água/cimento são baixas e a compactação e cura são realizadas conforme as recomendações padronizadas. Apesar de haver outras possíveis causas para a corrosão do concreto (ataque por sulfatos, bactérias, corrosão induzida por corrente induzida, etc.) o modelo estudado neste trabalho se limita ao fenômeno da penetração de cloretos, descrito nesta seção.

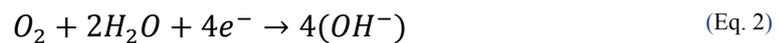
O concreto armado pode conter cloretos por diversas razões. Cloretos podem ser adicionados ao concreto por componentes contaminados pelo uso de  $\text{CaCl}_2$  como acelerador de pega durante a mistura [12]. Em países com ocorrência de neve, sal de cozinha ( $\text{NaCl}$ ) é derramado sobre rodovias no inverno para permitir seu derretimento. Ademais, em áreas litorâneas o sal presente no ar também penetra concreto adentro. Cloretos agem como catalisadores para a corrosão, não sendo consumidos no processo mas favorecendo que este ocorra mais rápido. Quando os cloretos na superfície da

armadura chegam a um nível crítico, a interação dos cloretos com os óxidos leva a uma desintegração localizada da camada passiva. Além disso, cloretos são higroscópicos, o que significa que eles absorvem e retêm umidade. O aumento de umidade diminui a resistividade elétrica do concreto e favorece o transporte de íons, novamente facilitando a corrosão.

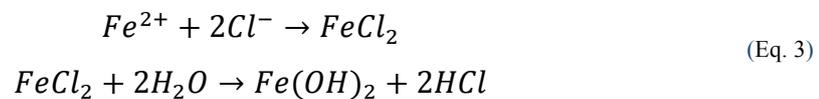
O processo corrosivo é eletroquímico, envolvendo semi-reações anódicas e catódicas. No ânodo, o ferro que compõe o aço libera elétrons de acordo com a reação:



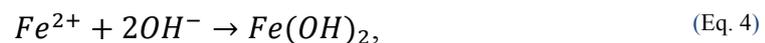
Os elétrons liberados na reação anódica são consumidos na superfície do aço, junto com água e oxigênio, a fim de manter neutralidade elétrica. A reação catódica é a que se segue:



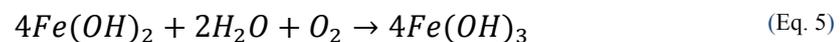
Os íons de cloreto podem reagir com a superfície desprotegida da armadura e formar um ânodo:



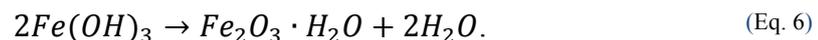
Hidróxido ferroso,  $Fe(OH)_2$ , também pode ser gerado por:



podendo resultar na formação de hidróxido férrico  $Fe(OH)_3$ :



e finalmente em óxido de ferro hidratado (ferrugem):



$Fe_2O_3$  é o produto final da corrosão, mas os demais óxidos de ferro também ocorrem. As reações descritas acima estão ilustradas na Figura 2. Cada semi-reação possui determinado potencial elétrico. A diferença de potencial elétrico entre o cátodo e

o ânodo gera uma corrente elétrica, denominada corrente de corrosão, que se refere ao deslocamento de íons na solução aquosa que permeia os poros do concreto.

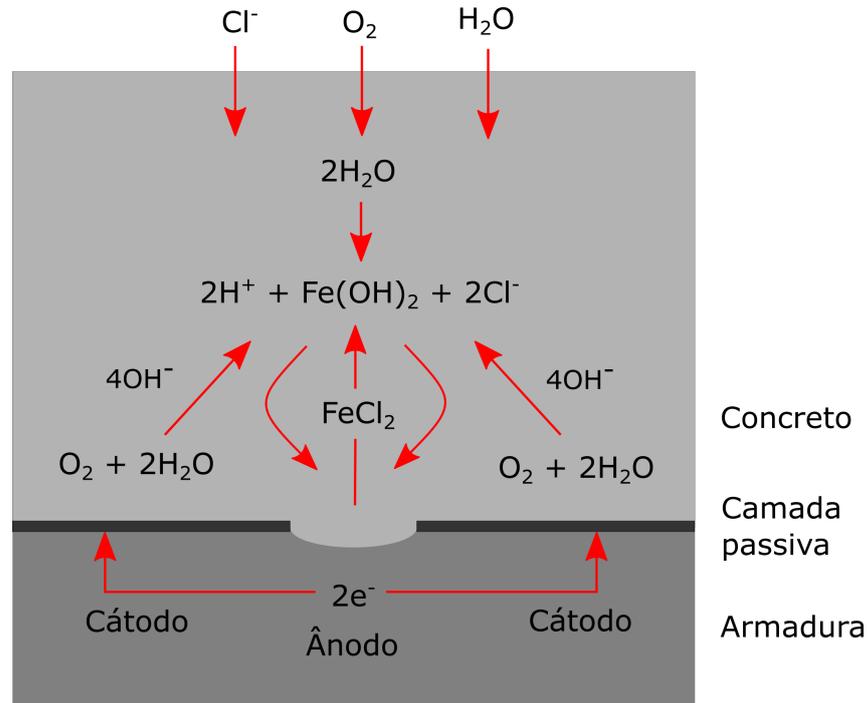


Figura 2: Reações de oxirredução do aço

As reações apresentadas envolvem íons de cloreto, água e oxigênio. Portanto, para haver corrosão, estes elementos devem necessariamente se encontrar nos poros do concreto próximos à superfície da armadura. O oxigênio particularmente dificilmente ingressa concreto perto do seu ponto de saturação, portanto nestas situações a corrente de corrosão é controlada pela baixa taxa de difusão do oxigênio e sua pequena disponibilidade na fronteira concreto-armadura. Por isso, muitas vezes a reação catódica (Eq. 2) concentra-se em regiões da estrutura de umidade elevada, maiores e mais frequentes que as regiões em que predominam a reação anódica (Eq. 1), formando o que é denominado macrocélula e implicando na corrosão localizada intensa do aço. Corrosão intensa está associada à elevação da umidade, devido à natureza higroscópica de cloretos, e subsequentemente à baixa resistividade elétrica do concreto e fácil transporte de íons [9]. A corrosão induzida por cloretos concentra-se dessa forma em regiões do concreto armado que encontram as condições de saturação propícias para sua ocorrência, sendo um fenômeno estudado inclusive como variável no espaço além de variável no tempo [13]. Entretanto, por simplificação o modelo probabilístico adotado neste estudo é dito *zero-dimensional*, desconsiderando quaisquer coordenadas espaciais e assumindo a homogeneidade da degradação da estrutura.

Os diversos óxidos de ferro formados (Eq. 3-6) possuem volume de 2-6 vezes maior que o ferro do qual se originaram (Figura 3). Devido a essa grande expansão de volume, são induzidas tensões expansivas no concreto que causam o surgimento de fissuras e sua subsequente abertura.

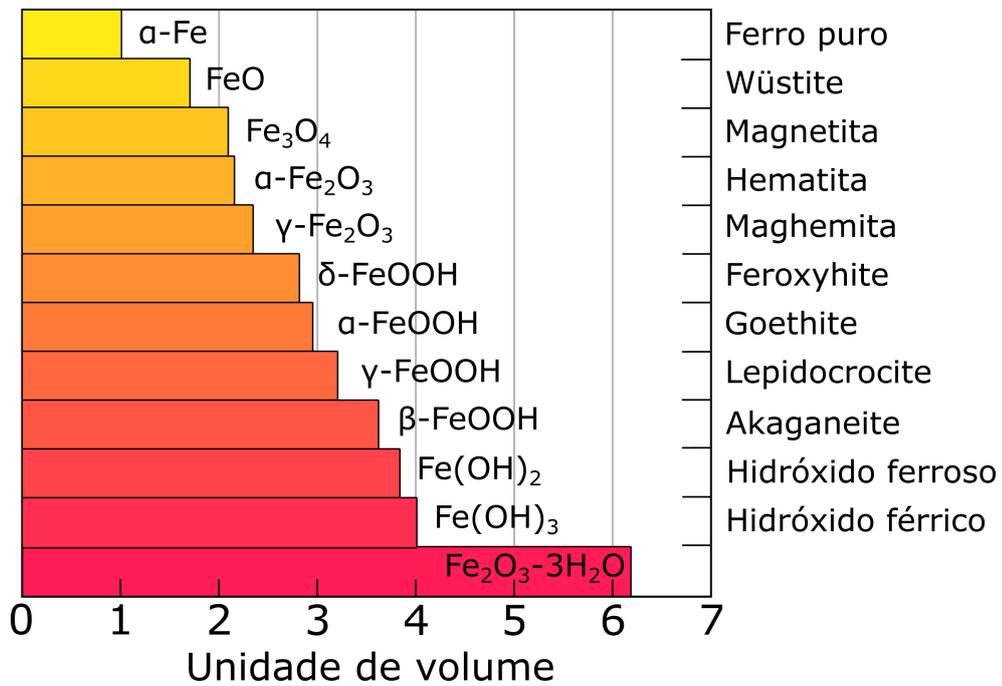


Figura 3: Volumes relativos do ferro puro e de seus óxidos, adaptado de [9]

Pela sucinta descrição apresentada dos processos químicos que levam à corrosão da armadura de aço em estruturas de concreto armado, sucede que a progressão do processo corrosivo se dá em três fases: o período de início de corrosão, o período de início de fissuração e o período de propagação de fissura. O período de início de corrosão engloba o tempo levado da construção da estrutura até a permeação do concreto por cloretos em grau suficiente para atingirem a armadura e acumularem em quantidade suficiente para causar a despassivação do aço, permitindo o início da corrosão. Assume-se que não ocorre dano devido à corrosão neste período. O período seguinte é o de início de fissuração, que vai da despassivação do aço até a formação de óxidos de ferro gerar tensões internas suficientes para fissurar o revestimento de concreto. Finalmente, o período de propagação das fissuras é contado após a fissuração do revestimento, contabilizando a expansão e alargamento das fissuras.

## 2.2 MODELOS DE VIDA DE SERVIÇO DE ESTRUTURAS CORROÍDAS

A predição do segundo período do processo corrosivo, da desp passivação do aço à fissuração do cobrimento, é um elemento chave para a avaliação da vida útil de estruturas em concreto armado, pois as primeiras fissuras do cobrimento são convencionalmente utilizadas para determinar o fim da vida de serviço e a necessidade de manutenção estrutural. Ademais, a força de ligação entre concreto e aço inicialmente aumenta com o a corrosão apenas até a formação de fissuras, após a qual decresce rapidamente [14]. Devido a essas características, o estudo do processo corrosivo em concreto armado e em particular da formação de fissuras continua a ser estudado e modelado por diversos autores.

O modelo para a vida de serviço de estruturas em concreto armado proposto por Tuutti em 1980 [15], apresentado na Figura 4, levava em consideração apenas o período de início de corrosão,  $T_0$ , e o período de propagação de corrosão,  $T_{cr}$ , do qual o período de propagação das fissuras não é diferenciado, como será explicado logo mais.

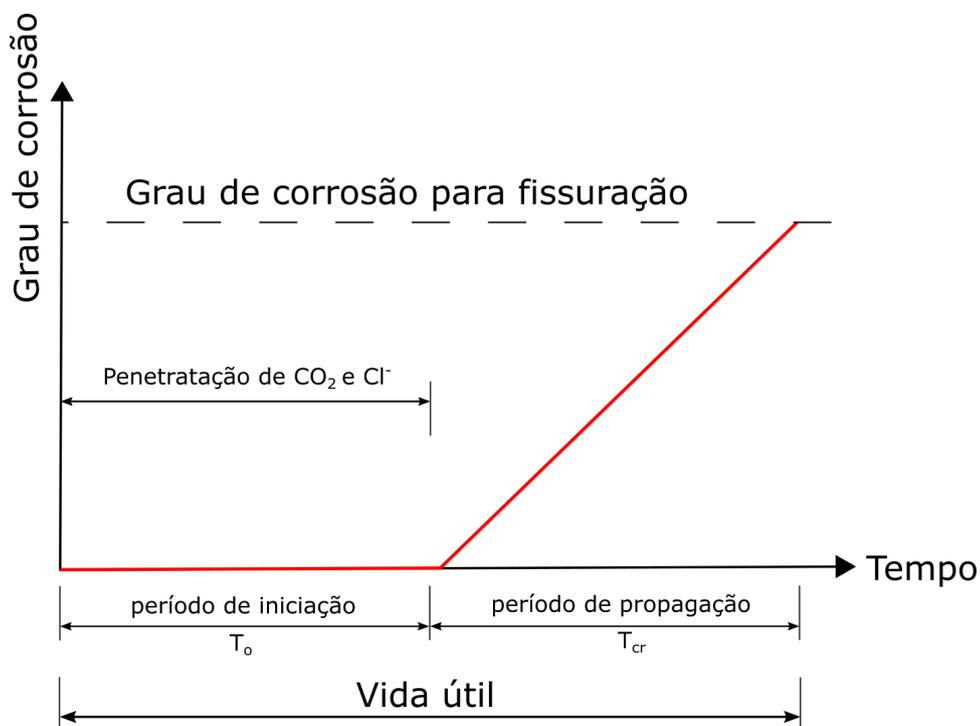


Figura 4: Modelo de vida de serviço de Tuutti [15]

O modelo de Tuutti (Figura 4) assume que em  $T_0$  os íons de cloreto e gás carbônico difundem no concreto até levar à despassivação da armadura, a partir de qual inicia-se a corrosão da armadura, até levar à fissura do cobrimento. Em contrapartida, Weyers concluiu em sua pesquisa em 1998 [16] que nem todos os produtos da corrosão contribuem para o aumento das tensões expansivas sobre o concreto; os primeiros óxidos produzidos preenchem lacunas e poros ao redor da armadura, e outros migram para longe da interface concreto-aço através dos poros do concreto. Segundo Weyers, apenas após esses espaços serem preenchidos que os produtos da corrosão começam a induzir tensão de fissuração no concreto. Com isso, a pesquisa concluiu que o modelo conceitual de Tuutti subestima  $T_{cr}$ , o que está de acordo com observações empíricas em campo e em laboratório. Essa diferença deve-se à presença de uma zona porosa circundante à armadura causada pela transição de pasta de cimento para aço, lacunas de ar preso durante a concretagem e lacunas capilares na pasta de cimento nas quais os produtos da corrosão se difundem. A Figura 5 mostra um diagrama esquemático do início da corrosão da armadura até fissuração do cobrimento segundo Weyers.

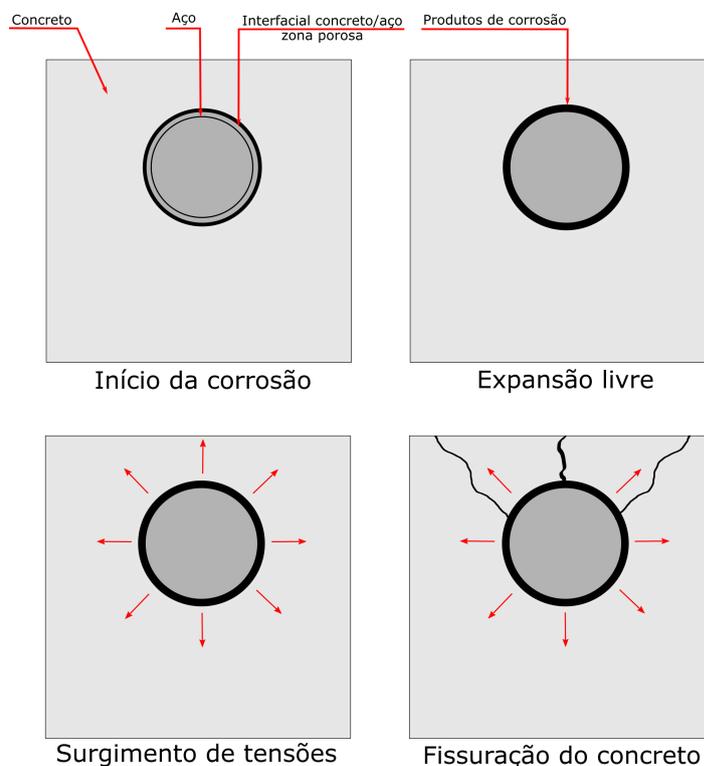


Figura 5: Processo de corrosão e fissuração de concreto armado

Como ilustrado na Figura 5, após o início da corrosão, há um período de expansão livre dos óxidos de ferro formados, até o ponto em que a camada porosa é consumida. Depois disso, os óxidos formados passam a gerar tensões internas no concreto, levando a eventuais fissuras. A Figura 6 ilustra o impacto que a consideração da zona porosa tem no modelo da vida de serviço da estrutura.

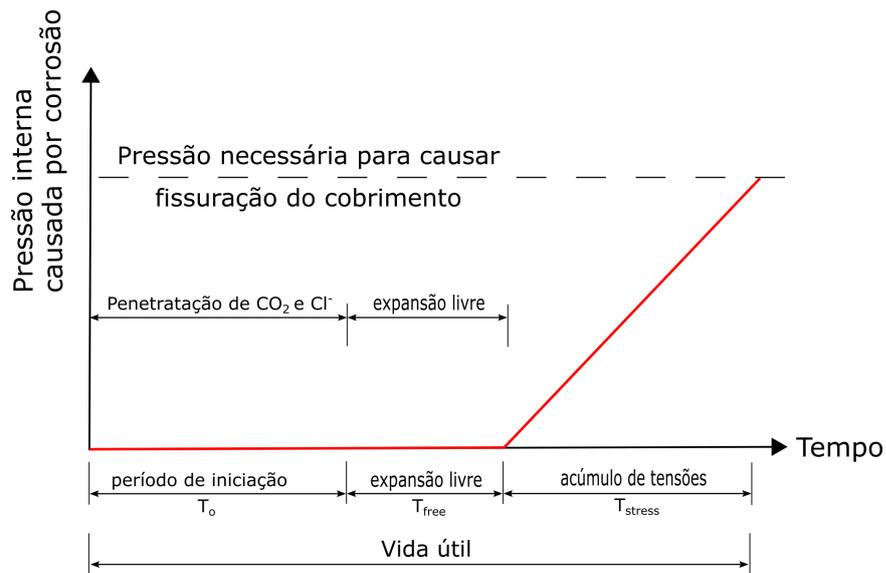


Figura 6: Modelo de vida de serviço de Weyers [16]

Na Figura 6 vê-se que o período até fissuração,  $T_{cr}$ , foi dividido em duas seções:  $T_{free}$ , em que os produtos da corrosão ocupam a zona porosa, e  $T_{stress}$ , em que a zona porosa já se encontra preenchida e os produtos de corrosão passam a gerar tensão expansiva no concreto. Tanto no modelo de Tuutti quanto de Weyers, é assumido que a pressão aumenta linearmente com o aumento do volume dos produtos de corrosão até que as tensões de tração exercidas excedam a resistência à tração do concreto circundante. Esta consideração é válida até o ponto de início da fissuração (o fim da segunda fase do processo corrosivo), a partir do qual a distribuição de pressão deixa de ser uniforme.

Como o modelo probabilístico estudado no capítulo 3 se atém ao segundo período do processo corrosivo, ele desconsidera tanto o tempo levado até a despassivação do aço quanto alterações no modelo devido ao aumento e propagação das fissuras, sobre as quais há muito debate e pouco consenso. Apesar de intuitivamente

assumir-se que o maior espaçamento de fissuras facilita a entrada de oxigênio e cloretos, como em [17], existe uma lacuna de modelos que quantifiquem o impacto dessa mudança. Quanto à difusão de cloretos, é sugerido por diferentes autores sua dependência da espessura das fissuras [18], da razão entre espessura das fissuras e cobrimento [19], independência de quaisquer fissuras [12], entre outras hipóteses. Apesar das muitas incertezas ainda envolvidas, tem-se evidências que o impacto de fissuras na corrente de corrosão e na perda da massa de aço é significativa em experimentos de curto prazo [20], mas que esta influência torna-se menor em processos de médio e longo prazo [21]. Como o estudo realizado neste trabalho utiliza dados e simulações para 50 anos, é considerado que todo o dano sofrido após a despassivação do aço pode ser fidedignamente modelado pelo segundo período do processo corrosivo, consideração já realizada por Tuutti (1980) e Weyers (1998) em seus modelos de tempo de vida de serviço (Figuras 4 e 6).

### **2.3 PERÍODO DO INÍCIO DA CORROSÃO À FISSURAÇÃO**

O tempo entre o início da corrosão da armadura e a fissuração do cobrimento do concreto armado,  $T_{cr}$ , é deduzido da pressão de expansão exercida pelos produtos da corrosão no concreto do cobrimento e pela Lei de Faraday, segundo modelo proposto por [7]. Quatro considerações básicas são assumidas neste modelo:

- Os produtos de corrosão formam-se uniformemente ao longo das barras de aço da armadura. Esta consideração é largamente utilizada na modelagem da expansão volumétrica causada por corrosão, como em [22, 23].
- Existe uma zona porosa ao redor das barras de aço da armadura que deve ser preenchida pelos produtos de corrosão antes que estes comecem a induzir pressão interna no concreto circundante, conforme modelo de Weyers e corroborado por [24].
- A expansão volumétrica causada pela corrosão leva à deformação apenas do concreto, negligenciando-se a deformação do aço. Esta consideração provém da diferença entre os módulos de Young do aço e do concreto; como o módulo de elasticidade do aço é cerca de uma ordem de grandeza maior do que o do concreto, a deformação sofrida pelo aço é desprezível quando comparada à do concreto. As propriedades mecânicas do concreto adjacente

à barra de aço são consideradas iguais às do restante do concreto. Essas considerações foram utilizadas por outros autores para prever pressão interna devido à corrosão [22, 25].

- O concreto circundante à barra de aço é modelado como um cilindro de paredes espessas, de espessura igual ao menor cobrimento disponível. Assume-se que o anel de concreto racha quando as tensões de tração na direção circunferencial em todo o anel atingem a resistência à tração do concreto [14, 22, 25].

### 2.3.1 PRESSÃO INTERNA CAUSADA POR CORROSÃO

Uma camada uniforme de produtos do processo corrosivo induziria tensões de expansão uniformes ao longo da superfície de interface entre aço e concreto, resultando no deslocamento radial uniforme da superfície da camada de ferrugem. Considerando o concreto ao redor da barra de aço um cilindro de paredes espessas, a pressão radial,  $P_{cor}$ , necessária para induzir o deslocamento  $\delta_c$  necessário para a acomodação da expansão do volume da armadura devido à corrosão da armadura é dado por

$$\delta_c = kP_{cor} \quad (\text{Eq. 7})$$

em que  $k$  é a constante de flexibilidade do furo que relaciona o deslocamento radial à pressão interna atuante no cilindro. Como existe uma zona porosa na interface aço-concreto, os produtos provenientes da corrosão devem preencher esta zona antes que a expansão comece a gerar pressão no concreto circundante. Esta zona porosa está inclusa na derivação da constante de flexibilidade do furo  $k$ , substituída na equação abaixo por expressão consolidada pela teoria da elasticidade [26].

$$\delta = \frac{a}{E_{ef}} \left[ \frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \nu \right] P \quad (\text{Eq. 8})$$

Nesta equação geral,  $\delta$  é o deslocamento interno radial,  $P$  é a pressão radial interna correspondente,  $E_{ef}$  é o módulo de elasticidade efetivo de um cilindro de paredes espessas,  $a$  é o raio interno do cilindro,  $b$  o raio externo do cilindro e  $\nu$  seu coeficiente de Poisson. Assumindo-se  $D$  o diâmetro da barra de aço e  $\delta_0$  a espessura da zona

porosa, o diâmetro interno do cilindro é  $D + 2\delta_0 = D'$ . Dessa forma,  $a = \frac{D'}{2}$  e  $b = C + \frac{D'}{2}$ , em que  $C$  é a espessura da parede do cilindro. Substituindo estas considerações na Eq. 8, ela passa a ser reescrita da forma:

$$\delta = \frac{D'}{2E_{ef}} \left[ \frac{D'^2}{2C(C + D')} + 1 + \nu \right] P \quad (\text{Eq. 9})$$

e então considerando-se  $\psi = D'^2/2C(C + D')$ , a Eq. 9 simplifica-se para:

$$\delta = \frac{D'}{2E_{ef}} [1 + \nu + \psi] P \quad (\text{Eq. 10})$$

Portanto, a flexibilidade do furo,  $k$ , é dada por:

$$k = \frac{(1 + \nu + \psi)D'}{2E_{ef}} = \frac{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)}{2E_{ef}} \quad (\text{Eq. 11})$$

Um esquemático das mudanças no diâmetro da barra de aço é apresentado na Figura 7.

