ANÁLISE NUMÉRICA DA DEFORMAÇÃO DE ELEMENTOS DE CONCRETO ARMADO DEVIDO À AÇÃO DA CORROSÃO UNIFORME

E. F. FELIX
Doutorando em Eng. Civil/Estruturas
USP/SET/EESC
São Carlos/SP; Brasil
emerson.felipe.felix@gmail.com

R. CARRAZEDO
Professor Dr. em Eng. Civil/Estruturas
USP/SET/EESC
São Carlos/SP; Brasil
rogcarrazedo@sc.usp.br

E. POSSAN
Professora Dra. em Eng. Civil/Materiais
UNILA/PGECI
Foz do Iguaçu/PR; Brasil
epossan@gmail.com

RESUMO

A fim de controlar e minimizar os danos associados à corrosão faz-se necessário deter ferramentas e conhecimento suficientes para entender os efeitos desta manifestação patológica sobre o comportamento mecânico do concreto armado. Neste trabalho é simulada e analisada a corrosão por carbonatação de vigas de concreto armado através de um modelo numérico baseado no Método dos Elementos Finitos. Frente aos resultados obtidos via simulação numérica, constatou-se que a depender do nível de corrosão das armaduras, o elemento de concreto tem seu estado de tensão e deformação alterado. Ademais, os resultados apontam a eficiência do modelo desenvolvido e a sua aplicabilidade frente à simulação do comportamento mecânico de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão.
Palavras-chave: Concreto Armado. Corrosão. Método dos Elementos Finitos. Compósitos. Partículas.

ABSTRACT

In order to control and minimize the corrosion effects, it is necessary to have enough tools and knowledge to understand the effects of this pathological manifestation on the reinforced concrete mechanical behavior. In this work, reinforced concrete beams subjected to the carbonation corrosion is numerically simulated and analyzed through a model based on the Finite Element Method. The results show that the stress and strain field are dependents on the level of reinforcement corrosion and may have altered its behavior. In addition, the results indicate the efficiency of the developed model and its applicability to the simulation of the mechanical behavior of reinforced concrete structures subject to uniform corrosion.
Keywords: Reinforced Concrete. Corrosion. Finite Element Method. Composite. Particle.

1. INTRODUÇÃO

A degradação de estruturas de concreto armado devido à ação da corrosão das armaduras é de difícil mensuração devido à complexidade do fenômeno físico-químico e dos múltiplos parâmetros envolvidos (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Do ponto de vista da mecânica dos materiais e das estruturas, o principal efeito da corrosão às armaduras consiste na perda de massa do aço e, por consequência, na transformação desse material nos produtos de corrosão, ou ferrugem, como é vulgarmente conhecido. Os produtos da corrosão são expansivos, gerando tensões de tração no interior do concreto que por sua vez levam a fissuração e destacamento do concreto ao longo do tempo.

Em geral, o concreto apresenta condições suficientes para a proteção das armaduras frente à corrosão graças a alta alcalinidade da pasta (pH situado entre 12 e 13). Entretanto, esta proteção é perdida ao longo

do tempo à medida em que o concreto é atacado pelos diferentes agentes agressivos presentes na atmosfera, por exemplo, íons de cloreto (Cl^-) e dióxido de carbono (CO_2) (GENTIL, 2011).

A depender da concentração do agente agressivo, presente na atmosfera, o processo corrosivo pode ser classificado como uniforme ou localizado. A corrosão localizada (ou por pite) ocorre quando íons cloretos causam um aumento da condutividade elétrica do concreto e atacam a camada passivadora que protege as armaduras. Neste tipo de corrosão apenas algumas regiões da armadura perdem massa de aço, justificando o termo "localizada", utilizado em sua classificação (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015).

O processo corrosivo é dito uniforme (ou por carbonatação) quando o teor de CO_2 presente na atmosfera é preponderante ao de íons cloretos. Neste caso, a difusão do CO_2 no concreto causa a diminuição do pH da matriz cimentícia (de aproximadamente 13 ou 12 até 9), o que leva a destruição da camada passivadora que envolve as armaduras, tornando o aço susceptível à corrosão (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A corrosão uniforme ocorre predominantemente em estruturas com concreto de baixa qualidade, em locais onde o cobrimento da armadura é insuficiente para garantir a proteção do aço ou em ambientes de severa agressividade (RIBEIRO; CUNHA; HELENE, 2015). Helene (1986) verificou que, nestes casos, a corrosão leva à formação de produtos de corrosão na interface entre o aço e o concreto, e que estes podem ocupar um espaço de 3 a 10 vezes maior que o inicial.

De acordo com Andrade, Alonso e Molina (1993) e Ribeiro, Cunha e Helene (2015), a formação e o desenvolvimento dos produtos de corrosão devido à corrosão uniforme dependem de diversos fatores, sejam eles ambientais (temperatura do ambiente, umidade relativa do ar, grau de agressividade do ambiente, teor de exposição ao CO_2, entre outros) ou construtivos (tipo de cimento utilizado na produção do concreto, relação água/cimento do concreto, tipo de aço, dimensão do cobrimento das armaduras, entre outros).

Com a formação dos produtos de corrosão, campos internos de tensão são gerados na interface entre o aço e concreto (Figura 1). A medida em que as tensões geradas pelos produtos de corrosão se tornam superiores às resistidas pelo concreto, microfissuras surgem na matriz de concreto que, com a progressão da manifestação patológica (quando não são feitos reparos na estrutura), aumentam de tamanho e espessura, espalhando-se por todo o elemento estrutural até causar o destacamento do concreto de cobrimento (Figura 2), afetando a durabilidade da estrutura.

Figura 1 – Surgimento dos produtos de corrosão

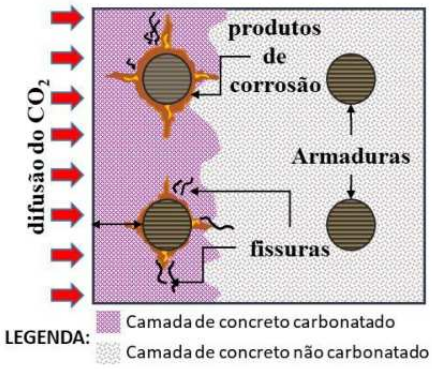
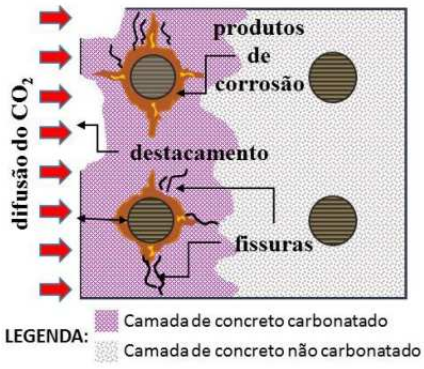


Figura 2 – Fissuração e destacamento do concreto



A fim de minimizar os efeitos da corrosão é necessário conhecimento técnico atualizado e abrangente do fenômeno, conhecendo as formas de iniciação e propagação do processo corrosivo, possibilitando a redução de sua incidência e, em casos avançados, a reparação e/ou restauração das estruturas de forma a aumentar a sua vida útil, reduzindo riscos e danos aos seus usuários.

