

Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF

E. F. Felix^{*1}, T. J. Rodrigues Balabuch¹, M. Corrêa Posterlli¹, E. Possan², R. Carrazedo¹

*Autor de Contato: emerson.felipe.felix@gmail.com

DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

Recepção: 24/08/2017 | Aceitação: 18/12/2017 | Publicação: 31/01/2018

RESUMO

O presente trabalho apresenta uma análise numérica da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão uniforme. O processo de modelagem foi dividido em dois estágios, iniciação e propagação. A modelagem da fase de iniciação foi feita via Redes Neurais Artificiais (RNA) enquanto que a fase de propagação foi modelada através do Método dos Elementos Finitos (MEF). Os resultados demonstram que o modelo gerado pelo acoplamento das RNA ao MEF, possibilita de forma eficiente, a simulação da degradação de estruturas de concreto armado devido à ação da corrosão uniforme e, a aplicabilidade da ferramenta numérica quanto a previsão da vida útil destas estruturas.

Palavras chave: concreto armado; corrosão de armaduras; vida útil; Redes Neurais Artificiais; Método dos Elementos Finitos.

Citar como: E. F. Felix, T. J. Rodrigues Balabuch, M. Corrêa Posterlli, E. Possan, R. Carrazedo (2018), “Análise da vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme por meio de um modelo com RNA acoplado ao MEF”, Revista ALCONPAT, 8 (1), pp. 1 – 15, DOI: <http://dx.doi.org/10.21041/ra.v8i1.256>

¹ Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Brasil.

² Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Brasil.

Informação Legal

Revista ALCONPAT é uma publicação trimestral da Associação Latino-Americana de Controle de Qualidade, Patologia e Recuperação de Construção, Internacional, A.C., Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310, Tel.5219997385893, alconpat.int@gmail.com, Website: www.alconpat.org

Editor responsável: Dr. Pedro Castro Borges. Reserva de direitos de uso exclusivo No.04-2013-011717330300-203, eISSN 2007-6835, ambos concedidos pelo Instituto Nacional de Direitos Autorais. Responsável pela última atualização deste número, Unidade de Informática ALCONPAT, Eng. Elizabeth Sabido Maldonado, Km. 6, antiga estrada para Progreso, Mérida, Yucatán, C.P. 97310.

As opiniões expressas pelos autores não refletem necessariamente a posição do editor.

É totalmente proibida a reprodução total ou parcial dos conteúdos e imagens da publicação sem autorização prévia do ALCONPAT International A.C.

Qualquer discussão, incluindo a resposta dos autores, será publicada no terceiro número do ano 2018, desde que a informação seja recebida antes do fechamento do segundo número do ano de 2018.

Service life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM

ABSTRACT

The present work intends to analyze and numerically model the corrosion process, estimating the service life of concrete structures. The modelling process was divided in two stages, initiation and propagation. The modeling of the initiation phase was carried out by Artificial Neural Networks (ANN), and the modeling of the propagation phase was done by means of Finite Element Method (FEM). The results show the efficiency of the model generated by the coupling of ANN to the FEM to analyze and study the durability of reinforced concrete structures under uniform corrosion, and the numerical model applicability to estimate the service life of reinforced concrete structures.

Keywords: reinforced concrete; reinforcement corrosion; service life; Artificial Neural Networks; Finite Element Method.

Análisis de la vida útil de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme a través del modelo con RNA acoplado al MEF

RESUMEN

Este estudio tiene como objetivo analizar y estimar la vida útil de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme. El modelado se dividió en dos etapas, iniciación y propagación. El modelado de la fase de iniciación fue realizado por medio de Redes Neuronales Artificiales (RNA) y el modelado de la fase de propagación fue hecho por medio del Método de los Elementos Finitos (MEF). El acoplamiento de la RNA en el MEF permitió analizar y estudiar la durabilidad de estructuras de hormigón armado bajo la acción de corrosión uniforme, presentándose como una metodología alternativa para la estimación del tiempo de vida útil de estas estructuras.

Palabras clave: hormigón armado; corrosión de las armaduras; vida útil; Redes Neuronales Artificiales; Método de los Elementos Finitos.

1. INTRODUÇÃO

Dentre os fatores para o desenvolvimento sustentável e o crescimento econômico da sociedade moderna estão a confiabilidade e durabilidade de estruturas e instalações de infraestrutura, destacando-se as estruturas de concreto armado. Entretanto, esses sistemas estruturais são vulneráveis a processos de deterioração resultantes de agressões químicas e danos físicos, que, ao longo do tempo, podem conduzir a um desempenho estrutural insatisfatório sob cargas de serviço ou ações acidentais.

Diante do exposto, nos últimos anos houve avanços significativos nas áreas de modelagem, análise e projeto quanto a deterioração em estruturas, assim como novas abordagens foram propostas quanto à avaliação de vida útil das estruturas (Ellingwood, 2005; Biondini et al., 2017, Andrade et al., 2017).

A corrosão das armaduras apresenta-se como a patologia com o maior índice de ocorrência em estruturas de concreto armado (KARI et al., 2014). No Brasil, por exemplo, este índice varia de 14 a 64% a depender da região de análise (Carmona et al., 1988; Dal Molin, 1988; Andrade, 1992).

Percebe-se que a modelagem estrutural precisa e computacionalmente eficiente, da deterioração causada pela corrosão, é um pré-requisito essencial para a confiabilidade estrutural e análise de

vida útil, de modo a reduzir os custos de manutenção das estruturas, especialmente as de concreto armado (Vu et al., 2000; Rao et al., 2017).

A corrosão da armadura de aço no concreto é um processo eletroquímico, causado pelas diferenças nas concentrações de íons dissolvidos, de maneira que parte do metal se torna catódica e outra anódica, resultando na perda de volume do material e na formação de produtos de corrosão, material secundário com volume de 3 a 10 vezes maior que o inicial (Mehta et al., 2014; Geiker et al., 2016).

A modelagem da deterioração do concreto, devido à corrosão uniforme, tem utilizado os processos fenomenológicos em que a corrosão do aço, imerso no concreto armado, pode ser segmentada e resumida em dois estágios, iniciação e propagação.

A fase de iniciação da corrosão, corresponde ao período em que ocorre o transporte de agentes agressivos, por exemplo, o CO₂, na matriz porosa do concreto, tendo por consequência a redução do pH do meio (de aproximadamente 12,5 a 8,5) e, a despassivação da armadura. Já a fase de propagação, caracteriza-se pela perda de massa do aço e a formação de produtos de corrosão que causam a fissuração do concreto de cobrimento ou em estágios mais avançados o destacamento do concreto (Tuutti, 1982; Bakker, 1988; Rao et al., 2017).

É de conhecimento geral que os custos de projetos de estruturas de concreto armado que consideram apenas o período de iniciação da corrosão não são os mais econômicos, uma vez que não são considerados os custos de manutenção causados pela corrosão, principalmente no período de propagação, consideração esta de grande importância na análise de vida útil das estruturas de concreto armado (Yanaka et al., 2016).

Diante do exposto, neste trabalho analisa-se a vida útil de estruturas de concreto armado por meio do acoplamento de dois modelos, um responsável pela estimativa do tempo em que ocorre a despassivação da armadura (vida útil de projeto - VUP) e outro referente ao tempo em que o elemento de concreto alcança o estado limite de serviço (vida útil de serviço - VUS).

2. VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO SOB CORROSÃO

A vida útil, a segurança, a confiabilidade e o risco dos sistemas de infraestrutura civil tornaram-se questões emergentes nos últimos anos devido às catástrofes naturais e humanas, questões de sustentabilidade e ao aquecimento global.

