

Modelagem bidimensional da corrosão não uniforme em estruturas de concreto armado

Two-dimensional modeling of non-uniform corrosion in reinforced concrete structures

Éverton Souza Ramos (1); Matheus de Godoy Tavares (1); Rogério Carrazedo (2)

(1) *Doutorando, Departamento de Engenharia de Estruturas/EESC-USP*
(2) *Professor Doutor, Departamento de Engenharia de Estruturas/EESC-USP*
evertonramos@usp.br; matheust@usp.br; rogcarrazedo@sc.usp.br

Resumo

A corrosão das armaduras caracteriza-se na principal manifestação patológica que acomete as estruturas de concreto armado. As ações de natureza deletéria desencadeadas pela corrosão comprometem com a segurança e desempenho estrutural. Neste cenário, a corrosão não uniforme ocasionada em virtude dos íons cloreto apresenta maior grau de agressividade quando comparada com a corrosão uniforme devido à carbonatação do concreto de cobrimento. A manifestação patológica provocada por cloretos induz a formação não uniforme dos produtos de corrosão, os quais imprimem uma distribuição de tensões não uniforme na interface entre o aço e o concreto. O presente trabalho apresenta os resultados do desenvolvimento de uma ferramenta computacional utilizando a abordagem posicional do método dos elementos finitos para avaliar o comportamento mecânico de seções transversais de elementos reticulados de concreto armado sujeitos à corrosão não uniforme. A imersão das armaduras é realizada com base em técnicas de embutimento, sem gerar graus de liberdade adicionais ao problema. As tensões não uniformes foram inseridas usando uma estratégia baseada na expansão das armaduras, considerando de maneira aditiva uma parcela de deformação para simular o avanço da camada dos produtos de corrosão. Com o intuito de verificar o padrão de formação das fissuras, foi incorporado um modelo de dano isotrópico, controlado por uma variável de deformação equivalente. A taxa de formação dos produtos de corrosão foi modelada através das leis de Faraday. As formulações implementadas são validadas por meio dos resultados presentes na literatura e aplicações numéricas são apresentadas a fim de demonstrar as potencialidades da ferramenta desenvolvida. *Palavra-Chave: Concreto armado; Corrosão não uniforme; Corrosão por cloretos; MEF; Dano.*

Abstract

The corrosion of reinforcement is the main pathological manifestation that affects reinforced concrete structures. The harmful actions triggered by corrosion impair the structural safety and performance. In this scenario, the non-uniform corrosion caused by the chloride ions is more aggressive than the uniform corrosion due to the carbonation of the covering concrete. The pathological manifestation caused by chlorides induces non-uniform rust formation, which generates a non-uniform stress distribution at the interface between steel and concrete. The present work aims the development of a computational tool using the positional approach of the finite element method to evaluate the mechanical behavior of cross sections of reinforced concrete elements subjected to non-uniform corrosion. The coupling of the reinforcements is based on embedded techniques, without adding degrees of freedom to the problem. The non-uniform pressure was implemented using a strategy based on the expansion of the reinforcement, additively considering the strain related to the advance of the rust layer. In order to verify the crack formation pattern, an isotropic damage model controlled by an equivalent strain variable was incorporated. The rust production rate was modeled using Faraday's laws. The implemented formulations are validated through the results present in the literature and numerical applications are presented in order to demonstrate the potential of the developed tool.

Keywords: Reinforced concrete; Non-uniform corrosion; Chloride corrosion; FEM; Damage.

1 Introdução

A corrosão do aço imerso no concreto caracteriza-se em uma manifestação patológica desencadeada por reações eletroquímicas que afetam severamente as condições de segurança e funcionalidade das estruturas de concreto armado. Inúmeros casos de corrosão são observados frequentemente no setor da construção civil, chamando a atenção para a precocidade com que ocorrem e o volume total dos recursos despendidos (STEWART; ROSOWSKY, 1998; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Estima-se que em países desenvolvidos os gastos gerados pelas atividades de recuperação e manutenção de estruturas corroídas correspondem cerca de 3,5% a 5,0% de seu PIB (GENTIL, 2011; RIBEIRO et al, 2018).