Para o estudo da corrosão e de seus efeitos no comportamento mecânico do concreto armado, alguns trabalhos experimentais foram realizados ao longo dos últimos anos (MOLINA; ALONSO; ANDRADE, 1993; ALMUSALLAM, 2001; CHUNG et al., 2004; GRAEFF, 2007; ZHU, 2014), os quais resultaram em

descobertas relevantes para a área. Entretanto, três importantes limitações são apontadas pelos pesquisadores: (i) a dificuldade de estudar isoladamente os diferentes fatores que influenciam no processo de corrosão; (ii) elevados custos e (iii) tempo necessário para a realização dos ensaios experimentais.

Com o avanço da computação, diversas ferramentas numéricas foram desenvolvidas nos últimos anos, à exemplo, o Método dos Elementos de Contorno (MEC), o Método dos Elementos Finitos (MEF), Redes Neurais Artificiais (RNA), entre outras, fazendo com que pesquisadores da área de corrosão se interessassem e as utilizassem para a criação de modelos numéricos, uma vez que estas ferramentas se apresentam como uma alternativa eficiente para a superação dos limites anteriormente citados.

Sabendo disso, Hansen e Saouma (1999), Maruya et al. (2003) e Bhargava et al. (2005) utilizaram diferentes ferramentas numéricas para a resolução de forma automatizada de equações matemáticas referentes aos mecanismos da corrosão, o que possibilitou analisar os efeitos da corrosão e sua propagação. O mesmo procedimento foi adotado por Coronelli e Gambarova (2004), Isgor e Razaqpur (2006), Xu, Jiang e Wang (2009), Du e Jin (2014), Ožbolt, Oršanić e Balabanić (2014), Paul e Zijl (2016) e Zhao et al. (2016), porém os autores resolveram o problema químico-mecânico da corrosão em estruturas de concreto armado, via Método dos Elementos Finitos.

Dando continuidade à utilização de ferramentas numéricas para o estudo da corrosão, no presente trabalho é analisado numericamente os efeitos desta manifestação patológica, no comportamento mecânico de estruturas de concreto armado, especialmente no que remete à formação dos produtos de corrosão, quando sujeitas à carbonatação.

2. MODELAGEM DA CORROSÃO UNIFORME EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Com o objetivo de simular a expansão do concreto armado devido à corrosão uniforme, em especial, à formação dos produtos de corrosão, desenvolveu-se uma ferramenta numérica baseada no Método dos Elementos Finitos Posicional (MEFP). O código foi desenvolvido em linguagem Fortran e considera diferentes formulações analíticas para a determinação de parâmetros representativos da corrosão.

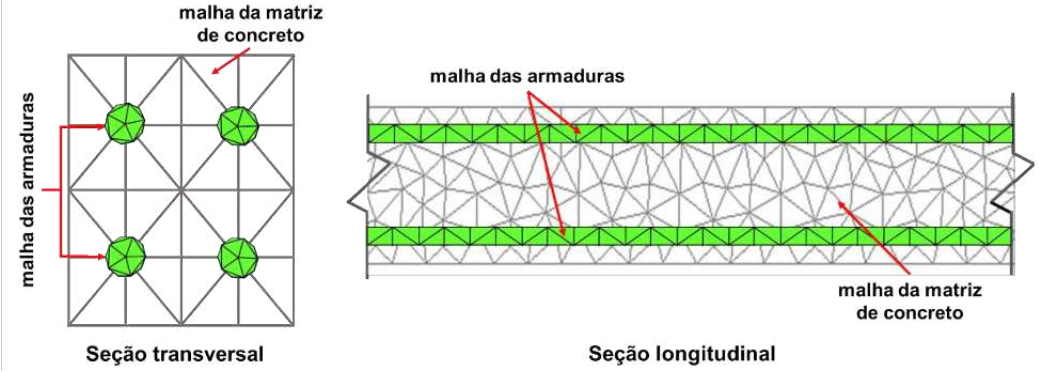
2.1 Descrição do modelo desenvolvido

2.1.1 Modelo mecânico

Para a determinação do comportamento mecânico do concreto armado, utilizou-se uma formulação baseada no MEFP para sólidos compósitos, desenvolvida por Paccola e Coda (2016), onde os parâmetros nodais considerados são as posições e as deformações são medidas em relação à posição inicial do corpo. A medida de deformação é a de Green e a lei constitutiva dos materiais é a de Saint-Venant-Kirchhoff.

O concreto armado é discretizado levando em consideração a matriz de concreto e as armaduras (Figura 3). Tanto a matriz de concreto quanto as armaduras são representadas por meio de elementos finitos bidimensionais triangulares planos, sendo a malha das armaduras acoplada à da matriz de concreto por meio da técnica do embutimento, descrita em Vanalli, Paccola e Coda (2008) e Paccola e Coda (2016).

Figura 3 – Discretização da seção transversal e longitudinal de uma viga de concreto armado



Na sequência é apresentado de forma sucinta o processo empregado neste trabalho para a obtenção da resposta mecânica de um problema via MEFP para o concreto armado.
Considerando-se forças conservativas e o Princípio da Mínima Energia Potencial Estacionária para a solução do problema não linear geométrico, a energia potencial total de um sólido compósito particulado é dada na Eq. (1).

$$\prod = \int_{V_0^m} u_e(\boldsymbol{E}) dV_0^m + \int_{V_0^p} \Theta(\boldsymbol{E_p}) dV_0^p - \boldsymbol{F} \cdot \boldsymbol{Y} \tag{1}$$

em que Θ é a energia específica de deformação das partículas, u_e é a energia específica de deformação da matriz, $\boldsymbol{F}$ é o vetor de forças conservativas externas, $\boldsymbol{Y}$ é o vetor de posição nodal, $\boldsymbol{E_p}$ é a deformação desenvolvida nas partículas, calculada conforme Eq. (2), $\boldsymbol{E}$ é a deformação desenvolvida na matriz, também calculada conforme Eq. (2), e V_0^p e V_0^m representam os volumes iniciais das partículas e da matriz, respectivamente.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(C_{ij} - \delta_{ij}) \tag{2}$$

em que E_{ij} representa a parcela elástica da deformação, C_{ij} é o tensor de alongamento à direita de Cauchy-Green e δ_{ij} representa o delta de Kronecker.

