

MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS A CORROSÃO

¹Douglas Carneiro Santos, ²Lucas Chagas Soares, ³Luiz Álvaro de Oliveira Júnior

¹Estudante, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, douglas775.sam@gmail.com

²Estudante, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, lucaschagassoares0@gmail.com

³Professor Doutor, Escola Politécnica, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, alvarojunior@pucgoias.edu.br

Resumo

Este trabalho tem como objetivo analisar pelo Método dos Elementos Finitos o efeito da corrosão em vigas de concreto armado fletidas, considerando redução da resistência à tração, do módulo de elasticidade e da área de aço das armaduras longitudinais. Para isto, uma viga de 5000 mm de comprimento, 500 mm de altura e 169 mm de espessura foi modelada na versão 10.3 do DIANA® considerando taxas de corrosão de 10%, 20% e 30%. No modelo, o concreto apresentava 53 MPa de resistência à compressão, enquanto o aço da armadura apresentava 500 MPa de resistência à tração e 210 GPa de módulo de elasticidade, reduzidos conforme modelo empírico de Ou *et al* (2016). A área de aço da armadura longitudinal, composta de barras de 16 mm de diâmetro, foi reduzida conforme modelo de Lu *et al* (2016). As modelagens mostraram mudanças sutis nas configurações deslocadas e agravamento do panorama de fissuração com o aumento da taxa de corrosão, com fissuras de aberturas superiores aos limites normativos para atender aos estados limites de serviço. Os resultados mostraram que o acoplamento dos três efeitos da corrosão nas armaduras compromete a manutenção da área de aço para mobilização da resistência à tração, redução a capacidade resistente da peça e aumenta a deformabilidade da estrutura.

Palavras-chave: corrosão, modelagem, elementos finitos, vigas de concreto armado, armadura longitudinal

Abstract

This work aims to assess by the finite element method the corrosion effect in reinforced concrete beams under flexure, considering the reduction of the tensile strength, the elastic modulus and the cross-sectional area of longitudinal reinforcement. So, a beam 5000 mm long, 500 mm high and 169 mm depth was modeled in DIANA® version 10.3 considering corrosion rates of 10%, 20% and 30%. Concrete was modeled with compressive strength of 53 MPa while the steel was modeled with yielding stress of 500 MPa and elastic modulus of 210 MPa, both reduced according to empiric model by Ou *et al* (2016). Cross-sectional area of longitudinal reinforcement, composed by 16 mm diameter bars was reduced according to model by Lu *et al* (2016). Results showed discrete differences in displacements and increasing of the severity of damage caused by cracks according to increasing on the corrosion rates, with crack openings higher than those allowed by the normative limits to respect the service limit state. Results also showed that coupling of the three corrosion effects on the steel reinforcements make difficult keeping the cross-sectional area for mobilizing of the tensile strength, reduce the beam resistance and increase its deformability.

Keywords: corrosion, modeling, finite element method, reinforced concrete beams, longitudinal reinforcement

1 Introdução

O concreto já foi considerado um material quase perene. Porém, no decorrer do tempo, comprovou-se o contrário. Já foram identificados vários tipos de mecanismos de deterioração e anomalias das estruturas de concreto armado que vêm preocupando a comunidade técnica, entre eles citam-se a corrosão, a carbonatação, a reação álcali-agregado, entre outras. Dessa forma, muitas pesquisas têm sido conduzidas pela comunidade científica para dar respostas aos problemas relacionados à durabilidade desse material. Dentre as diversas linhas de pesquisa para prevenção da degradação das estruturas de concreto armado, uma das que mais se destaca é o estudo da corrosão de armadura do concreto armado, sendo essa a maior das causas de deterioração de estruturas de concreto armado segundo Kaefer (1998) e Santos (2014).

De acordo com Andrade (2001) tecnicamente o estudo da corrosão em estruturas segue duas linhas de raciocínio que se relacionam à origem do fenômeno da corrosão: a) a ação de agentes agressivos infiltrados para o interior das estruturas de concreto ou b) pela despassivação da armadura devido ao fenômeno da carbonatação. A primeira linha de raciocínio leva em consideração as características da microestrutura do material e o comportamento dos fluidos, enquanto a segunda tem relação com a redução da alcalinidade do concreto, favorecendo a instalação de processo corrosivo em decorrência da acidificação do meio. Ambas as causas são favorecidas pelo processo natural de envelhecimento que ocorre nas estruturas.

O presente trabalho tem como objetivo realizar modelagem computacional do efeito da corrosão de armaduras em vigas de concreto armado em flexão, considerando redução da resistência à tração das armaduras longitudinais, do módulo de elasticidade e da área de aço nos deslocamentos e na fissuração.

Estruturas de concreto armado utilizam componentes metálicos e, portanto, estão sujeitas ao processo de corrosão em decorrência de reações químicas atuando em três frentes: redução da resistência do aço, redução do módulo de elasticidade e perda de seção resistente como indicam os estudos de Lim *et al* (2016), Ou *et al* (2016) e Lu *et al* (2016) entre outros. O processo de degradação resulta em manifestação patológica com prejuízos estéticos, que reduzem a durabilidade e a vida útil da edificação; financeiros e, em casos de severa agressividade ambiental, na perda da capacidade mecânica do elemento estrutural, comprometendo, por consequência, a segurança.

Com isso tornam-se importantes estudos que viabilizam um melhor entendimento sobre o tema. Então, estudos sobre a ação conjunta da corrosão e outros mecanismos de degradação são, incipientes, com uma literatura ainda escassa.

Com o advento da tecnologia modelos matemáticos que antes eram de difícil aplicação se tornam cada vez mais acessíveis, isso graças a evolução da computação, uma vez que os algoritmos e métodos que antes eram inviáveis se tornaram bastantes usuais em problemas complexos, por exemplo aqueles que envolvem a corrosão. São exemplos desses métodos numéricos os algoritmos genéticos, o método do enxame de partículas, o método dos elementos finitos, as redes neurais artificiais entre outros, os quais podem ser usados em separado ou em conjunto para resolver problemas diversos em variadas áreas do conhecimento, permitindo a ampliação mais rápida das fronteiras do conhecimento e o desenvolvimento de novas tecnologias.