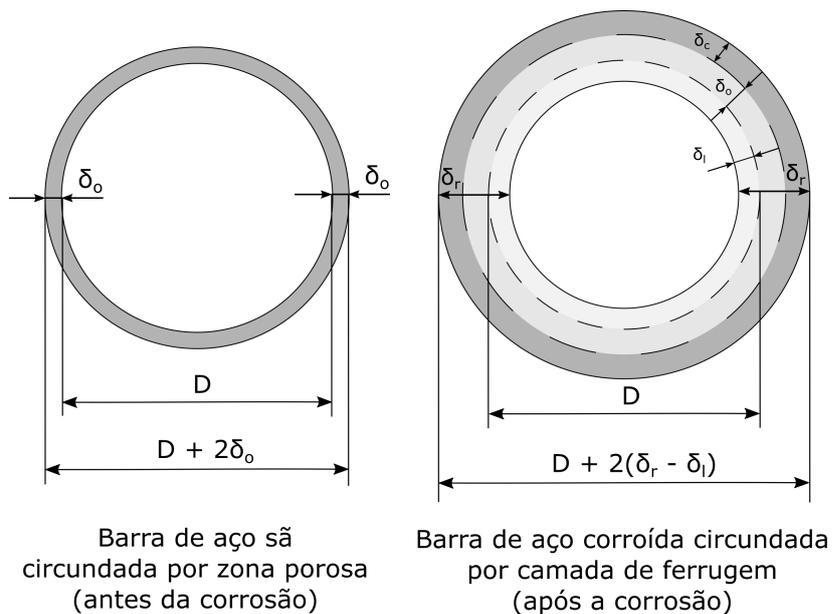


Figura 7: Alterações no diâmetro da armadura devido à corrosão

Como ilustrado na Figura 7, o processo corrosivo reduz o raio da barra de aço em  $\delta_l$  para dar origem a produtos (ferrugem) de espessura total  $\delta_r$ . Estes produtos da corrosão consomem então primeiramente a zona porosa  $\delta_0$ , após cujo preenchimento expandem adentrando a parede do cilindro (deslocamento  $\delta_c$ ). A predição da pressão radial interna causada por corrosão requer a determinação da proporção das espessuras envolvidas:  $\delta_r$ ,  $\delta_l$  e  $\delta_0$ .

Deixe  $M_r$  denotar a massa de ferrugem por unidade de comprimento que acometeu uma barra de aço e  $M_{loss}$  denotar a massa de aço consumida para produzir  $M_r$ . Como ilustrado na Figura 7, a formação da camada de ferrugem aumenta o diâmetro da barra de  $[D]$  para  $[D+2(\delta_r - \delta_l)]$ . O aumento de volume por unidade de comprimento pode ser calculado pela razão massa/densidade e igualado ao aumento correspondente da área da seção transversal, segundo a equação:

$$\frac{M_r}{\rho_r} - \frac{M_{loss}}{\rho_s} = \frac{\pi}{4} [[D + 2(\delta_r - \delta_l)]^2 - D^2] \quad (\text{Eq. 12})$$

em que  $\rho_r$  é a densidade da ferrugem e  $\rho_s$  é a densidade do aço, e  $D$  é o diâmetro original da armadura. A espessura de ferrugem,  $\delta_r$ , pode ser expressada como:

$$\delta_r = \delta_l + \delta_0 + \delta_c \quad (\text{Eq. 13})$$

em que  $\delta_c$  é o deslocamento da parede do cilindro para acomodar os produtos da corrosão correspondente à pressão radial interna  $P_{cor}$ . Considerando a Eq. 13 e desenvolvendo e simplificando os termos, a Eq. 12 pode ser escrita da seguinte forma:

$$\frac{M_r}{\rho_r} - \frac{M_{loss}}{\rho_s} = \pi [D(\delta_0 + \delta_c) + (\delta_0 + \delta_c)^2] \quad (\text{Eq. 14})$$

Despreza-se o termo  $(\delta_0 + \delta_c)^2$  na equação por  $(\delta_0 + \delta_c)^2 \ll D$ , alterando a Eq. 14 para:

$$\frac{M_r}{\rho_r} - \frac{M_{loss}}{\rho_s} = \pi D(\delta_0 + \delta_c) \quad (\text{Eq. 15})$$

$M_r$  pode ser escrito em função de  $M_{loss}$  utilizando-se a razão entre a massa molecular do aço e do ferro,  $\gamma$ , avaliada entre 0,523 e 0,622 (Liu, 1998), de acordo com a relação:

$$M_{loss} = \gamma M_r \quad (\text{Eq. 16})$$

Combinando-se as Eqs. 7, 11, 15 e 16, com  $\gamma = 0,622$ , a pressão radial interna  $P_{cor}$  é dada por:

$$P_{cor} = \frac{2M_{loss}E_{ef}[(1/0,622\rho_r) - (1/\rho_s)]}{\pi D(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_{ef}}{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} \quad (\text{Eq. 17})$$

Valores negativos para a Eq. 17 correspondem ao período de preenchimento da zona porosa e são igualados a zero por seu significado físico.

Em seguida, para relacionar a pressão radial causada pela corrosão  $P_{cor}$  com o percentual da massa de aço perdida,  $m_1$ , necessita-se da razão entre a densidade da ferrugem  $\rho_r$  e a densidade do aço  $\rho_s$ . Neste trabalho adota-se a razão  $\rho_r = 0,5\rho_s$ , sugerida por outros autores (Molina, 1993). Substituindo-se  $\rho_r = 0,5\rho_s$  na Eq. 17, a expressão para  $P_{cor}$  toma a forma:

$$P_{cor} = \frac{4,4(M_{loss}/\rho_s)E_{ef}}{\pi D(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_{ef}}{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} \quad (\text{Eq. 18})$$

A perda de massa percentual,  $m_1$ , é dada por:

$$m_1 = 100 \left( \frac{M_{loss}}{M_{st}} \right) \quad (\text{Eq. 19})$$

em que  $M_{st}$  é a massa original do aço por unidade de comprimento antes do dano causado pela corrosão.

A fim de expressar a pressão radial interna causada pela corrosão como função da perda de massa percentual  $m_l$ , utiliza-se a relação:

$$\left(\frac{M_{loss}}{\rho_s}\right) = \left(\frac{M_{loss}}{M_{st}}\right)\left(\frac{M_{st}}{\rho_s}\right) = \frac{m_l A_b}{100} = \frac{m_l \pi D^2}{400} \quad (\text{Eq. 20})$$

em que  $A_b$  é a área original da seção transversal da barra de aço. Combinando as Eqs. 20 e 18, a relação entre a perda de massa de aço percentual e a pressão radial interna devido à corrosão é dada por:

$$P_{cor} = \frac{m_l E_{ef} D}{90,9(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_{ef}}{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} \quad (\text{Eq. 21})$$

Novamente, resultados negativos para a Eq. 21 continuam a corresponder ao preenchimento da zona porosa e devem continuar sendo desprezados e igualados a zero para seu significado físico válido.

### 2.3.2 CRITÉRIO PARA A PRESSÃO INTERNA PARA FISSURAÇÃO

A Figura 8 apresenta o modelo de uma barra de aço de armadura envolta por um anel de concreto. Como explicado anteriormente, o concreto ao redor da barra é modelado como um cilindro de parede espessa, de espessura igual ao cobrimento mínimo da estrutura. Assume-se que a fissuração do anel de concreto ocorre quando as tensões de tração na direção circunferencial em todo o anel atingem a resistência à tração do concreto,  $f_{ct}$ .

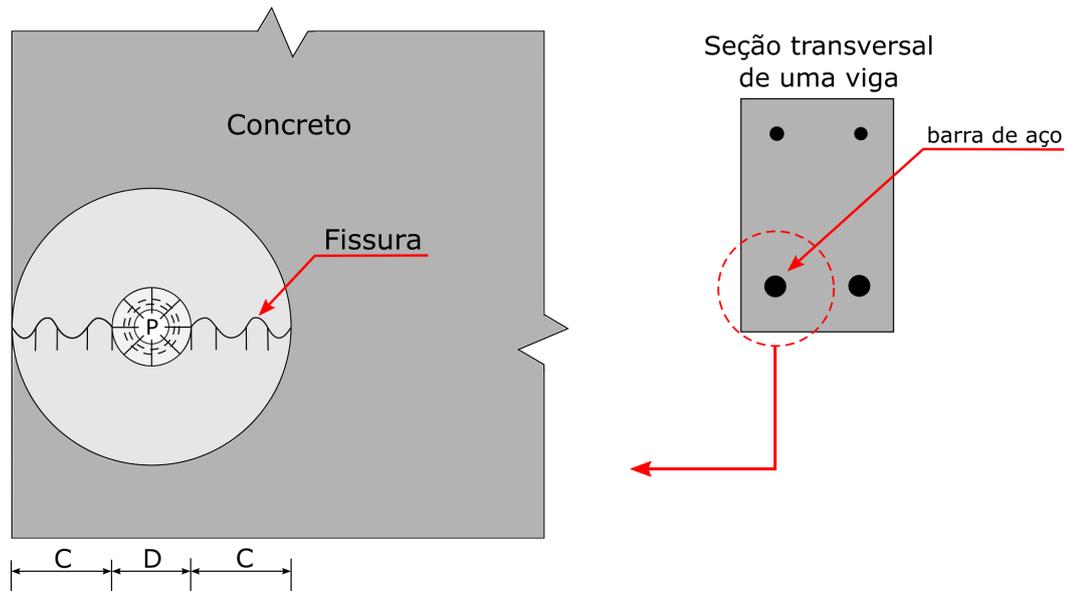


Figura 8: Modelo do anel de concreto

Como ilustrado na Figura 8, as tensões de tração na direção circunferencial do anel de concreto são efeito da pressão radial ocasionada pela corrosão,  $P_{cor}$ , que age pelo diâmetro interior ao anel de concreto. A resistência à tração do concreto  $f_{ct}$ , por outro lado provém do próprio concreto e, portanto, da espessura do anel. Igualando-se ambos os esforços, tem-se que a pressão radial necessária para causar a fissuração do cobrimento de concreto,  $P_{cr}$ , é igual a:

$$P_{cr}[D + 2(\delta_0 + \delta_c)] = 2[C - (\delta_0 + \delta_c)]f_{ct} \quad (\text{Eq. 22})$$

em que  $f_{ct}$  é a resistência à tração do concreto. Assumindo  $[D + 2(\delta_0 + \delta_c)] = D$ , e  $[C - (\delta_0 + \delta_c)]$ , pois  $D \gg 2(\delta_0 + \delta_c)$  e  $C \gg (\delta_0 + \delta_c)$ , a Eq. 22 simplifica para:

$$P_{cr} = \frac{2Cf_{ct}}{D} \quad (\text{Eq. 23})$$

Igualando-se  $P_{cor}$  da Eq. 23 com  $P_{cr}$  da Eq. 21 obtém-se a equação de estado limite para a fissuração do cobrimento de concreto:

$$\frac{m_1 E_{ef} D}{90,9(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} - \frac{2\delta_0 E_{ef}}{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} = \frac{2Cf_{ct}}{D} \quad (\text{Eq. 24})$$

### 2.3.3 TEMPO PARA FISSURAÇÃO

A variável tempo é finalmente introduzida na Eq. 24 pela Lei de Faraday. A Lei de Faraday foi utilizada por diversos autores para estimar a perda de massa de aço devido a correntes de corrosão monitoradas [27, 28]. O alcance da Lei de Faraday para a predição de perda de massa de aço para correntes corrosivas reais foi estudada e sua aplicabilidade corroborada [29]. A forma utilizada da Lei de Faraday para aplicação ao modelo analisado é:

$$M_1 = \frac{MIT}{zF} \quad (\text{Eq. 25})$$

em que  $T$  é o tempo (s),  $M_1$  é a massa de aço (g) consumida no tempo  $T$  pela corrosão,  $I$  é a corrente de corrosão (A),  $F$  é a constante de Faraday (96.500 As),  $z$  é a carga iônica do elemento (2 para ferro, devido à Eq. 1) e  $M$  sua massa atômica (56g no caso do ferro). Substituindo estes valores na Eq. 25, a relação entre o tempo  $T$  e a massa de aço consumida pela corrosão  $M_1$  é dada por:

$$T = \frac{24125(M_1/a_s)}{7i} \quad (\text{Eq. 26})$$

em que  $i$  é a densidade de corrente ( $\text{A}/\text{cm}^2$ ) e  $a_s$  a área superficial da barra de aço. A razão ( $M_1/a_s$ ) pode ser expressa da seguinte forma:

$$\frac{M_1}{a_s} = \frac{(m_1)(\pi D^2/4)\rho_s}{100\pi D} = \frac{m_1 D \rho_s}{400} \quad (\text{Eq. 27})$$

em que  $m_1$  é a perda percentual da massa de aço e  $\rho_s$  é a densidade do aço. Combinando as Eqs. 26 e 27 com  $\rho_s = 7,85\text{g}/\text{cm}^3$  e ajustando-se as unidades, obtém-se:

$$T = \frac{78,3m_1 D}{i} \quad (\text{Eq. 28})$$

em que  $T$  é o tempo (dias)  $m_1$  é a perda percentual da massa de aço,  $D$  é o diâmetro da armadura de aço (mm) e  $i$  é a densidade de corrente ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ).

Isolando  $m_1D$  na Eq. 24, substituindo na Eq. 28 e finalmente isolando-se  $T$ , resulta-se em uma equação para o tempo do início da corrosão à fissuração do cobrimento de concreto,  $T_{cr}$ :

$$T_{cr} = \left[ \frac{7117,5(D + 2\delta_0)(1 + \nu + \psi)}{iE_{ef}} \right] \left[ \frac{2Cf_{ct}}{D} + \frac{2\delta_0E_{ef}}{(1 + \nu + \psi)(D + 2\delta_0)} \right] \quad (\text{Eq. 29})$$

em que  $E_{ef}$  é o módulo elástico efetivo do concreto, igual a  $[E_c/(1+\phi_{cr})]$ ,  $E_c$  é o módulo elástico do concreto,  $\phi_{cr}$  é o coeficiente de *creep* (deformação progressiva) do concreto, tido como 2,35 pela norma CSA Standard A23.3-94, e  $\nu$  é o coeficiente de Poisson do concreto (0,18).

## 2.4 CORRENTE DE CORROSÃO

Como visto no fim da seção anterior, a predição do desenvolvimento da deterioração induzida por corrosão em relação ao tempo durante o período de propagação depende da corrente de corrosão, ou da taxa de corrosão, normalmente expressa em termos de densidade de corrente de corrosão  $i$ .

Modelos empíricos prevendo corrente de corrosão baseiam-se na correlação observada entre a corrente de corrosão e os diferentes parâmetros que a afetam. Modelos analíticos baseiam-se na representação matemática dos mecanismos definidores da corrosão e modelos numéricos são modelos eletroquímicos que consideram o comportamento polarizador das regiões catódicas e anódicas da superfície do aço; suas soluções podem ser encontradas apenas numericamente, por exemplo por meio do método de elementos finitos.

Existem inúmeros modelos empíricos para a predição de corrente de corrosão induzida por cloretos. Em um deles, desenvolvido por Morinaga [30], a densidade de corrente de corrosão depende do conteúdo de cloreto à superfície da armadura, da proporção água/cimento, do diâmetro da armadura e da espessura do cobrimento. Morinaga se baseou em estudos de longo prazo que consideram diversas variáveis. Entretanto, em sua pesquisa foram utilizadas barras de aço cobertas por graute em vez de corpos de prova de concreto armado. Como parte do projeto DuraCrete [31], uma outra equação empírica foi proposta baseada principalmente no controle da resistividade elétrica do concreto. Entretanto, atualmente há carência de dados e normas que

viabilizem a quantificação dos parâmetros deste modelo. Vu e Stewart [5] desenvolveram um modelo baseado na consideração que a disponibilidade de oxigênio na superfície do aço (reação catódica) é o fator determinante para a corrosão. Portanto, este modelo pode ser de utilidade limitada para casos em que a resistividade do concreto (reação anódica) é o fator preponderante.

Modelos analíticos são em grande parte modelos de redes de resistores ou linhas de transmissão [32], isto é, utilizam um circuito elétrico equivalente para modelar a corrosão do aço em concreto. Uma estratégia, por exemplo, é calcular a corrente propagando em macrocélulas utilizando a Lei de Ohm. Embora modelos de circuito equivalente considerem os mecanismos de ativação e de controle de resistência do processo corrosivo, são de aplicação severamente limitada para a vida real por exigirem conhecimento da exata distribuição catódica e anódica na superfície do aço.

Finalmente, há propostas de modelos numéricos baseados na análise de elementos finitos, cujas previsões são, de forma geral, as mais confiáveis dos modelos apresentados até agora, dado que valores adequados sejam atribuídos nos parâmetros de entrada. Entretanto, estes modelos ainda não alcançaram o ponto em que podem ser utilizados na prática, devido à alta demanda computacional necessária à complexidade das tarefas envolvidas, como, por exemplo, na predição das regiões catódicas e anódicas na superfície da armadura.

Como foi buscado evidenciar, apesar do extenso número de publicações a respeito de correntes de corrosão, a complexidade do problema e a falta de dados experimentais suficientes não permitiram a prevalência de modelos de previsão amplamente aceitos. Com isso em mente, o modelo de Liu e Weyers [8] será utilizado para a predição do tempo de propagação de corrosão neste trabalho, tanto sua parte sistêmica (média) como sua parte variável.

Liu e Weyers [8] desenvolveram seu modelo empírico testando grandes corpos de prova de concreto armado simulando tabuleiros de pontes. Ao longo dos 5 anos de exposição ao ar livre dos exemplares, foram salvas 2927 medições. De acordo com suas análises experimentais, concluíram que a fórmula de  $i$  depende da concentração de cloreto, temperatura, resistência elétrica do concreto e tempo, pela seguinte equação:

$$\ln 1,08i = 7,89 + 0,7771 \ln(1,69C_{rb}) - \frac{3006}{T_{mp}} - 0,000116R_c + 2,24T^{-0,215} + N(0, \sigma), \quad \sigma = 0,3312 \quad (\text{Eq. 30})$$

em que  $i$  é a densidade de corrente de corrosão ( $\mu\text{A}/\text{cm}^2$ ),  $C_{rb}$  é o conteúdo de cloreto à profundidade da armadura ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $T_{mp}$  é a temperatura (K)  $R_c$  é a resistência elétrica do cobrimento de concreto ( $\Omega$ ) e  $T$  é o tempo de corrosão (anos). A Eq. 30 indica que  $\ln i$  possui distribuição normal ao passo em que  $i$  possui distribuição lognormal, com coeficiente de variação igual a:

$$\text{CoV} = \frac{\sqrt{\text{Var}[X]}}{E[X]} = \frac{e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2} \sqrt{e^{\sigma^2} - 1}}{e^{\mu + \frac{1}{2}\sigma^2}} = \sqrt{e^{\sigma^2} - 1} \cong 0,3405 \quad (\text{Eq. 31})$$

A resistência do concreto  $R_c$  pode ser calculada segundo outra relação empírica sugerida por Liu:

$$\ln R_c = 8,03 - 0,549 \ln(1 + 1,69 C_{rb}) + N(0, \sigma), \quad \sigma = 0,1203 \quad (\text{Eq. 32})$$

A Eq. 32 indica que  $\ln R_c$  é normalmente distribuído ao passo em que  $R_c$  possui distribuição lognormal com coeficiente de variação igual a 0,1207.

Apesar do modelo de Liu e Weyers ser bastante abrangente, permanece limitado pelo número finito de resultados experimentais no qual foi baseado, assim como todo modelo experimental. A limitação mais significativa do modelo é que ele não inclui a disponibilidade de oxigênio na superfície do aço, desconsiderando portanto polarização por concentração. Apesar disso, o modelo fornece estimativas razoáveis para correntes de corrosão [9] e foi aplicado ao modelo para o tempo de propagação de corrosão utilizado nos capítulos seguintes.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão detalhadas as etapas e seções de um estudo estatístico do tempo e do dano causado entre o início da corrosão do aço e a fissuração do cobrimento do concreto armado, com base em um modelo analítico deduzido da fundamentação teórica. O objeto de estudo baseia-se no modelo que El Maaddawy [7] propôs para concreto armado, que consiste em uma barra circular de aço circundada por um cilindro espesso de concreto. Ao contrário de como foi realizado o estudo de El Maaddawy, entretanto, neste trabalho os parâmetros do modelo foram considerados variáveis estocásticas, a fim de tornar a análise mais fidedigna e representativa do alto grau de incerteza que acompanha a maioria dos parâmetros envolvidos no processo corrosivo do concreto armado.

Como elaborado na seção 2.4, grande parte da dificuldade da predição dos efeitos da corrosão provém da incerteza do parâmetro da corrente de corrosão. Para este estudo, o modelo estocástico para a corrente de corrosão de Liu e Weyers [8] foi associado ao modelo de El Maddaawy para tempo de corrosão. Ademais, para o parâmetro de temperatura necessário ao modelo resultante foram utilizadas as temperaturas médias mensais da cidade de Brasília ao longo de um período de 50 anos. O período de 50 anos foi selecionado por ser o período de vida útil vigente recomendado para o projeto estrutural.

Estas temperaturas foram aplicadas ao modelo por constituírem uma base de dados de 600 medições mensais ao longo de 50 anos, não havendo sido estudada previamente a aplicação dos modelos de El Maddaawy e de Liu e Weyers para as condições climáticas e ambientais particulares de Brasília. Como o modelo refere-se à corrosão em concreto armado induzida por penetração de cloretos, no caso de Brasília este fenômeno estaria estritamente relacionado à utilização de cloreto como acelerador de pega na mistura do concreto, já que não se trata de uma cidade exposta à maresia tampouco à temperaturas negativas, nas quais muitas vezes que se aplica NaCl em estruturas para derretimento de gelo. Desta forma, a variação dos valores médios do conteúdo de cloreto à profundidade da armadura foram selecionados visando representar esta prática construtiva, atualmente em desuso.

Ressalta-se que para fins de simplificação o modelo desconsiderou a correlação entre temperatura e umidade ambiente. Na realidade, altas temperaturas estão

correlacionadas a umidades atmosféricas elevadas, consideradas críticas para as reações de corrosão que afetam o concreto armado. A umidade elevada diminui a resistividade do concreto e facilita o fluxo de íons por seus poros, de forma que a consideração de uma faixa de temperaturas críticas (de umidade elevada) provavelmente elevasse a acurácia do modelo. Também para tornar o modelo mais simples e reduzir o número de parâmetros envolvidos, o modelo desconsidera o fenômeno de consumo do cimento por parte do cloreto.

Uma simulação de Monte Carlo foi utilizada para arbitrar os valores dos parâmetros do modelo e introduzir variação às temperaturas utilizadas. Com essas considerações calculou-se a corrente de corrosão, a perda de aço da seção transversal, a previsão do tempo do início da corrosão à fissuração do revestimento e o dano causado ao revestimento e em função da temperatura. Na mesma simulação também calculou-se a expectativa do tempo de vida útil do modelo ao final do período de 50 anos considerado. Por fim, analisou-se a influência dos parâmetros espessura da zona porosa e conteúdo de cloreto sobre a variabilidade desta vida útil.