Considerando que a variação da energia potencial total é igual a zero na configuração de equilíbrio, o problema consiste em encontrar o vetor de posição nodal que remete à essa posição, conforme Eq. (3).

$$\delta\prod = \left(\int_{V_0^m} \boldsymbol{S} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{Y}} dV_0^m + \int_{V_0^p} \boldsymbol{S_p} : \frac{\partial \boldsymbol{E_p}}{\partial \boldsymbol{Y}} dV_0^p - \boldsymbol{F} \right) \cdot \delta \mathbf{Y} \tag{3}$$

em que $\boldsymbol{S}$ é o segundo tensor de tensões de Piola-Kirchhoff desenvolvido na matriz elástica e $\boldsymbol{S_p}$ é o segundo tensor de tensões de Piola-Kirchhoff desenvolvido nas partículas.

A solução da Eq. (3) é obtida por meio do processo iterativo de Newton-Raphson, o qual utiliza como estratégia de solução um vetor de desbalanceamento de forças **g**, como mostrado em Eq. (4).

$$\mathbf{g}(\mathbf{Y}) = \left(\int_{V_0^m} \boldsymbol{S} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{Y}} dV_0^m + \int_{V_0^p} \boldsymbol{S_p} : \frac{\partial \boldsymbol{E_p}}{\partial \boldsymbol{Y}} dV_0^p \right) - \boldsymbol{F} = (\boldsymbol{F_{int}^m} + \boldsymbol{F_{int}^p}) - \boldsymbol{F} = 0 \tag{4}$$

em que $\boldsymbol{F_{int}^m}$ é o vetor de forças internas referente à matriz e $\boldsymbol{F_{int}^p}$ é o vetor de forças internas referente às partículas.

Como o processo é não linear, expande-se a Eq. (4) por série de Taylor, conforme Eq. (5).

$$\mathbf{g}(\mathbf{Y}) \cong \mathbf{g}(\boldsymbol{Y_0}) + \left.\frac{\partial \boldsymbol{g}}{\partial \boldsymbol{Y}}\right|_{\boldsymbol{Y_0}} \cdot \Delta \boldsymbol{Y} = \mathbf{g}(\boldsymbol{Y_0}) + \mathbf{H} \cdot \Delta \boldsymbol{Y} = 0 \tag{5}$$

em que $\boldsymbol{Y_0}$ é uma posição tentativa e **H** é a matriz Hessiana (ou matriz de rigidez tangente).

Como as forças são conservativas, **H** pode ser decomposta em duas matrizes, uma referente a contribuição da rigidez dos elementos da matriz (**H**$_m$) e outra dos elementos de partículas (**H**$_p$), como mostra Eq. (6).

$$\mathbf{H} = \left\{ \left(\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{Y}} : \frac{\partial^2 \boldsymbol{u_e}}{\partial \boldsymbol{E} \partial \boldsymbol{E}} : \frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{Y}} + \boldsymbol{S} : \frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \boldsymbol{Y} \partial \boldsymbol{Y}} \right) + \left(\frac{\partial \boldsymbol{E_p}}{\partial \boldsymbol{Y}} : \frac{\partial^2 \Theta}{\partial \boldsymbol{E} \partial \boldsymbol{E}} : \frac{\partial \boldsymbol{E_p}}{\partial \boldsymbol{Y}} + \boldsymbol{S_p} : \frac{\partial^2 \boldsymbol{E_p}}{\partial \boldsymbol{Y} \partial \boldsymbol{Y}} \right) \right\} = H_m + H_f \tag{6}$$

A solução do sistema não linear apresentado na Eq. (5) pelo método de Newton-Raphson fornece a correção da posição ($\boldsymbol{Y} = \boldsymbol{Y_0} + \Delta \boldsymbol{Y}$) e o procedimento é repetido até que $|\Delta \boldsymbol{Y}|/|\boldsymbol{X}|$ seja menor do que uma dada tolerância. $\boldsymbol{X}$ é o vetor referente as posições nodais da configuração inicial do corpo.

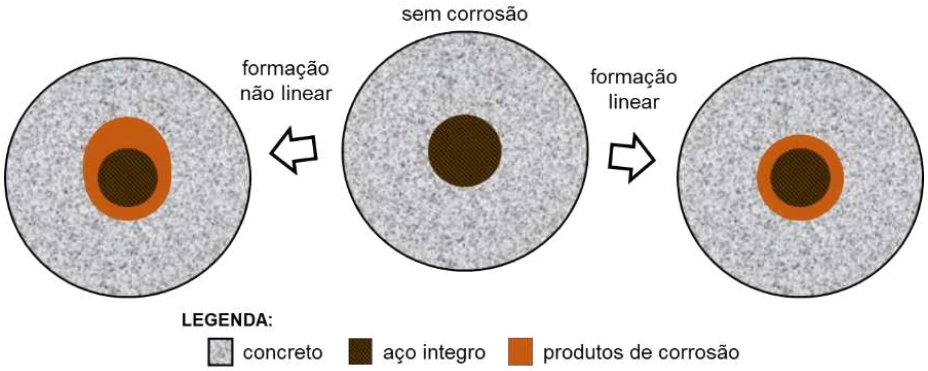
Maiores detalhes acerca das deduções das equações aqui descritas, assim como do processo de acoplamento dos elementos de partícula à matriz, podem ser vistos em Paccola e Coda (2016).

2.1.2 Modelo de corrosão

Entender como se desenvolvem e se distribuem os produtos de corrosão ao redor da seção da armadura possibilita a determinação de modelos e ferramentas que sejam capazes de descrever os campos de deformação e de tensão que surgem nas estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão. Estes modelos auxiliam nos estudos referentes aos efeitos da corrosão sobre o comportamento mecânico do concreto, da durabilidade e vida útil destas estruturas.