2 Revisão bibliográfica

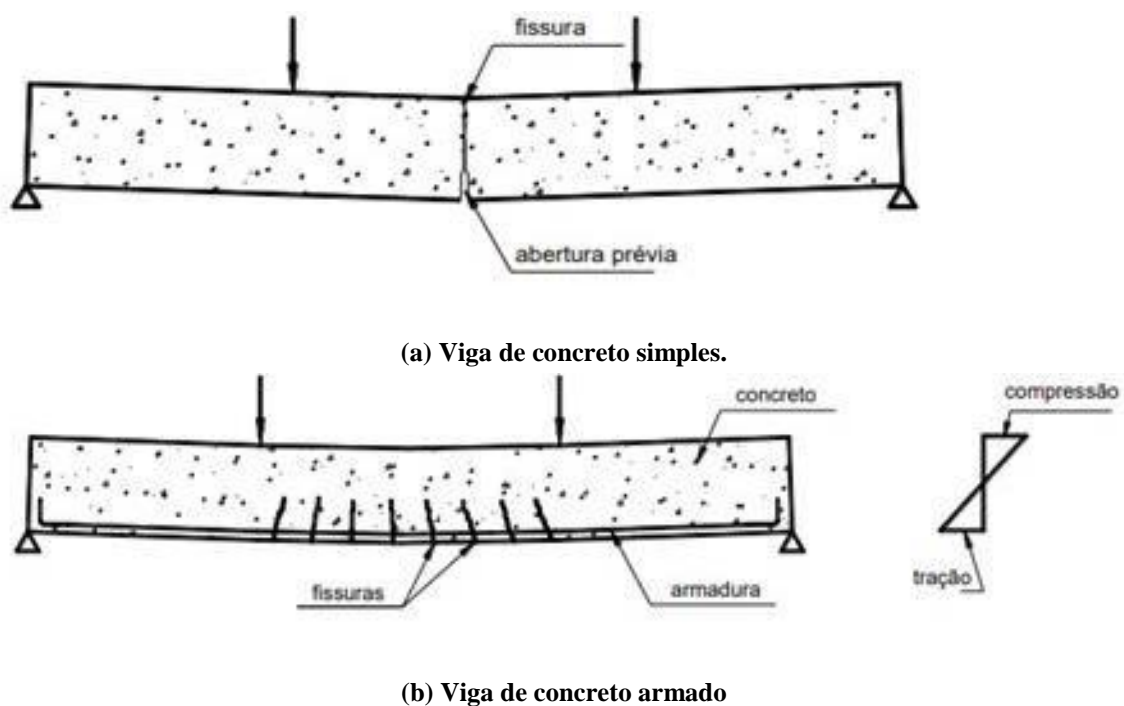
2.1 Concreto armado

O concreto apresenta diversas qualidades (baixo custo, durabilidade, boa resistência à compressão, ao fogo e à água, entre outras) e associado ao aço, que se destaca pela elevada ductilidade e excelente resistência à tração e à compressão, entre outras qualidades, resulta em um material de construção resistente, durável e versátil com grande potencial na construção de elementos com as mais variadas formas e volumes, com relativa rapidez e facilidade, para os mais variados tipos de obra.

O aço é envolvido pelo concreto, sendo a espessura da camada de concreto, denominada cobertura, responsável pela proteção do aço da armadura em uma peça concreto armado, ficando protegido de danos mecânicos e aqueles causados pela corrosão e outros mecanismos de degradação, bem como quando submetido a elevadas temperaturas provocadas por incêndio (pelo menos durante um certo período).

No concreto armado a armadura é chamada passiva, isto é, não é pré-alongada para produzir forças de protensão. Tensões e deformações nela mobilizadas devem-se exclusivamente às ações a ela impostas, podendo ser permanentes, variáveis ou excepcionais. O trabalho conjunto entre o concreto e a armadura pode ser compreendido analisando a viga sem armadura (concreto simples, Figura 1a) e outra viga análoga com armadura longitudinal (concreto armado, Figura 2b), ambas sob flexão em quatro pontos.

Figura 1 - Viga de concreto simples submetida à flexão em quatro pontos com entalhe no meio do vão.



Fonte: BASTOS (2019)

Na viga da Figura 1a, foi criado um entalhe no meio do vão para induzir o surgimento de uma fissura única de flexão na seção entalhada, na região de máximo momento fletor, onde as fissuras são perpendiculares à face inferior da viga. Supondo que as forças aplicadas sobre as vigas aumentem gradativamente de zero até a ruptura, a viga sem armadura rompe bruscamente tão logo se inicia a primeira fissura, o que ocorre quando a tensão de tração atuante alcança a resistência do concreto à tração na flexão, que no entalhe, é menor que nas demais seções, já que a altura da viga na seção entalhada é menor. Desta forma, a viga romperá sempre por flexão, pois o processo de fissuração não alcançará os vãos de cisalhamento para que fissuras inclinadas se formem.

Já a viga de concreto armado (Figura 1b) tem a capacidade resistente à flexão significativamente aumentada devido à existência da armadura e a ausência de entalhe, que permite que mais de uma fissura se forme na peça, podendo variar a trajetória em função do vão em que a fissura se formar.

Na região central da viga, na qual atua momento fletor máximo e de valor constante ao longo de toda a região, prevalecem os efeitos da flexão simples, de modo que serão observadas apenas fissuras perpendiculares à face inferior da viga. Nas regiões adjacentes aos apoios, o esforço prioritário é o de cisalhamento, cujo valor é constante nessas regiões, em detrimento do momento fletor, que varia, aumentando na medida em que a seção se distancia do apoio. Essa constância do esforço cortante e a variação do momento fletor faz com que as fissuras que se formarem nessas regiões sigam trajetórias inclinadas formando bielas que seguem do apoio em direção aos pontos carregados no terço médio.

2.2 Corrosão

Segundo COELHO (2017), a corrosão é um mecanismo de degradação caracterizado pela perda de material da superfície de um metal. O processo físico-químico gerando óxidos e hidróxidos de ferro, os quais são produtos da corrosão, que ocupam um volume significativamente superior ao volume original das barras metálicas, induzindo microfissuração interna que compromete ainda mais a durabilidade do elemento no qual a corrosão está instalada, favorecendo o agravamento do processo corrosivo, bem como a instalação de outros mecanismos de degradação e/ou manifestações patológicas, como o deslocamento do cobrimento de concreto e a presença de bolores provocados pela entrada de umidade no interior no concreto armado.

Os tópicos a seguir discutem o tipo de corrosão de interesse neste trabalho: a corrosão por ação de íons cloreto.

2.2.1 Corrosão por ação de íons cloreto

A ação de íons cloretos (Cl^-) nas estruturas de concreto além de severa, provoca a despassivação do aço de forma acelerada, bem como a corrosão localizada, com surgimento de trincas e deslocamento do concreto (ver Figura 3).

Figura 2 - Ataque de íons cloreto



Fonte: www.axfiber.com.br

Acessado em 03/2021

A penetração de íons cloreto para o concreto pode ocorrer devido à interação com o meio ambiente, quando neste encontra-se grande concentração de sais de cloreto de sódio disponível (regiões marítimas), no consumo de sais de degelo, na utilização de aditivos ou agregado contendo íons cloreto na fase de produção do concreto. A velocidade e profundidade da penetração dos íons cloretos nas estruturas de concreto dependem de algumas condições, segundo COELHO (2017), dentre elas:

- a. **A concentração de C3A (aluminato tricálcico) ou C4AF (aluminoferotetracálcio)** presente na pasta de cimento que determina a capacidade de combinação destes compostos com o íon cloreto. Cimentos que em sua composição apresentam baixa concentração desses compostos possuem pouca capacidade de reação com os íons cloretos (presente, por exemplo, na maresia). Esta reação que forma um sal complexo insolúvel, cloro-aluminato de cálcio, que reduz a concentração de íons cloreto livres na solução aquosa que se acumulam nos poros da superfície do concreto.
- b. **Relação água/cimento**, adensamento e cura, pois quanto menor a relação de água cimento menor será a porosidade que dificultará o acesso de agentes agressivos na estrutura de concreto. O adensamento e a cura possuem um efeito importante sobre as propriedades de transporte nas pastas de cimento endurecidas e conseqüentemente a difusão dos íons cloretos para o concreto. A difusão é um fenômeno físico, no qual as moléculas por ação da energia térmica se movem constantemente em um fluido, que pode ser líquido ou gasoso, promovendo a passagem do soluto para regiões de menores concentrações.