O processo corrosivo pode ser estimulado pela carbonatação do concreto de cobrimento ou pela ação dos íons cloreto. O fenômeno da carbonatação surge em virtude da difusão do dióxido de carbono (CO_2), presente no ar atmosférico ou em águas agressivas. Ao adentrar no concreto, combina-se com o hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), formando o carbonato de cálcio ($CaCO_3$), promovendo a redução do teor de alcalinidade e, conseqüentemente, afetando a estabilidade do filme passivante que recobre as armaduras. Este tipo de corrosão, também conhecido como generalizada, é caracterizada pela formação uniforme dos produtos de corrosão em torno da armadura. Na corrosão por cloretos a despassivação do aço ocorre em virtude do acúmulo destes íons na superfície da película protetora, rompendo-a em regiões discretas do material, motivo pelo qual este tipo de corrosão é conhecido como localizada. Devido ao fato das reações eletroquímicas ocorrerem em regiões limitadas, a intensidade de corrosão tende a ser maior, promovendo o surgimento de pites com profundidades consideráveis, originando uma distribuição não uniforme dos produtos de corrosão (GENTIL, 2011; MEIRA, 2017).

A análise da vida útil das estruturas pode ser realizada consistentemente por meio do modelo fenomenológico proposto por Tuutti (1982). Este modelo é capaz de representar o processo corrosivo de forma mais didática e elucidativa, em que a vida útil é dividida em dois períodos de tempo, o primeiro referente à iniciação e o último à propagação da corrosão. O período de iniciação é governado pelos mecanismos de transporte das substâncias agressivas para o interior do concreto, em especial, a difusão. Já a fase de propagação corresponde efetivamente ao processamento das reações de oxirredução. Alguns métodos de predição da vida útil consideram somente a fase de iniciação. Contudo, em determinadas ocasiões o período de propagação pode ser vagaroso, contribuindo significativamente para a vida útil da estrutura (RAUPACH, 2006).

A redução da área de seção transversal das armaduras e a formação dos produtos de corrosão são as principais ações deletérias resultantes do processo corrosivo. No entanto, outros efeitos secundários podem ser observados, como, por exemplo, a perda de aderência entre a armadura e o concreto devido ao desgaste superficial do aço e o acúmulo dos produtos de corrosão, a concentração de tensões em virtude das descontinuidades do material geradas pela corrosão, e a redução da tensão de escoamento do aço decorrente das alterações físico-químicas da microestrutura cristalina dos metais. A Figura 1 apresenta

o processo de propagação das fissuras em função das tensões expansivas geradas pelos produtos de corrosão. Destaque especial é dado aos valores de largura das fissuras (w).

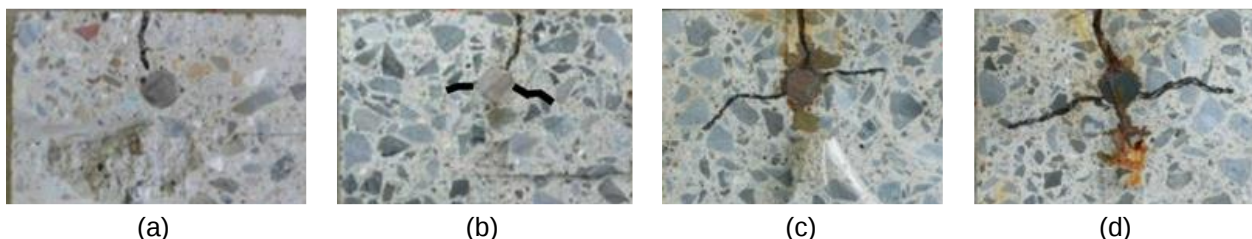


Figura 1 – Evolução das fissuras em virtude da propagação da corrosão na armadura de aço: (a) $w = 0,35$ mm; (b) $w = 0,54$ mm; (c) $w = 0,94$ mm; (d) $w = 1,52$ mm (TRAN et al., 2011)

Salienta-se que, para os estados de fissuração mostrados nas Figuras 1.a à 1.d, de acordo com a referência, foram geradas as seguintes quantidades de produto de corrosão por unidade de área da seção transversal das armaduras, respectivamente: 108 mg/cm^2 , 162 mg/cm^2 , 445 mg/cm^2 e 915 mg/cm^2 .