A gestão da durabilidade da infraestrutura civil envolve gastos significativos e, em uma época de recursos públicos limitados, requer decisões difíceis para estabelecer prioridades de manutenção, reabilitação e substituição. Neste aspecto, percebe-se a importância do conceito de vida útil, que serve como base para uma abordagem holística de projeto. As estruturas devem ser idealizadas para a segurança estrutural e a manutenção durante um período especificado. Isso inclui o projeto para durabilidade e sustentabilidade. Com o intuito de conceber uma estrutura com uma baixa necessidade de manutenção durante a sua vida útil, medidas devem ser tomadas já na fase de concepção e, ainda, é necessário realizar o controle quando a estrutura está em serviço (Ellingwood et al., 2016).

Uma das principais causas de redução da vida útil de estruturas de concreto armado é a corrosão, uma vez que essa envolve a perda de material da superfície do aço como resultado de uma ação química, e a perda material leva a redução de área efetiva na seção transversal e, conseqüentemente, a diminuição da capacidade de suportar cargas.

Entretanto, a corrosão pode ser retardada, adotando um concreto de média ou alta durabilidade (a depender do ambiente de exposição) ou, considerando uma espessura adequada para o concreto de cobrimento. Broomfield (2007) e Dyer (2015) relatam que quanto menor for o cobrimento e a qualidade do concreto, maior será a possibilidade de ocorrência da corrosão e, conseqüentemente, dos seus efeitos degradativos, por exemplo, a fissuração do concreto.

A alcalinidade do concreto se dá devido aos poros microscópicos que contêm altas concentrações de óxidos de cálcio, sódio e potássio solúveis. Estes formam hidróxidos, alcalinos na presença de água, criando uma condição de pH ótimo (entre 12 e 13). Deste modo o concreto protege o aço da corrosão tanto fisicamente formando uma camada protetora para a armadura, quanto quimicamente por meio da condição alcalina que induz a formação de uma película passiva, na superfície do aço, muito densa, fina e de óxido, levando a uma taxa muito lenta de corrosão (Broomfield, 2007; Köliö et al., 2017).

O processo de corrosão uniforme, corrosão por carbonatação, pode ser subdividido em duas fases, iniciação e propagação. A fase de iniciação se caracteriza pelo processo de difusão de CO_2 . O gás carbônico penetra na matriz porosa do concreto reagindo com os hidróxidos de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) presente na pasta de cimento, levando a formação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (Figura 1). Na literatura este processo recebe o nome de carbonatação, sendo responsável por algumas alterações no concreto carbonatado, por exemplo, redução da permeabilidade (Neville, 1997). Além disso, esse processo reduz o pH do concreto (de aproximadamente 12,5 a 8,5), tendo por consequência a destruição de uma camada química que protege o aço dos mecanismos de corrosão (Chang et al., 2006) (Figura 1).

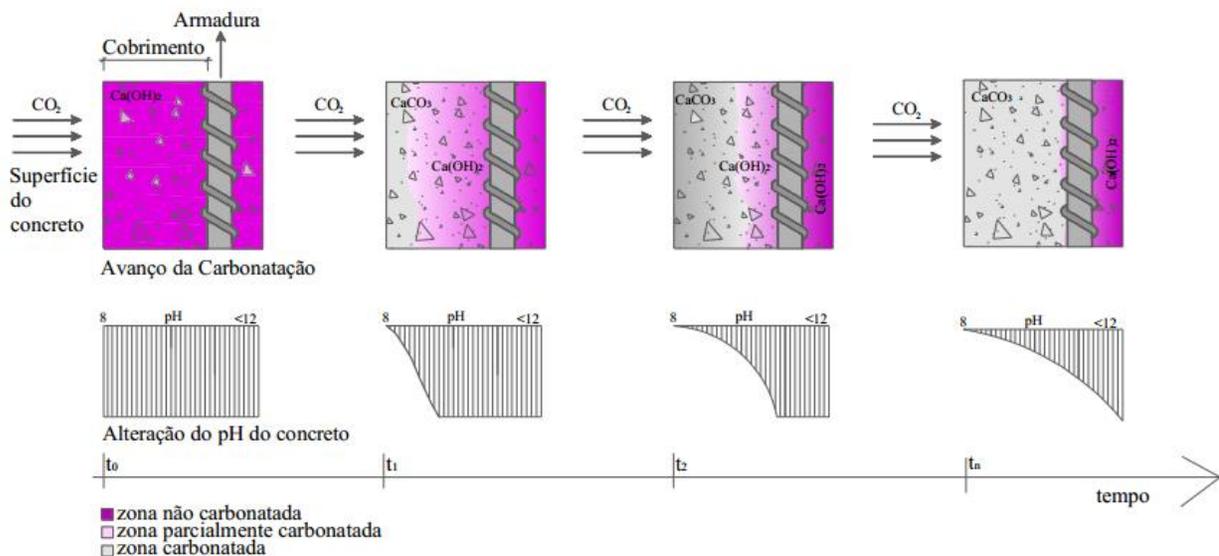
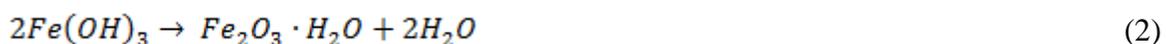


Figura 1. Avanço da frente de carbonatação vs. redução do pH no concreto (Possan, 2010).

A reação de carbonatação começa na superfície do concreto progredindo internamente com o tempo. À medida que a frente de carbonatação atinge a profundidade do aço, inicia-se a fase de progressão da corrosão, não havendo a ocorrência de nenhum dano real à estrutura até este ponto (Tuutti, 1982; Possan, 2010; Köliö et al., 2017).

Na fase de propagação, para que haja a formação dos produtos de corrosão, é necessário que primeiro o hidróxido ferroso se transforme em hidróxido férrico (1) para então se transformar em óxido férrico hidratado, também denominado produto de corrosão, demonstrado em (2).



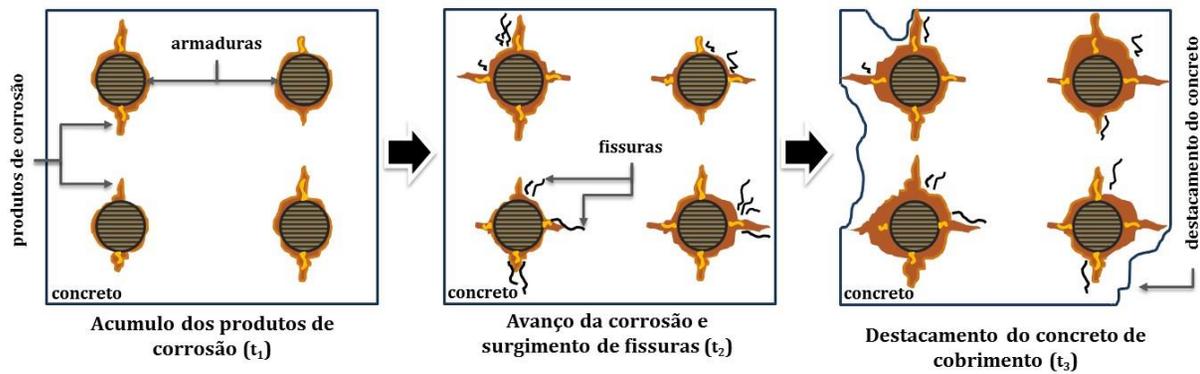


Figura 2. Estágios dos danos causados no concreto no período de progressão da corrosão.