c. **Grau de saturação** dos poros e a concentração de íons cloreto na superfície do concreto, pois a penetração de íons cloreto para o interior do concreto ocorre através do fenômeno da difusão, e/ou pela sucção capilar da água que os contém, de modo que esses íons se acumulam na superfície do concreto, quando ocorrem ciclos de umedecimento e secagem.

d. **Grau de fissuração da estrutura:** a primeira área a ser atingida pelos íons cloreto é a que apresenta maior grau de fissuramento, pois essas áreas criam regiões anódicas no interior das fissuras e regiões catódicas maiores fora delas. A velocidade em que a corrosão se desenvolve depende da abertura, profundidade da qualidade do concreto e da relação entre área catódica e anódica.

2.2.2 Modelagem da corrosão

De acordo com Lim *et al.* (2016) o Método dos Elementos Finitos (MEF) foi utilizado para analisar os efeitos danosos causados às armaduras pela corrosão, um dos mais presentes mecanismos de deterioração que agem sobre as estruturas de concreto armado. Os resultados encontrados apontam que houve redução nas propriedades efetivas do aço, assim como na sua geometria, resultado na perda de capacidade resistente da estrutura, visto que a corrosão causou diminuição da seção transversal das armaduras. A corrosão também comprometeu a durabilidade do material, bem como a aderência entre aço e concreto.

Coelho (2017) explica que na literatura há vários modelos matemáticos que buscam indicar o começo da corrosão. Tendo como parâmetros principais: a difusão dos agentes agressivos no concreto, relação agregado/cimento, relação água/cimento, produtos da hidratação do cimento, exemplos desses o C-S-H, C-H, C₂S₂ e C₃S, bem como a temperatura e/ou umidade relativa, fatores ambientais que variam de acordo com a localidade da estrutura.

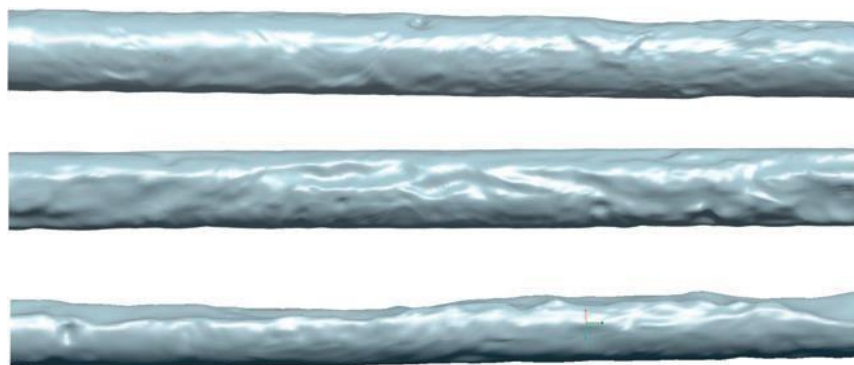
A modelagem matemática é uma técnica que visa reproduzir por meio de equações, os efeitos de um determinado fenômeno, normalmente empregando em seu desenvolvimento, seja para obtenção do modelo matemático, ou para sua calibração e validação, parâmetros experimentais. Por consequência, trata-se de uma técnica bastante útil que gera modelos empíricos que, por vezes, são capazes de reproduzir fenômenos complexos, embora com limitações, entre as quais se destacam a aplicabilidade e a precisão. A primeira se refere ao fato de os modelos matemáticos serem limitados na capacidade de representar muitos fenômenos ou fenômenos

muito complexos, normalmente não sendo aplicáveis a situações muito distintas daquela que gerou o modelo. A segunda se refere à precisão dos resultados que o modelo é capaz de gerar, que pode ser relativamente baixa, sobretudo se o fenômeno for muito complexo e/ou apresentar muitas variáveis, já que o erro na avaliação dos parâmetros experimentais afeta esse tipo de modelagem.

Coelho (2017) utiliza o método do dano concentrado com auxílio do MEF em seu estudo, que incluiu a consideração de rótulas plásticas contendo a variável dano, bem como parâmetros ambientais e de dosagem. Coelho (2017) observou que o início da corrosão varia de acordo com a porosidade do concreto, isso é, concretos mais porosos (que têm água/cimentos mais alta) são mais permeáveis e suscetíveis a agentes agressivos, permitindo maior exposição da armadura aos efeitos nocivos da corrosão. Coelho (2017) também levou em consideração em seu modelo a dependência do tempo, da umidade e da concentração dos íons de cloretos.

Wang *et al* (2012) fizeram uma modelagem 3D para analisar numericamente o comportamento de barras de comprimentos variando de 300 mm a 600 mm que foram extraídas de lajes de concreto armado de um bueiro que sofreu corrosão ao longo de 19 anos. Dos estudos realizados por Wang *et al* (2012), a média das perdas por corrosão das barras variou de 1% a 40% e foi causada por carbonatação e não por ataque de cloretos. Paralelamente, uma segunda análise foi feita, desta vez de forma experimental, utilizando ensaios de corrosão acelerada em duas amostras compostas de aço e concreto. Nestas amostras, toda a superfície dos vergalhões foi escaneada usando instrumentos de varredura a laser 3D para criar as coordenadas de cada ponto da superfície da barra de aço, conforme Figura 4, observando a modelagem 3D verificou-se que a corrosão na barra não foi uniforme, além de apresentar cavidades de várias formas.

Figura 3 - Modelagem 3D para representação de barras corroídas



Fonte: WANG *et al* (2012)

Pellizer *et al* (2018) analisaram o modelo mecânico que combina os efeitos da corrosão de armaduras e as respostas não lineares dos materiais aço e concreto para prever a perda de resistência de vigas em concreto armado ao longo do tempo. Os comportamentos dos materiais aço e concreto foram simulados por modelos baseados na teoria da plasticidade unidimensional e na mecânica do dano, respectivamente. As leis de Fick e métodos empíricos fundamentados nas leis de Faraday foram utilizados para representar a entrada de cloretos e degradação das armaduras.

Um processo simplificado foi adotado por Pellizer *et al* (2018) para a simulação do início da corrosão em tempos diferentes ao longo da estrutura. Os resultados mostraram que o modelo mecânico baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF) representou apropriadamente o comportamento mecânico em termos de deslocamentos. Além disso, Pellizer *et al* (2018) verificaram que a taxa de perda de capacidade resistente da viga analisada foi maior nos primeiros anos após o início da corrosão e tendeu a se estabilizar nos anos posteriores.