Ao longo dos últimos anos alguns modelos foram propostos com objetivo de representar e descrever o perfil de distribuição dos produtos de corrosão no entorno das armaduras, à exemplo, Liu e Weyers (1998), Yuan e Ji (2009), Balafas e Burgoyne (2010) e Kiani e Shodja (2011). Quanto ao perfil da formação e distribuição dos produtos de corrosão, eles são divididos em linear e não linear, conforme mostra a Figura 4.

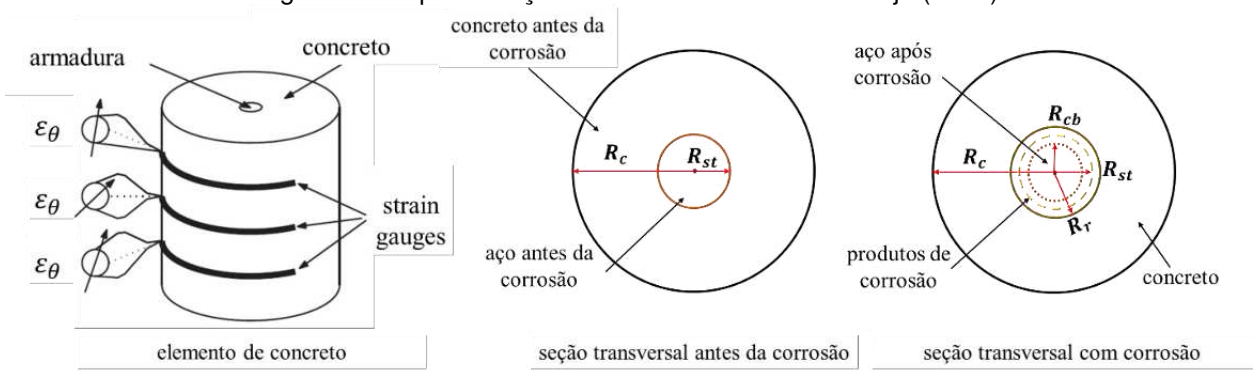
Figura 4 – Formação dos produtos de corrosão



Assim, sabendo que a corrosão desencadeada pela carbonatação do concreto de cobrimento se desenvolve uniformemente em toda a armadura, o modelo de Kiani e Shodja (2011) é utilizado neste trabalho para a representação do avanço dos produtos de corrosão.

Os autores desenvolveram um modelo linear para a formação dos produtos de corrosão em estruturas de concreto armado, utilizando dados experimentais referentes a corpos de prova cilíndricos de concreto contendo em seu centro uma armadura de diâmetro e propriedades físicas conhecidas (Figura 5).

Figura 5 – Representação do modelo de Kiani e Shodja (2011)



O modelo de Kiani e Shodja (2011) (Eq. 7-10) resume-se na determinação do raio residual de aço (R_{cb}) e do raio da frente de avanço dos produtos de corrosão (R_r), que podem ser obtidos respectivamente pelas Eq. (7) e (8). Para a determinação destes parâmetros faz-se necessário calcular o volume gerado pelos produtos de corrosão, conforme mostrado em Eq. (9), e o volume de aço que as armaduras perderam, Eq. (10).

$$R_{cb} = \sqrt{R_{st}^2 - \frac{V_s}{\pi}} \quad (7)$$

$$R_r = \sqrt{R_{cb}^2 + \frac{V_r}{\pi}} \quad (8)$$

$$V_r(t) = \frac{\quad}{\quad} \int \int 2 \times 6{,}78 \times 10^{-10} \pi . R_{st} . i_{corr} dt \quad (9)$$

$$V_s(t) = \frac{\quad}{\quad} \int \int 2 \times 6{,}78 \times 10^{-10} \pi . R_{st} . i_{corr} dt \quad (10)$$

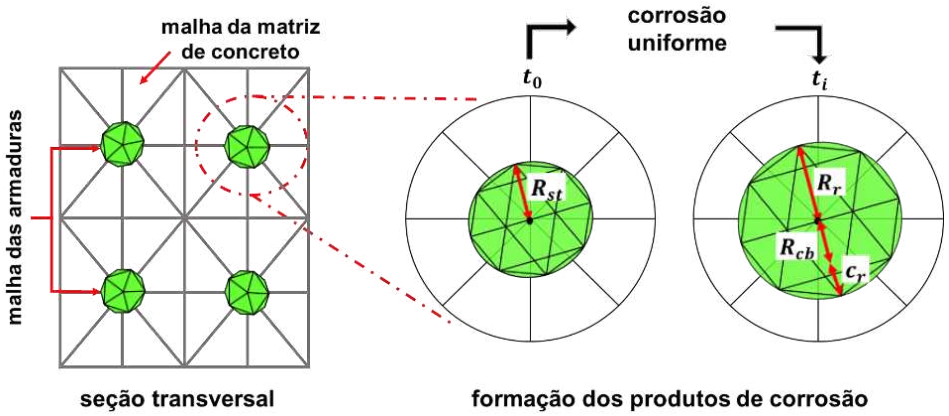
$$i_{corr}(t_p) = 0{,}85.10^{-2} . \left| \frac{\quad}{\quad} \right| . t_p^{-0{,}29} \quad (11)$$

em que R_{st} refere-se ao raio inicial da armadura (em m), α é a razão entre a densidade do aço e dos produtos de corrosão, ρ_{st} é a densidade do aço (em kg/m³), i_{corr} é a densidade da corrente de corrosão (em A/m²), calculada na Eq. 11, η_m é a proporção de massa de ferro para a massa molecular dos produtos de corrosão, t (em s) refere-se ao tempo de análise, sendo dado a partir do momento em que ocorre a despassivação da armadura, $\frac{a}{c}$ é a relação água/cimento do concreto, t_p é o tempo de progressão da corrosão, período pós despassivação da armadura (em anos), e cob é a espessura do concreto de cobrimento (em cm).

2.1.3 Acoplamento dos modelos

Considerando que a seção transversal de um elemento estrutural de concreto armado seja representado por um elemento compósito particulado, conforme mostra a Figura 6, a expansão do concreto de cobrimento devido à formação dos produtos de corrosão, é simulada por meio da expansão do elemento de partícula, uma vez que a armadura está perfeitamente aderida à matriz de concreto (condição decorrente da técnica de embutimento adotada no acoplamento entre a partícula e a matriz).