A propagação é determinada pela taxa de corrosão (governada pela disponibilidade de oxigênio, umidade relativa e temperatura) e a capacidade da cobertura do concreto para suportar tensões internas. O óxido férrico não hidratado (Fe_2O_3) tem um volume de cerca de duas vezes o do aço que substitui quando totalmente denso. O óxido férrico ao hidratar-se, se expande ainda mais tornando-se poroso, aumentando o volume na interface aço-concreto de seis a dez vezes, causando a perda de área efetiva de aço.

A expansão do concreto devido à formação dos produtos de corrosão tem por consequência a fissuração do concreto de cobrimento, isso ocorre quando as tensões induzidas pela camada crescente de produtos de corrosão excedem a capacidade de tração do concreto, especialmente em estruturas com pequenos cobrimentos. Com a fissuração do concreto, a difusão de agentes externos é facilitada e acelerada, podendo causar maiores danos ao concreto, por exemplo, o destacamento do concreto de cobrimento (Figura 2), onde todo um segmento da cobertura de concreto se desprende da superfície da estrutura (Broomfield, 2007; Köliö et al., 2017).

3. MODELAGEM DA VIDA ÚTIL DE ESTRUTURAS DE CONCRETO

3.1 Descrição do modelo implementado para a análise da vida útil

Com o intuito em determinar a vida útil de estruturas de concreto armado sob corrosão, implementou-se inicialmente um programa em linguagem Fortran, para a análise estrutural não linear geométrica de sólidos bidimensionais compósitos com fibras (para a representação do concreto armado) baseando-se no Método dos Elementos Finitos Posicional (MEFP), descrito em Coda (2003). Em seguida realizou-se uma adaptação no programa para que o mesmo incorporasse os danos da fase de propagação da corrosão através da redução da área útil de aço das armaduras, utilizando para tal, as equações para a determinação do diâmetro íntegro de aço (Stewart et al., 1998) e da taxa de corrosão das armaduras (Vu et al., 2000), dadas respectivamente em (3) e (4).

$$d(t_p) = d_0 - (2.0,0116 \cdot \eta \cdot t_p) \quad (3)$$

$$\eta = \left(\frac{37,8 \cdot (1 - a/c)^{-1,64}}{cob} \right) \cdot 0,85 \cdot (t_p)^{-0,29} \quad (4)$$

em que $d(t_p)$ é o diâmetro íntegro de aço (em mm) no tempo t_p (em anos) após iniciar o período de progressão da corrosão, d_0 é o diâmetro inicial da barra (mm), η representa a taxa de corrosão da armadura ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), a/c é a relação água/cimento do concreto e cob é a espessura do concreto de cobrimento (mm).

Para a determinação do instante em que ocorre a despassivação do aço (VUP), acoplou-se ao código, baseado no MEF, um modelo do avanço da profundidade de carbonatação do concreto, desenvolvido por Félix (2016) via Redes Neurais Artificiais (RNA) do tipo MultiLayer Perceptron. As variáveis de entrada do modelo e a topologia da rede responsável por descrever a frente de carbonatação são apresentadas na Figura 3.

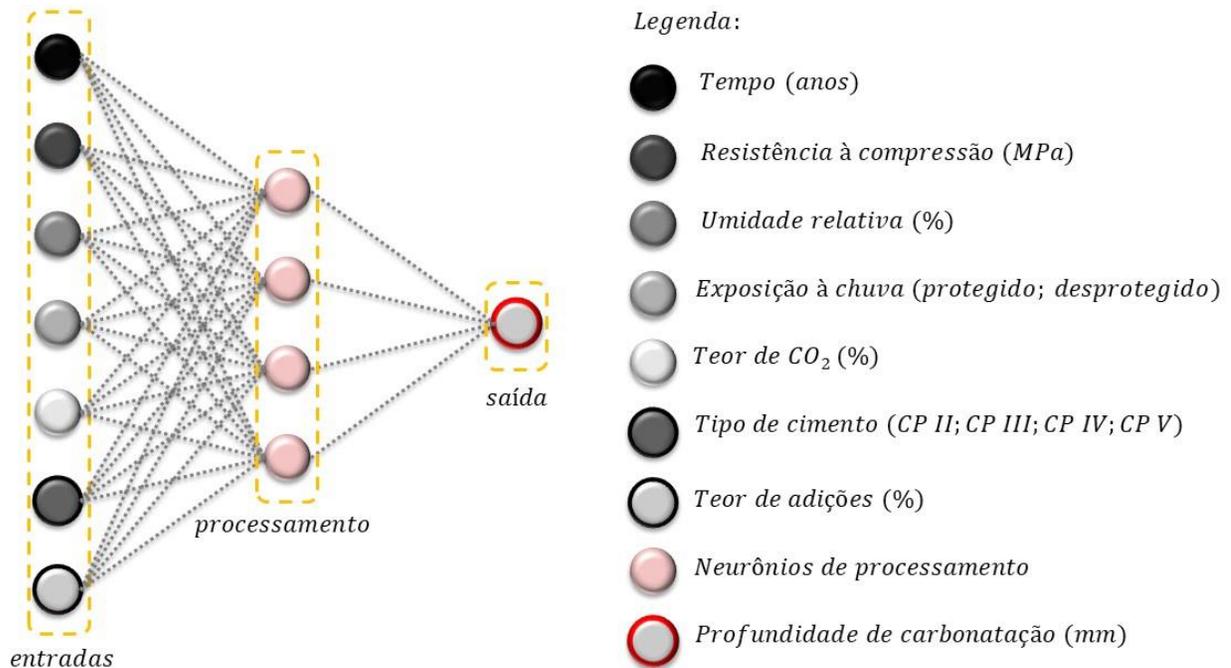


Figura 3. Variáveis do modelo proposto e topologia da RNA (Félix et al., 2017).

Quanto à VUS, a mesma é calculada no presente trabalho como sendo o instante de tempo em que o elemento de concreto sob corrosão tem a sua abertura de fissura característica (5) maior que os valores aceitáveis e/ou os deslocamentos da estrutura ultrapassam os deslocamentos limites, valores estes recomendados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

$$w \leq \begin{cases} w_1 = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \frac{3 \cdot \sigma_{si}}{f_{ctm}} \\ w_2 = \frac{\phi_i}{12,5 \cdot \lambda_i} \cdot \frac{\sigma_{si}}{E_{si}} \cdot \left(\frac{4}{\rho_{ri}} + 45 \right) \end{cases} \quad (5)$$

em que w é a abertura de fissura característica (mm), ϕ_i é o diâmetro da armadura (mm), λ_i é o coeficiente de conformação superficial da armadura (1.0 para barras lisas, 1.4 para barras dentadas e 2.5 para barras nervuradas), σ_{si} é a tensão de tração da armadura (kN/cm²), E_{si} é o módulo de elasticidade da barra de aço (kN/cm²), f_{ctm} é a tensão de tração média do concreto (kN/cm²) e ρ_{ri} é a taxa de armadura em relação à área envolvente.

Assim, na Figura 4 é apresentado um fluxograma referente ao programa implementado para determinar a vida útil de estruturas de concreto armado sob ação da corrosão.