### **3.1 DEFINIÇÃO DO OBJETO DE ESTUDO**

O objeto de estudo consiste na análise dependente do tempo do efeito da corrosão sobre uma barra de aço de diâmetro  $D = 16$  mm, ao redor da qual está um cilindro maciço de concreto cujas paredes possuem espessura  $C = 20$  mm. Este arranjo é representativo da armadura de uma estrutura em concreto armado e seu revestimento de menor espessura. Foi assumido que os produtos de corrosão se formam uniformemente ao redor e ao longo da barra de aço e que o anel de concreto racha quando as tensões de tração na direção circunferencial em todo o anel atingem sua resistência à tração  $f_{ct}$ , conforme a Eq. 23. O modelo considerou a existência da zona porosa no concreto e desprezou a deformação do aço, conforme explicado na seção 2.3.

O estudo utilizou dados das temperaturas médias mensais da cidade de Brasília de 30/04/1969 a 31/03/2019, configurando um total de 600 medições realizadas ao longo de 50 anos, coletadas da base de dados de livre acesso do Instituto Nacional de Meteorologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) [33]. Uma simulação de Monte Carlo de 200 iterações foi realizada para introduzir variabilidade a estes dados, assim como para fornecer os demais parâmetros necessários ao modelo, listados na Tabela 1.

Tabela 1 - Variáveis aleatórias utilizadas

| Variável                      | Descrição   | Média $\mu$ | Coefficiente de Variação $\delta/\mu$ | Distribuição |
|-------------------------------|---|-------------|---------------------------------------|--------------|
| $C_{rb}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Conteúdo de cloreto à profundidade da armadura                    | 0,1         | 0,25                                  | Lognormal    |
| $\delta_0$ (mm)               | Espessura da zona porosa  | 25          | 0,25                                  | Normal       |
| $\rho_s$ (kg/m <sup>3</sup> ) | Densidade do aço  | 7.850,1     | 0,10                                  | Normal       |
| $C$ (mm)                      | Cobrimento de concreto  | 20          | 0,075                                 | Normal       |
| $E_c$ (MPa)                   | Módulo de Young do concreto                                       | 22.000      | 0,10                                  | Normal       |
| $\nu$                         | Coefficiente de Poisson do concreto                               | 0,18        | 0,10                                  | Normal       |
| $f_{ct}$ (MPa)                | Resistência à tração do concreto                                  | 3,55        | 0,10                                  | Normal       |
| $\phi_{cr}$                   | Coefficiente de <i>creep</i> (deformação progressiva) do concreto | 2,35        | 0,10                                  | Normal       |

O número de iterações da simulação de Monte Carlo foi limitado a 200 em prol da racionalidade do tempo computacional. Destaca-se que a Tabela 1 não contém a variável para o diâmetro da barra de aço,  $D$ , pois esta foi considerado determinístico ( $D = 16$  mm) devido à sua variabilidade desprezível em relação às dos outros parâmetros. Ademais, não contém a densidade de corrente de corrosão,  $i$ , pois esta foi obtida como função do conteúdo de cloreto à profundidade da armadura  $C_{rb}$  e da temperatura  $T_{mp}$ . Para a temperatura, como dito anteriormente, foram utilizadas 600 medições empíricas da temperatura média mensal de Brasília no decorrer de 50 anos. A estes valores foram acrescentadas variações impostas por um coeficiente de variação de 0,20, adicionadas a cada medição original de temperatura durante a simulação de Monte Carlo. Finalmente, para o estudo da influência do conteúdo de cloreto e da espessura da zona porosa na expectativa de vida do modelo (seção 3.6), as variáveis  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  tiveram seus parâmetros e distribuições variados, como será explicado adiante na seção 3.6.

### 3.2 CORRENTE DE CORROSÃO

O modelo utilizou para a obtenção da densidade de corrente de corrosão o modelo de Liu e Weyers [8], exposto na seção 2.4. Primeiramente, para cada iteração da simulação de Monte Carlo, obteve-se um valor para o conteúdo de cloreto  $C_{rb}$ , com o qual calculou-se a resistência ohmica do concreto  $R_c$  de acordo com a Eq. 32. Também

de fundamentação empírica, assumiu-se na Eq. 32 que  $\ln R_c$  possui distribuição normal com desvio padrão igual a 0,1203.

Em seguida, para cada temperatura das 600 medições utilizadas, calculou-se a densidade de corrosão  $i$  correspondente pela Eq. 30, adotando-se a distribuição normal e o desvio padrão de 0,3312 para  $\ln 1,08i$ . Desta forma, para cada uma das 200 iterações de Monte Carlo, foram obtidos 600 valores de densidade de corrente, cada um correspondente a um valor mensal de temperatura.

### 3.3 PERDA DE ÁREA DE AÇO DA SEÇÃO TRANSVERSAL

A perda de área de aço da seção transversal da armadura foi deduzida da aplicação da Lei de Faraday (Eq. 25) à massa de aço consumida devido à corrosão. Substituindo na Eq. 25  $F$  pelo valor da constante de Faraday (96.500 As),  $z$  pela carga iônica do ferro (2) e  $M$  pela massa atômica do ferro (56 g), obteve-se

$$M_1 = \frac{56IT}{193.000} \quad (\text{Eq. 33})$$

em que  $T$  é o tempo (s),  $M_1$  é a massa de aço (g) consumida no tempo  $T$  (s) pela corrosão e  $I$  é a corrente de corrosão (A). Para escrever a equação em função da densidade de corrente de corrosão, é necessário dividir  $I$  pela área longitudinal da barra de aço,  $2\pi r \cdot L$ , em que  $r$  é o raio da barra e  $L$  seu comprimento. Como neste trabalho considerou-se apenas a seção transversal da barra de aço e o anel de concreto circundante, supondo a corrosão uniforme, a análise da perda da massa de aço  $M_1$  foi considerada por unidade de comprimento  $L$ . Desta forma,  $L$  é considerado igual a 1 e a perda de massa  $M_1$  por unidade de comprimento é dada por:

$$M_1 = \frac{56\pi DiT}{193.000} \quad (\text{Eq. 34})$$

em que  $D$  é o diâmetro da barra de aço em m e  $i$  a densidade da corrente de corrosão em  $A/m^2$ , calculada na seção 3.2.

Dividindo-se  $M_1$  pela densidade do aço  $\rho_s$  (em  $g/m^3$ ), obteve-se  $V_1$ , o volume de aço perdido para a corrosão por unidade de comprimento em  $m^3$ :

$$V_1 = \frac{56\pi DiT}{193.000\rho_s} \quad (\text{Eq. 35})$$

O volume original da armadura de aço por unidade de comprimento  $V_0$  é conhecido, funções apenas do diâmetro original  $D_0$ :

$$V_0 = \frac{\pi D_0^2}{4} \quad (\text{Eq. 36})$$

Como a perda de aço é suposta constante tanto por unidade de comprimento quanto ao redor da barra, é válido que

$$V_0 - V_1 = \frac{\pi D_0^2}{4} - \frac{\pi D_1^2}{4} \quad (\text{Eq. 37})$$

em que  $D_1$  é a redução do diâmetro da barra de aço por unidade de comprimento proporcional à perda de volume por unidade de comprimento  $V_1$ . Neste ponto é importante ressaltar que no cálculo de  $V_1$  (Eq. 35), a variável  $D$  não é, necessariamente, o diâmetro original da barra  $D_0$ , mas o diâmetro que a barra possuía quando a densidade de corrente  $i$  a penetrou, que pode ser menor que  $D_0$ . Tampouco é  $D_1$ , efeito de  $V_1$ .

Estabelecida a relação da Eq. 37, esta foi manipulada para calcular  $D_1$ , o decréscimo diametral da barra de aço devido à densidade de corrente  $i$  ao longo do tempo.

$$D_1 = \sqrt{D_0^2 - \frac{4}{\pi}(V_0 - V_1)} \quad (\text{Eq. 38})$$

O decréscimo diametral  $D_1$  foi calculado e subtraído de  $D_0$  para cada valor de densidade de corrente  $i$  até calcular-se o diâmetro final da barra após o efeito da corrosão ao longo de 50 anos,  $D_f$ . O processo foi repetido a cada iteração da simulação de Monte Carlo. A razão da perda da área de aço da seção transversal,  $\alpha$ , foi calculada pela razão entre as áreas de aço final e original:

$$\alpha = \frac{D_f^2}{D_0^2} \quad (\text{Eq. 39})$$

Com os valores para a perda da área de aço após 50 anos também foram feitos histogramas ilustrando o resultado da simulação de Monte Carlo.

### 3.4 TEMPO DO INÍCIO DA CORROSÃO À FISSURAÇÃO

A previsão do tempo do início da corrosão do aço à fissuração do cobrimento,  $T_{cr}$ , foi calculado com base na Eq. 29. As variáveis tempo ( $T$ ), diâmetro da barra de aço ( $D$ ) e densidade de corrente ( $i$ ), por serem variáveis no tempo, foram calculadas para

cada um dos 600 pares tempo/temperatura a cada iteração de Monte Carlo. As demais variáveis: o cobrimento  $C$ , módulo de elasticidade  $E_c$ , coeficiente de Poisson  $\nu$ , resistência à tração do concreto  $f_t$ , coeficiente de deformação progressiva  $\phi_c$  e espessura da zona porosa  $\delta_\theta$  foram arbitrados apenas uma vez para cada uma das 200 iterações realizadas.

Desta forma, para cada iteração,  $T_{cr}$  foi calculado para cada um dos 600 pares tempo/temperatura. Sendo  $T_{cr}$  variável no tempo primordialmente em relação à densidade de corrente  $i$ , já que a variação de  $D$  ao longo do tempo é muito menor, e sendo que  $i$  oscila com a temperatura (função do tempo),  $T_{cr}$  não surpreendentemente se mostrou de extrema variabilidade ao longo do tempo.

### 3.5 DANO CAUSADO AO COBRIMENTO

O resultado da Eq. 29,  $T_{cr}$ , é o tempo do início da corrosão do aço à fissuração do cobrimento em função de  $i$ , que oscila muito com a variação do tempo, e  $D$ , que decresce pouco e gradativamente com o tempo. Portanto, apenas o cálculo de  $T_{cr}$  não é representativo para a previsão da vida útil de uma estrutura com base em dados passados. Para este fim, foi necessário estruturar uma outra função,  $T_u$ , em função do dano acumulado  $D_{am}$  que o cobrimento sofre ao decorrer do processo corrosivo.  $D_{am}$  se inicia no 0, quando o cobrimento de concreto está intacto, chegando a 1, quando há fissuração do cobrimento.

$D_{am}$  foi calculado cumulativamente acrescentando a cada iteração o dano de  $T_{cr}$  proporcional ao intervalo de tempo que abrange; no caso, todos os intervalos temporais foram iguais a um mês. Desse modo, a fórmula utilizada para  $D_{am}$  pode ser representada:

$$D_{am_n} = D_{am_{n-1}} + \frac{T_n - T_{n-1}}{T_{cr_{n-1}}} \quad (\text{Eq. 40})$$

em que  $D_{am_n}$  é o dano acumulado no cobrimento ao  $n$ -ésimo par tempo/temperatura,  $T_n - T_{n-1}$  é o intervalo de tempo entre as duas iterações consecutivas e  $T_{cr_{n-1}}$  é a previsão do tempo do início da corrosão do aço à fissuração do cobrimento da iteração anterior.

A expectativa de vida foi então calculada para cada iteração como:

$$E_v = (1 - D_{am})T_{cr} \quad (\text{Eq. 41})$$

caso  $D_{am} < 1$ ; caso contrário,  $E_v$  foi igualado a zero. A previsão de vida útil  $T_u$  para o modelo considerado, portanto, foi o tempo decorrido para a análise acrescido de  $E_v$ , caso o revestimento não fissurasse no período de tempo considerado (isto é,  $D_{am} < 1$ ). Caso o dano acumulado atingisse 1 antes que as iterações tempo/temperatura chegassem ao fim,  $T_u$  foi igualado ao último tempo  $T$  antes da fissuração do revestimento.

A previsão da vida útil  $T_u$  é, desta forma, apenas 1 valor para cada iteração da simulação de Monte Carlo, cujos histogramas foram plotados justapostos aos da perda da área de aço após 50 anos.

### 3.6 INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ZONA POROSA E DO CONTEÚDO DE CLORETO SOBRE A PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

A última etapa do estudo consistiu na análise comparativa da influência das variáveis  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  sobre a previsão da vida útil  $T_u$ . Para isso, os parâmetros e distribuições de  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  foram variados e combinados conforme apresentado nas Tabelas 2 e 3.

Para o cálculo de  $T_u$ , foram aplicadas a ambos  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  distribuições normal e lognormal. Enquanto os parâmetros de  $C_{rb}$  permaneciam fixos em  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,25$ , os parâmetros de  $\delta_0$  foram calculados como três dos nove pares entre  $\mu_{\delta_0} = [40 \ 25 \ 15] \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = [0,1 \ 0,25 \ 0,5]$ :  $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = 0,1$ ;  $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = 0,25$ ;  $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = 0,5$ . A escolha desta combinação de parâmetros de  $\delta_0$  foi feita para inicialmente comparar a influência de  $\delta_0$  sobre  $T_u$  com a de  $C_{rb}$  sobre  $T_u$ , a fim de aprofundar a análise para os 9 pontos apenas na variável de maior influência.

Para analisar-se o impacto de  $C_{rb}$  sobre  $T_u$ , por outro lado, manteve-se os parâmetros de  $\delta_0$  fixos em  $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = 0,25$ , e variou-se os parâmetros de  $C_{rb}$  entre  $\mu_{C_{rb}} = [0,3 \ 0,1 \ 0,02] \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = [0,1 \ 0,25 \ 0,35]$ . As primeiras combinações de parâmetros de  $C_{rb}$  utilizadas para avaliar o impacto da variação de  $C_{rb}$  sobre  $T_u$  e, e compará-lo ao da variação de  $\delta_0$ , foram:  $\mu_{C_{rb}} = 0,3 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,1$ ;  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,25$ ;  $\mu_{C_{rb}} = 0,02 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,5$ . Como foi verificado que a variação de  $C_{rb}$  possui maior impacto sobre  $T_u$ , como será apresentado na seção 4.2, prosseguiu-se para calcular  $T_u$  para as demais combinações de  $\mu_{C_{rb}}$  e  $V_{C_{rb}}$ .

No total, entre combinações de variações normais e lognormais e  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  com parâmetros fixos ou variáveis, foram realizados 8 pares de gráficos de  $\mu_{T_u}$  e  $\delta_{T_u}$ , cada um marcando de 3 a 9 pontos para os parâmetros calculados de  $T_u$ .

Tabela 2 - Variações dos parâmetros de  $\delta_0$  utilizadas para o cálculo de  $T_u$

| $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3, V_{C_{rb}} = 0,25$ |   |                                  |
|--|---|----------------------------------|
| $C_{rb} \sim \text{Normal}$                            | $C_{rb} \sim \text{Lognormal}$                        |                                  |
| $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,1$   | $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,1$  | $\delta_0 \sim \text{Normal}$    |
| $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,25$  | $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,25$ |                                  |
| $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,5$   | $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,5$  |                                  |
| $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,1$   | $\mu_{\delta_0} = 40 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,1$  | $\delta_0 \sim \text{Lognormal}$ |
| $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,25$  | $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,25$ |                                  |
| $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,5$   | $\mu_{\delta_0} = 15 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,5$  |                                  |

Tabela 3 - Variações dos parâmetros de  $C_{rb}$  utilizadas para o cálculo de  $T_u$

| $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}, V_{\delta_0} = 0,25$ |  |                                |
|---|--|--------------------------------|
| $\delta_0 \sim \text{Normal}$                         | $\delta_0 \sim \text{Lognormal}$                   |                                |
| $\mu_{C_{rb}} = [0,3 \ 0,1 \ 0,02] \text{ kg/m}^3$    | $\mu_{C_{rb}} = [0,3 \ 0,1 \ 0,02] \text{ kg/m}^3$ | $C_{rb} \sim \text{Normal}$    |
| $V_{C_{rb}} = [0,1 \ 0,25 \ 0,35]$                    | $V_{C_{rb}} = [0,1 \ 0,25 \ 0,35]$                 |                                |
| $\mu_{C_{rb}} = [0,3 \ 0,1 \ 0,02] \text{ kg/m}^3$    | $\mu_{C_{rb}} = [0,3 \ 0,1 \ 0,02] \text{ kg/m}^3$ | $C_{rb} \sim \text{Lognormal}$ |
| $V_{C_{rb}} = [0,1 \ 0,25 \ 0,35]$                    | $V_{C_{rb}} = [0,1 \ 0,25 \ 0,35]$                 |                                |

## 4 RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados das análises realizadas, descritas no capítulo 3. Está dividido em duas seções: a primeira, 4.1, dedicada à análise dependente do tempo do modelo empregado, para a qual foram utilizados os parâmetros descritos na Tabela 1. Conta com representações gráficas da densidade de corrente,  $i$ , da razão da perda da área de aço da seção transversal,  $\alpha$ , da previsão do tempo do início da corrosão do aço à fissuração do revestimento,  $T_{cr}$ , e da expectativa de vida do modelo,  $E_v$ , todos estes em função do tempo. Ao final da seção apresenta-se também um histograma da previsão da vida útil do modelo ao final da análise temporal,  $T_u$ , assim como outro histograma da perda da área de aço do modelo ao final do período de tempo considerado.

A seção 4.2 apresenta os resultados da análise da influência da espessura da zona porosa  $\delta_0$  e do conteúdo de cloreto à profundidade da armadura  $C_{rb}$  sobre a previsão da vida útil  $T_u$ . Para isto, foram calculados os parâmetros  $T_u$  para as diferentes combinações de distribuições e parâmetros de  $\delta_0$  e  $C_{rb}$  descritas na seção 3.6.

### 4.1 ANÁLISE DEPENDENTE DO TEMPO

Para o cálculo da densidade corrente  $i$  conforme descrito na seção 3.2, com base nas Eqs. 30 e 32, obteve-se o gráfico representado na Figura 9, em que cada linha corresponde a uma iteração da simulação de Monte Carlo. Como se pode ver,  $i$  oscila ao longo do tempo, em decorrência da dependência da temperatura da Eq. 30. É exponencialmente decrescente devido ao expoente negativo da formulação da Eq. 30 na forma:

$$i = e^{\frac{7,89+0,7771\ln(1,69C_{rb})-\frac{3006}{T_{mp}}-0,000116R_c+2,24T^{-0,215}}{1,08}} \quad (\text{Eq. 42})$$

já que o tempo  $T$  está elevado a um expoente negativo e  $\ln(1,69C_{rb})$  é um número negativo, devido a  $1,69C_{rb}$  ser sempre menor que 1.  $i$  começa em aproximadamente  $2 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  quando  $T = 0$  e cai para menos de  $0,3 \mu\text{A}/\text{cm}^2$  após cerca de 4 anos, decrescendo de maneira mais gradual a partir de então. Ressalta-se, entretanto, que por se tratar de um processo estocástico, os valores exatos mudam a cada realização do

processo, podendo se interpretar com acurácia apenas a tendência e faixa estimada da função calculada.

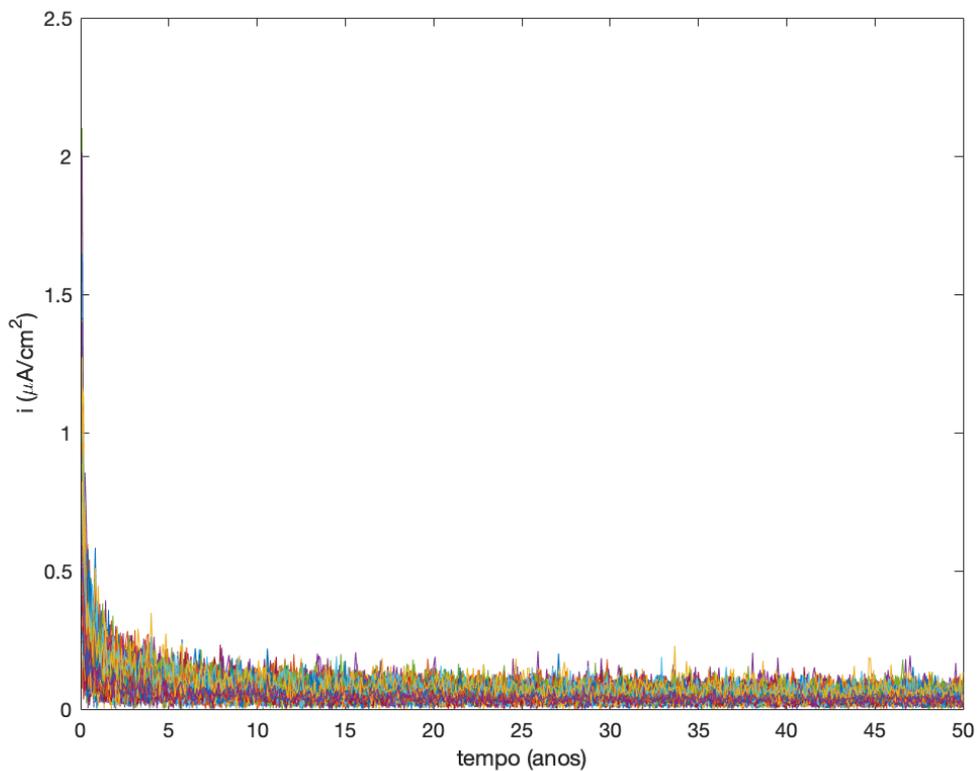


Figura 9: Densidade de corrente  $i$  em função do tempo

Pode-se relacionar o decaimento brusco da corrente de corrosão  $i$  até o 5º ano após o início da corrosão (Figura 9) com as recomendações de normas de desempenho de iniciar-se a vistoria de estruturas em concreto armado em torno deste período, quando a corrente corrosiva atuante já mostrou-se máxima. A razão da perda da área de aço da seção transversal,  $\alpha$ , foi calculada dividindo-se a área de aço final da seção transversal  $A_f$  pela área de aço original  $A_0$ , conforme escrito em termos dos diâmetros da barra na Eq. 39. A compilação de todas as iterações da simulação de Monte Carlo resultou na Figura 10.

Como se pode observar na Figura 10, após 25 anos calculou-se que o modelo já teria perdido cerca de 1% da área de aço de sua seção transversal. Após 50 anos, esta perda varia entre 1,5 e 4%. Como na análise da figura anterior, e de todos os gráficos desta seção, os valores obtidos para  $\alpha$  variam a cada realização do processo e a Figura 10 possui maior utilidade para analisar a tendência da perda da área de aço do modelo e estimar seu valor em função do tempo do que para a obtenção de valores exatos.