Figura 6 – Representação da corrosão uniforme via MEF



Para que a expansão da armadura corresponda coerentemente à expansão causada pelos produtos de corrosão, a deformação do elemento de partícula é determinada pela Eq. (12), determinado de acordo com a medida de deformação de Green.

$$\varepsilon_r = \frac{1}{n} \frac{(R_r - R_{st})}{R_{st}} \quad (12)$$

Entretanto, observa-se pela Figura 6 e na Eq. (12) que, após iniciado o processo de corrosão, a dimensão da partícula que representa a armadura passa a ser equivalente à dimensão da seção integra de aço mais a camada de produtos de corrosão, que se forma entre o aço e o concreto. Assim, faz-se necessário corrigir o módulo de elasticidade do elemento de partícula, de forma que sejam inseridos os efeitos da corrosão no que diz respeito à perda de seção integra de aço. Para isso, considera-se que o valor do módulo de elasticidade da partícula é ponderado em função da perda de seção de aço, conforme Eq. (13).

$$E_p(t) = E_p(0) \frac{R_{cb}}{R_{st}} + E_r \frac{(R_r - R_{cb})}{R_{st}} \quad (13)$$

em que $E_p(0)$ é o módulo de elasticidade inicial da partícula (referente à armadura integra), $E_p(t)$ é o módulo de elasticidade da partícula no instante de análise, E_r é o módulo de elasticidade do produto de corrosão, R_{st} refere-se ao raio inicial da armadura, R_{cb} é o raio integro de aço e R_{st} é o raio referente à frente dos produtos de corrosão.

Por fim, para que seja considerada a expansão do concreto devido à formação dos produtos de corrosão, uma decomposição aditiva do tensor de deformações de Green (Eq. (2)) é empregada. Assim, os termos do tensor de deformação dos elementos de partículas são calculados de acordo com a Eq. (14). Cabe mencionar que a decomposição do tensor só é possível devido a consideração de pequenas ou moderadas deformações.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}\left(C_{ij} - \delta_{ij}\right) - \varepsilon_r \delta_{ij} \tag{14}$$

em que E_{ij} representa a parcela elástica da deformação e ε_r é a deformação da partícula (armadura) devido à corrosão uniforme para cada uma das direções principais.

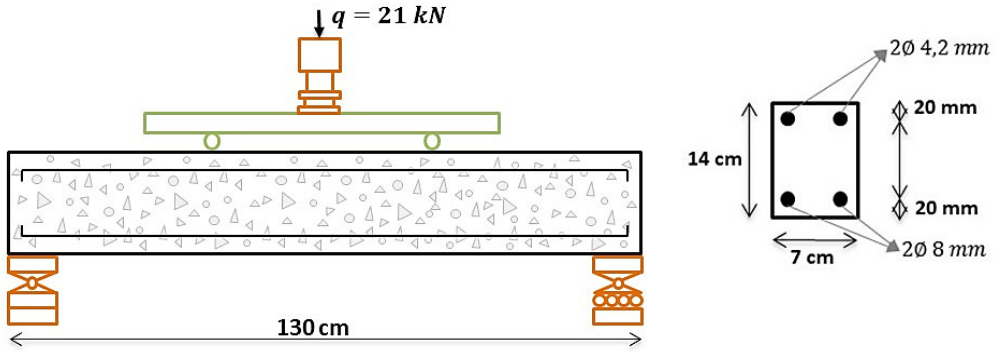
3. RESULTADOS

A fim de demonstrar a eficiência do modelo desenvolvido, apresenta-se inicialmente um exemplo de validação do modelo, onde o mesmo é analisado e comparado frente a resultados obtidos em Graeff (2007). Em seguida, analisam-se os efeitos da corrosão uniforme em estruturas de concreto armado por meio da simulação numérica da corrosão uniforme de uma viga bi-engastada de concreto.

3.1 Validação do modelo

Para fins de validação do modelo numérico proposto, modelou-se a degradação imposta pela corrosão em uma viga de concreto armado (Figura 7) 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 7 é apresentado o detalhamento da viga e o carregamento imposto.

Figura 7 – Detalhamento da viga de concreto armado



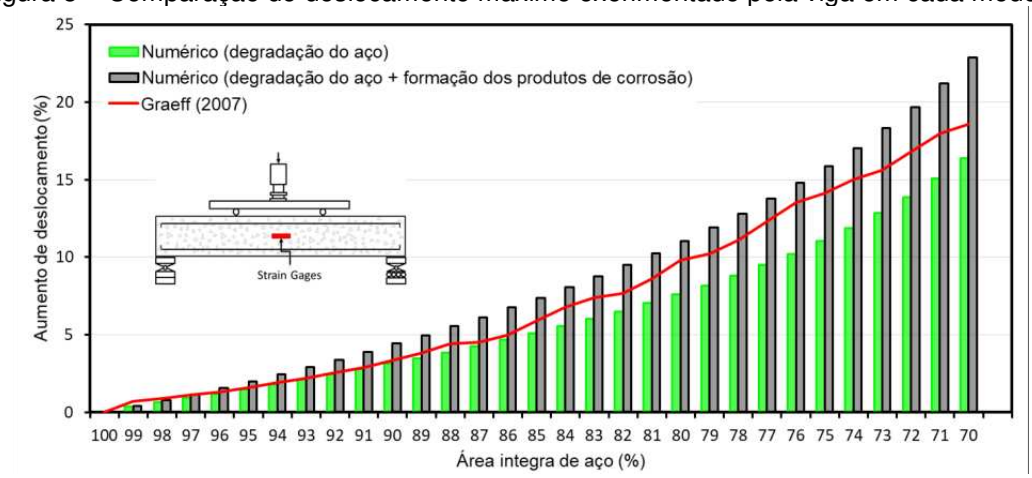
A discretização da malha de elementos finitos da viga de concreto armado foi feita com 134 nós e 34 elementos triangulares com ordem de aproximação cúbica para a representação da matriz de concreto, e com 340 elementos de triangulares (partículas) para a representação das armaduras.

Quanto às propriedades dos materiais, o concreto possuí módulo de elasticidade de 2600,0 kN/cm², resistência à compressão de 2,5 kN/cm², resistência à tração de 0,179 kN/cm² e coeficiente de Poisson de 0,2. Já as armaduras possuem módulo de elasticidade 21000,0 kN/cm² e resistência à tração de 50,0 kN/cm².

Em seu modelo numérico, Graeff (2007) considerou ainda o comportamento não linear do concreto e, como efeitos de degradação da corrosão, Graeff considerou a perda de seção de aço e de aderência entre o aço e o concreto.

Neste trabalho a simulação da corrosão foi feita considerando duas situações, uma em que os efeitos da corrosão remetem apenas à perda de seção de aço, e outra, em que a corrosão causa a perda de seção de aço e a expansão do concreto devido à formação de produtos de corrosão. Na Figura 8 comparam-se os resultados obtidos neste trabalho com os determinados em Graeff (2007).