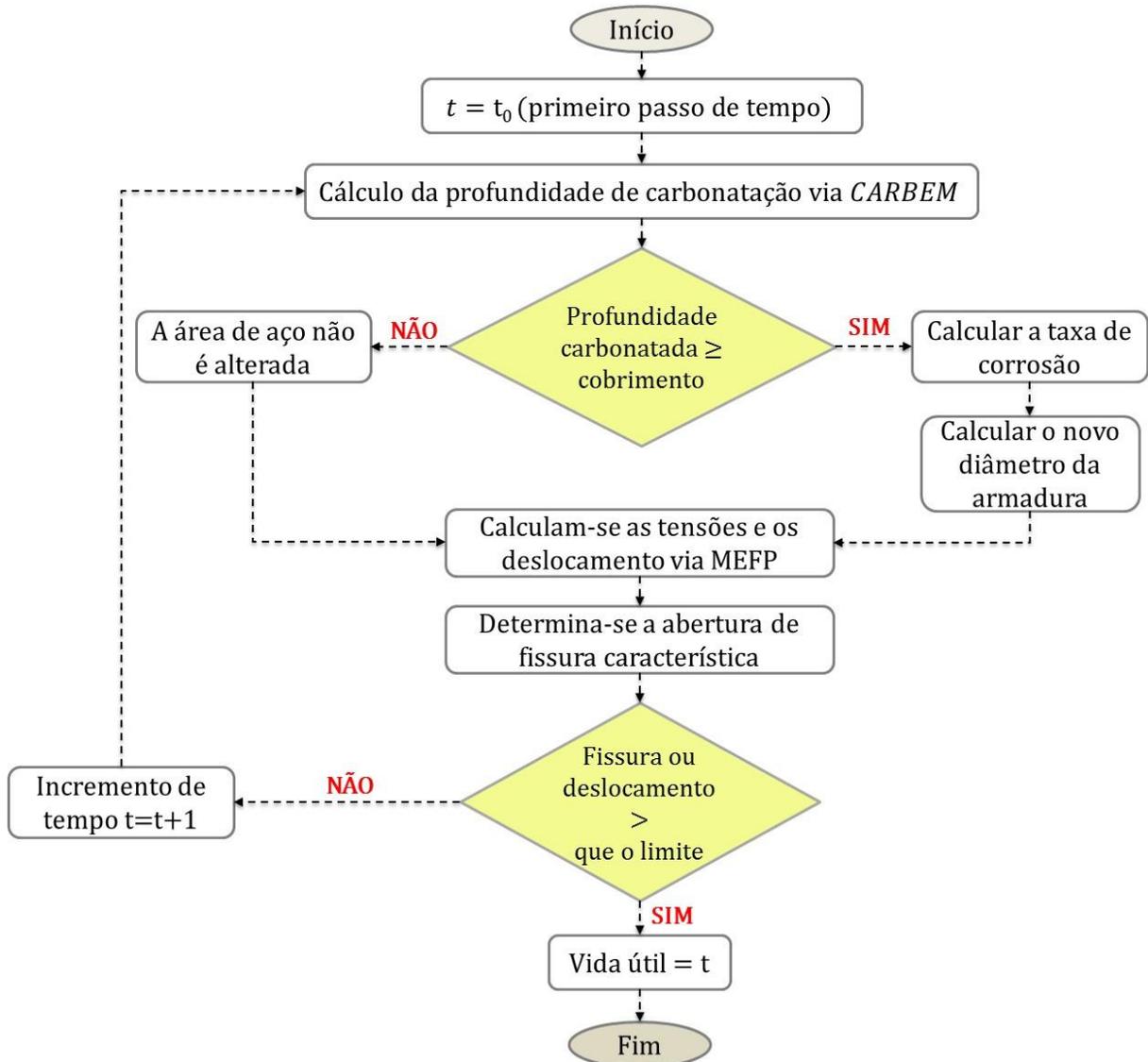


Figura 4. Fluxograma referente aos processos de cálculo do programa desenvolvido.

3.2 Validação do modelo de predição da profundidade de carbonatação

A fim de demonstrar a aplicabilidade do modelo proposto, nas Figuras 5(a-d) são apresentadas curvas do avanço da profundidade de carbonatação em estruturas de concreto sob distintos cenários, conforme apresentado na Tabela 1. O modelo é comparado a outros existentes na literatura (Smolczyk, 1976; Vesikari, 1988; Bob et al., 1993; EHE, 2008; Possan, 2010), descritos com detalhes em Felix (2016) e com dados reais de degradação de Meira (2004).

Tabela 1. Cenários das estruturas de concreto sob carbonatação.

Cenário	Teor de CO ₂ (%)	Umidade relativa (%)	Exposição à chuva	Tipo de Cimento	Resistência à compressão (MPa)
I	0.04	70.00	Protegido	CP II – E	30.00
II	0.04	70.00	Protegido	CP III	40.00
III	0.04	65.00	Desprotegido	CP IV	40.00
IV	0.04	65.00	Desprotegido	CP V	40.00

OBS.: Em todos os cenários o teor de adição é zero e o tempo de análise é de 60 anos.

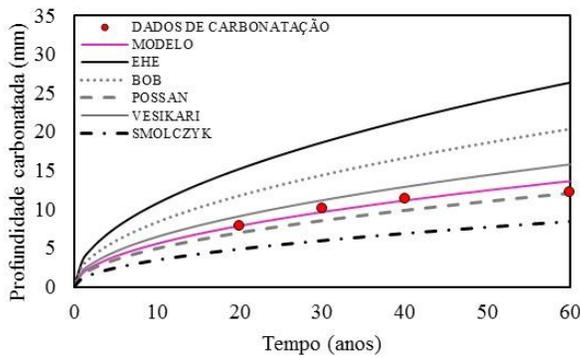


Figura 5(a). Carbonatação no cenário I.

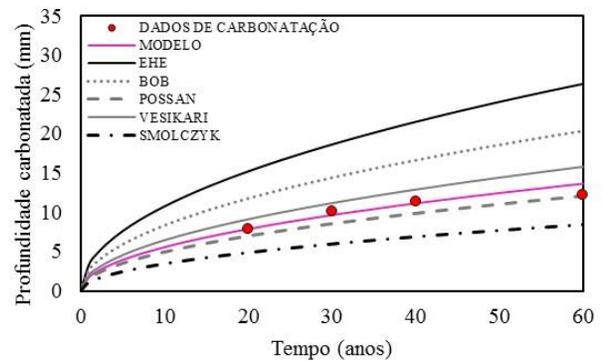


Figura 5(b). Carbonatação no cenário II.

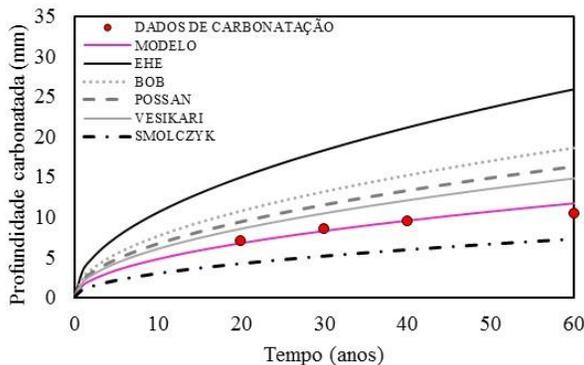


Figura 5(c). Carbonatação no cenário III.

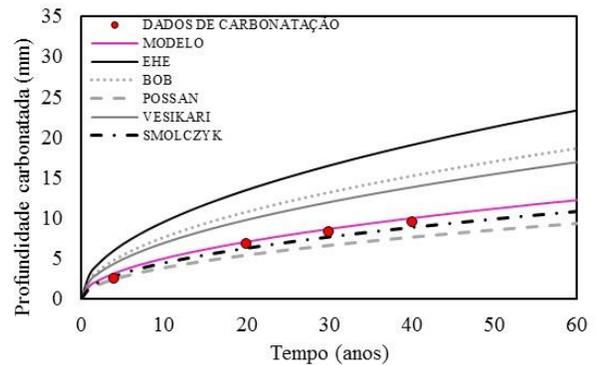


Figura 5(d). Carbonatação no cenário IV.