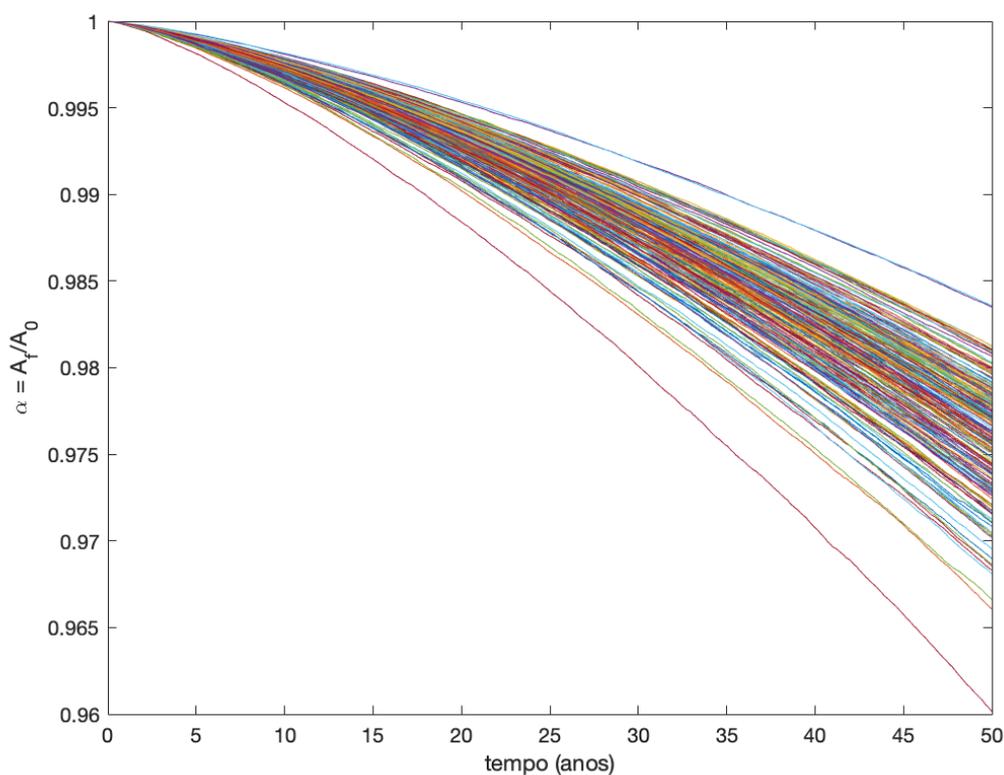


Figura 10: Perda da área de aço da seção transversal  $\alpha$  em função do tempo

Na Figura 10 percebe-se que a área de aço ao término dos 50 anos analisados varia entre cerca de 96% e 98,5% da área de aço original. Esta redução em estruturas construídas indicaria a necessidade do recálculo estrutural para a nova área de aço. Além da redução do volume de aço, a verificação estrutural também precisaria ser realizada para as propriedades físico-mecânicas do aço, alteradas pela corrosão. Como esta tende a ocasionar a perda de ductilidade do aço, seria recomendável realizar um ensaio de tração em uma amostra da estrutura considerada.

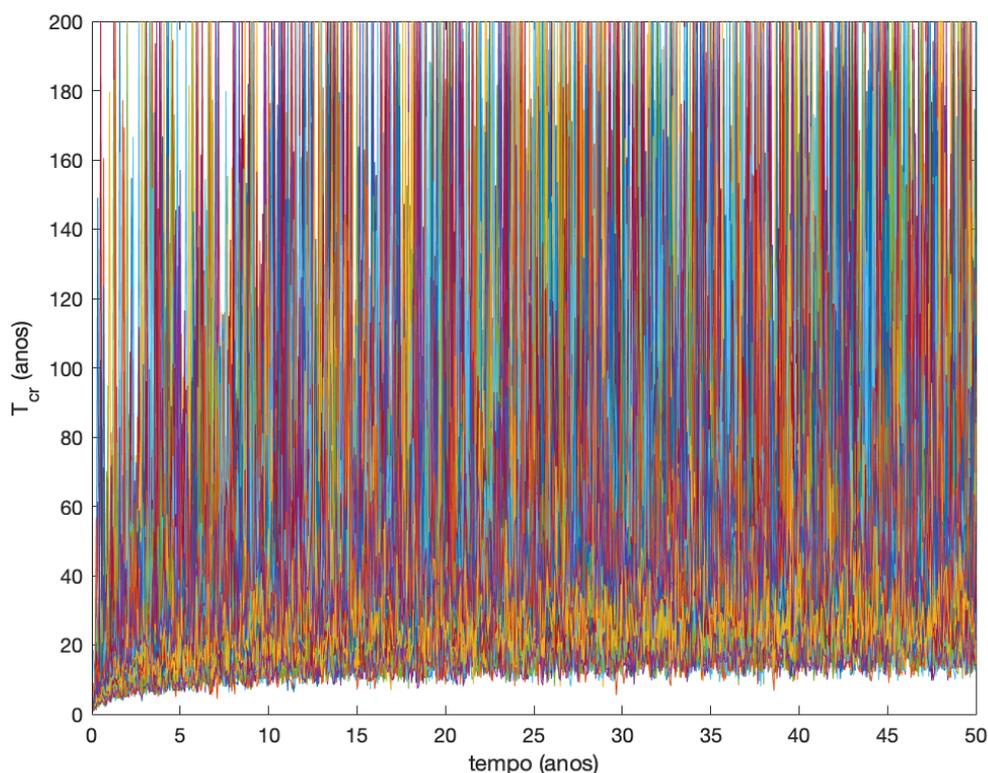


Figura 11: Previsão do tempo do início da corrosão do aço à fissuração do cobrimento,  $T_{cr}$ , em função do tempo

Na Figura 11 estão representados os valores previstos para o tempo do início da corrosão do aço da armadura à fissuração do cobrimento,  $T_{cr}$ , em função do tempo.  $T_{cr}$  foi calculado pela Eq. 29, função do tempo  $T$ , diâmetro da barra de aço  $D$ , densidade de corrente de corrosão  $i$ , espessura do cobrimento  $C$ , módulo de elasticidade  $E_c$ , coeficiente de Poisson  $\nu$ , coeficiente de deformação progressiva do concreto  $\phi_c$  e espessura da zona porosa  $\delta_0$ . Como  $D$  e  $i$  também são função de  $T$ , e  $i$  oscila drasticamente em função de  $T$ , como pode ser verificado na Figura 9, a previsão do tempo de início da corrosão à fissuração do cobrimento também oscila de 0 a 200 anos. Esta oscilação independente do tempo como  $T_{cr}$  é uma previsão momentânea para dado intervalo de tempo, oscilando com a corrente de corrosão que por sua vez oscila com a temperatura.

Sendo  $T_{cr}$ , em função do tempo, primordialmente dependente de  $i$ , que varia mais que o decréscimo de  $D$  ao decorrer do processo corrosivo, o cálculo de  $T_{cr}$  torna-se dependente da temperatura  $T_{mp}$  da qual  $i$  é função, segundo as Eqs. 30 e 42. Desta forma, a oscilação natural da temperatura explica a extrema oscilação da Figura 11. Apesar da aparência randômica, nota-se na Figura 11 que  $T_{cr}$  é menor para valores muito baixos de  $T$  (aproximadamente até  $T = 4$  anos), o que corresponde ao período da

densidade da corrente de corrosão  $i$  anterior ao seu decréscimo exponencial (Figura 9). Ademais, o limite inferior de  $T_{cr}$  continua aumentando ligeiramente ao longo do tempo, como consequência do decaimento gradual da densidade de corrente  $i$ .

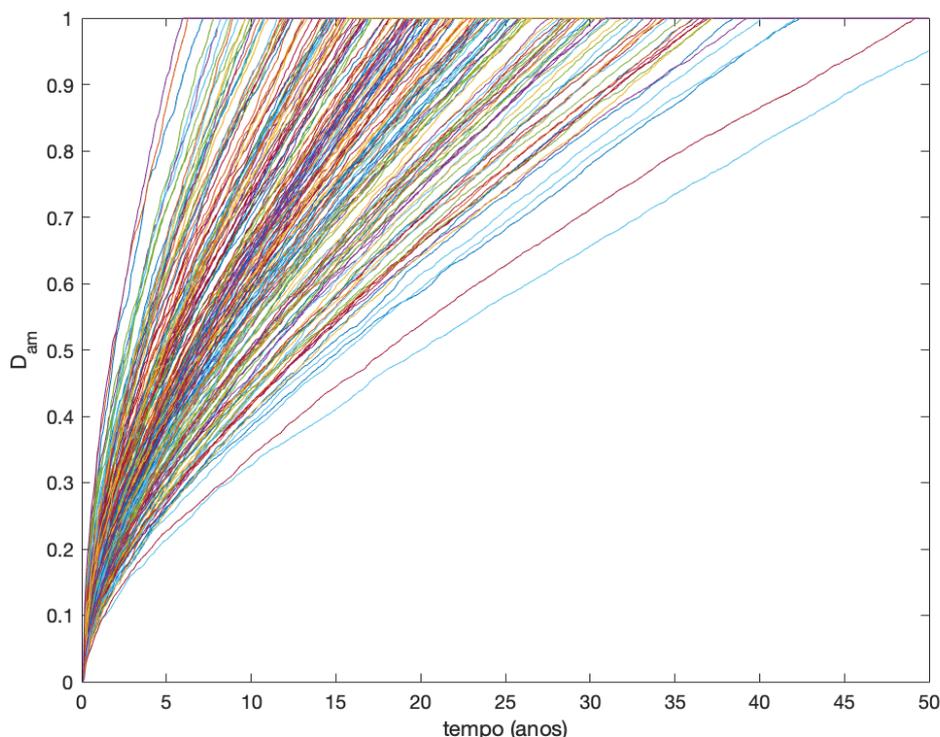


Figura 12: Dano acumulado causado ao cobrimento,  $D_{am}$ , em função do tempo

O dano acumulado  $D_{am}$  sofrido pelo cobrimento no decorrer do processo corrosivo foi calculado como função de  $T_{cr}$  pela Eq. 40, conforme explicado na seção 3.5. A Figura 12 apresenta os resultados das 200 iterações da simulação de Monte Carlo para o cálculo de  $D_{am}$  ao longo do tempo. Nela percebe-se que  $D_{am}$  atingiu seu valor máximo, 1, desde tão cedo quanto 6 anos após o início da corrosão até além dos 50 anos modelados, concentrando-se  $D_{am}=1$  na faixa dos 20 anos. Ou seja, na simulação realizada, houve fissuração do cobrimento de quase todos os cilindros de concreto, alguns tão cedo quanto 6 anos após o início da corrosão. Entretanto, há uma minoria cuja fissuração ocorre apenas 30 anos após o início da corrosão do aço, com exceções não atingindo a fissuração ao mesmo ao fim dos 50 anos analisados.

Calculado o dano  $D_{am}$ , a expectativa de vida  $E_v$  foi calculada pela Eq. 41, ou seja, como produto entre a fração do cobrimento restante, acumulado, e a previsão do tempo do início da corrosão do aço da armadura à fissuração do cobrimento,  $T_{cr}$ , função do tempo. O resultado é apresentado na Figura 13.

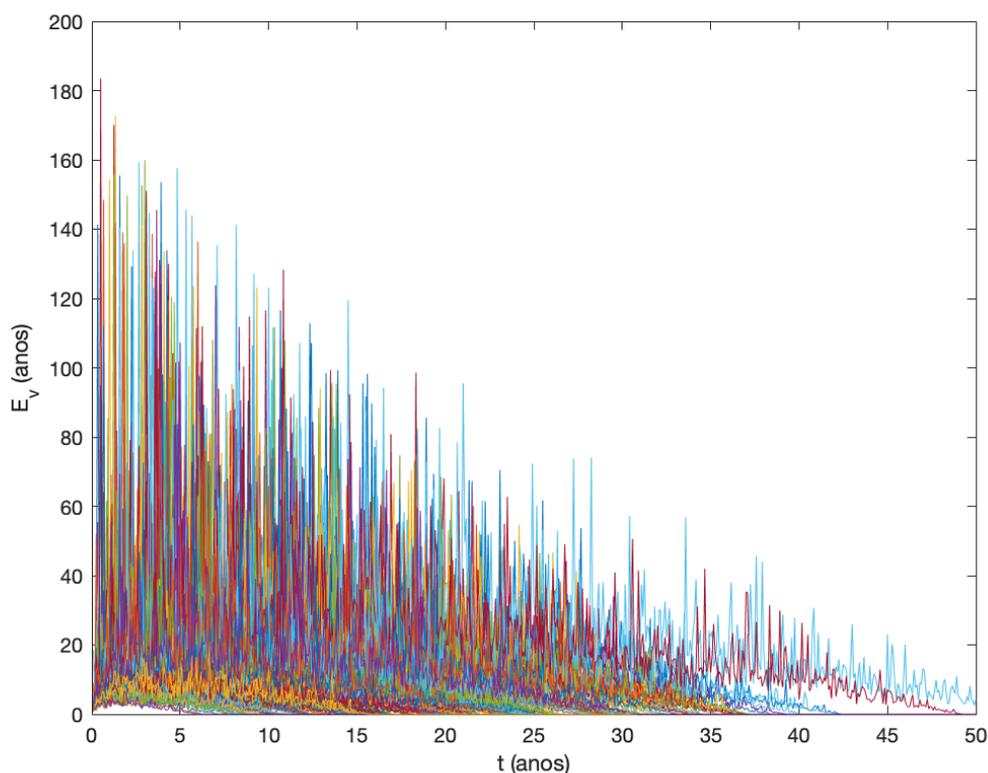


Figura 13: Dano acumulado causado ao cobrimento,  $D_{am}$ , em função do tempo

Como esperado, a expectativa de vida do modelo  $E_v$ , diminui com o passar do tempo, conforme a aumento do dano acumulado  $D_{am}$ .

Finalizando esta seção, a Figura 14 apresenta um histograma da previsão da vida útil do modelo,  $T_u$ , e razão da perda de área aço,  $\alpha$ , após o tempo analisado. O histograma de  $T_u$  foi obtido calculando-se o tempo para a fissuração do cobrimento (isto é, o tempo até o dano acumulado  $D_{am}$  somar 1, ou o tempo da análise acrescido da expectativa de vida  $E_v$  ao seu final, caso a fissuração do cobrimento não ocorresse dentro do período de tempo analisado) para cada iteração de Monte Carlo realizada.

O histograma de  $\alpha$  foi calculado com os valores finais da área de aço corroída a cada iteração da simulação realizada. Desta forma, visa ser representativa da razão da perda de área de aço após 50 anos de uma barra de 16 mm de diâmetro envolta por cobrimento de concreto de 20 mm, submetida às variações de temperatura da cidade de Brasília dos últimos 50 anos.

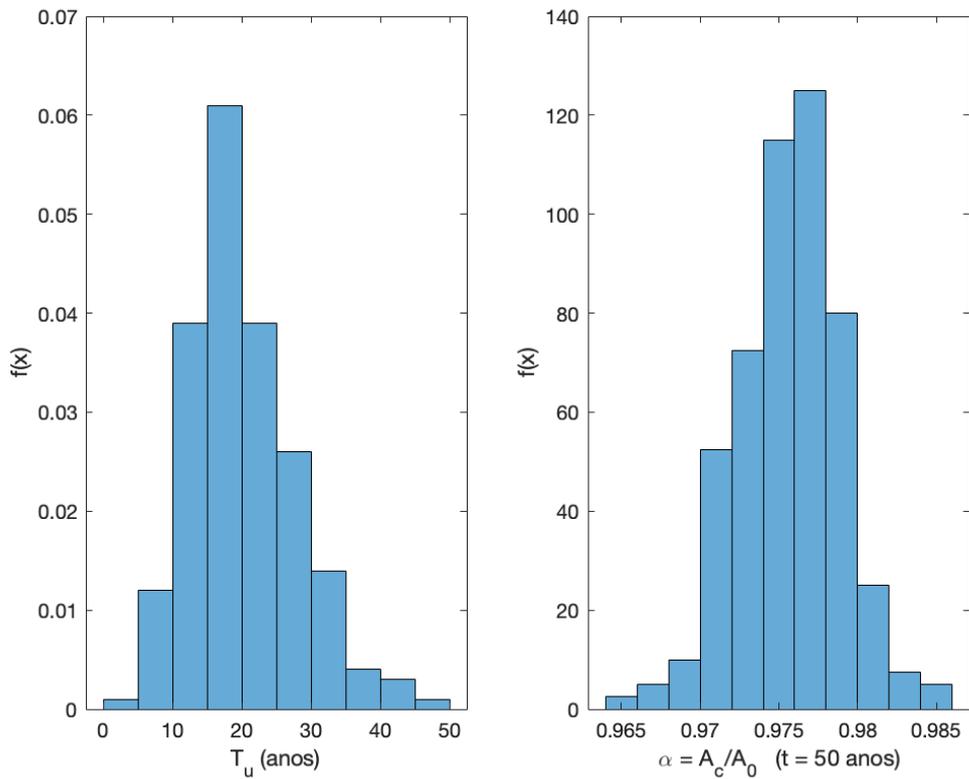


Figura 14: Direita: histograma da vida útil  $T_u$ . Esquerda: histograma da perda da área de aço ao final de 50 anos

#### 4.2 ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESPESSURA DA ZONA POROSA E DO CONTEÚDO DE CLORETO SOBRE A PREVISÃO DA VIDA ÚTIL

Para a análise da influência das variáveis  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  sobre a previsão da vida útil  $T_u$ , adotou-se as distribuições e parâmetros  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  discriminados nas Tabelas 2 e 3, mantendo as demais variáveis com os parâmetros listados na Tabela 1. Para  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  adotando distribuição normal, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros de  $T_u$ :

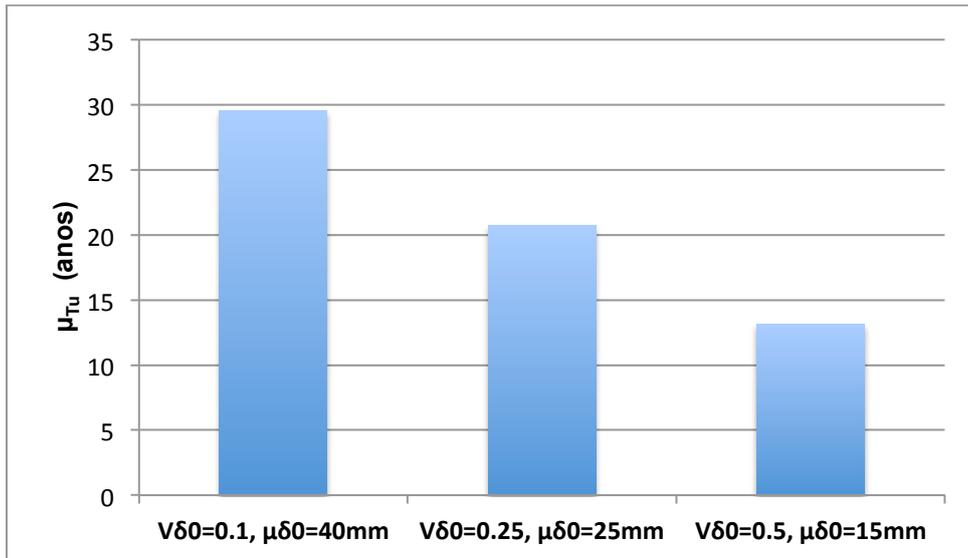


Figura 15: Médias  $\mu_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

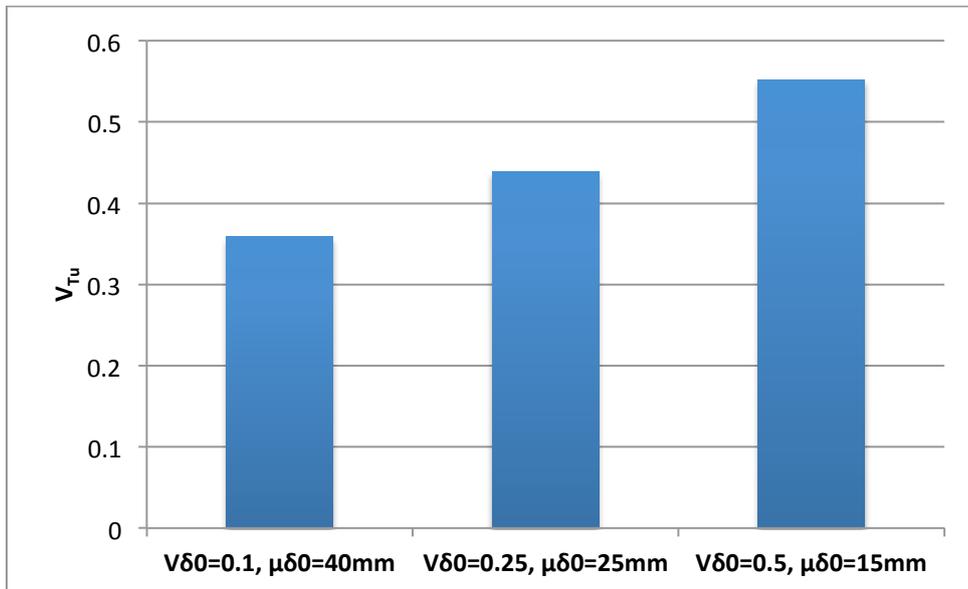


Figura 16: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .

$C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

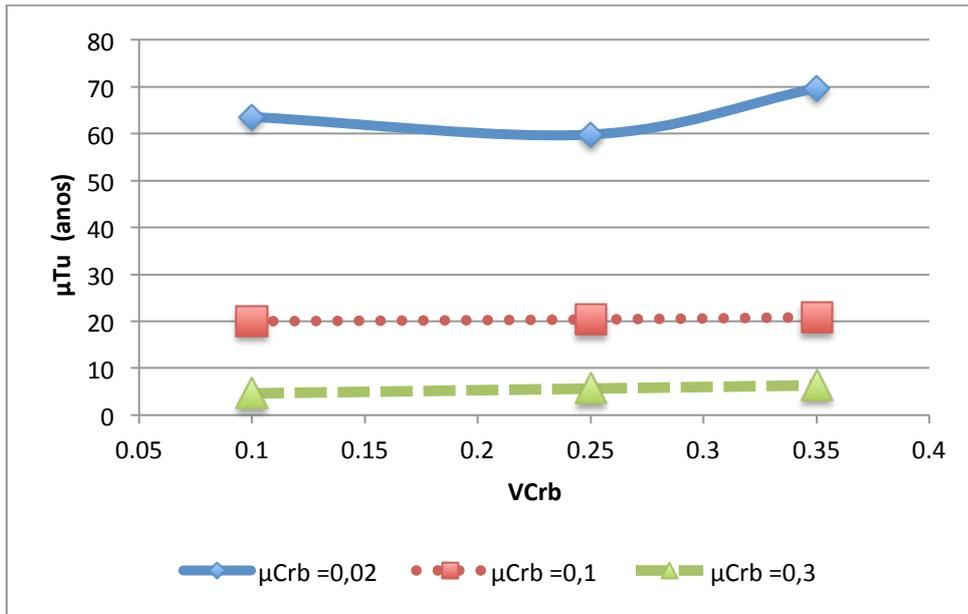


Figura 17: Médias  $\mu_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

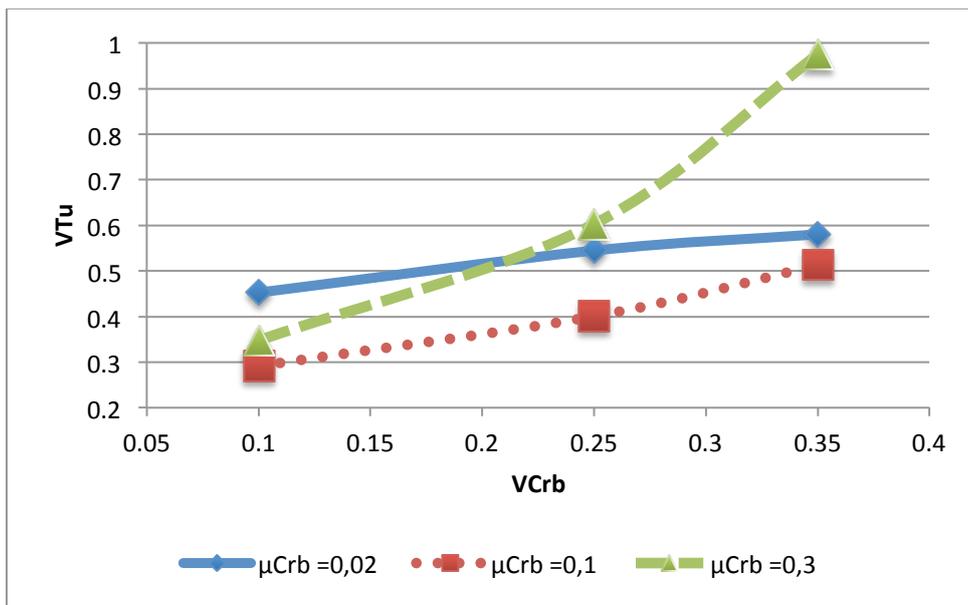


Figura 18: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

Como se pode ver nas figuras 15-18, a variabilidade de  $T_u$  foi maior variando-se os parâmetros de  $C_{rb}$  que os parâmetros de  $\delta_0$ , motivo pelo qual os gráficos das Figuras 17 e 18 foram detalhados para 9 pontos, enquanto as Figuras 15 e 16 descrevem apenas 3. Os histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  para as combinações de parâmetros representadas nas Figuras 15 e 16 são os que se seguem:

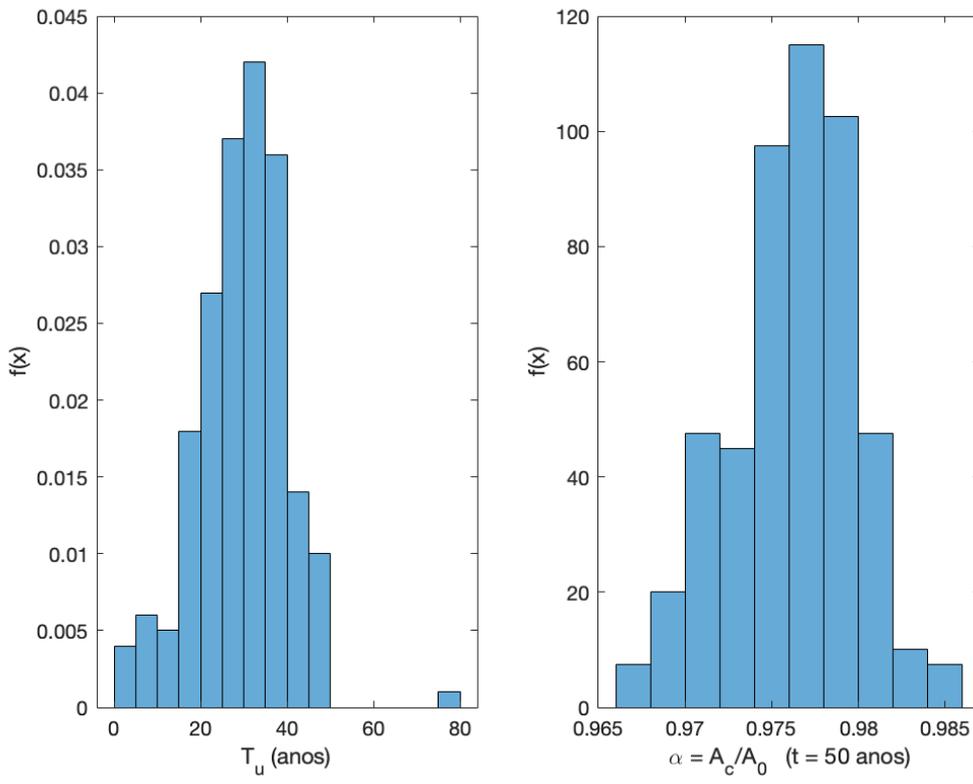


Figura 19: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 40$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

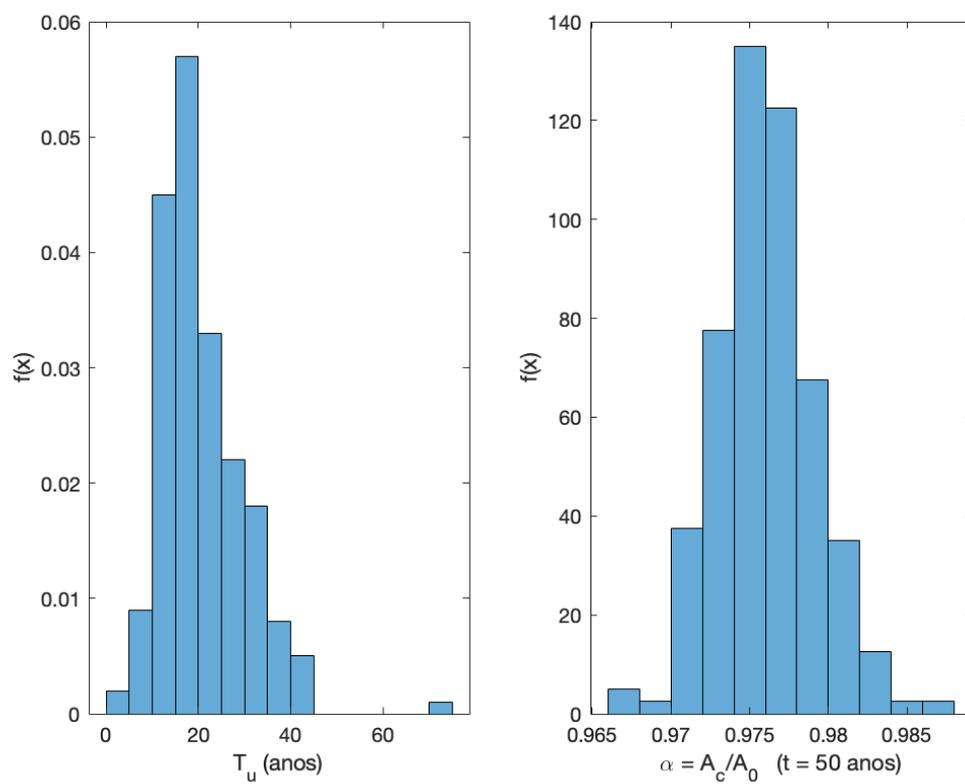


Figura 20: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

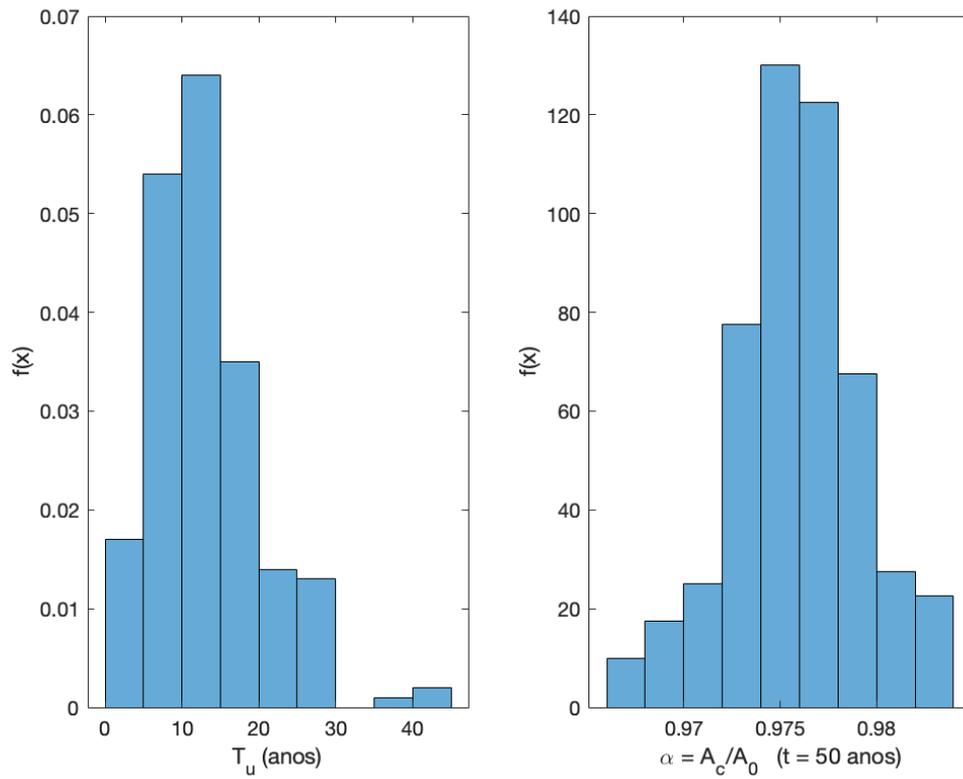


Figura 21: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 15$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,5$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

Para 3 dos pontos ilustrados nas Figuras 17 e 18, isto é, cálculos de  $T_u$  com  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  seguindo distribuições normais,  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ , foram obtidos os seguintes histogramas:

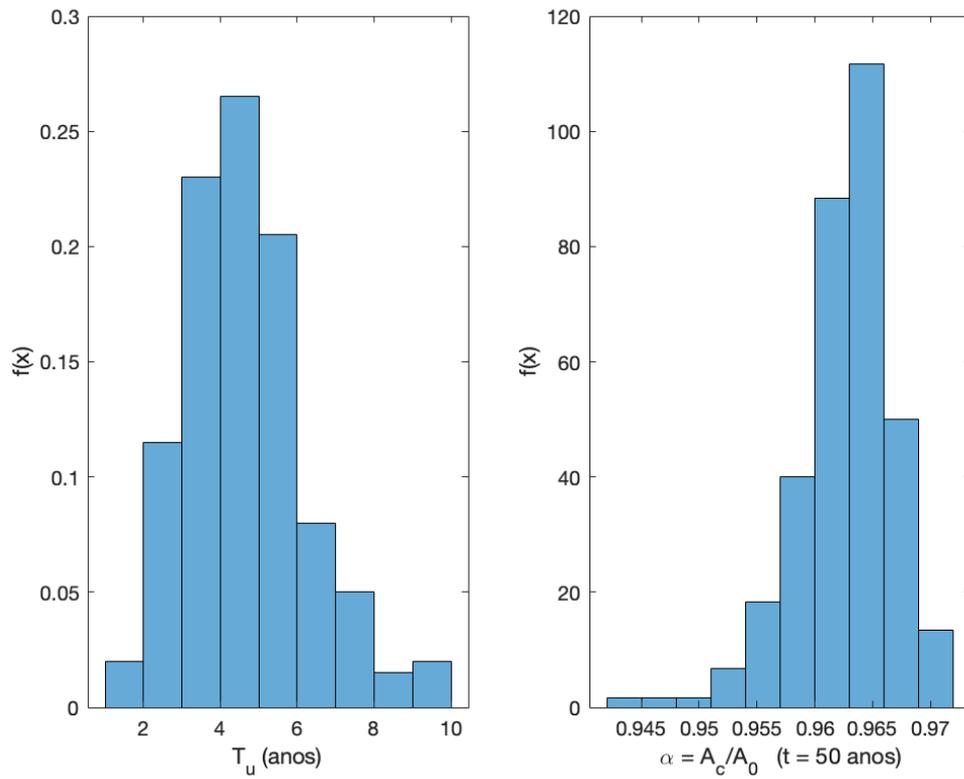


Figura 22: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,3 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,1$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

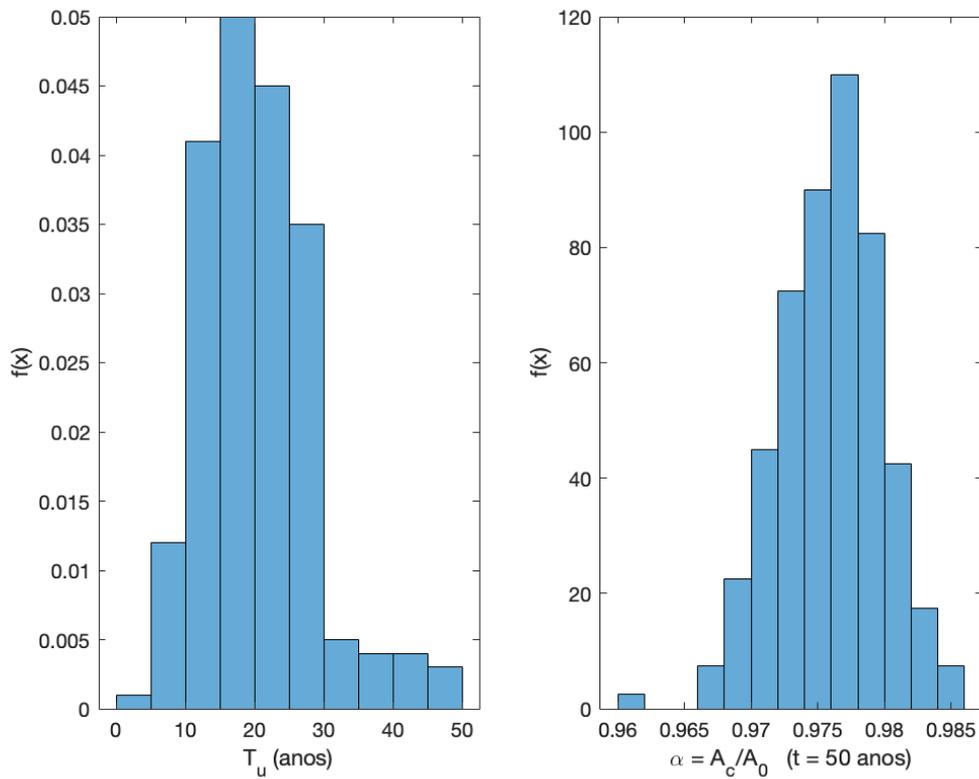


Figura 23: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

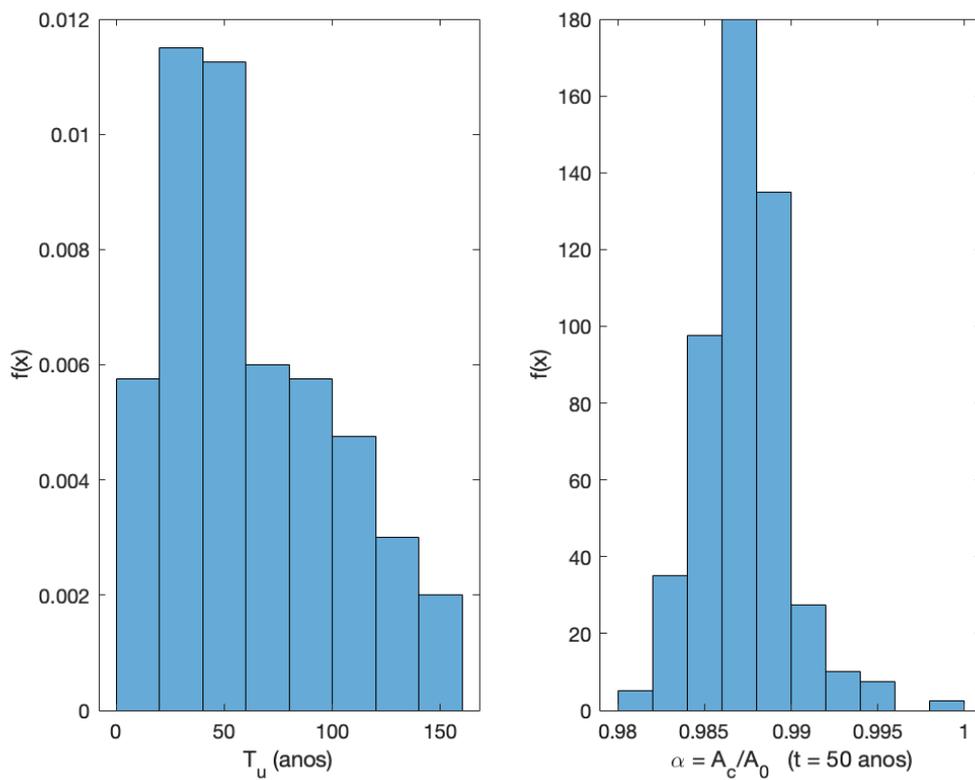


Figura 24: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{C_{rb}} = 0,02 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}}=0,35$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim N$

Em seguida, para  $C_{rb}$  adotando distribuição lognormal e  $\delta_0$  adotando distribuição normal, obteve-se os seguintes valores para os parâmetros de  $T_u$ :

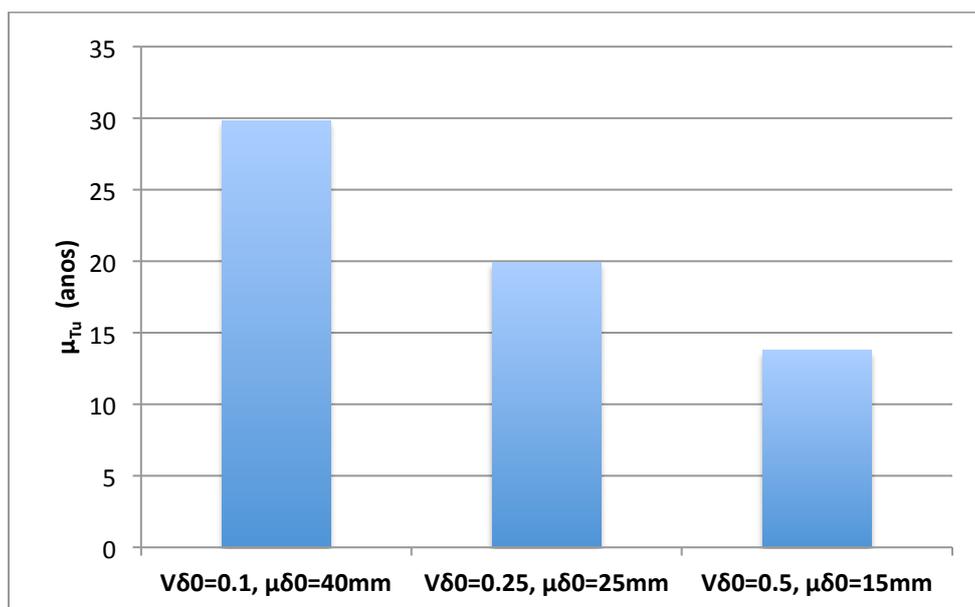


Figura 25: Médias  $\mu_{T_u}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}}=0,25$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim N$

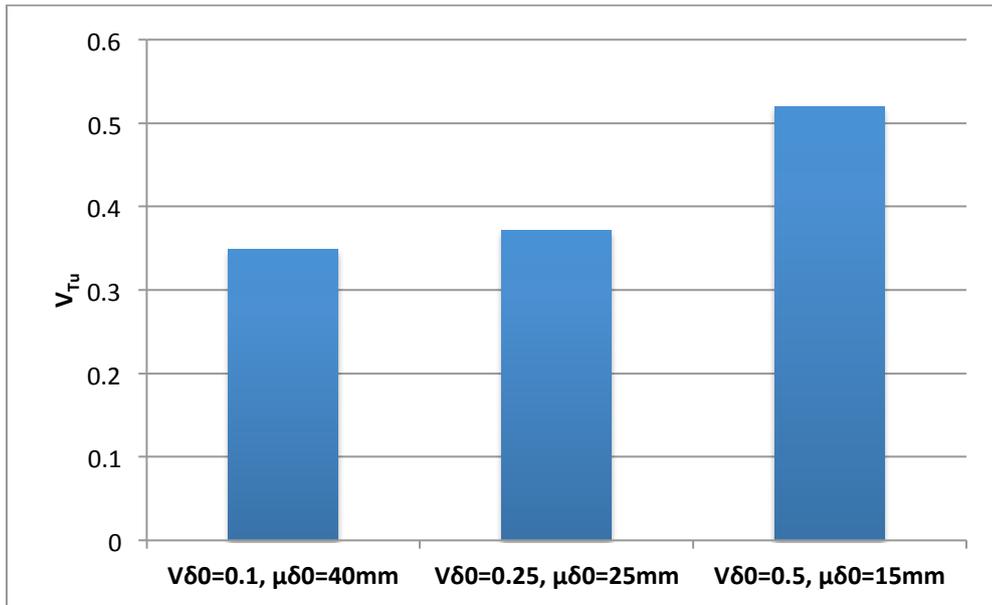


Figura 26: Coeficientes de variação  $V_{T_u}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,25$ .

$C_{rb} \sim \text{LN}, \delta_0 \sim \text{N}$

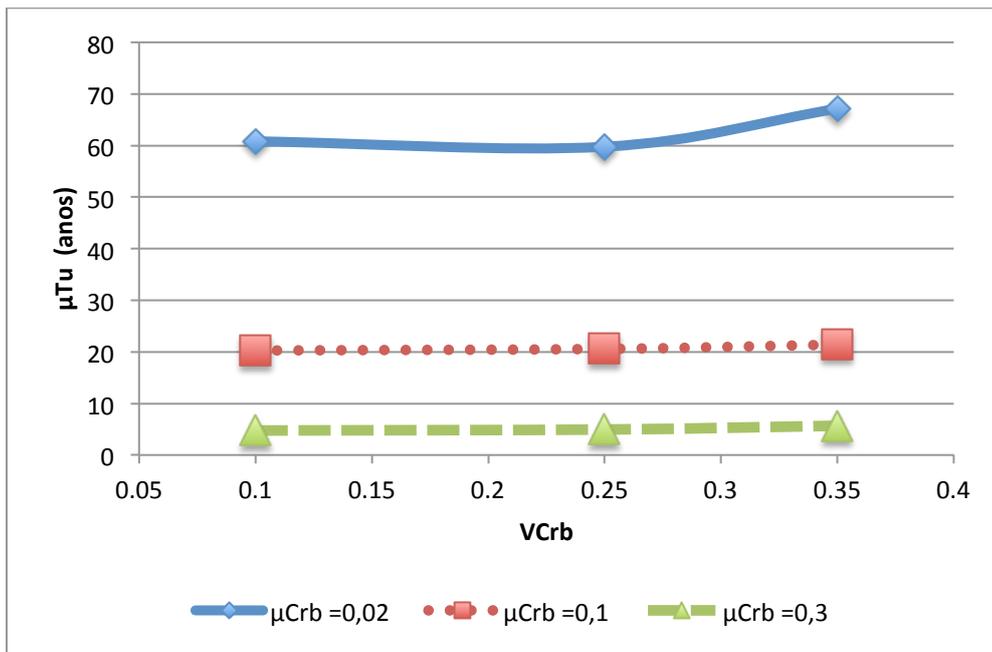


Figura 27: Médias  $\mu_{T_u}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25 \text{ mm}$  e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}, \delta_0 \sim \text{N}$

Ressalta-se que foram novamente calculadas 9 combinações de parâmetros para  $C_{rb}$  e 3 para  $\delta_0$  pois  $C_{rb}$  permaneceu a variável de maior influência sobre  $T_u$  após assumir distribuição lognormal; em todas as combinações de distribuição realizadas,  $C_{rb}$  mostrou ter mais influência que  $\delta_0$  sobre  $T_u$ .