Liberati *et al* (2014) afirmam que dentre as ações agressivas causadas pelo meio ambiente levando à corrosão das armaduras de estruturas de concreto armado, a corrosão eletroquímica causada pelos íons cloretos é o principal fator que causa problemas de degradação estruturais no concreto armado ao longo de sua vida útil. O método utilizado por Liberati *et al* (2014) é a modelagem do fenômeno de transferência dos íons cloretos no concreto que mensura de maneira indireta a durabilidade e a vida útil das estruturas. A modelagem também incluiu a Teoria da Confiabilidade para considerar a incerteza dos parâmetros, tratando-os como variáveis aleatórias a fim de considerar variações probabilísticas em seus valores.

Liberati *et al* (2014) também empregaram as leis de difusão de Fick e algoritmos determinísticos de confiabilidade para tornar a abordagem mais consistente com a aleatoriedade da realidade. O estudo proposto por eles foi o da perda da capacidade de flexão das vigas de concreto armado causada pelas armaduras corroídas, combinado as leis de difusão de Fick, a Teoria de Confiabilidade e as leis de Faraday para melhor tratar a evolução da corrosão nas vigas.

Liberati *et al* (2014) concluíram que os procedimentos adotados na norma NBR 6118 (ABNT, 2013) garantem que a falha de um elemento estrutural de concreto armado submetido à flexão tenha um intervalo probabilístico de falha aceitável, e que a quantidade de cloreto na superfície,

assim como a espessura de cobrimento, demonstrou ter grande importância na análise probabilística.

Nos resultados obtidos por Liberati *et al* (2014) também se observa que a durabilidade das estruturas de concreto armado deve ser associada a valores mais significativos de espessura de cobrimento. Da mesma forma, os autores explicam que concretos menos porosos mostraram melhor desempenho, com menor probabilidade de ocorrer o início da corrosão das armaduras.

3 Metodologia

As modelagens desenvolvidas neste trabalho empregaram um modelo computacional para análise da influência da corrosão uniforme das armaduras longitudinais de vigas de concreto armado nas tensões, deformações e fissuras. Para modelar o efeito da corrosão na viga, além da perda da seção transversal da armadura longitudinal, foram consideradas reduções no módulo de elasticidade e na resistência à tração por meio de modelos empíricos. Os tópicos a seguir apresentam em mais detalhes a metodologia deste trabalho.

3.1 Levantamento bibliográfico

Para o desenvolvimento do referencial teórico deste trabalho, a etapa de levantamento bibliográfico priorizou informações provenientes de livros, artigos de periódicos nacionais e internacionais, teses e dissertações publicados nos últimos 10 anos. As bases de dados pesquisadas foram o Portal de Periódicos Capes e Google Acadêmico, utilizando as seguintes palavras chaves: corrosão, método dos elementos finitos, modelagem computacional, análise não linear e suas respectivas versões em língua inglesa (corrosion, finite element method, computational modeling e nonlinear analysis).

3.2 Simulação computacional

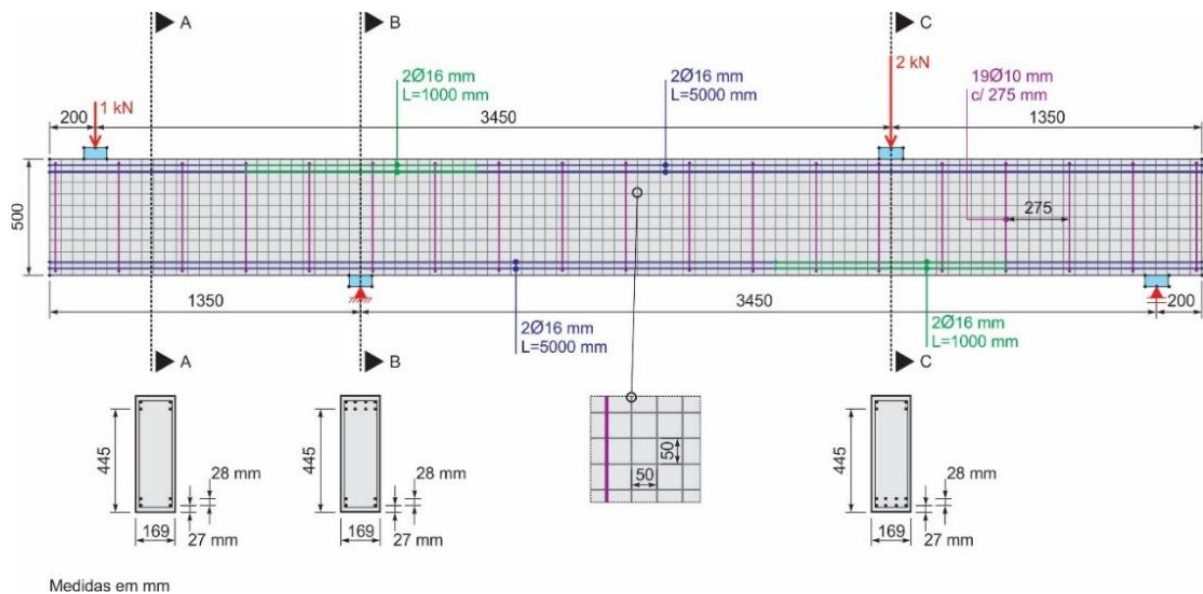
Para este estudo foi utilizado um modelo computacional bidimensional desenvolvido com base no Método dos Elementos Finitos (MEF) e modelos não lineares de comportamento mecânico para o aço e o concreto, com a utilização da versão educacional do software DIANA FEA[®] 10.3. O modelo computacional foi uma viga de concreto armado extraída do tutorial do DIANA FEA[®] 10.3 (*Shear Failure In Reinforced Concrete Beam*) e posteriormente alterado para incluir 19 estribos verticais de 10 mm em aço CA-50 espaçados entre si de 275 mm e modificar as propriedades da armadura longitudinal. O espaçamento dos estribos foi definido de tal forma

que não alterasse a forma de ruptura prevista do modelo original, que deveria ocorrer por cisalhamento. O cobrimento de concreto para os estribos foi admitido igual a 25 mm. Este modelo foi escolhido para fins de calibração por *benchmarking* do modelo computacional deste trabalho.

3.2.1 Geometria, malha e condições de contorno

A viga de concreto armado foi considerada simplesmente apoiada com apoio de 2º gênero à esquerda e de 1º gênero à direita, aplicando uma força de 1 kN à esquerda e outra de 2 kN à direita, sendo a geometria, a malha e as condições de contorno mostradas na Figura 5.

Figura 4 - Geometria, malha, condições de contorno e demais detalhes do modelo computacional



Fonte: Autoria própria.

Na malha foram utilizados elementos finitos de membrana (CQ16M), quadrilaterais, os quais tinham nove nós, cada um com dois graus de liberdade representativos das translações nos eixos x e y , resultando em uma malha com 3950 nós e 1008 elementos. Tais elementos utilizam uma função quadrática na interpolação do campo de deslocamentos.

3.2.2 Propriedades dos materiais

Para representar o comportamento de cada material envolvido no modelo, foram definidos modelos constitutivos apropriados. O aço das placas de apoio e carregamento foi considerado material isotrópico e elástico linear para todos os passos de carga, com módulo de elasticidade de 210 GPa e coeficiente de Poisson de 0,15.