Figura 8 – Comparação do deslocamento máximo exérimentado pela viga em cada modelo



Observa-se pela Figura 8 que é crescente a diferença entre os resultados obtidos pelo modelo numérico apresentado neste trabalho (nas duas simulações) e os obtidos por Graeff (2007), à medida que aumenta a degradação das armaduras. Uma explicação para tal diferença deve-se ao fato de Graeff (2007) adotar em seu modelo uma lei constitutiva não-linear para o concreto e o aço.

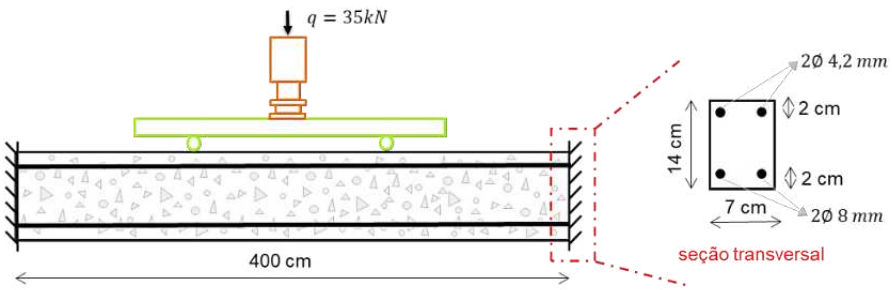
Entretanto, observa-se que todas as curvas possuem comportamento semelhante no que diz respeito a deslocabilidade da estrutura, e que, se considerado o período inicial da corrosão (até o instante em que a armadura perde 15% de área útil), ou momento em que os materiais ainda trabalham em regime elástico-linear, o modelo implementado apresenta resultados equivalentes aos de Graeff (2007).

Por meio da Figura 8 é possível ver que a consideração combinada de mais de um efeito de degradação da corrosão acarreta em uma maior deslocabilidade da viga, e que, quando considerada a expansão do concreto devido à formação dos produtos de corrosão, a perda da capacidade mecânica do concreto passa a ser maior com o avanço da corrosão. Tal fato demonstra a importância da consideração deste fenômeno na modelagem da corrosão de estruturas de concreto.

3.2 Análise da deformação de uma viga de concreto armado sob corrosão uniforme

A estrutura analisada a seguir consiste em uma viga bi-engastada de concreto armado sujeita à corrosão por carbonatação. A simulação desta viga tem por objetivo avaliar o efeito da corrosão uniforme na deformação de um elemento de concreto armado e seus efeitos nos campos de tensão e deslocamento. A geometria da viga, suas dimensões, carregamento e condições de contorno são apresentadas na Figura 9.

Figura 9 – Geometria, condições de contorno e dimensões da viga



Inicialmente a corrosão é imposta de forma acelerada, utilizando uma corrente constante de 100 μA/cm². Em seguida, avaliam-se os efeitos da corrosão simulada em ambiente de laboratório (corrosão acelerada) comparando-os com os efeitos da corrosão natural, utilizando para tal uma corrente variável no tempo, determinada de acordo com a Eq. (11). A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados na formulação referente à formação dos produtos de corrosão, cujos dados foram extraídos de Nguyen et al. (2007).

Tabela 1 – Parâmetros de entrada do modelo de corrosão

Parâmetro	Valor	Unidade
Densidade do aço	7860,00	kg/m³
Valência	3,00	-
Razão entre densidade do aço e dos produtos de corrosão	4,50	-
Massa atômica do aço	55,84	-
Razão em volume da expansão dos produtos de corrosão	4,50	-

A discretização da malha de elementos finitos da viga de concreto armado foi feita com 2230 nós e 468 elementos triangulares para a representação da matriz de concreto, e com 952 elementos de triangulares (partículas) para a representação das armaduras.

Quanto às propriedades dos materiais, o concreto possui módulo de elasticidade de 2600,0 kN/cm², resistência à compressão de 2,5 kN/cm², resistência à tração de 0,179 kN/cm² e coeficiente de Poisson de 0,2. Já as armaduras possuem módulo de elasticidade 21000,0 kN/cm² e resistência à tração de 50,0 kN/cm².

Nas Figura 10 e 11 são apresentados os resultados obtidos referentes ao deslocamento vertical e à tensão longitudinal, respectivamente, para três diferentes regiões da viga, considerando tanto as solicitações químico-mecânicas impostas pela corrosão quanto as solicitações advindas do carregamento.

Figura 10 – Deslocamento vertical da viga para 50 horas de corrosão acelerada

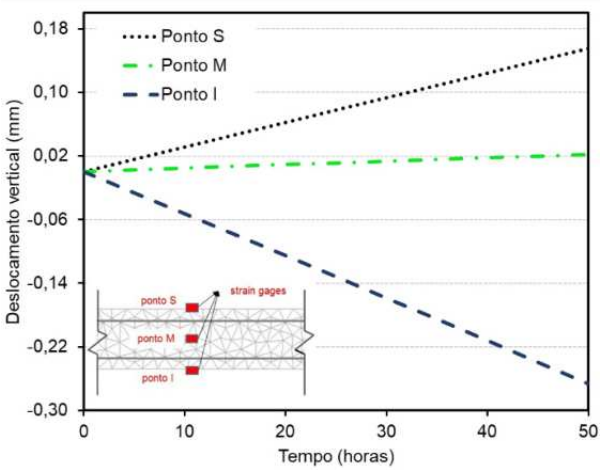
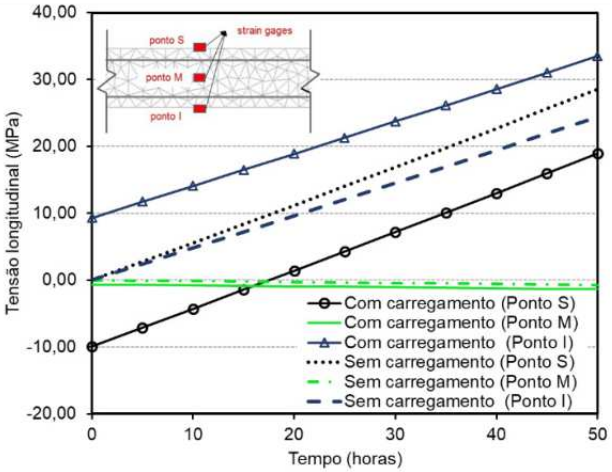


Figura 11 – Tensão longitudinal em diferentes regiões da viga para 50 horas de corrosão acelerada



Observa-se na Figura 10 que, após 50 horas de corrosão acelerada, a estrutura experimenta um acréscimo de deslocamento de 0,26 mm para um ponto situado na parte inferior do centro da viga (ponto “I”), enquanto que, para um ponto situado na parte superior do centro da viga (ponto “S”), o acréscimo é de 0,14 mm, quase a metade do valor observado no ponto inferior.