Neste trabalho apresenta-se um modelo numérico baseado no MEF desenvolvido para a análise do comportamento mecânico de seções transversais de estruturas de concreto sujeitas à corrosão não uniforme das armaduras. Tanto a matriz de concreto quanto as armaduras são modeladas por meio de elementos finitos triangulares bidimensionais. A imersão das armaduras na matriz de concreto é realizada com base em técnicas de embutimento, descrevendo os parâmetros nodais do elemento finito da armadura em função dos parâmetros nodais dos elementos da matriz. Esta estratégia garante perfeita aderência entre os domínios. A imposição das tensões expansivas é realizada através da incorporação aditiva de uma parcela de deformação nas armaduras, a fim de representar o avanço da camada dos produtos de corrosão. Assim, a corrosão não uniforme é incorporada conforme o modelo proposto por Yuan e Ji (2009), em que a profundidade do pite é determinada por meio das leis de Faraday e a taxa da corrente de corrosão é calculada segundo o modelo de Vu e Stewart (2000).

2 Modelo mecânico

2.1 Modelagem de compósitos particulados via MEFP

Para a simulação da seção transversal das estruturas de concreto, implementou-se inicialmente uma formulação para análise de sólidos elásticos bidimensionais reforçados com partículas, conforme apresentada por Paccola e Coda (2016). O modelo numérico é formulado a partir de uma abordagem posicional do método dos elementos finitos, o qual utiliza posições e vetores generalizados como parâmetros nodais ao invés dos deslocamentos e giros empregados no método convencional. Ambos materiais, concreto e armadura, são modelados por elementos finitos planos triangulares, com dois graus de liberdade por nó, em que o acoplamento cinemático é realizado utilizando uma metodologia baseada em técnicas de embutimento. Maiores detalhes a respeito da formulação posicional do MEF podem ser encontrados em Coda (2018).

2.2 Modelo de dano

O comportamento não linear físico do concreto é incorporado ao código computacional de compósitos particulados por meio da teoria da mecânica do dano contínuo, alicerçada sob as bases da termodinâmica dos processos irreversíveis. Neste trabalho, o processo de degradação mecânica do concreto é descrito pelo modelo de dano isotrópico proposto por Mazars (1984). Apesar de tratar-se de um modelo considerado simplificado, o mesmo garante resultados satisfatórios, sendo bastante empregado na comunidade científica ao longo dos anos. Outra vantagem que justifica sua escolha está atrelada ao fato de requerer um baixo número de parâmetros, os quais podem ser obtidos facilmente por meio das curvas de tensão-deformação uniaxiais teóricas ou experimentais.

No modelo de Mazars as deformações plásticas provindas de uma possível situação de descarregamento são completamente desprezadas. A danificação é governada por uma variável escalar D , a qual visa penalizar os parâmetros elásticos do material, calculada em função de uma variável de deformação equivalente ε_{eq} , destinada a mensurar seu estado de alongamento, a qual é dada por:

$$\varepsilon_{eq} = \sqrt{(\varepsilon_1)_+^2 + (\varepsilon_2)_+^2 + (\varepsilon_3)_+^2}, \quad (\text{Equação 1})$$

em que $(\varepsilon_i)_+$ correspondem às deformações principais positivas. Portanto, a danificação material ocorre somente devido à presença de deformações de alongamento. O início do processo de degradação mecânica ocorre quando uma determinada deformação de referência é atingida, a qual refere-se à deformação correspondente à máxima tensão de tração do concreto, ε_{d0} . Assim, o critério de danificação pode ser escrito do seguinte modo:

$$f(\varepsilon_{eq}, D) = \varepsilon_{lim} - \varepsilon_{eq} < 0, \quad (\text{Equação 2})$$

em que inicialmente $\varepsilon_{lim} = \varepsilon_{d0}$. Já após a danificação ε_{lim} passa a ser o máximo valor presente no histórico de deformações. A variável de dano é calculada em função do estado de deformações, o qual está associado ao estado de tensões. A mesma é dividida nas parcelas D_T e D_C , responsáveis por representar o comportamento não linear das curvas de tensão-deformação uniaxiais do concreto tracionado e comprimido, respectivamente, sendo dadas pelas seguintes expressões:

$$D_T = 1 - \varepsilon_{d0}(1 - A_T)(\varepsilon_{eq})^{-1} - A_T e^{-B_T(\varepsilon_{eq} - \varepsilon_{d0})} \quad (\text{Equação 3})$$

$$D_C = 1 - \varepsilon_{d0}(1 - A_C)(\varepsilon_{eq})^{-1} - A_C e^{-B_C(\varepsilon_{eq} - \varepsilon_{d0})} \quad (\text{Equação 4})$$

em que as constantes A_T , A_C , B_T e B_C são parâmetros intrínsecos ao modelo de dano de Mazars. Para o estado multiaxial de tensões, as variáveis de dano à tração e à compressão podem ser combinadas linearmente, em que os coeficientes α_T e α_C são obtidos em função do estado de deformação. Assim, a variável de dano é dada por:

$$D = \alpha_T D_T + \alpha_C D_C, \quad (\text{Equação 5})$$

em que: $0 \leq \alpha_T \leq 1$; $0 \leq \alpha_C \leq 1$; e $\alpha_T + \alpha_C = 1$.