Já o concreto, foi representado em regime elástico linear como um material isotrópico de módulo de elasticidade tangente inicial igual a 38,483 GPa e coeficiente de Poisson de 0,15. Em regime não linear, a relação entre tensões e deformações foi representada pelo modelo de amolecimento de Hordjik, sendo a resistência à tração igual a 3,82 MPa, a energia no modo I de fraturamento igual a 0,169 N/mm e a largura da banda de fissuração calculada pelo modelo de Rots. Por sua vez, o comportamento na compressão foi representado pelo modelo de Thorenfeldt, sendo a resistência à compressão do material de 55 MPa.

O aço das armaduras longitudinal e transversal foi tratado como material isotrópico em regime elástico linear com módulo de elasticidade de 210 GPa. Para representar o comportamento não linear do aço, foi utilizado o modelo de von Mises, adotando resistência à tração de 500 MPa (tensão de escoamento). Para consideração dos efeitos da corrosão no modelo computacional, a estratégia utilizada se ampara nas seguintes providências:

- As armaduras longitudinais estão sujeitas à corrosão uniforme, estando as armaduras transversais isentas de corrosão;
- A resistência à tração e o módulo de elasticidade das armaduras longitudinais foram determinados por meio dos modelos empíricos de Ou *et al* (2016), os quais penalizam essas propriedades multiplicando-as por seus respectivos fatores de redução calculados para as taxas de corrosão escolhidas;
- A redução do diâmetro da barra ($\Delta\phi$), obtida conforme Lu *et al* (2016), supõe que a taxa de corrosão reflete a perda de massa das barras afetadas pela corrosão, implicando em redução uniforme do diâmetro para as taxas de corrosão escolhidas;
- Foram consideradas três taxas de corrosão (x_c), quais sejam: 10%, 20% e 30%.

A Tabela 1 apresenta os valores da tensão de escoamento e do módulo de elasticidade das armaduras no estado original (sem corrosão) e no estado final (já corroídas).

Tabela 1 - Propriedades do aço para consideração da corrosão uniforme. Fonte: Autoria própria.

Modelo	Sem corrosão			Com corrosão			
	f_{y0} (MPa)	E_{s0} (GPa)	x_c (%)	f_{yc} (MPa)	$\Delta\phi$ (%)	ϕ_c (mm)	A_c (mm ²)
0			0	500,0	0,000	16,000	402,10
1	500,0	210,0	10	438,5	0,821	15,179	361,90
2			20	377,0	1,689	14,311	321,70
3			30	315,5	2,613	13,387	281,50

Fonte: Autoria própria.

Os valores das propriedades foram calculados considerando as equações (1) e (2) propostas por Ou *et al* (2016), nas quais as resistências f_{y0} e f_{yc} são dadas em MPa, enquanto os módulos de elasticidade E_{s0} e E_{sc} são dados em GPa. Nessas equações, β_f e β_E são constantes empíricas cujos valores se referem à corrosão natural e foram determinadas por Ou *et al* (2016). Por sua vez, a redução do diâmetro foi calculada pela equação (3), proposta por Lu *et al* (2016) para cada taxa de corrosão.

$$f_{yc} = (1 - \beta_f \cdot x_c) \cdot f_{y0} \quad \text{com } \beta_f = 0,0123 \quad (1)$$

$$E_{yc} = (1 - \beta_E \cdot x_c) \cdot E_{y0} \quad \text{com } \beta_E = 0,0130 \quad (2)$$

$$\Delta\phi = \phi_0 \cdot \left(1 - \sqrt{1 - \frac{x_c}{100}}\right) \quad (3)$$

3.2.3 Processamento

Nas análises, o carregamento foi aplicado monotonicamente em 115 passos de carga, que correspondem aos incrementos de carga da análise não linear, que requer uma abordagem dita “incremental iterativa” para evitar a ruptura imediata que ocorreria na aplicação de todo o carregamento de uma única vez. Os dez primeiros passos de carga foram de 5 kN e os 105 restantes, de 1 kN, realizando-se controle de força até a ruína, que ocorre para aproximadamente 74,6 kN. As análises não lineares foram realizadas com controle de força para possibilitar a obtenção da distribuição dos deslocamentos, tensões, deformações e aberturas de fissuras para os modelos com diferentes taxas de corrosão. Para solucionar o sistema de equações gerado, foi utilizado o método de Newton-Raphson convencional com 20 iterações, verificando a convergência a cada passo de carga por meio de um critério baseado em energia de deformação, empregando-se, ainda, o método do comprimento de arco para facilitar a convergência.