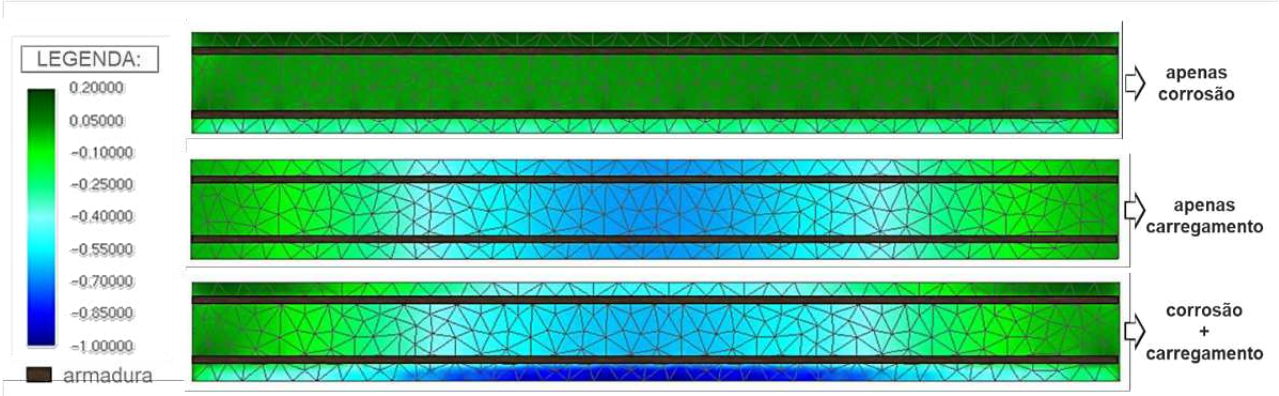
Os resultados apresentados na Figura 11 demonstram a influência da corrosão no campo de tensão da viga sob corrosão quando considerada a aplicação de um carregamento externo. Observa-se que, para o caso em que há apenas corrosão (sem carregamento), as tensões nos pontos “S” e “I” são sempre de tração (independentemente do tempo de propagação), conforme observado por Balafas e Burgoyne (2010). Entretanto, observa-se pela Figura 11 que, na presença de um carregamento externo, o campo de tensão passa a ter comportamento controlado pelo nível de corrosão das armaduras. Por exemplo, o ponto “S”, situado na parte superior da viga, tem seu estado de tensão alterado de compressão para tração após 15 horas de corrosão acelerada.

Assim, observa-se uma influência significativa da corrosão no campo de tensão de estruturas de concreto armado em serviço (com carregamento). Essa influência tem efeitos secundários que corroboram com a

redução da vida útil das estruturas, à exemplo, a fissuração do concreto de cobrimento. Sabe-se que o estado de fissuração de um elemento de concreto armado é altamente dependente do seu estado de tensão, e assim, se a corrosão altera o campo de tensão de um elemento estrutural, a mesma pode vir a modificar e/ou acelerar os mecanismos de ruptura do mesmo.

Na Figura 12 é apresentada a configuração deformada da viga considerando três diferentes configurações de solicitações: (i) só corrosão; (ii) só carregamento e (iii) ação conjunta do carregamento e da corrosão.

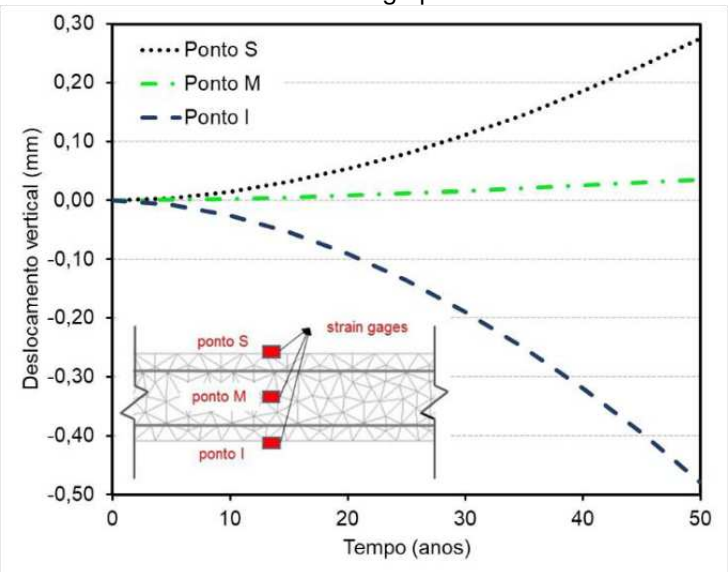
Figura 12 – Deslocamento vertical da viga considerando a corrosão e o carregamento



Mediante Figura 12, observa-se que no caso em que as solicitações da viga são exclusivamente decorrentes da corrosão, todo o elemento estrutural é tracionado, devido à formação dos produtos de corrosão. É possível observar ainda que os deslocamentos da viga, para o caso em que há corrosão e carregamento externo, podem ser descritos pela sobreposição das solicitações mecânicas (devido ao carregamento externo) e químico-mecânicas (decorrentes da corrosão).

Por fim, a Figura 13 apresenta os resultados obtidos para o deslocamento vertical, da viga de concreto armado apresentada na Figura 9, considerando corrosão natural. Cabe mencionar que, para essa análise, foram considerados apenas os efeitos da corrosão (sem carregamento externo).

Figura 13 – Deslocamento vertical da viga para 50 anos de corrosão natural



Diante dos resultados obtidos na simulação da corrosão natural, os quais são apresentados na Figura 13, verificou-se que o deslocamento do ponto “I”, após 50 anos de corrosão natural, é de 0,47 mm, 79% maior que o deslocamento observado após 50 horas de corrosão acelerada.

4. CONCLUSÕES

Da análise dos resultados apresentados referente à validação do modelo desenvolvido, pode-se concluir que a formulação baseada no Método dos Elementos Finitos Posicional (MEF) foi corretamente implementada e que apresenta resultados coerentes quando comparados a outros modelos da literatura.