Os resultados encontrados, demonstram a aplicabilidade do modelo, e que o mesmo se apresenta como uma ferramenta eficiente para a estimativa da profundidade de carbonatação do concreto.

3.3 Validação do modelo referente à modelagem de estruturas de concreto sob corrosão

Para fins de validação do modelo numérico proposto, modelou-se a degradação imposta pela corrosão em uma viga de concreto armado (Figura 6) ensaiada e modelada por Graeff (2007). A estrutura consiste em um modelo reduzido de uma viga de seção retangular, de dimensão 7x14x130 cm, com vão entre os apoios de 120 cm. Na Figura 6 é apresentado um detalhamento simplificado da viga e o esquema referente ao carregamento imposto.

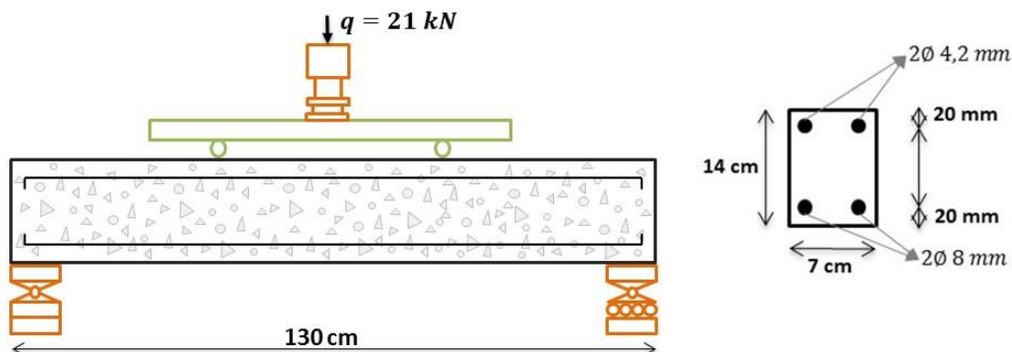


Figura 6. Detalhamento simplificado da viga de concreto armado.

A discretização da malha de elementos finitos da viga de concreto armado foi feita com 134 nós e 34 elementos triangulares com ordem de aproximação cúbica para a representação da matriz de concreto e com 120 elementos de barra simples (fibras) para a representação das armaduras.

Quanto às propriedades dos materiais, o concreto possui módulo de elasticidade de 2600 kN/cm^2 , resistência à compressão de 2.5 kN/cm^2 , resistência à tração de 0.179 kN/cm^2 e coeficiente de Poisson de 0.2. Já as armaduras possuem módulo de elasticidade 21000 kN/cm^2 e resistência à tração de 50.0 kN/cm^2 . O modelo constitutivo empregado é o de Saint-Venant-Kirchhoff para materiais elástico-lineares.

A Figura 7 apresenta a comparação entre os resultados numéricos (modelo proposto) e experimentais (Graeff, 2007) para o deslocamento vertical do centro do vão da viga. Mostra-se que o modelo representa de forma coerente o campo de deslocamento da viga no trecho em regime elástico-linear.

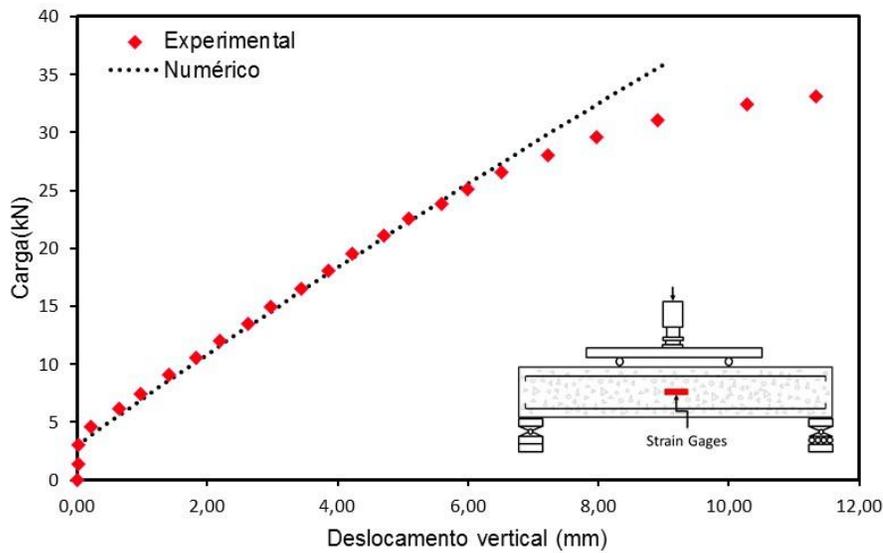


Figura 7. Comparação entre os deslocamentos.

A fim de verificar aplicabilidade do modelo quanto à determinação dos efeitos causados pela corrosão às estruturas de concreto armado, comparou-se a taxa de aumento do deslocamento vertical do centro da viga à medida em que as armaduras sofrem degradação (perda de área), com a obtida numericamente por Graeff (2007).

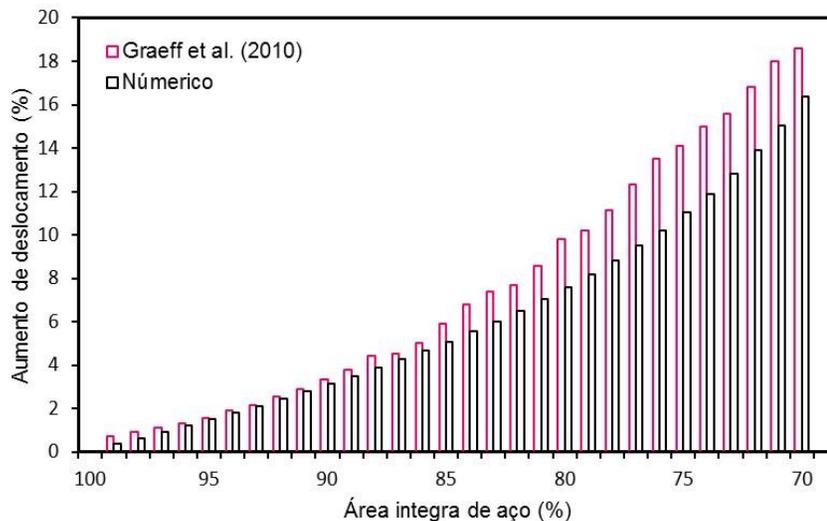


Figura 8. Comparação entre as taxas de aumento dos deslocamentos.

Observa-se na Figura 8, que é crescente a diferença entre as respostas dos dois modelos com a evolução da degradação da armadura, isso ocorre devido Graeff (2007) adotar em seu modelo uma lei constitutiva não-linear. No entanto, o modelo proposto obtém deslocamentos equivalentes aos de Graeff (2007), apresentando um desvio médio de 3.20%.

3.4 Descrição da estrutura analisada

A estrutura analisada neste trabalho consiste em uma viga de concreto armado dimensionada de acordo com os procedimentos da NBR 6118 (ABNT, 2014). O Esquema que representa o carregamento utilizado para o dimensionamento (obtido em ELU) e para a análise da vida útil (obtido em ELS) são apresentados na Figura 9, assim como os detalhes construtivos da mesma. A fim de analisar a durabilidade da estrutura de concreto exposta a um ambiente com agressividade moderada, a estrutura foi dimensionada para três diferentes cobrimentos, 20, 25 e 30 mm.