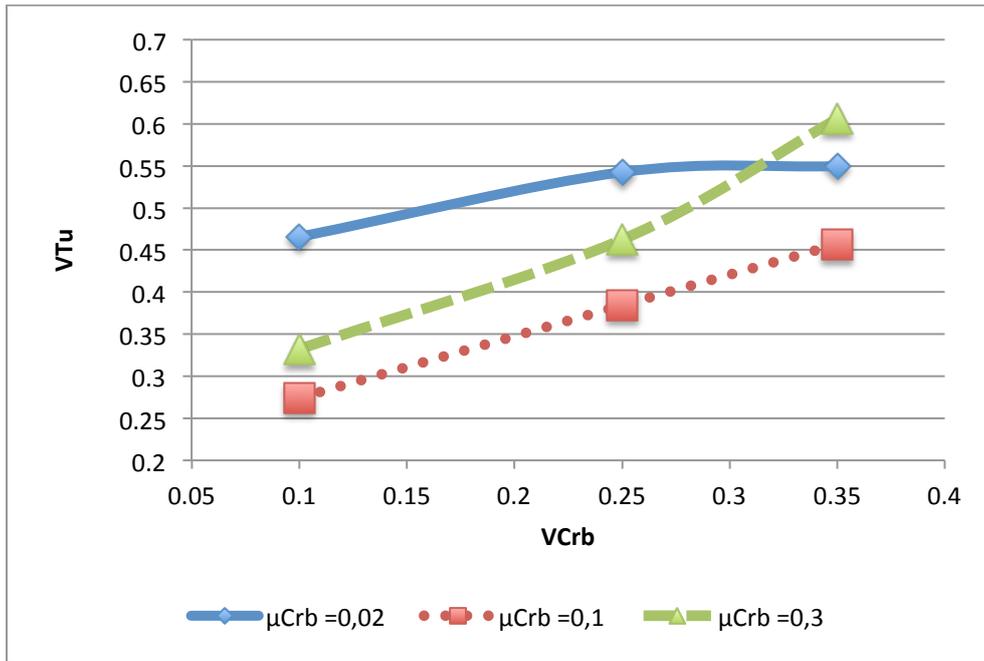


Figura 28: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta 0} = 25$  mm e  $V_{\delta 0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim N$

Os histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  para as combinações de parâmetros representadas nas Figuras 25 e 26 são os que se seguem:

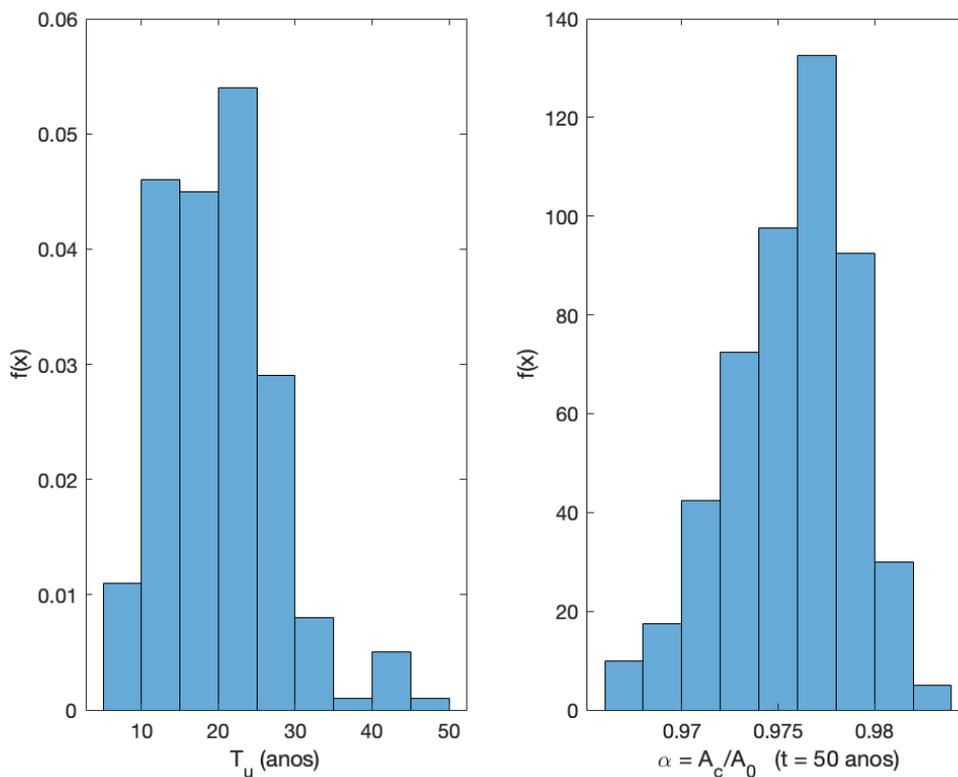


Figura 29: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta 0} = 40$  mm e  $V_{\delta 0} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim N$

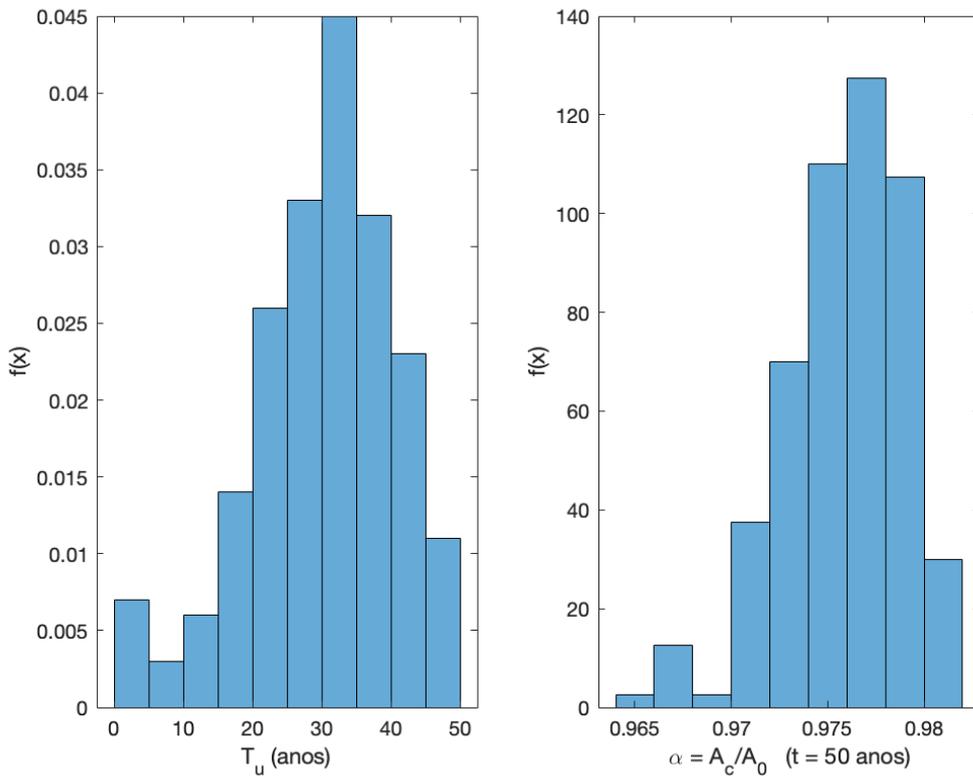


Figura 30: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim N$

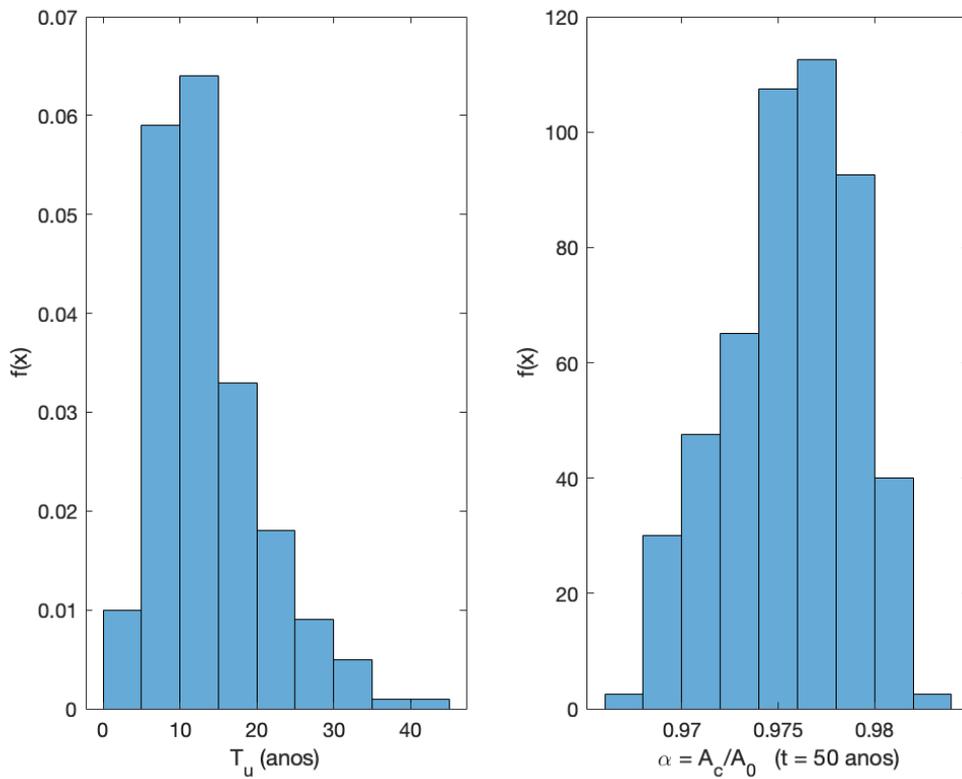


Figura 31: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 15$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,5$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim N$

Os histogramas referentes a 3 das 9 combinações de parâmetros de  $C_{rb}$  representadas nas Figuras 27 e 28, isto é, com  $C_{rb}$  seguindo uma distribuição lognormal,  $\delta_0$  seguindo distribuição normal e de parâmetros constantes  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ , foram obtidos e estão apresentados nas figuras seguintes:

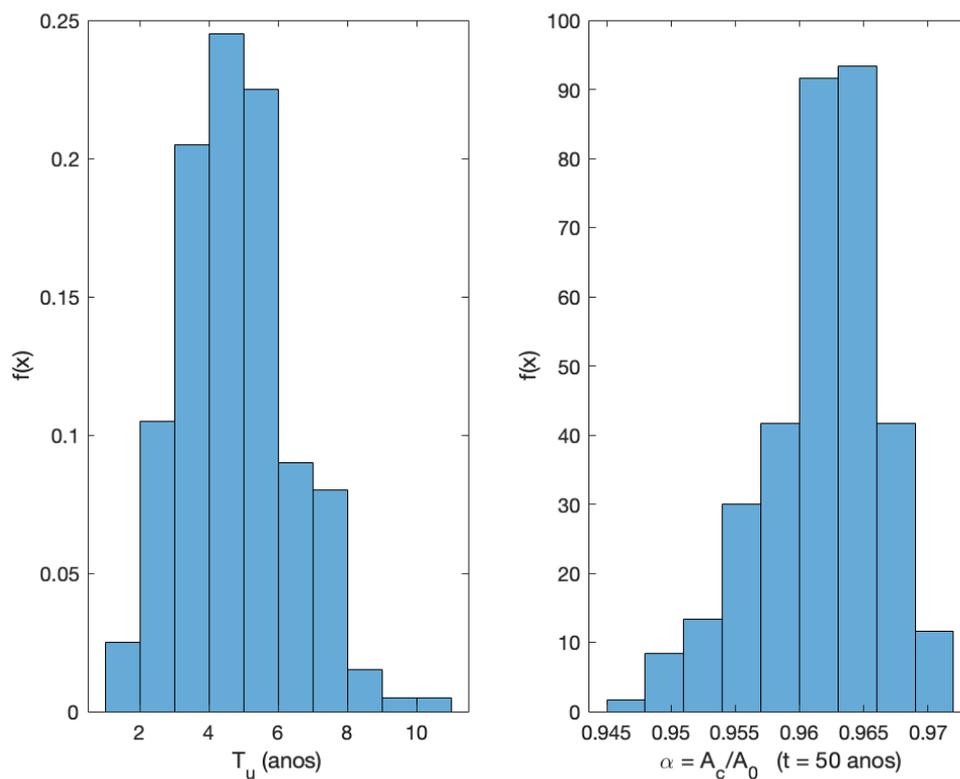


Figura 32: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{C_{rb}} = 0,3 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{N}$

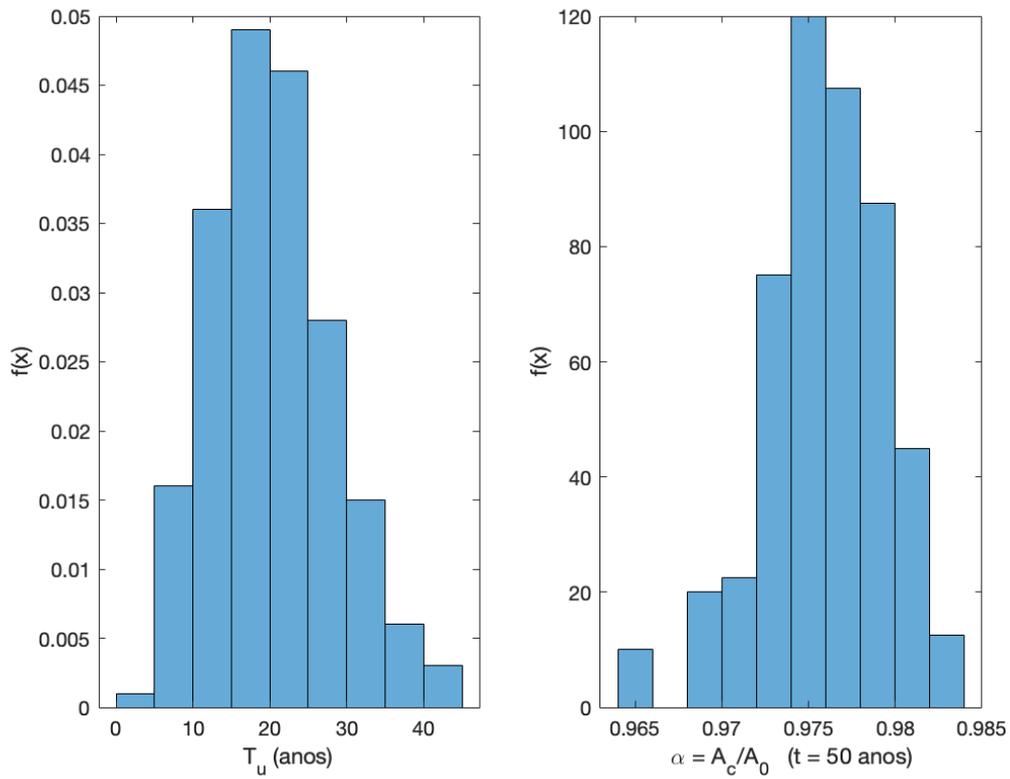


Figura 33: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{N}$

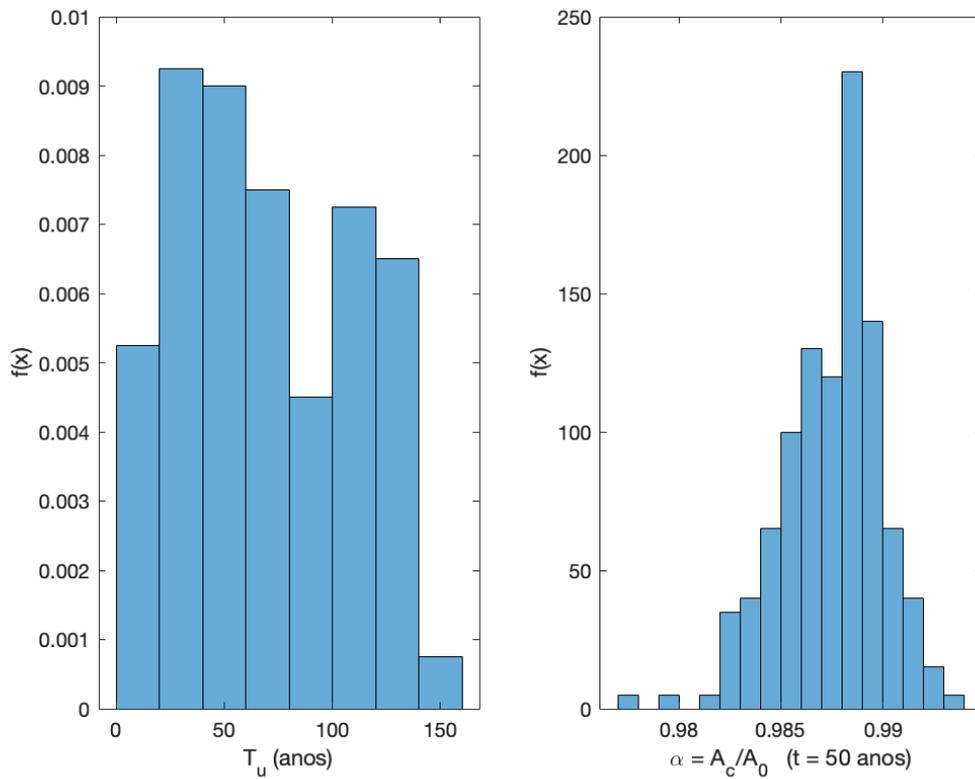


Figura 34: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,02 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,35$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{N}$

Em sequência, calculou-se os parâmetros de  $T_u$  para  $C_{rb}$  seguindo distribuição normal e  $\delta_0$  seguindo distribuição lognormal:

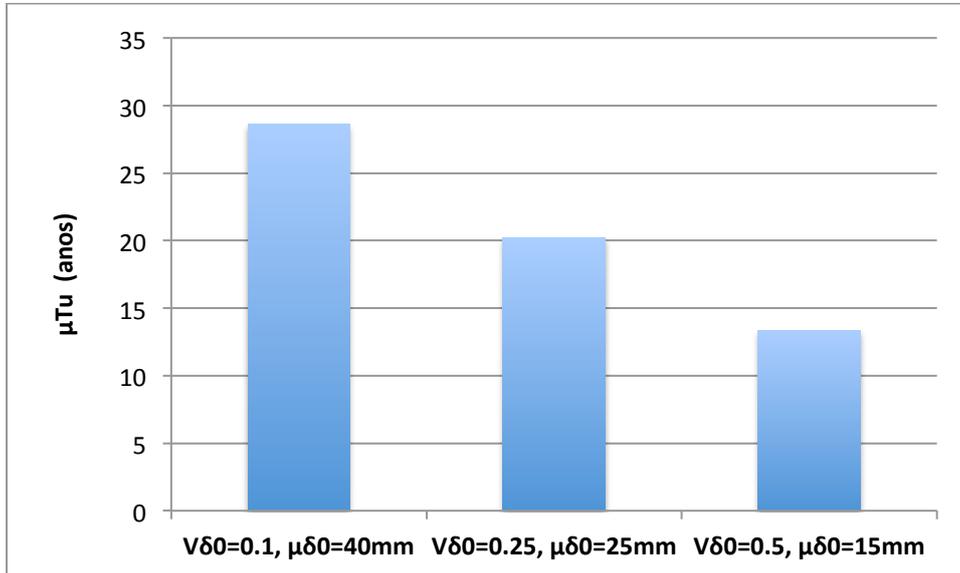


Figura 35: Médias  $\mu_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

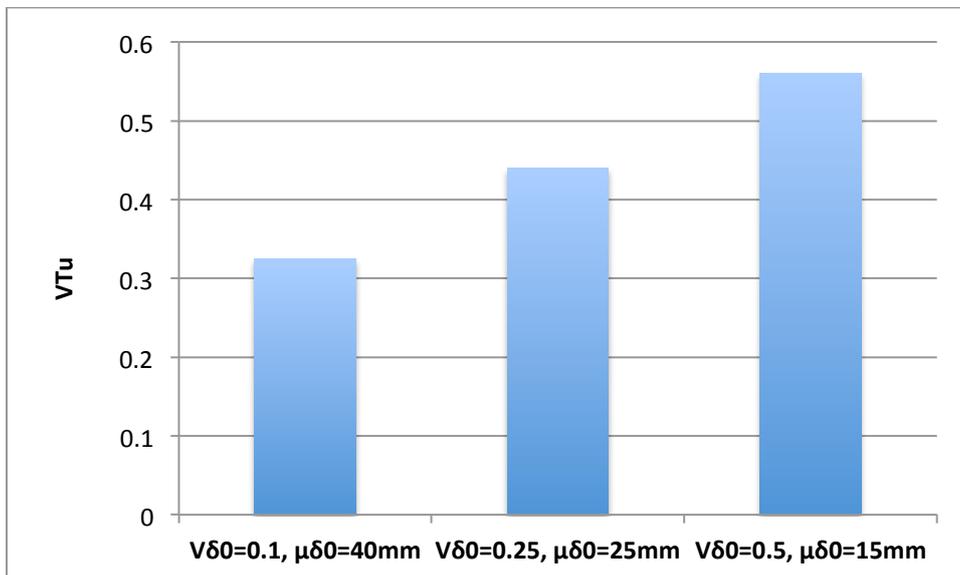


Figura 36: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}} = 0,25$ .

$$C_{rb} \sim N, \delta_0 \sim LN$$

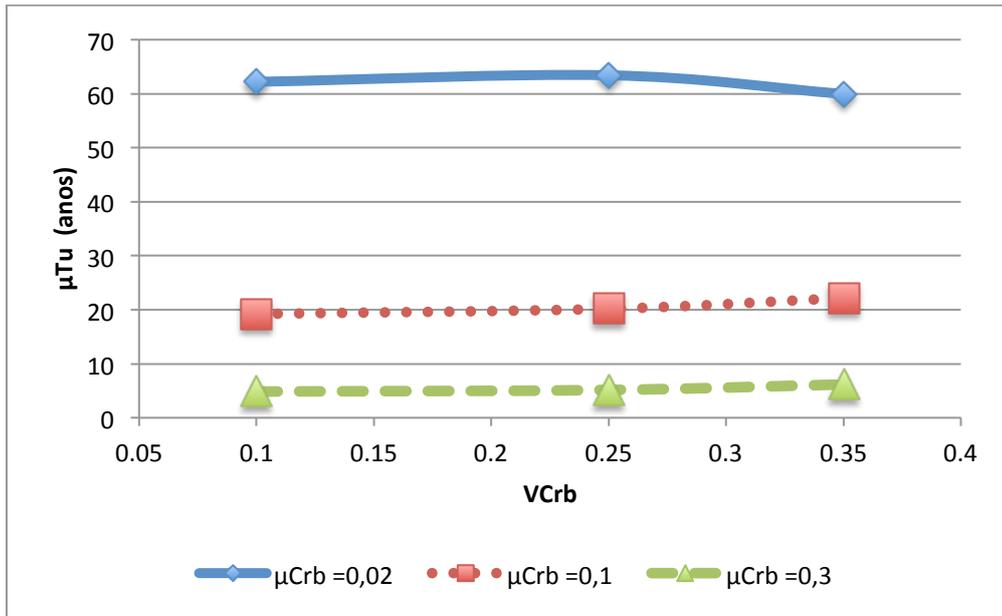


Figura 37: Médias  $\mu_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

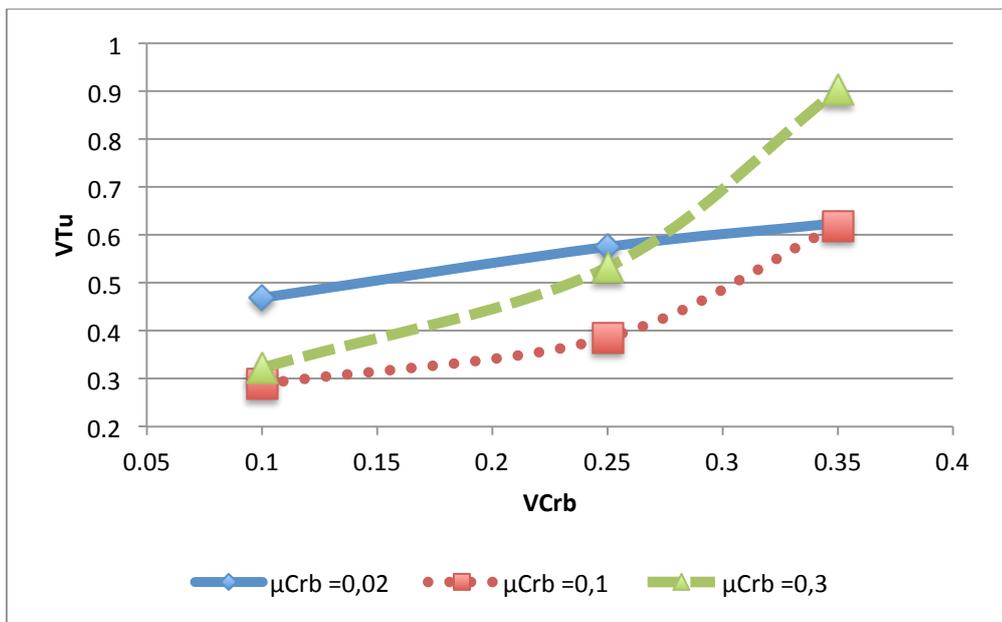


Figura 38: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

Os histogramas referentes aos valores de  $T_u$  cujos parâmetros estão apresentados nas Figuras 35 e 36 se encontram nas Figuras 39-41, a seguir:

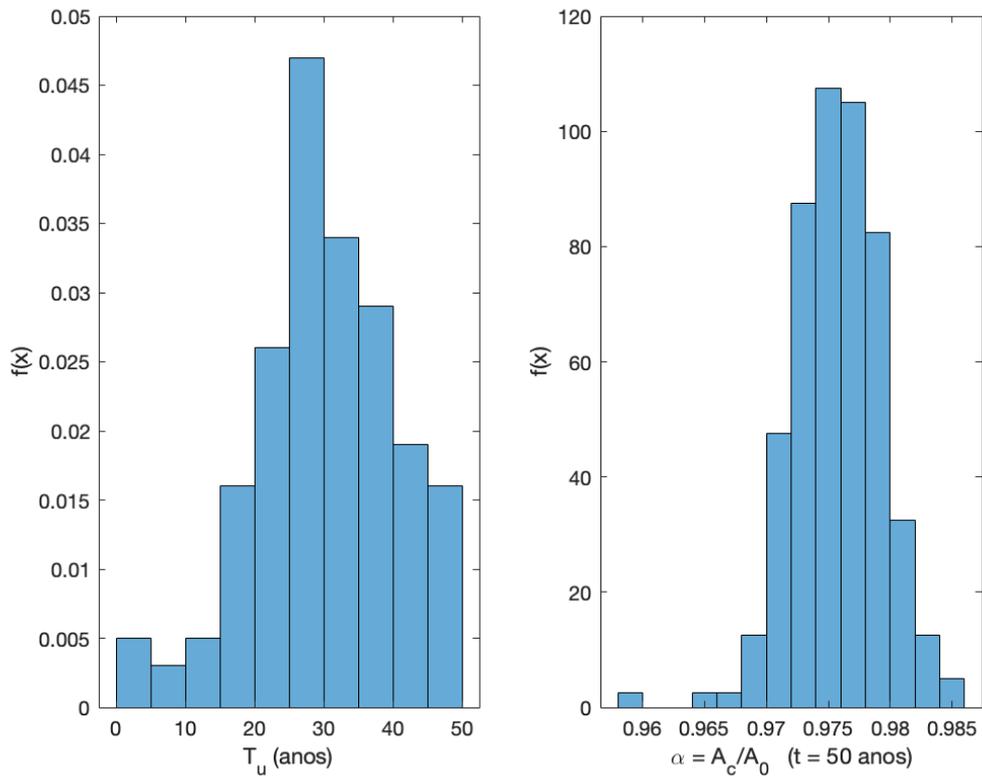


Figura 39: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 40$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

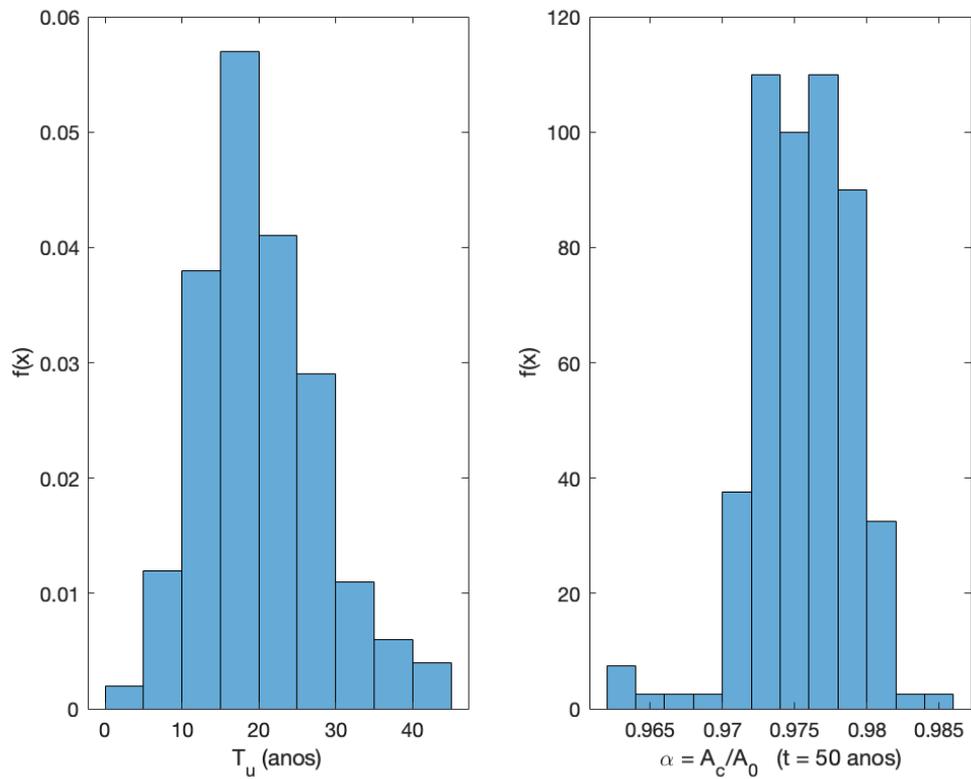


Figura 40: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

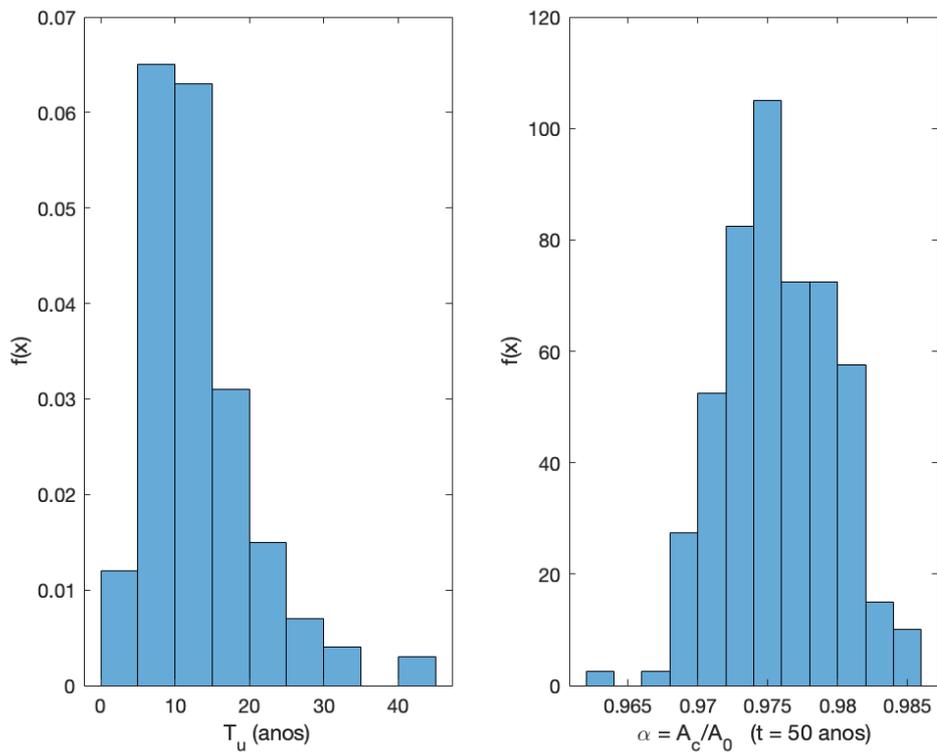


Figura 41: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 15$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,5$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

Os histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  para 3 combinações de parâmetros de  $C_{rb}$  utilizadas para obtenção das Figuras 37 e 38 estão apresentados nas Figuras 42-44, a seguir:

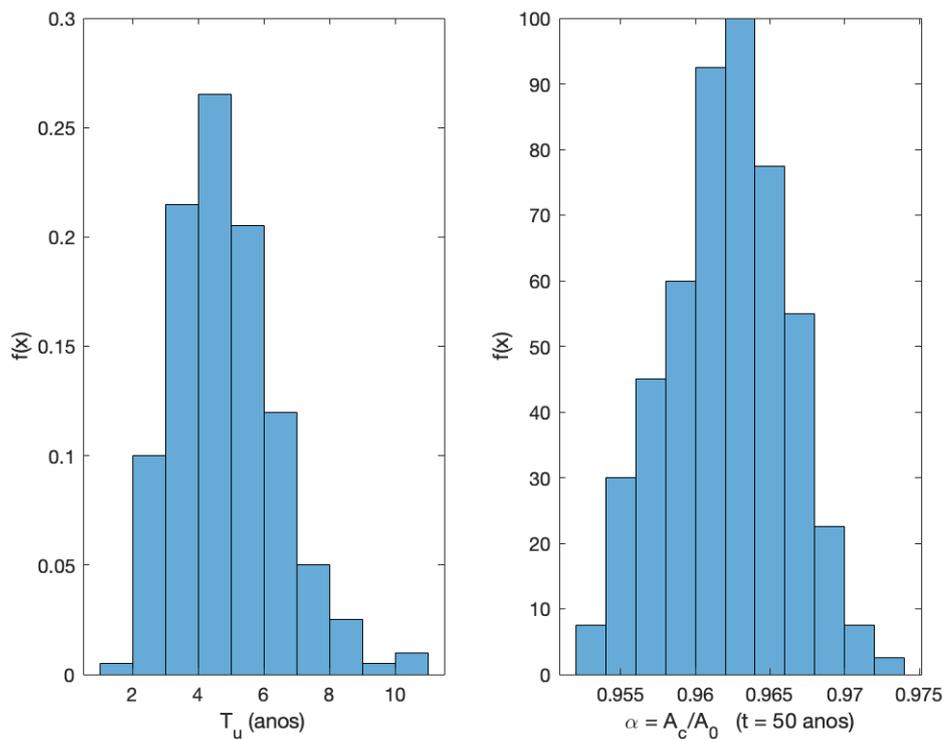


Figura 42: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{C_{rb}} = 0,3$  kg/m<sup>3</sup> e  $V_{C_{rb}} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim LN$

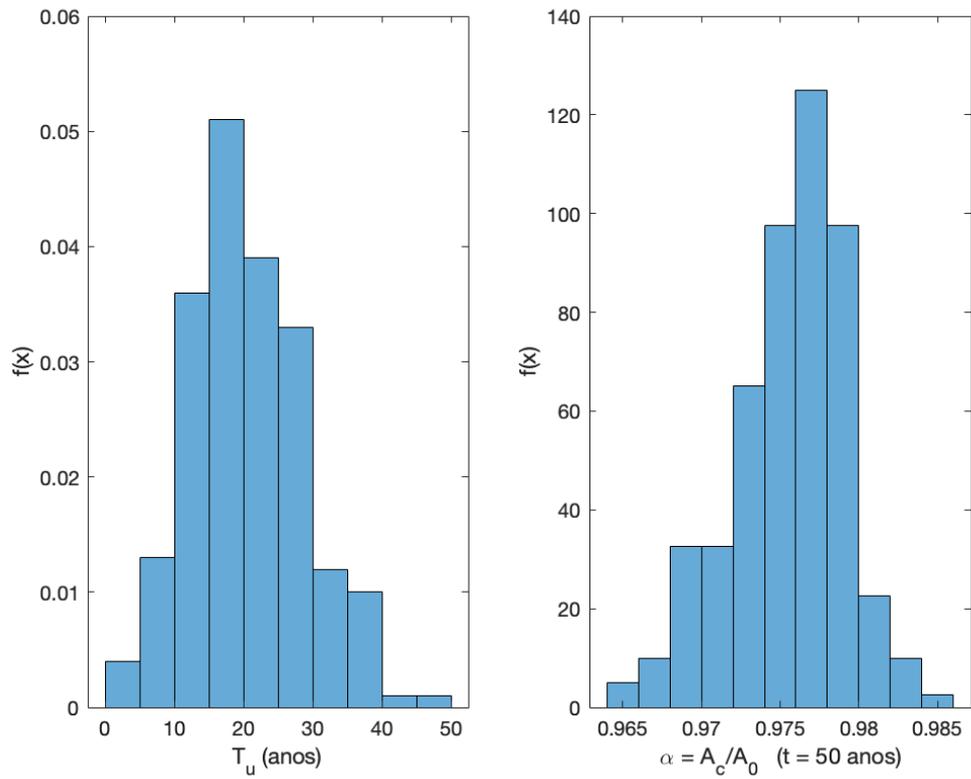


Figura 43: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

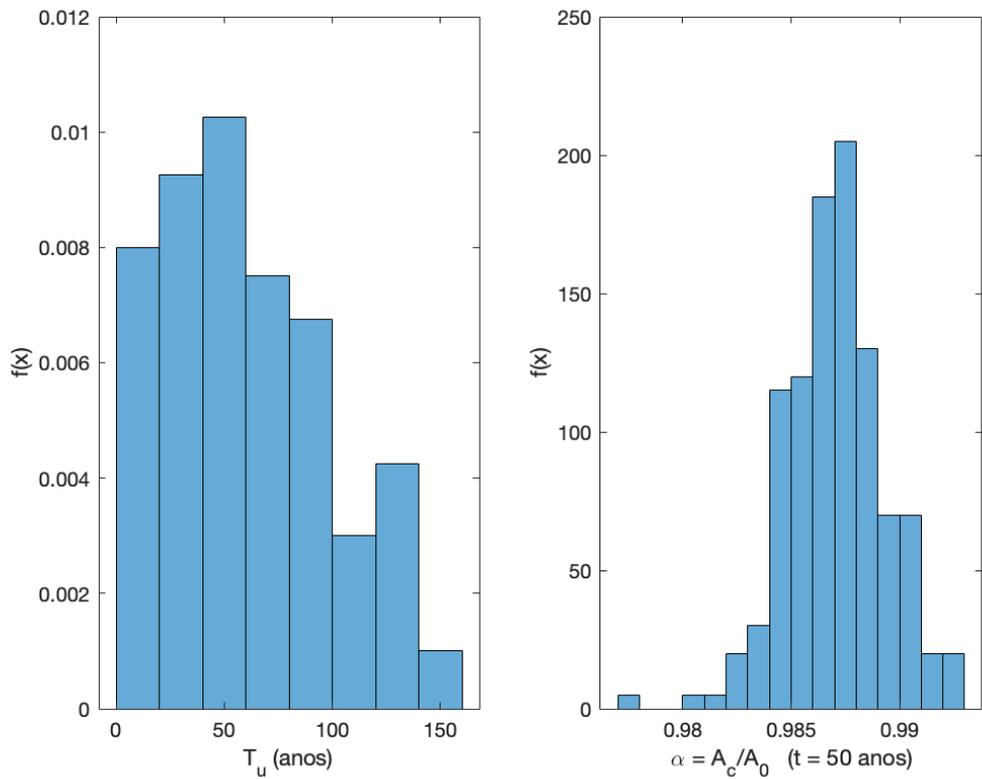


Figura 44: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,02 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,35$ .  $C_{rb} \sim N$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

Finalmente, para ambas as variáveis  $C_{rb}$  e  $\delta_0$  seguindo distribuição lognormal, foram obtidos os seguintes parâmetros de  $T_u$ :

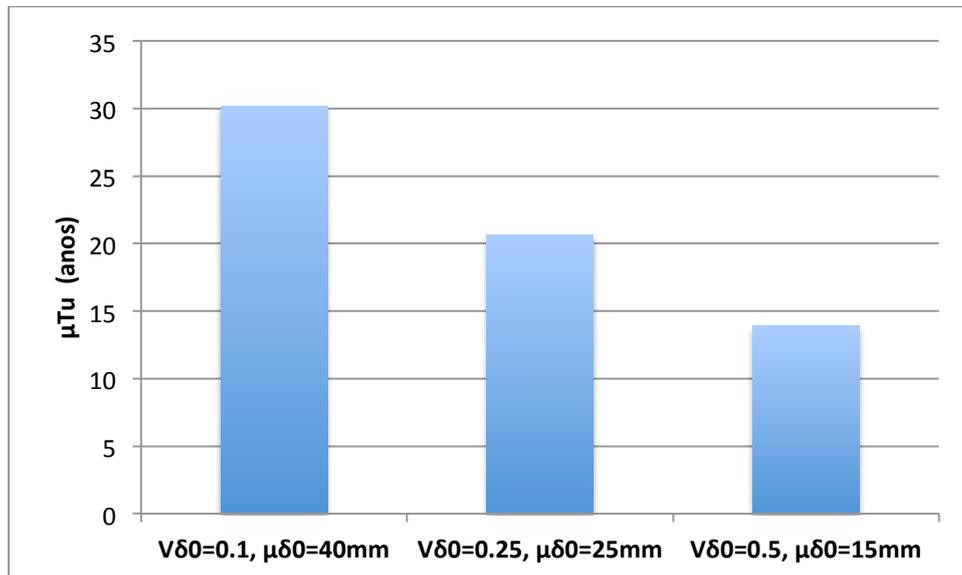


Figura 45: Médias  $\mu_{T_u}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}}=0,25$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

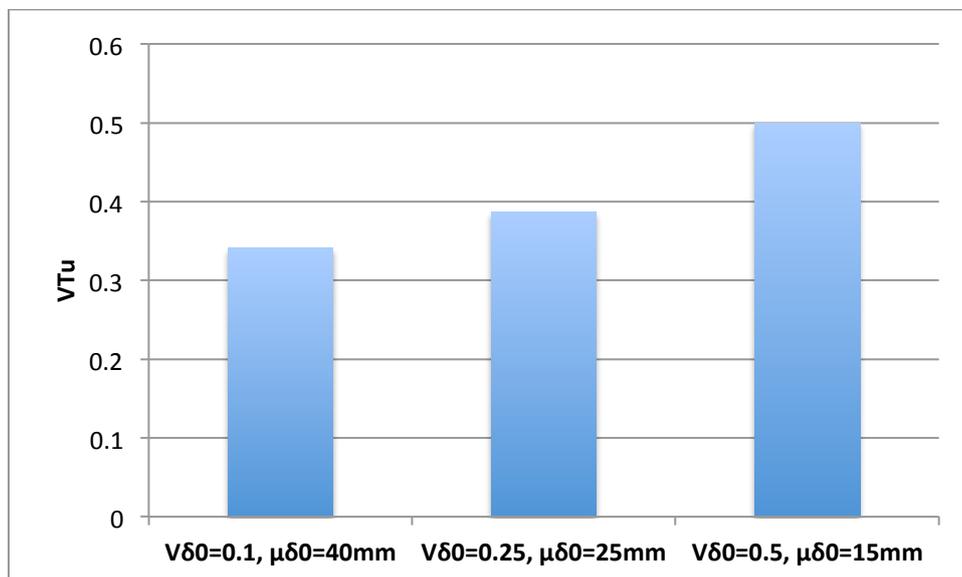


Figura 46: Coeficientes de variação  $V_{T_u}$  para diferentes parâmetros de  $\delta_0$ .  $\mu_{C_{rb}} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{C_{rb}}=0,25$ .

$C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

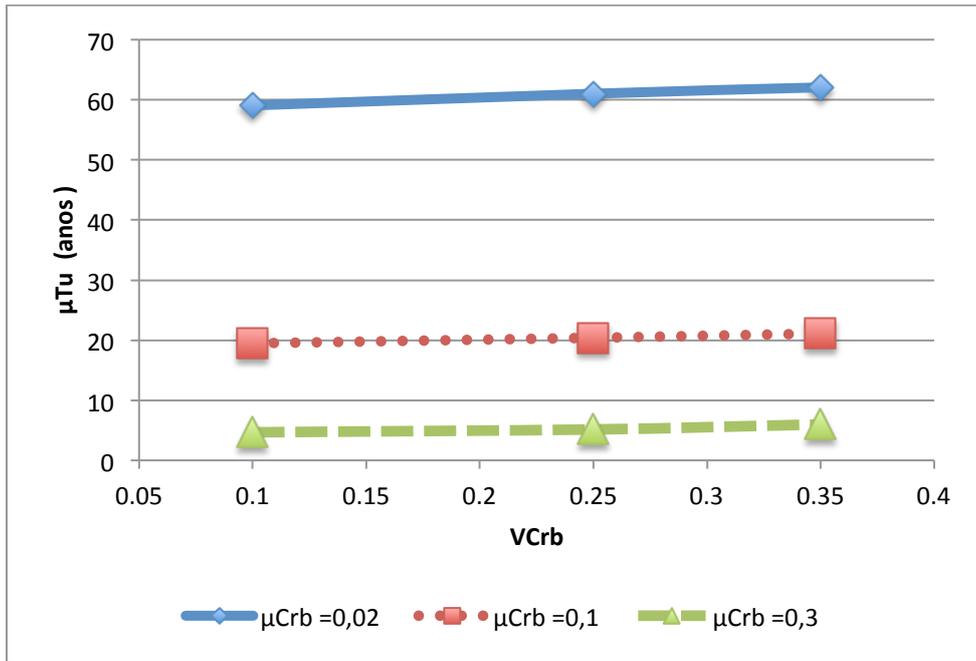


Figura 47: Médias  $\mu_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim LN$ ,  $\delta_0 \sim LN$

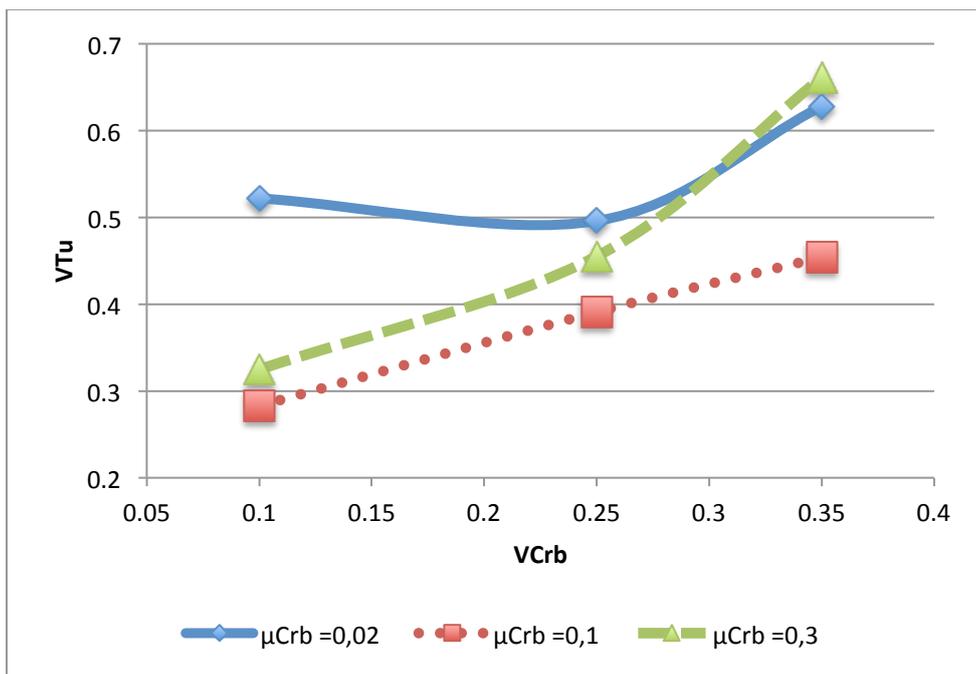


Figura 48: Coeficientes de variação  $V_{Tu}$  para diferentes parâmetros de  $C_{rb}$ .  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .

$$C_{rb} \sim LN, \delta_0 \sim LN$$

Os histogramas referentes aos valores de  $T_u$  cujos parâmetros estão apresentados nas Figuras 45 e 46 estão representados nas Figuras 49-51, ao passo que os histogramas de 3 dos cálculos de  $T_u$  utilizados para as Figuras 47 e 48 estão representados nas Figuras 52-54.