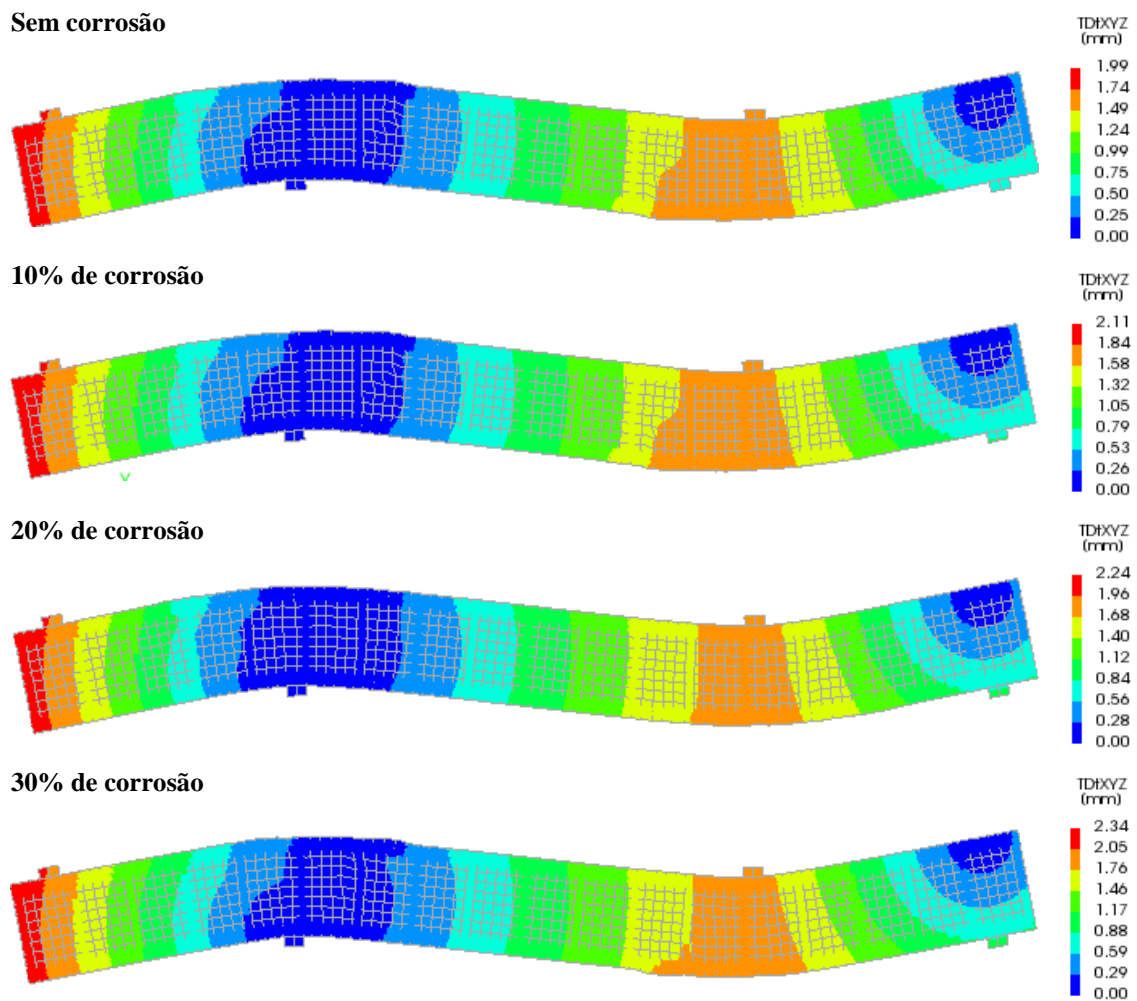
4 Análise dos resultados

Nos tópicos a seguir são apresentados e discutidos os resultados das modelagens realizadas para as quatro taxas de corrosão (0%, 10%, 20% e 30%) para os parâmetros: deslocamentos, deformações nas fissuras, e aberturas de fissuras.

4.1 Deslocamentos

A Figura 6 mostra as configurações deslocadas obtidas para as vigas analisadas, respectivamente para as situações: sem corrosão e com 10%, 20% e 30% de corrosão. Comparando a configurações deslocadas das vigas, não são notadas diferenças significativas na distribuição dos deslocamentos nas vigas.

Figura 5 – Configurações deslocadas das vigas analisadas.



Fonte: Autoria própria.

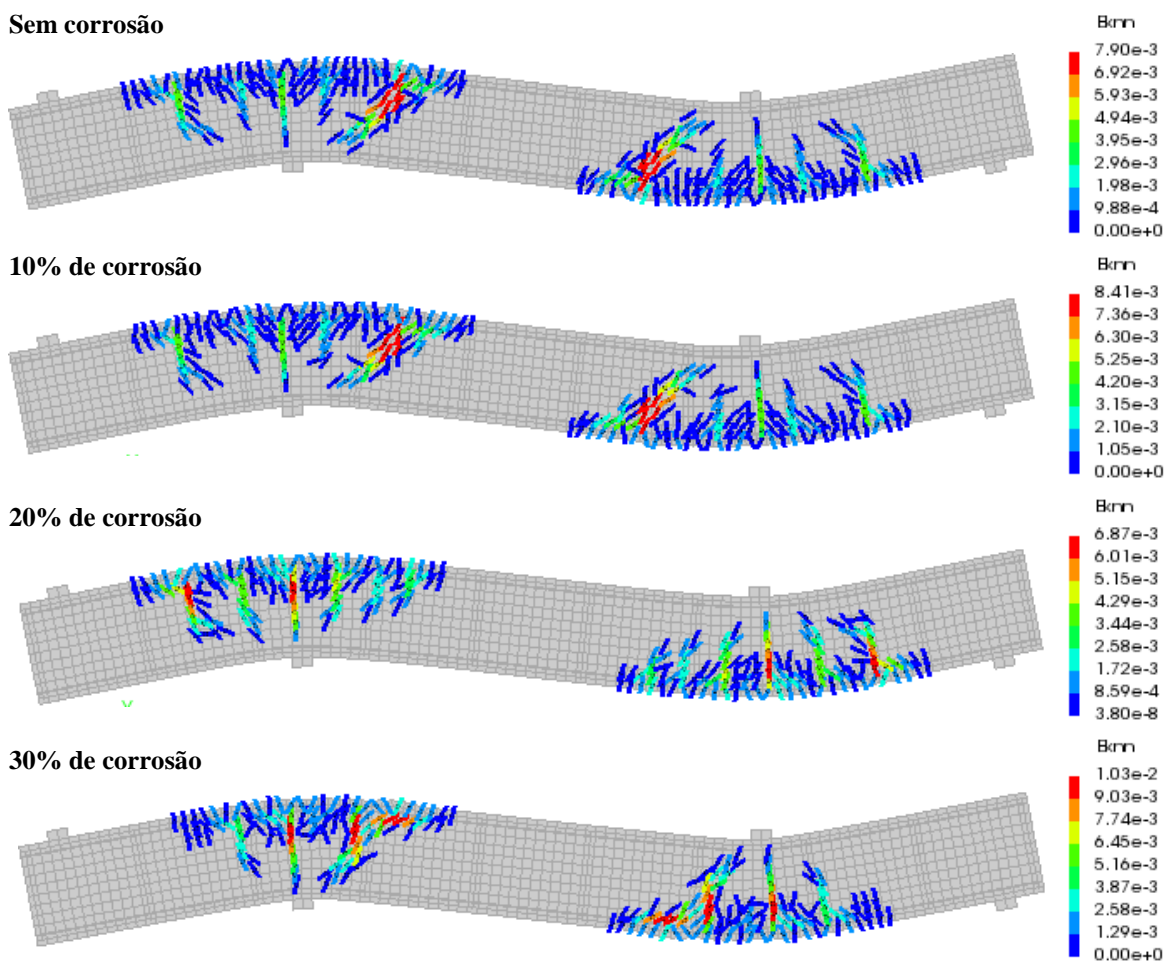
As diferenças começam a ser notadas para as vigas com armaduras afetadas pela corrosão em taxas de 20% e 30% e se concentram na região entre o apoio da esquerda e a placa de carregamento da direita (a mais carregada). Observa-se que os deslocamentos máximos obtidos são, também, próximos. Enquanto a viga sem corrosão apresentou deslocamento máximo de 1,99 mm, os deslocamentos máximos para as demais aumentaram em 6,0% (2,11 mm) para a viga com 10% de corrosão, 12,5% (2,24 mm) para a viga com 20% de corrosão e 17,6% (2,34

mm) para a viga com 30% de corrosão. Apesar de serem aumentos significativos, os deslocamentos são inferiores a 10 mm e, portanto, permanecem dentro dos limites aceitáveis definidos pela NBR6118 (ABNT, 2014).

4.2 Fissuração

A Figura 7 mostra as deformações de fissuração obtidas para as vigas analisadas, respectivamente para as situações: sem corrosão e com 10%, 20% e 30% de corrosão. Comparando essas deformações, observa-se que para a viga sem corrosão, o maior valor observado para a deformação de fissuração aumentou em aproximadamente 6,5% e 30,4%, respectivamente para as vigas com 10% e 30% de corrosão. Por outro lado, houve redução no valor dessa deformação de 13,0% na viga com 20% de corrosão, pois as fissuras passaram a ser de flexão e não mais de cisalhamento, devido às alterações na distribuição das tensões.

Figura 6 – Deformações de fissuração



Fonte: Autoria própria.

Observa-se que nas vigas sem corrosão e com 10% de corrosão as trajetórias das fissuras são muito semelhantes, inclinadas e, portanto, se referem a fissuras ocasionadas pelo cisalhamento que ocorre na região entre o apoio da esquerda e a placa de carregamento da direita.