Neste trabalho a variável de dano é calculada nos pontos de integração. Logo, a degradação mecânica do material em um dado passo de carga é considerada por meio da penalização do módulo de elasticidade longitudinal $\mathbb{E}$, em que o módulo de elasticidade degradado $\tilde{\mathbb{E}}$ é definido como:

$$\tilde{\mathbb{E}} = (1 - D)\mathbb{E}, \quad (\text{Equação 6})$$

e o módulo de elasticidade transversal resulta em: $\tilde{\mathbb{G}} = \tilde{\mathbb{E}}/[2(1 + \nu)]$. Maiores detalhes a respeito da teoria da mecânica do dano contínuo podem ser encontrados em Kachanov (1958), Rabotnov (1969), Lemaitre, Chaboche e Germain (1985), Lemaitre e Dufailly (1987) e Lemaitre (1992).

3 Modelagem da corrosão não uniforme

3.1 Descrição do modelo adotado

A modelagem da fase de propagação da corrosão é realizada por meio de modelos determinísticos disponíveis na literatura. O principal parâmetro que governa a intensidade do processo corrosivo consiste na densidade da corrente de corrosão. Neste trabalho é utilizado o modelo proposto por Vu e Stewart (2000). Sua escolha deve-se ao fato de requerer somente dois parâmetros, o fator água/cimento e a espessura do concreto de cobrimento, os quais podem ser obtidos durante a fase de projeto. Neste modelo a corrente de corrosão decresce exponencialmente com o tempo, assumindo maiores valores no início do processo. Tal aspecto apresenta boa concordância com o processo de corrosão por cloretos, pois como as reações eletroquímicas se processam em uma área limitada da superfície das armaduras, o fenômeno é mais intenso nos períodos iniciais, atenuando-se com o tempo. Portanto, a corrente de corrosão é calculada como:

$$i_{corr}(t_p) = \left[\frac{37,8 (1 - a/c)^{-1,64}}{x_c} \right] 0,85 t_p^{-0,29} \quad (\text{Equação 7})$$

em que i_{corr} corresponde à densidade da corrente de corrosão ($\mu\text{A}/\text{cm}^2$), t_p representa o tempo de propagação da corrosão (anos), a/c refere-se ao fator água/cimento e x_c é a espessura do concreto de cobrimento (mm).

A modelagem da corrosão não uniforme na seção transversal das armaduras é realizada por meio do modelo proposto por Yuan e Ji (2009). Na ocasião os autores buscaram investigar a redução da área de aço e a distribuição dos produtos de corrosão devido à corrosão não uniforme desencadeada por íons cloreto. Como conclusão, verificaram que a armadura corroída pode ter seu formato aproximado por uma semi-elipse, considerando que somente a superfície da armadura voltada para o cobrimento é afetada. A Figura 2 apresenta uma esquematização do modelo de corrosão não uniforme, enfatizando a degradação da área de aço:

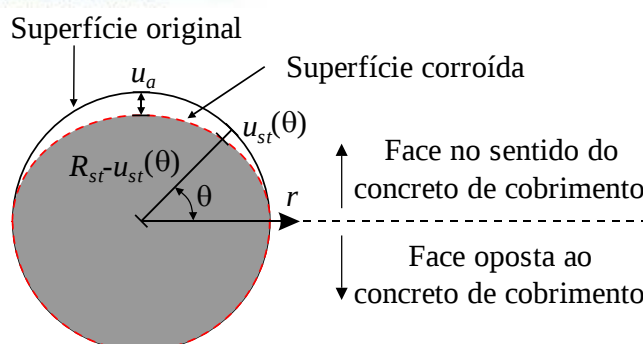


Figura 2 – Esquematização do modelo de corrosão não uniforme

A partir desta evidência, os autores propuseram aproximar a redução do raio da armadura em função do ângulo pela seguinte expressão:

$$u_{st}(\theta) = R_{st} - \frac{R_{st}(R_{st} - u_a)}{\sqrt{(R_{st} - u_a)^2 \cos^2 \theta + R_{st}^2 \sin^2 \theta}} \quad (\text{Equação 8})$$

em que u_{st} corresponde à camada de aço corroída, R_{st} equivale ao raio inicial da armadura, u_a representa a profundidade do pite e θ é o ângulo que descreve a metade da superfície da armadura, assumindo valores entre 0 e π . A profundidade do pite pode ser determinada consistentemente pelas leis de corrosão de Faraday, conforme a Equação 9. Tais leis visam descrever os processos pertinentes às reações eletrolíticas por meio de relações entre as massas das substâncias produzidas nos eletrodos e as quantidades de energia gastas.

$$u_a(t_p) = \frac{\int_0^{t_p} i_{corr}(t) dt A}{Z_{Fe} F \rho_{st}} \quad (\text{Equação 9})$$

em que t_p é o tempo de propagação da corrosão, dado em segundos, $A = 55,85$ g/mol representa a massa atômica do aço corroído, $Z_{Fe} = 2$ refere-se à valência da reação anódica, $F = 96485$ C/mol indica a constante de Faraday e $\rho_{st} = 7800000$ g/m³ corresponde à densidade do aço.

Para avaliar a distribuição das tensões expansivas, pode-se correlacionar a perda de massa do aço com a geração dos produtos da corrosão. Desse modo, para modelar a progressão da camada dos produtos de corrosão, adotou-se uma taxa de expansão volumétrica de $n = 3$, em concordância com o trabalho de Cheng et al. (2013). Logo, o deslocamento imposto radialmente no concreto de interface, em virtude da camada dos produtos de corrosão, é determinado da seguinte forma:

$$u_r(\theta, t_p) = (n - 1)u_{st}(\theta, t_p) \quad (\text{Equação 10})$$

A fim de ilustrar a adaptação do modelo de corrosão não uniforme, para descrever a distribuição dos produtos de corrosão em torno da armadura, apresenta-se a Figura 3. Nota-se que somente a metade da armadura direcionada para o cobrimento é afetada.

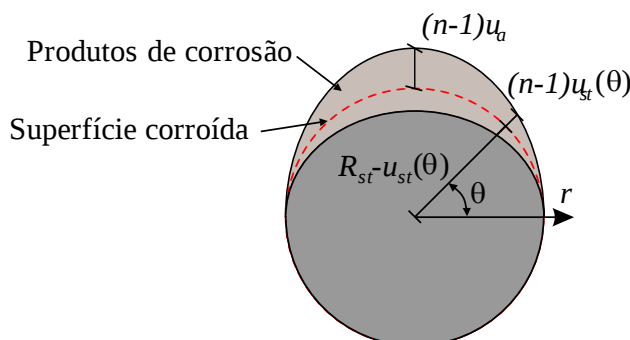


Figura 3 – Esquemática da imposição da camada formada pelos produtos de corrosão

3.2 Estratégia de acoplamento numérico

Neste trabalho as armaduras presentes na seção transversal do elemento de concreto armado são representadas por elementos de partículas, imersos por uma técnica de embutimento. A metodologia empregada no acoplamento cinemático confere a aderência total entre os domínios por meio dos nós da discretização da armadura, garantindo uma boa transferência de tensões entre os materiais. Desse modo, as tensões expansivas providas da formação dos produtos de corrosão são impostas por meio da expansão dos elementos particulados. Tal estratégia foi empregada com sucesso no trabalho de Felix et al. (2018), considerando o caso de corrosão uniforme desencadeada pela carbonatação do concreto de cobertura. O processo de expansão é realizado considerando uma decomposição aditiva das deformações desenvolvidas nos elementos de partícula, incluindo agora uma parcela referente às deformações radiais correspondentes à frente da camada dos produtos de corrosão. Assim, o tensor de deformações nas partículas, considerando um regime de deformações moderadas, passa ser escrito como:

$$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^0 + \varepsilon_{ij}^r \quad (\text{Equação 11})$$

em que ε_{ij} são as deformações totais, ε_{ij}^0 representa as deformações elásticas iniciais e ε_{ij}^r corresponde às deformações radiais responsáveis por representar a camada dos produtos de corrosão. As deformações radiais são calculadas para cada ponto de integração dos elementos finitos das partículas que compõem a armadura, sendo dadas por:

$$\varepsilon_{ij}^r = \frac{u_r(\theta, t_p)}{R_{st}} \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta \end{bmatrix} \quad (\text{Equação 12})$$