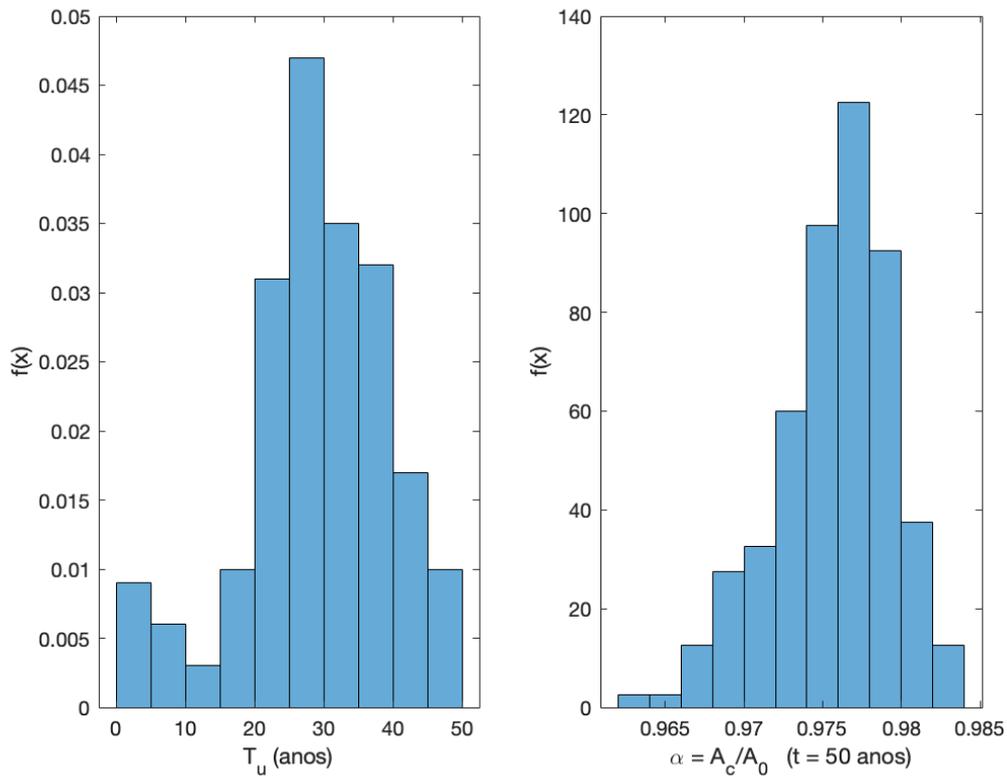


Figura 49: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 40$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

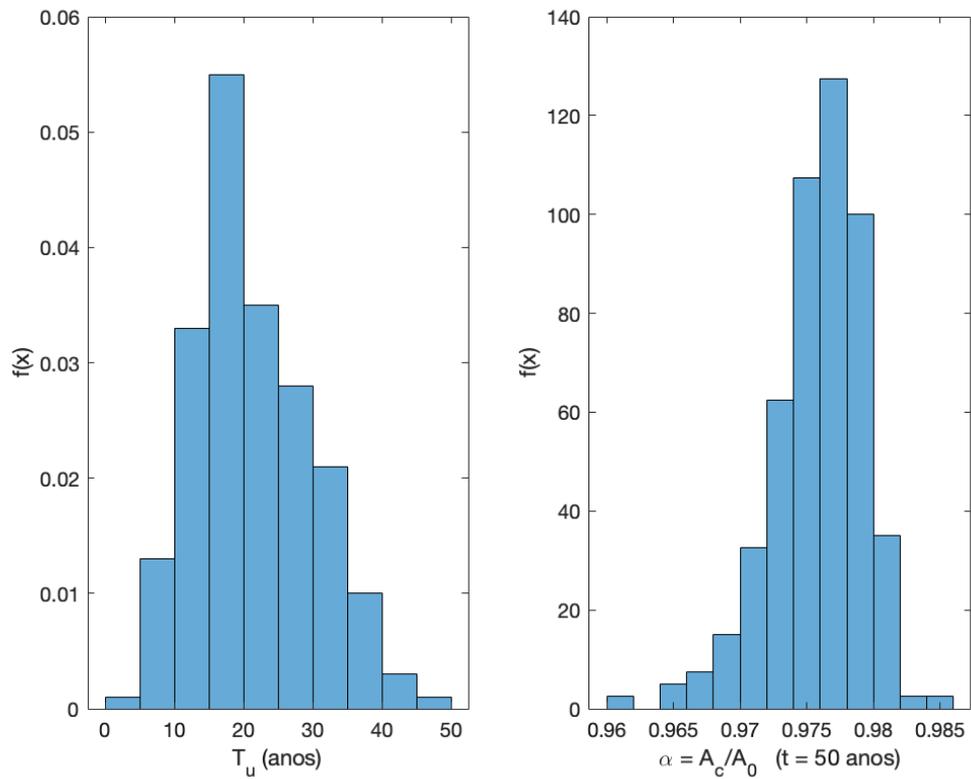


Figura 50: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 25$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,25$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

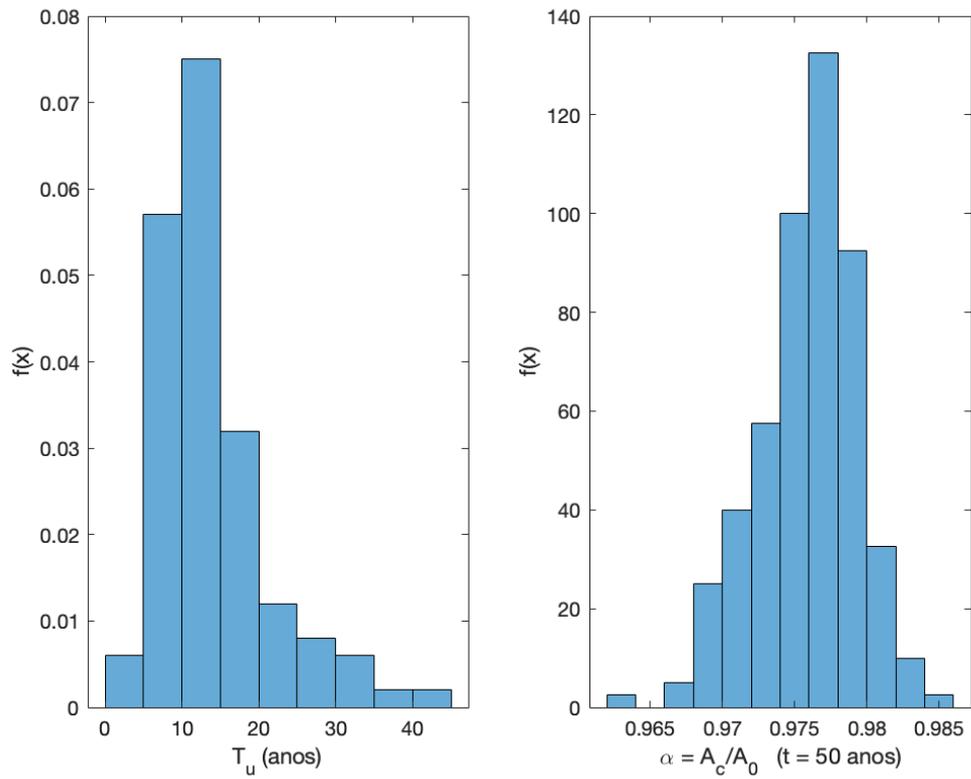


Figura 51: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{\delta_0} = 15$  mm e  $V_{\delta_0} = 0,5$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

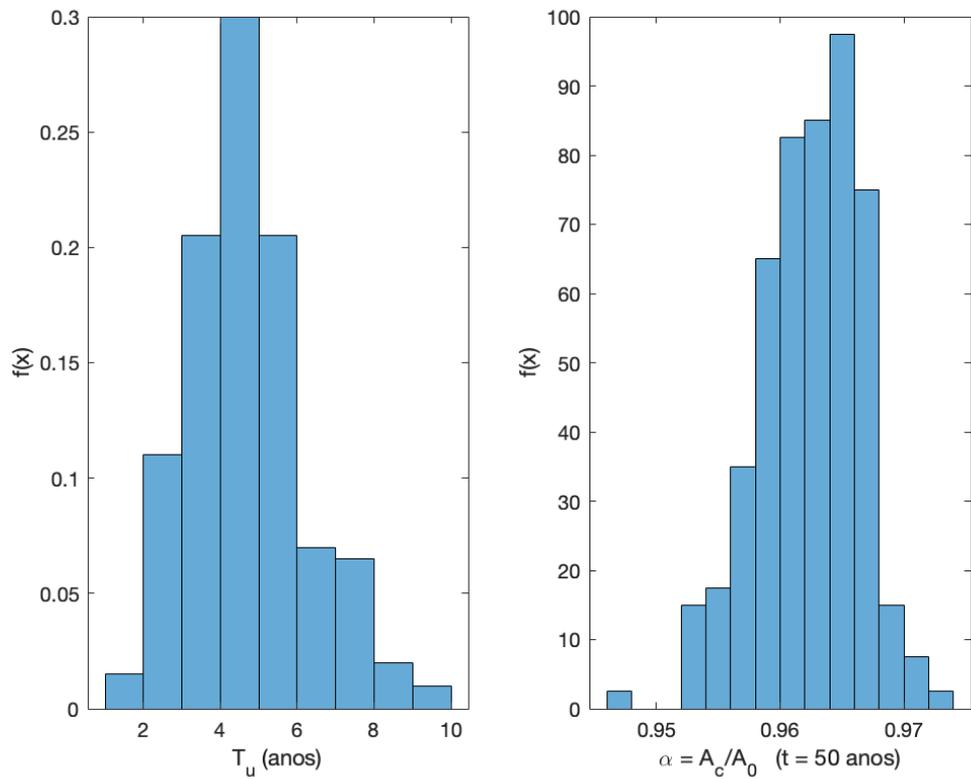


Figura 52: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{C_{rb}} = 0,3$  kg/m<sup>3</sup> e  $V_{C_{rb}} = 0,1$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

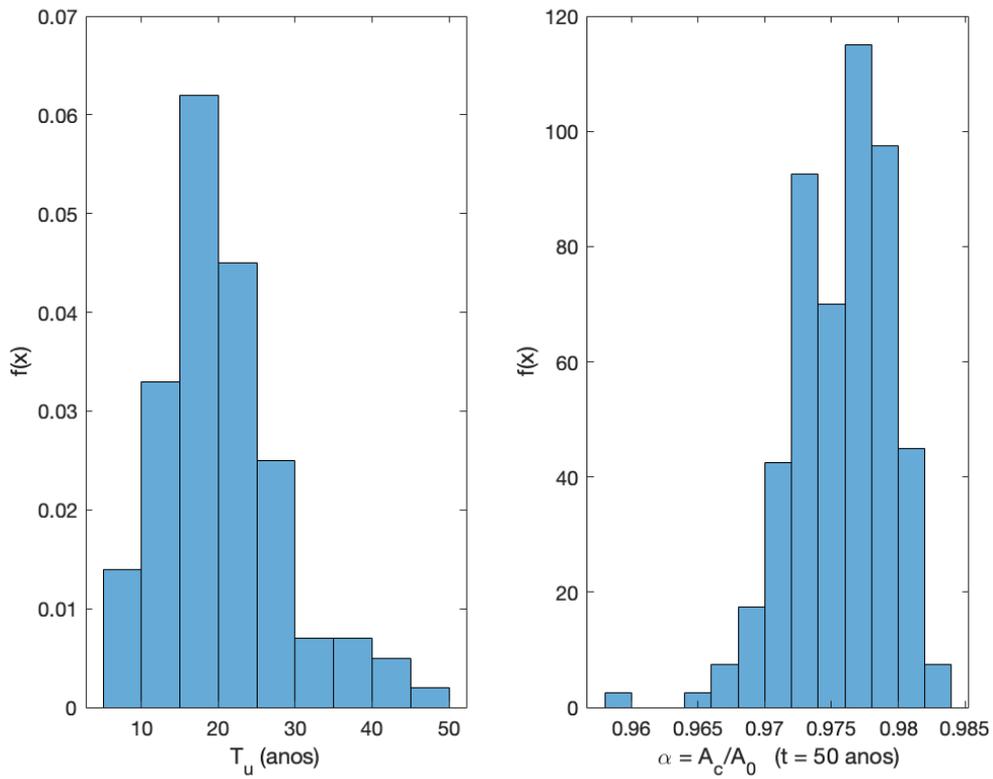


Figura 53: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,1 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,25$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

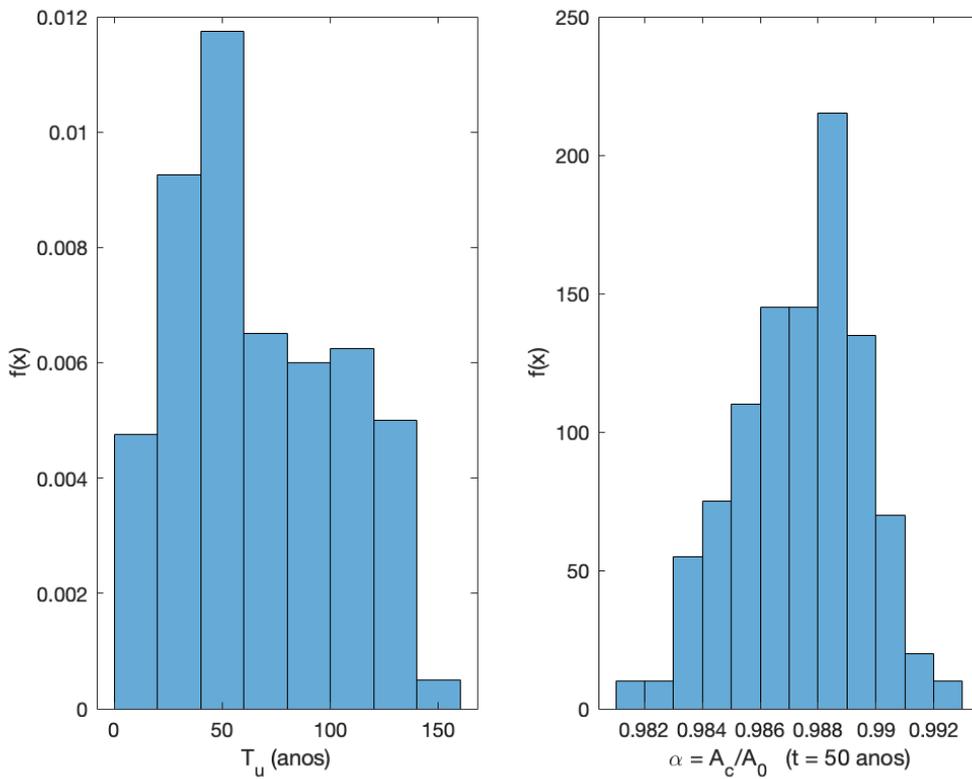


Figura 54: Histogramas de  $T_u$  e  $\alpha$  (50 anos).  $\mu_{Crb} = 0,02 \text{ kg/m}^3$  e  $V_{Crb}=0,35$ .  $C_{rb} \sim \text{LN}$ ,  $\delta_0 \sim \text{LN}$

## 5 CONCLUSÃO

O modelo elaborado atendeu aos objetivos do estudo listados na seção 1.3. Com base em modelos analíticos e probabilísticos para os efeitos da corrosão do aço sobre estruturas em concreto armado, obteve-se um modelo probabilístico inédito para a predição do tempo entre o início da corrosão e a fissuração do cobrimento, neste trabalho denominado tempo útil. Pela obtenção de novas fórmulas para a perda de área de aço da seção transversal, dano causado ao cobrimento, expectativa de vida e previsão do tempo útil, foram propostas novas alternativas de análise de questões de fundamental importância para o desempenho, durabilidade e segurança de construções civis.

A análise dependente do tempo, cujos resultados foram compilados na seção 4.1, ressaltou a grande oscilação da densidade de corrente de corrosão em função da temperatura e o caráter crítico que esta variável assume na análise do desempenho e vida útil de estruturas. Como explicado na seção 2.4, a ausência de um modelo amplamente aceito para a modelagem da densidade de corrente se deve em grande parte à complexidade da questão e ausência de dados suficientes para a elaboração de um modelo abrangente. Não obstante, pelo impacto da densidade de corrente nos resultados obtidos, entende-se que sua compreensão e melhor aproximação é de crucial importância para a acurácia e representatividade dos modelos vigentes para corrosão de estruturas em concreto armado.

A utilização de uma simulação de Monte Carlo para a obtenção dos parâmetros do modelo proveu incertezas e variabilidade às diversas variáveis envolvidas, fornecendo desta forma mais informação que um modelo determinístico seria capaz. Foram obtidos não apenas valores para as incógnitas de interesse, mas um espectro realista para os efeitos da corrosão e a probabilidade de estes ocorrerem considerando uma base de dados de 600 medições ao longo de 50 anos.

Considerando a análise da influência do conteúdo de cloreto à profundidade da armadura e da espessura da zona porosa sobre o tempo útil previsto pelo modelo elaborado, concluiu-se pelos resultados da seção 4.2 que o conteúdo de cloreto possui maior influência que a espessura da zona porosa sobre o tempo útil da estrutura. Entretanto, como o conteúdo de cloreto é utilizado no cálculo da densidade de corrente, volta-se novamente à importância da consolidação de uma melhor compreensão do

fenômeno corrosivo e da determinação da densidade de corrente, o que permanece um desafio científico a ser melhor dominado.

Apesar desta ressalva, é nítido que o modelo elaborado para o tempo útil  $T_u$  possui alta sensibilidade ao teor de cloreto à profundidade da armadura, com sua média passando de aproximadamente  $\mu_{T_u} = 6$  anos, quando  $\mu_{C_{rb}} = 0,3$ , a mais de  $\mu_{T_u} = 60$  anos, quando  $\mu_{C_{rb}} = 0,02$ . Notou-se pelos gráficos das Figuras 18, 28, 38 e 48 que a dependência de  $T_u$  de  $C_{rb}$  torna-se ainda maior conforme aumentam os valores médios de  $C_{rb}$ , com a iteração com o maior valor médio de  $C_{rb}$   $\mu_{C_{rb}} = 0,3$  resultando invariavelmente na maior variação de  $T_u$  para os diferentes desvios de  $C_{rb}$  avaliados. Desta forma, os resultados sugerem que a correta modelagem, medição e predição desta variável pode ter retorno significativo para uma melhor análise da durabilidade de estruturas em concreto armado.

## 5.1 PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

A sequência mais evidente a ser dada ao estudo apresentado consiste na sua comparação a dados empíricos de campo ou experimentais. Apesar do modelo apresentado ter sido elaborado com base em outros modelos de rigor acadêmico, e de ter apresentado resultados superficialmente razoáveis, seria de extremo valor aplicá-lo a dados empíricos distintos para testar sua abrangência. Caso o modelo se mantenha válido, seria interessante também dedicar um estudo à sua relevância e comparar suas predições com as de outros modelos similares.

Outro estudo interessante a ser associado a este modelo seria sobre o tempo de início da corrosão,  $T_0$ , já que todas as considerações aqui realizadas e predições temporais consideram apenas o período após  $T_0$ . Associando-se o uma predição de  $T_0$  com a predição de  $T_u$  fornecida por este modelo, poder-se ia obter uma melhor estimativa para o tempo de serviço de estruturas, objeto de extremo interesse para a sociedade e indústria da construção civil.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CLÍMACO, João Carlos Teatini de Souza. *Estruturas de concreto armado : fundamentos de projeto, dimensionamento e verificação*. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier; Brasília, DF: Ed. UnB, 2016.
- [2] PAPADAKIS, V. G.; VAYENAS, C. G.; FARDIS, M. N. Experimental investigation and mathematical modeling of the concrete carbonation problem. *Chemical Engineering Science*, Great Britain, v. 46, n. 5, p. 1333-1338, 1991.
- [3] ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias de. *Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto*. Florianópolis, 2011.
- [4] BROOMFIELD, J. *Corrosion of steel in concrete*. Nova Iorque: Taylor & Francis, 2007.
- [5] VU, K; STEWART, M; MULLARD, J. Corrosion induced cracking: experimental data and predictive models. *ACI Structures Journal*, v. 102, p. 719-726, 2005.
- [6] BASTIDAS-ARTEGA, E. et al. Coupled reliability model of biodeterioration, chloride ingress and cracking for reinforced concrete structures. *Structural Safety*, v. 30, p. 110-129, 2008.
- [7] EL MADDAAWY, T.; SOUDKI, K. A model for prediction of time from corrosion initiation to corrosion cracking. *Cement & Concrete Composites*, v. 29, p. 168-175, 2007.
- [8] LIU, T.; WEYERS, R.W. Modeling the dynamic corrosion process in chloride contaminated concrete structures. *Cement Concrete Research*, v. 28, p. 365-379, 1998.
- [9] PAPAKONSTANTINO, K.G.; SHINOZUKA, M. Probabilistic model for steel corrosion in reinforced concrete structures of large dimensions considering crack effects. *Engineering Structures*, v. 57, p. 306-326, 2013.
- [10] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). Corrosion of metals in concrete. *ACI manual of concrete practice*, 2002.
- [11] BERTOLINI, L. Steel corrosion and service life of reinforced concrete structures. *Structure and Infrastructure Engineering*, v. 4, p. 123-137, 2008.
- [12] RODRIGUEZ, O.G. Influence of cracks on chloride ingress into concrete. *ACI Materials Journal*, v. 100, p. 120-126, 2012.

- [13] SUDRET, B. Probabilistic models for the extent of damage in degrading reinforced concrete structures. *Reliability Engineering & System Safety*, v. 93, p. 410-422, 2008.
- [14] FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON. Bond of reinforcement in concrete. State-of-Art Report, International Federation for Structural Concrete: Switzerland, n. 10, p.188-215, 2000.
- [15] TUUTTI, K. Service life of structures with regard to corrosion of embedded steel. *Performance of concrete in marine environment, ACI SP-65*. Detroit, Michigan: American Concrete Institute, p. 223-236, 1980.
- [16] WEYERS, R.E. Service life model for concrete structures in chloride laden environments. *ACI Materials Journal*, v. 4, p.445-453, 1998.
- [17] LINDQUIST, W.D. et al. Effect of cracking on chloride content in concrete bridge decks. *ACI Materials Journal*, v. 103, p.467-473, 2006.
- [18] TUUTTI, K. *Corrosion of steel in concrete*. Estocolmo, Suécia: Swedish Cement and Concrete Research Institute, 1982.
- [19] GOWRIPALAN, N.; SIRIVIVATNANON, V.; LIM, C. Chloride diffusivity of concrete cracked in flexure. *Cement and Concrete Research*, v. 30, p. 725-730, 2000.
- [20] LI, C.Q. Initiation of chloride-induced reinforcement corrosion in concrete structural members- experimentation. *ACI Structures Journal*, v. 98, p. 502-510, 2001.
- [21] MARSAVINA, L. et al. Experimental and numerical determination of the chloride penetration in cracked concrete. *Construction Building Materials*, v. 23, p. 264-274, 2009.
- [22] LIU, Y; WEYERS, R. Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures. *ACI Materials Journal*, v. 6, p.675-681, 1998.
- [23] MORINAGA, S. Prediction of service lives of reinforced concrete buildings based on rate of corrosion of reinforcing steel. Report n. 23, Shimzu Corp, Japan, p. 82, 1988.
- [24] AL KHALAF, M.N.; PAGE, C.L. Steel/mortar: interfaces: microstructural features and mode of failure. *Cement Concrete Research*, v. 9, p. 197-208, 1978.
- [25] BAZANT, Z.P. Physical model for steel corrosion in concrete sea structures-applications. *Journal of the Structural Division*, 6/1979.

- [26] TIMOSHINKO, S.P. *Strength of materials – Part II: Advanced theory and problems*. Nova Iorque, EUA: Van Nostrand Company, Inc, 1940.
- [27] ANDRADE, C.; ALONSO, C.; MOLINA, F.J. Cover cracking as a function of bar corrosion: Part I – experimental test. *Material Structures*, v. 26, p. 453-464, 1993.
- [28] CABRERA, J.G. Deterioration of concrete due to reinforcement steel corrosion. *Cement and Concrete Composites Journal*, v. 18, p 47-59, 1996.
- [29] EL MAADDAWY, T.; SOUDKI, K. Effectiveness of impressed current technique to simulate corrosion of steel reinforcement in concrete. *ASCE Journal Materials in Civil Engineering*, v. 15, p. 51-47, 2003.
- [30] MORINAGA, S. Prediction of service life of reinforced concrete buildings based on the corrosion rate of reinforcing steel. *5th International conference on durability of building materials and components*. Brighton, Reino Unido, p. 5-17, 1990.
- [31] DURACRETE. *Probabilistic performance based durability design: modeling of degradation*. BE95-1347/R4-5, 1998.
- [32] RAUPACH, M. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion: an overview. *Materials Corrosion*, v. 57, p. 605-613, 2006.
- [33] INMET. Instituto Nacional de Meteorologia: consulta de dados da estação convencional em Brasília (DF). Acesso em: 04/05/2019. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/sim/sonabra/dspDadosCodigo.php?ODMzNzc=>>