Na viga com 20% de corrosão as fissuras com maiores deformações são verticais e, portanto, decorrentes do efeito de flexão no balanço da esquerda e no vão entre a placa de carregamento da direita e o apoio da direita. Essa mudança de trajetória, além da mudança na posição da fissura de maior deformação pode ser a causa da redução observada na deformação máxima de fissuração em comparação com a deformação máxima de fissuração observada na viga de referência.

Por fim, na viga com 30% de corrosão, nota-se que as fissuras de maiores deformações são verticais e horizontais. As fissuras verticais são decorrentes da flexão na região de momento máximo no balanço da esquerda. Por sua vez, as fissuras horizontais sugerem a ocorrência de fendilhamento das armaduras na região acima do apoio da esquerda, em particular, na região do corte BB (ver Figura 5).

A Figura 8 mostra as aberturas de fissuras obtidas para as vigas analisadas, respectivamente para as situações sem corrosão e com 10%, 20% e 30% de corrosão, que apresentaram aberturas máximas de fissura respectivamente de 0,48 mm, 0,49 mm, 0,52 mm e 0,67 mm. Além da redução ou até mesmo perda de aderência nos casos mais severos, a corrosão gera óxido de ferro, o qual apresenta comportamento expansivo e, por isso, induz a formação de fissuras internas que, por sua vez, facilitam o acesso dos íons cloreto às armaduras, além de comprometer o comportamento estrutural da peça. Em comparação com a viga de referência (sem corrosão), observam-se aumentos de 2,1%, 6,1% e 36,7%, respectivamente para as vigas com 10%, 20% e 30% de corrosão.

Figura 7 – Aberturas de fissura

Sem corrosão

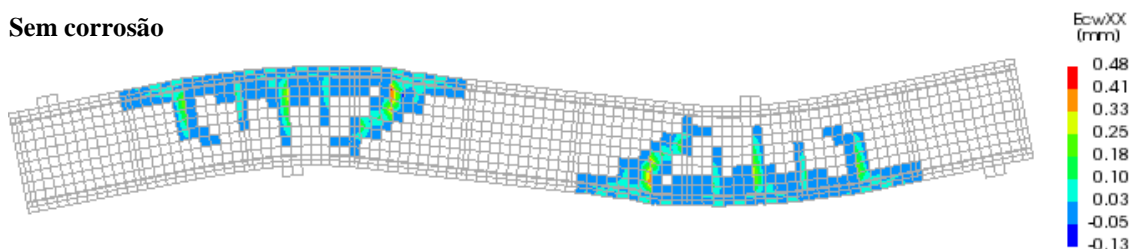
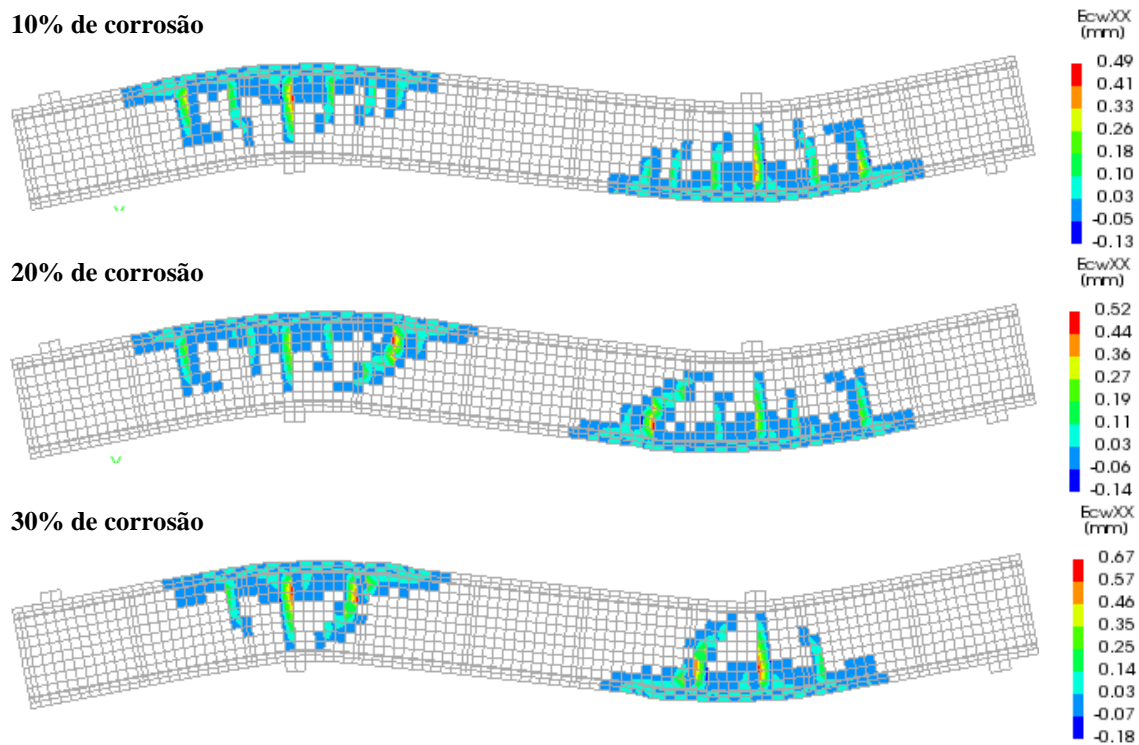


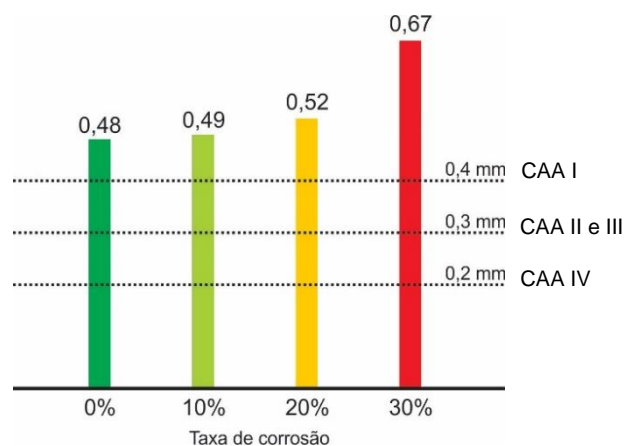
Figura 8 – Aberturas de fissura (continuação).



Fonte: Autoria própria.

Esses valores de abertura de fissuras são elevados e, em comparação com os limites estabelecidos pela NBR6118 (ABNT, 2014) na figura 9, indicam que as vigas não atendem ao Estado Limite de Serviço de Abertura de Fissuras (ELS-W), ainda que para a classe de agressividade ambiental (CAA) I, que é a mais branda. Os valores obtidos de abertura de fissuras estão 20,0%, 22,5%, 30,0% e 67,5% acima do limite normativo dessa classe de agressividade, que permite fissuras de abertura não superior a 0,4 mm (ver Figura 9).

Figura 8 – Comparação entre as aberturas de fissuras e os limites normativos da NBR6118 (ABNT, 2014).



Fonte: Autoria própria.