A redução das armaduras é considerada, de maneira aproximada, pela penalização das propriedades elásticas, aplicada diretamente sobre o módulo de elasticidade longitudinal, de acordo com a seguinte expressão:

$$\mathbb{E}_{eq} = \frac{\mathbb{E}_{st}(2R_{st} - u_a) + \mathbb{E}_r n u_a}{(2R_{st} - u_a + n u_a)} \quad (\text{Equação 13})$$

em que E_{eq} representa o módulo de elasticidade longitudinal equivalente, e E_{st} e E_r indicam os módulos de elasticidade longitudinal do aço e dos produtos de corrosão, respectivamente. Por simplicidade, adota-se para os produtos de corrosão um valor de E_r nulo.

Na sequência, a Figura 4 apresenta um fluxograma com os procedimentos referentes à implementação computacional. Embora os detalhes do método numérico tenham sido omitidos no presente texto, os detalhes do algoritmo foram mantidos. Assim, para um melhor entendimento do leitor a respeito da aproximação via método dos elementos finitos posicional, descrito no fluxograma, recomenda-se a consulta do trabalho de Paccola e Coda (2016).

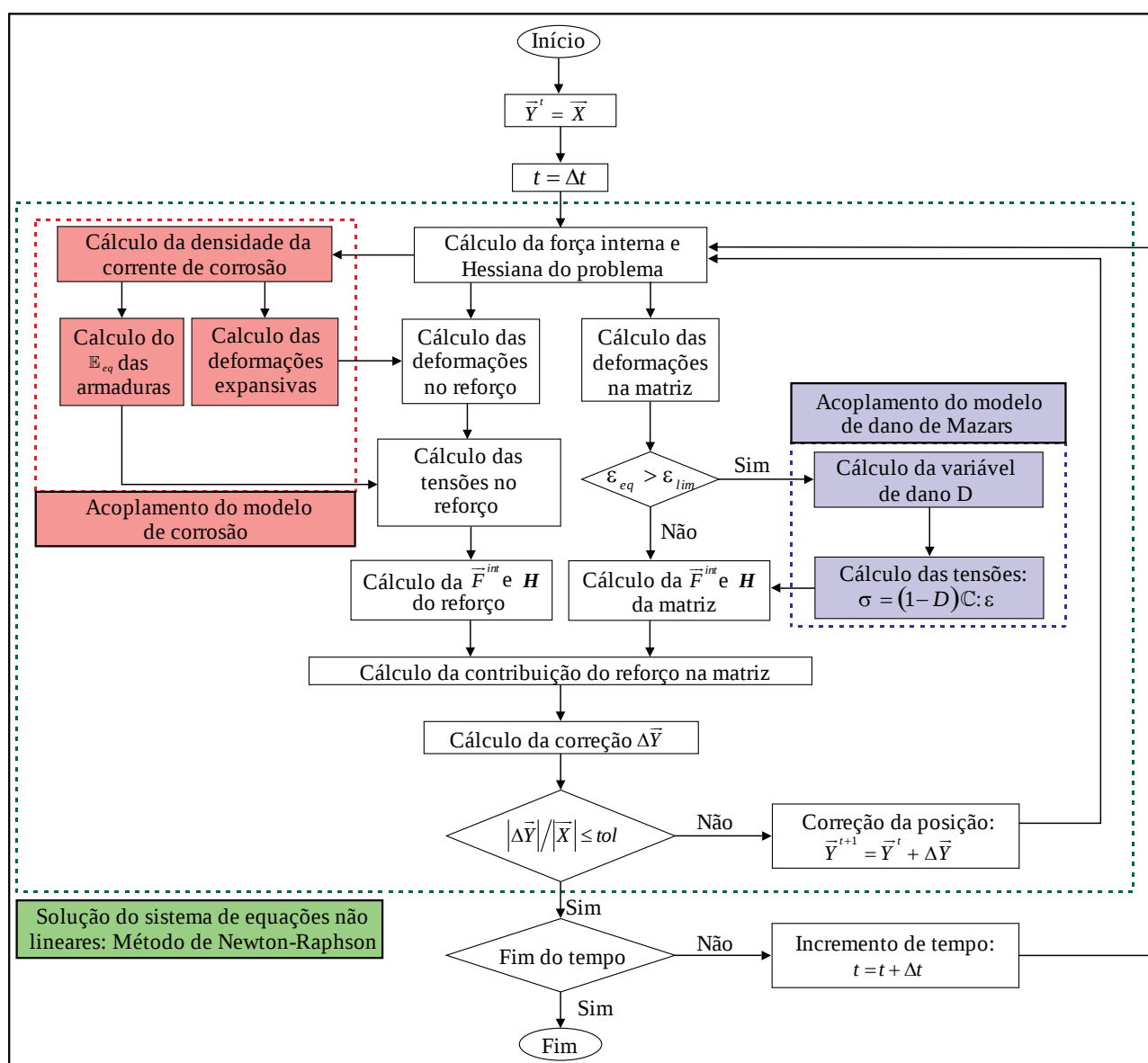


Figura 4 – Fluxograma da implementação realizada para a modelagem da corrosão não uniforme

4 Exemplos numéricos

Nesta seção dois exemplos numéricos são abordados, a fim de demonstrar a potencialidade do modelo desenvolvido. No primeiro, um corpo de prova sujeito à corrosão não uniforme devido ao ingresso de íons cloreto é analisado. Os resultados obtidos são comparados com os valores numéricos e experimentais disponíveis na literatura. Por fim, o último exemplo consiste na análise da corrosão não uniforme na seção transversal de uma viga de concreto armado.

4.1 Corrosão não uniforme em corpo de prova