Frente as simulações realizadas com o modelo, foi possível concluir que:

- A corrosão tende a alterar o campo de tensão de um elemento estrutural, fazendo com que algumas regiões do concreto passem do estado de compressão para o de tração à medida que se desenvolve a corrosão das armaduras;
- A consideração de um carregamento externo não altera a forma como os produtos de corrosão se formam e deformam o concreto armado. Ao contrário, os efeitos se sobrepõem e tendem a ser significativos, a depender do nível de corrosão das armaduras;
- Os deslocamentos da viga podem ser descritos pela sobreposição das solicitações mecânicas (devido ao carregamento externo) e químico-mecânicas (decorrentes da corrosão);
- Existem diferenças no comportamento mecânico de um elemento estrutural quando submetido à corrosão natural ou acelerada, não sendo direta a correlação entre os efeitos causados pela corrosão em cada um dos casos;
- Considerando um regime de pequenas deformações, a sobreposição dos efeitos (propriedade muitas vezes utilizada para a solução de problemas estruturais e mecânicos) pode ser estendida para a análise da ação da corrosão em armaduras em estruturas de concreto armado.

Por último, os resultados demonstram a aplicabilidade do modelo desenvolvido como uma alternativa viável e eficiente para a simulação de elementos de concreto armado sob corrosão uniforme, corroborando com os estudos da área de patologia das construções.

5. AGRADECIMENTOS

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo fomento oferecido à pesquisa.

6. REFERÊNCIAS

ALMUSALLAM, A. A. **Effect of degree of corrosion on the properties of reinforcing steel bars**. Construction and Building Materials, v. 15, n. 8, p. 361–368, 2001.

ANDRADE, C.; ALONSO, C; MOLINA, F. J. **Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 1 Experimental test**. Materials and Structures, v. 26, p. 453–464, 1993.

BALAFAS, I.; BURGOYNE, C. J. **Modeling the structural effects of rust in concrete cover**. Journal of Engineering Mechanics, American Society of Civil Engineers, v. 137, n. 3, p. 175–185, 2010.

BHARGAVA, K.; GHOSH, A.; MORI, Y.; RAMANUJAM, S. **Modeling of time to corrosion-induced cover cracking in reinforced concrete structures**. Cement and Concrete Research, v. 35, p. 2203–2218, 2005.

CHUNG, L.; CHO, S.; KIM, J. J.; YI, S. **Correction factor suggestion for ACI development length provisions based on flexural testing of RC slabs with various levels of corroded reinforcing bars**. Engineering structures, v. 26, n. 8, p. 1013–1026, 2004.

CORONELLI, D.; GAMBAROVA, P. **Structural assessment of corroded reinforced concrete beams: modeling guidelines**. Journal of Structural Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 130, n. 8, p. 1214–1224, 2004.

DU, X.; JIN, L. **Meso-scale numerical investigation on cracking of cover concrete induced by corrosion of reinforcing steel**. Engineering Failure Analysis, v. 39, p. 21–33, 2014.

GENTIL, V. **Corrosão**. Rio de janeiro: Editora LCT, 6º edição, 2011. 376 p.

GRAEFF, A. G. **Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da propagação da corrosão em elementos de concreto armado**. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

HANSEN, E. J.; SAOUMA, V. E. **Numerical simulation of reinforced concrete deterioration: Part 2-steel corrosion and concrete cracking**. ACI Materials Journal, v. 96, p. 331–338, 1999.

HELENE, P. **Corrosão em armaduras para concreto armado**. São Paulo: PINI, 1986. 46 p.

ISGOR, O. B.; RAZAQPUR, A. G. **Modelling steel corrosion in concrete structures**. Materials and Structures, v. 39, n. 3, p. 291–302, 2006.

JIANG, L.; LIN, B.; CAI, Y. **A model for predicting carbonation of high-volume fly ash concrete**. Cement and Concrete Research, v. 30, n. 5, p. 699–702, 2000.

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

LIU, Y.; WEYERS, R. E. **Modeling the time-to-corrosion cracking in chloride contaminated reinforced concrete structures**. Materials Journal, v. 95, n. 6, p. 675–680, 1998.

MARUYA, T.; HSU, K.; TAKEDA, H.; TANGTERMSIRIKUL, S. **Numerical modeling of steel corrosion in concrete structures due to chloride ion, oxygen and water movement**. Journal of Advanced Concrete Technology, Japan Concrete Institute, v. 1, n. 2, p. 147–160, 2003.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MOLINA, F. J.; ALONSO, C; ANDRADE, C. **Cover cracking as a function of bar corrosion: Part 2-Numerical model**. Materials and Structures, v. 26, p. 532–548, 1993.

NGUYEN, Q. T.; CARÉ, S; MILLARD, A.; BERTHAUD, Y. **Analyse de la fissuration du béton armé en corrosion accélerée**. Comptes Rendus Mecanique, v. 335, n. 2, p. 99–104, 2007.

OŽBOLT, J.; ORŠANIĆ, F.; BALABANIĆ, G. **Modeling pullout resistance of corroded reinforcement in concrete: Coupled three-dimensional finite element model**. Cement and Concrete Composites, Elsevier, v. 46, p. 41–55, 2014.

PACCOLA, R. R.; CODA, H. B. **A direct FEM approach for particulate reinforced elastic solids**. Composite Structures, v. 45, p.235–251, 2016.

PAUL, S. C.; ZIJL, G. P. A. G. V. **Chloride-induced corrosion modelling of cracked reinforced SHCC**. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v. 16, n. 4, p.734–742, 2016.

RIBEIRO, D.; CUNHA, M.; HELENE, P. **Corrosão em Estruturas de Concreto Armado: Teoria, Controle e Métodos de Análise**. São Paulo: Elsevier Brasil, 2015. 272 p.

VANALLI, L.; PACCOLA, R. R.; CODA, H. B. **A simply way to introduce fibers into FEM models**. Communications in Numerical Methods in Engineering, v. 24, p.585–603, 2008.

YUAN, Y.; JI, Y. **Modeling corroded section configuration of steel bar in concrete structure**. Construction and Building Materials, v. 23, n. 6, p. 2461–2466, 2009.

ZHAO, Y.; DONG, J.; WU, Y.; JIN, W. **Corrosion-induced concrete cracking model considering corrosion product-filled paste at the concrete/steel interface**. Construction and Building Materials, v. 116, p. 273–280, 2016.

ZHU, W. **Effect of corrosion on the mechanical properties of the corroded reinforcement and the residual structural performance of the corroded beams**. Tese (Doutorado), Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse). France, 2014.