5 Conclusões

A penalização do módulo de elasticidade em 13%, 26% e 39%, respectivamente para as taxas de 10%, 20% e 30% de corrosão, tornou as vigas mais deformáveis em comparação com a viga de referência, sendo determinante para a elevação dos deslocamentos observados para taxas crescentes de corrosão.

A penalização da resistência à tração em 12%, 25% e 37%, respectivamente para as taxas de 10%, 20% e 30% de corrosão, reduziu consideravelmente a capacidade resistente das vigas analisadas em comparação com a solicitação, que permaneceu inalterada. Essa redução acoplada à redução no módulo de elasticidade, colaborou para a manifestação de maiores deslocamentos e aberturas de fissuras nas vigas com maiores reduções.

De maneira análoga, a redução na área de aço de 10%, 20% e 30%, desempenhou papel importante no agravamento dos danos causados pelas solicitações atuantes no modelo, uma vez que a área de aço é necessária para a mobilização das tensões de tração na armadura.

Não foram observadas diferenças significativas nas configurações deslocadas para as vigas analisadas, mas os deslocamentos observados foram de 6,0%, 12,5% e 17,6%, respectivamente para as vigas de 10%, 20% e 30% de corrosão.

O aumento da taxa de corrosão resultou em agravamento do panorama de fissuração, com alterações na tipologia das fissuras que manifestaram as maiores deformações, sendo de cisalhamento para 10% de corrosão, flexão para a viga com 20% de corrosão e flexão acompanhada de fendilhamento da armadura longitudinal para a 30% de corrosão.

6 Referências Bibliográficas

ANDRADE, J. J. O.. *Contribuição à previsão da vida útil das estruturas de concreto armado atacadas pela corrosão de armaduras: iniciação por cloretos*. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001, 277 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento, 2014, Rio de Janeiro, 238 p.

BASTOS, P.. Disciplina: 2117 - *Estruturas de concreto I: fundamentos do concreto armado* (Apostila), Universidade Estadual de São Paulo, Bauru – São Paulo, 2019, p. 89.

CADORE, W. W.. *Estudo da carbonatação da camada de cobrimento de protótipos de concreto com altos teores de adições minerais e cal hidratada*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008. 150 f.

CEB. **Durability of Concrete Structures**. Report of CEB-RILEM International Workshop. Copenhagen, Mai, 1983; também CEBBulletin D' Information, N2 152, 1984.

COELHO, K. O.. *Modelos numéricos aplicados à modelagem probabilística da degradação mecânica do concreto e corrosão de armaduras*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Departamento de Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017. 189 p.

DIANA FEA. *Shear failure in reinforced concrete beam*. Tutorial. Disponível em: <https://dianafea.com/diana-tutorials>. Acessado em: 21 de março de 2022.

KAEFER, L. F.. *A Evolução do Concreto Armado*. PEF 5707 – Concepção, Projeto e Realização das estruturas: aspectos históricos – 1998, v. 43. Disponível em: <https://wwwp.feb.unesp.br/lutt/> Acesso em: 23 de novembro de 2021.

LIBERATI, E. A. P., LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G.. Influência da corrosão da armadura na capacidade resistente à flexão de vigas em concreto armado: uma abordagem via teoria da confiabilidade estrutural. *Revista Ibracon de estruturas e materiais*, v. 7, n. 3, 2014, p. 1-18.

LIM, S.; AKIYAMA, M; FRANGOPOL, D.. Assessment of the structural performance of corrosion-affected RC members based on experimental study and probabilistic modeling, *Engineering Structures*, v. 127, nov. 2016, p. 189-205.

LU, C.; YUAN, S.; CHENG, P.; LIU, R.. Mechanical properties of corroded steel bars in pre-cracked concrete suffering from chloride attack. **Construction and Building Materials**, Elsevier, p. 1-12, 2016.

OU, Y-C; SUSANTO, Y. T. T; ROH, H.. Tensile behavior of naturally and artificially corroded steel bars. **Construction and Building Materials**, Elsevier, p. 1-12, 2015.

PELLIZZER, G. P.; LEONEL, E. D.; NOGUEIRA, C. G.. Abordagem numérica sobre o efeito da corrosão de armaduras na capacidade mecânica de vigas em concreto armado ao longo do tempo considerando modelos não lineares dos materiais. **Revista Ibracon de Estruturas e Materiais**, v. 11, n. 7, p. 1-13, 2018.

SANTOS, T. M. H.. **Corrosão das armaduras do betão armado: causas, consequências, prevenção e projeto de durabilidade**. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa, Portugal, 2014, 323 p.

WANG, X., ZHANG, W., GU, X, DAI, H.. Determination of residual cross-sectional areas of corroded bars in reinforced. **Construction and Building Materials**, v. 38, jan. 2013, p. 846853.



**PUC
GOIÁS**

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
GABINETE DO REITOR

Av. Universitária, 1069 • Setor Universitário
Caixa Postal 86 • CEP 74605-010
Goiânia • Goiás • Brasil
Fone: (62) 3946.1000
www.pucgoias.edu.br • reitoria@pucgoias.edu.br

RESOLUÇÃO n° 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante **DOUGLAS CARNEIRO SANTOS** do Curso de **ENGENHARIA CIVIL**, matrícula **2017.2.0025.0002-0**, telefone: **(62) 98252-8665** e-mail **douglas775.sam@gmail.com**, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei n° 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À CORROSÃO**, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 27 de junho de 2022.

Assinatura do autor: Douglas Carneiro Santos

Nome completo do autor: Douglas Carneiro Santos

Assinatura do professor-orientador: [Assinatura]

Nome completo do professor-orientador: Luiz Álvaro de Oliveira Júnior

RESOLUÇÃO nº 038/2020 – CEPE

ANEXO I

APÊNDICE ao TCC

Termo de autorização de publicação de produção acadêmica

O(A) estudante **LUCAS CHAGAS MENDES** do Curso de **ENGENHARIA CIVIL**, matrícula **2017.1.0025.0240-7**, telefone: **(62) 98297-1234** e-mail **lucaschagassoares0@gmail.com**, na qualidade de titular dos direitos autorais, em consonância com a Lei nº 9.610/98 (Lei dos Direitos do Autor), autoriza a Pontifícia Universidade Católica de Goiás (PUC Goiás) a disponibilizar o Trabalho de Conclusão de Curso intitulado **MODELAGEM COMPUTACIONAL DE VIGAS DE CONCRETO ARMADO SUJEITAS À CORROSÃO**, gratuitamente, sem ressarcimento dos direitos autorais, por 5 (cinco) anos, conforme permissões do documento, em meio eletrônico, na rede mundial de computadores, no formato especificado (Texto(PDF); Imagem (GIF ou JPEG); Som (WAVE, MPEG, AIFF, SND); Vídeo (MPEG, MWV, AVI, QT); outros, específicos da área; para fins de leitura e/ou impressão pela internet, a título de divulgação da produção científica gerada nos cursos de graduação da PUC Goiás.

Goiânia, 27 de junho de 2022.

Assinatura do autor: _____

Nome completo do autor: _____

Assinatura do professor-orientador: _____

Nome completo do professor-orientador: _____