O presente exemplo visa validar o modelo numérico desenvolvido por meio dos resultados disponíveis na literatura. A estrutura analisada consiste em um corpo de prova prismático de concreto contendo duas barras de aço imersas, sendo uma delas constituída por um aço inoxidável enquanto a outra era susceptível ao fenômeno da corrosão. O elemento de concreto armado foi ensaiado experimentalmente por Ji et al. (2012), os quais objetivaram determinar a espessura da camada dos produtos de corrosão ao longo do tempo. Para a análise, os autores confinaram o corpo de prova em um ambiente controlado, com elevada concentração de cloretos, a fim de acelerar o processo de despassivação das armaduras. Após o fim do período de iniciação, o corpo de prova foi exposto às condições ambientais naturais. A geometria do corpo de prova, bem como a localização das armaduras, é evidenciada na Figura 5.

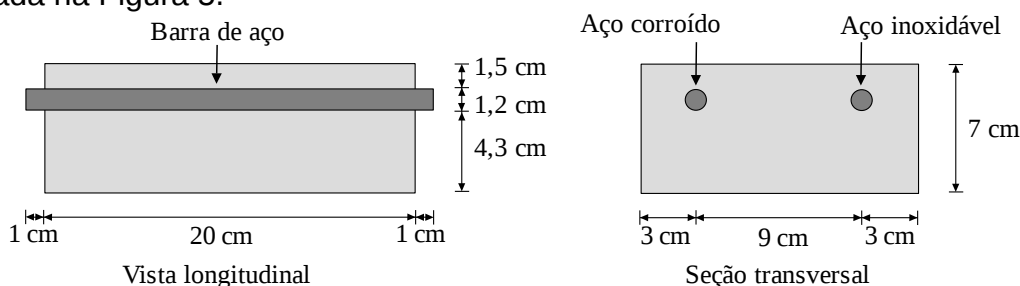


Figura 5 – Geometria do corpo de prova analisado

Com relação ao concreto, as seguintes propriedades foram consideradas: relação água/cimento $a/c = 0,60$, resistência característica à compressão aos 28 dias $f_{ck} = 20$ MPa, módulo de elasticidade longitudinal $E_c = 24700$ MPa, coeficiente de Poisson $\nu_c = 0,20$, $\varepsilon_{d0} = 6,5 \times 10^{-5}$, $A_T = 0,995$, $A_C = 1,13$, $B_T = 8000$ e $B_C = 1643,5$. Para o aço, adotou-se: módulo de elasticidade longitudinal $E_s = 210000$ MPa e coeficiente de Poisson $\nu_s = 0,00$. O ingresso dos agentes agressivos foi admitido somente na face superior do elemento. A modelagem da seção transversal foi realizada considerando a configuração estática adotada por Cao e Cheung (2014). A matriz de concreto foi discretizada por 1281 elementos finitos triangulares com ordem de aproximação cúbica, com 5899 nós e 11798 graus de liberdade. A armadura foi modelada considerando uma inclusão particulada definida por uma malha composta por 1408 elementos finitos triangulares com aproximação linear, totalizando 749 nós e 1498 graus de liberdade. Um extensômetro foi posicionado na face superior da seção, a fim de mensurar os deslocamentos externos ao longo do tempo. A Figura 6 ilustra a configuração estática adotada para a modelagem e a disposição da malha de elementos finitos.