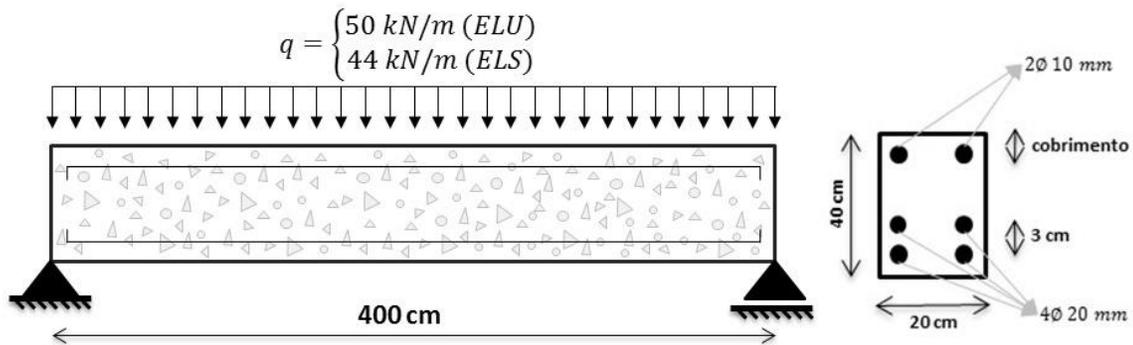


Figura 9. Detalhamento simplificado da viga de concreto armado.

A discretização da malha de elementos finitos da viga de concreto armado foi feita com 2317 nós e 486 elementos triangulares com ordem de aproximação cúbica para a representação da matriz de concreto e com 900 elementos de barra simples (fibras) para a representação das armaduras. O modelo constitutivo empregado é o de Saint-Venant-Kirchhoff para materiais elástico-lineares. Os dados referentes às propriedades dos materiais são apresentados na Tabela 2(a), enquanto que na Tabela 2(b) apresentam-se os dados referentes ao concreto e o ambiente de exposição da estrutura.

Tabela 2(a). Propriedade dos materiais.

Material	Propriedade (kN/cm ²)	Valor
Concreto (C30)	Módulo de elasticidade	2607.16
	Coefficiente de Poisson	0.20
	Resistência à compressão	3.00
	Resistência à tração	0.21
Aço (CA-50)	Módulo de elasticidade	21000.00
	Resistência à tração	50.00

Tabela 2(b). Dados referentes ao concreto e ambiente de exposição.

Característica	Condição
Tipo de cimento	CP III
Teor de adições (%)	0.00
Umidade relativa (%)	60.00
Ambiente	Externo, desprotegido da chuva
Teor de CO ₂ (%)	0.04 (ambiente urbano)

4. RESULTADOS

Inicialmente é apresentado na Figura 10 o avanço da profundidade de carbonatação do concreto e a VUP das vigas de diferentes cobrimentos (20, 25 e 30 mm). De imediato nota-se a importância da utilização de um cobrimento adequado em função da agressividade do meio ao qual a estrutura

de concreto é exposta, uma vez que o cobrimento adequado aumenta a VUP e consequentemente o tempo necessário para que ocorram as primeiras intervenções humanas e reparos nas estruturas.

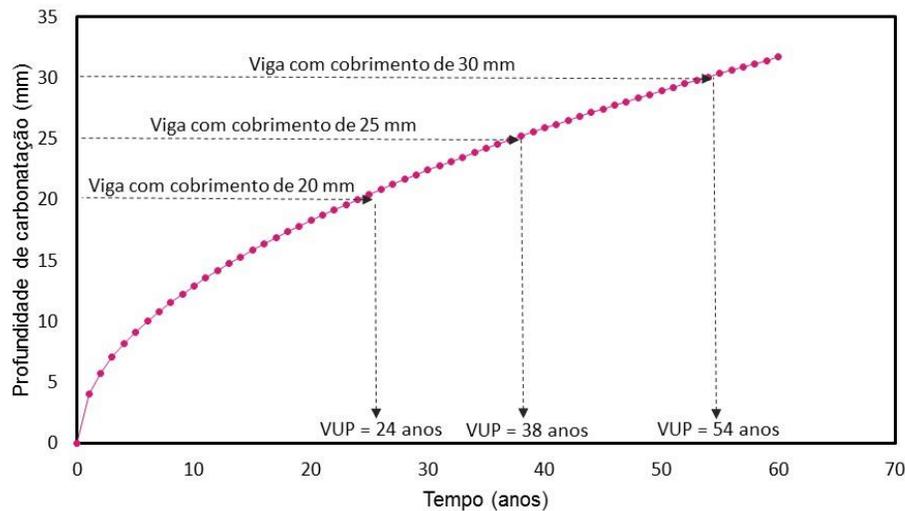


Figura 10. Avanço da carbonatação e VUP das vigas com diferentes cobrimentos.

Na Figura 11 é possível analisar o avanço da degradação das armaduras devido à ação da corrosão (no gráfico apresenta-se a área útil de aço das armaduras longitudinais). Observa-se que durante a fase de iniciação da corrosão (VUP) a área útil de aço das armaduras não é reduzida, e que a perda de seção é significativa nos primeiros anos do período de propagação da corrosão, em concordância com o estudo de Vu et al. (2000). Os autores descrevem que existe uma tendência de ocorrer maior perda de seção no período inicial da corrosão, devido à taxa de corrosão das armaduras ser maior, e que a mesma decresce ao longo do tempo apresentando um comportamento exponencial.

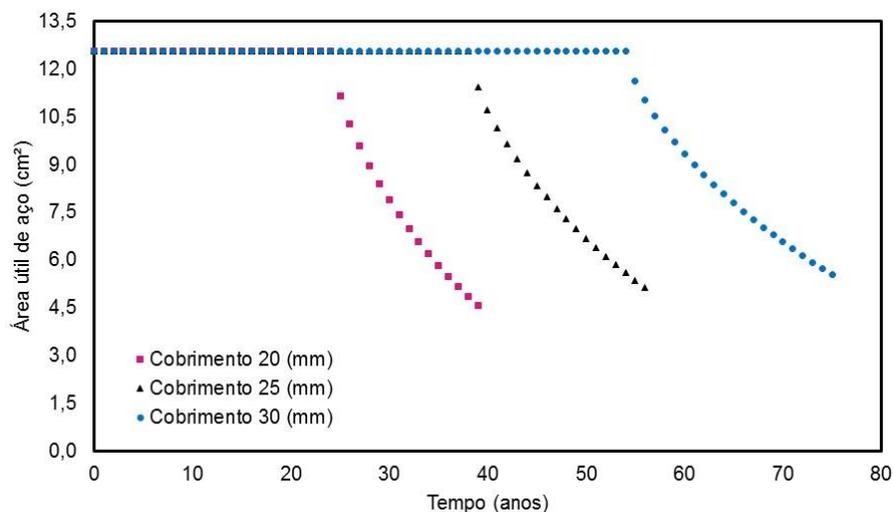


Figura 11. Perda da área útil de aço nas vigas de concreto sob corrosão.

Na figura 12 é apresentada a VUS das vigas de concreto armado analisadas neste trabalho. O valor limite de abertura de fissuras adotado para as análises foi $w_{lim} = 0.3$ mm, conforme prescreve a NBR 6118 (ABNT, 2014) para estruturas de concreto com classe de agressividade ambiental II (moderado).

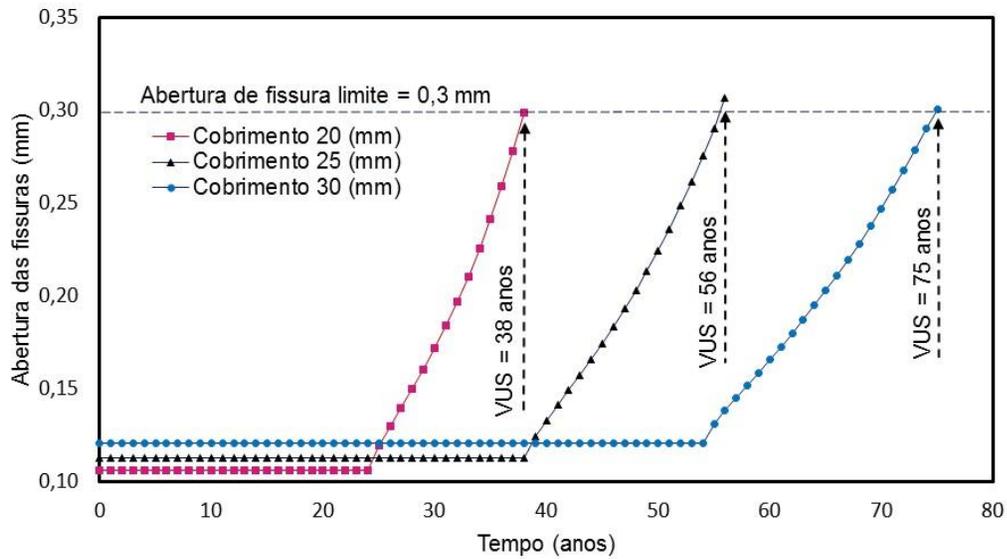


Figura 12. Progressão da abertura das fissuras e VUS das vigas de concreto.

Observa-se que a declividade da curva do avanço da abertura de fissuras decresce com o aumento do cobrimento, aumentando assim o tempo necessário para que a estrutura de concreto armado alcance o estado limite de abertura de fissuras (referente ao ELS).

Por fim, apresentam-se nas Figura 13, 14 e 15 as tensões longitudinais e os deslocamentos verticais das vigas de concreto armado com 20, 25 e 30 mm de cobrimento, no instante em que as fissuras alcançam o valor limite (VUS).

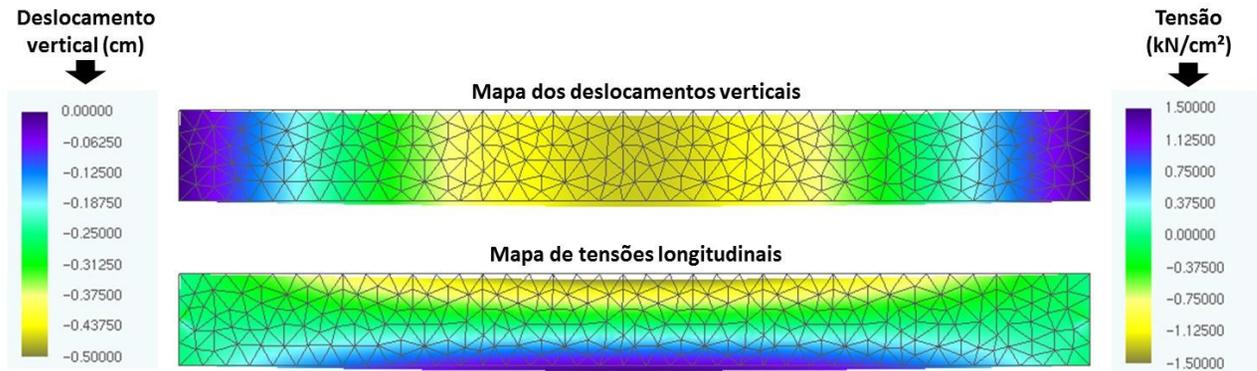


Figura 13. Configuração deformada da viga com cobrimento de 20 mm ao final da VUS.

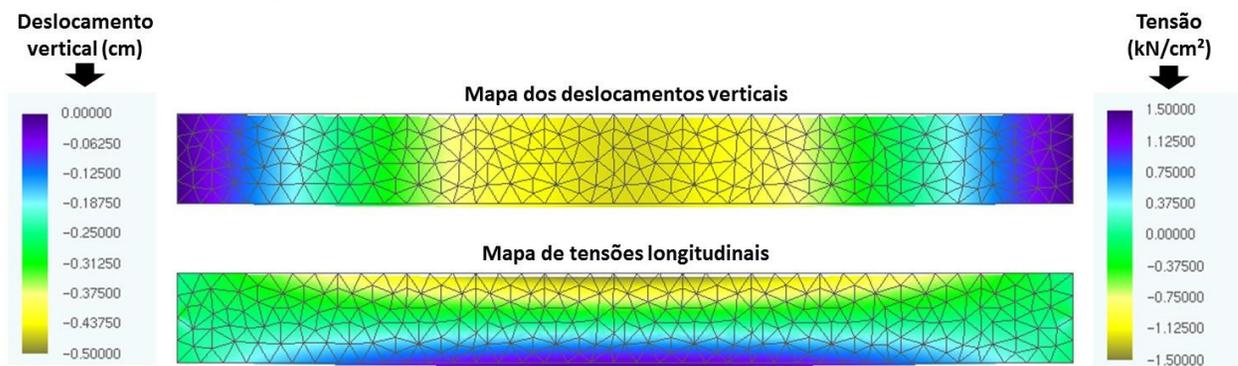


Figura 14. Configuração deformada da viga com cobrimento de 25 mm ao final da VUS.

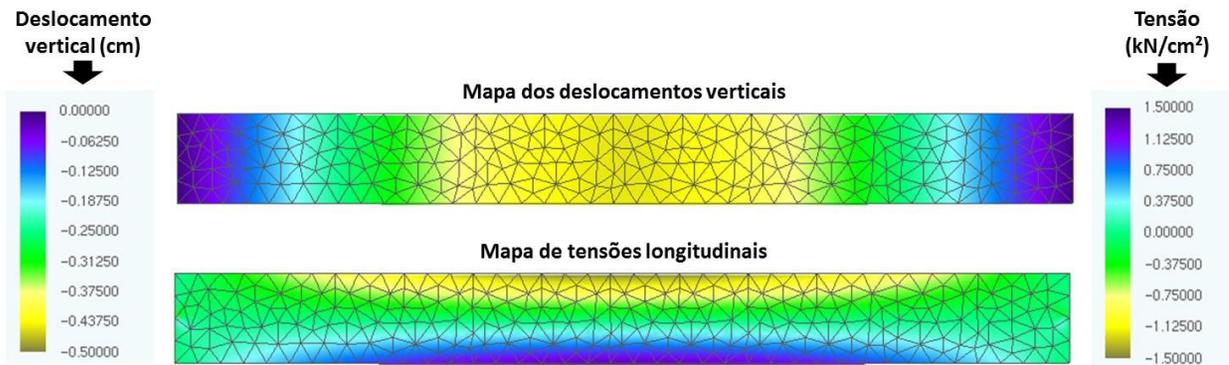


Figura 15. Configuração deformada da viga com cobrimento de 30 mm ao final da VUS.

Por meio dos mapas de cores apresentados nas Figuras 13, 14 e 15 é possível observar que os deslocamentos da viga diminuem com o aumento do cobrimento da armadura, isso ocorre devido ao fato de que existe uma camada maior de concreto para a difusão do CO_2 , retardando o início da corrosão e, conseqüentemente, a degradação das armaduras, responsável por dar maior rigidez à viga de concreto. Este resultado demonstra a necessidade em se conhecer corretamente o ambiente de degradação ao qual a estrutura estará submetida, uma vez que os elementos de concreto serão projetados com a durabilidade requisitada, garantindo tanto a vida útil destas estruturas quanto a segurança de seus usuários.

5. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados apresentados referente à validação do modelo desenvolvido, pode-se concluir que tanto a formulação para a determinação da VUP mediante uso de Redes Neurais Artificiais (RNAs), quanto a formulação para a análise mecânica de estruturas de concreto armado sob corrosão uniforme, baseada no Método dos Elementos Finitos Posicional (MEF), estão coerentemente implementadas e que apresentam resultados coerentes quando comparados a dados da literatura.

Das simulações realizadas com modelo gerado pelo acoplamento do MEF com as RNA, foi possível concluir que:

- Um cobrimento adequado (cobrimento que leva em consideração o grau de agressividade ao qual a estrutura está submetida) garante não só um período maior para levar à despassivação das armaduras, como também, para atingir o limite de abertura de fissuras recomendado pela NBR 6118 (ABNT, 2014);
- A consideração da perda de massa do aço, como consequência da corrosão, resulta no desenvolvimento de fissuras com dimensão máxima superior à recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2014), quando o nível de corrosão alcança os 60 %;
- Quando a taxa de corrosão das armaduras alcança os 50 %, constata-se um aumento de 30 % na flecha das vigas, independente do cobrimento;
- Ao aumentar o cobrimento das armaduras, reduzem-se os deslocamentos máximos e a deformação da viga, ao final da VUS, devido ao menor grau de corrosão ao qual às armaduras estão submetidas;
- Embora todas as vigas ao final da VUS estejam com o concreto no mesmo estado de fissuração, a capacidade mecânica da viga com 30 mm de cobrimento é maior, uma vez que as armaduras se encontram com menor grau de corrosão, e assim, maior área útil, demonstrando que um cobrimento coerente com a agressividade do ambiente ao qual a estrutura está submetida proporciona além de durabilidade, segurança para seus usuários.

Os resultados obtidos apontam a aplicabilidade do código desenvolvido como uma ferramenta eficiente e alternativa para a análise da vida útil de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão uniforme.

Ademais, o programa desenvolvido demonstra a eficiência da utilização de ferramentas numéricas no desenvolvimento de modelos para o estudo e a simulação de mecanismos complexos da degradação de estruturas de concreto armado, corroborando com os estudos de patologia das construções.

6. AGRADECIMIENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento oferecido à pesquisa.

7. REFERENCIAS

- Andrade, C. (1992), *“Manual para diagnóstico de obras deterioradas por corrosão de armaduras”*, Tradução de Antônio Carmona e Paulo Helene, São Paulo: PINI, p. 104.
- Andrade, J. J. O., Possan, E., Dal Molin, D. C. C. (2017), *“Considerations about the service life prediction of reinforced concrete structures inserted in chloride environments”*, Journal of Building Pathology and Rehabilitation, V. 2, p. 1-8.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas (2014), NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto, Rio de Janeiro, ABNT.
- Bakker, R. M. F. (1988), Initiation period. In: Schiess P. *“Corrosion of steel in concrete”*, London, Chapman and Hall, cap. 3, pp. 22-55.
- Biondini, F., Frangopol D. M. (2017), *“Time-variant redundancy and failure times of deteriorating concrete structures considering multiple limit states”*, Structure and Infrastructure Engineering, V.13, pp. 94-106.
- Bob, C., Afana, E. (1993), *“On-site assessment of concrete carbonation”*, Proceedings of the International Conference Failure of Concrete Carbonation, RILEM, Bratislava, pp. 84-87.
- Broomfield, J. P. (2007), *“Corrosion of steel in concrete: understanding, investigation and repair”*. 2. Ed. New York, Taylor & Francis, pp. 294.
- Carmona, A. F., Marega, A. (1988), *“Retrospectiva da patologia no Brasil: Estudo Estatístico”*, in: Jornadas em Español y Portugués sobre Estructuras y Materiales, CEDEX, IETcc, pp. 325-348.
- Chang, C. F., Chen, J. W. (2006), *“The experimental investigation of concrete carbonation depth”*, Cement and Concrete Research, V.36, pp. 1760-1767.
- Coda, H. B. (2003), *“Análise não linear geométrica de sólidos e estruturas: uma formulação posicional baseada no MEF”*, Volume II, Departamento de Estruturas, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.
- Comission Permanente del Hormigón, EHE (2008), *“Instrucción de Hormigón Estructural. Ministério de obras públicas e urbanismo”*. Madrid, Espanha.
- Dal Molin, D. C. C. (1988), *“Fissuras em estruturas de concreto armado: análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul”*, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Dyer, T. (2015), *“A durabilidade do concreto”*. Rio de Janeiro, Editora Ciência Moderna, pp. 536.

- Ellingwood, B. R., Frangopol, D. M. (2016), “*Introduction to the state of the art collection: risk-based lifecycle performance of structural systems*”, Journal of Structural Engineering, V.142, pp. 1.
- Felix, E. F. (2016), “*Desenvolvimento de software para a estimativa da profundidade de carbonatação, vida útil e captura de CO₂ de estruturas de concreto empregando RNA's*”, Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Foz do Iguaçu.
- Félix, E. F., Carrazedo, R., Possan, E. (2017), “*Análise Paramétrica da carbonatação em estruturas de concreto armado via Redes Neurais Artificiais*”, Revista ALCONPAT, V.7, N. 3, pp. 302-316.
- Geiker, M. R., Polder, R. B. (2016), “*Experimental support for new electro active repair method for reinforced concrete*”, Materials and Corrosion, V.67, pp. 600-606.
- Graeff, A. G. (2007), “*Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Kari, O. P., Puttonen, J., Skantz, E. (2014), “*Reactive transport modelling of long-term carbonation*”, Cement and Concrete Composites, V.52, pp. 42-53.
- Köliö, A., Pakkala, T. A., Hohti, H., Laukkarinen, A., Lahdensivu, J., Mattila, J., Pentti, M. (2017), “*The corrosion rate in reinforced concrete facades exposed to outdoor environment*”, Materials and Structures, V.50, pp. 1-16.
- Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. (2014), “*Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*”. 2.ed. São Paulo, IBRACON, pp.751.
- Neville, A. M. (1997), “*Propriedades do concreto*”, São Paulo: PINI, pp. 828.
- Possan, E. (2010), “*Modelagem da carbonatação e previsão de vida útil de estruturas de concreto em meio urbano*”, Tese de Doutorado em Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- Rao, A. S., Lepech, M. D., Kiremidjian, A. S., Sun X. Y. (2017), “*Simplified structural deterioration model for reinforced concrete bridge piers under cyclic loading*”, Structure and Infrastructure Engineering, V.13, pp. 55-66.
- Smolczyk, H. G. (1969), “*Written Discussion*”, proceeding of the 1969 International Symposium on the Chemistry of Cement, Part III, v. II/4, pp. 369-384.
- Stewart, M. G., Rosowsky, D. V. (1998), “*Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion*”, Journal of Infrastructure Systems V.4, pp. 146-155.
- Tuutti, K. (1982), “*Corrosion of steel in concrete*”. Stockholm, Swedish Cement and Concrete Research Institute.
- Val, D. V., Melchers, R. E. (1997), “*Reliability of deteriorating RC slab bridges*”, Journal of Structural Engineering, V.123, pp. 1638-1644.
- Vesikari, E. (1988), “*Service life prediction of concrete structures with regard to corrosion of reinforcement*”. Technical Research Centre of Finland, report No. 553, Finland p. 53.
- Vu, K. A. T., Stewart, M. G. (2000), “*Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models*”, Structural Safety, V.22, pp. 313-333.
- Yanaka, M, Ghasemi, S. H., Nowak, A. (2016), “*Reliability-based and life-cycle cost-oriented design recommendations for prestressed concrete bridge girders*”, Structural Concrete, V.17, pp. 836-847.