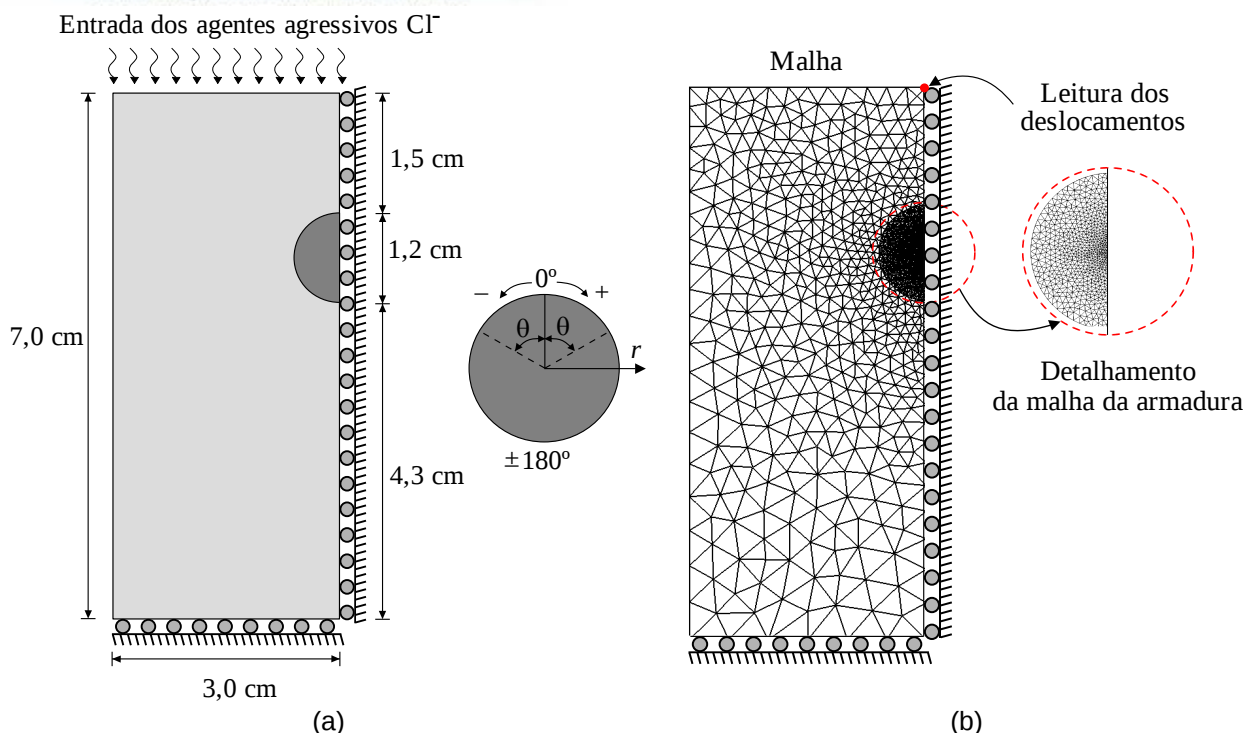


Figura 6 – Propriedades da seção transversal: (a) geometria e condições de contorno; (b) malha adotada

A análise foi conduzida considerando o estado plano de deformação, admitindo uma espessura unitária. A propagação da corrosão foi avaliada para um período de 5 meses, incrementados gradativamente por 100 passos de tempo. Duas situações foram estudadas, a primeira considerando a matriz perfeitamente elástica e na segunda introduzindo a degradação mecânica do material. Ressalte-se que, para o processo de superposição de malhas, o módulo de elasticidade do concreto foi subtraído do módulo de elasticidade da armadura. Além disso, a região de concreto sobreposta à armadura não foi danificada. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 7, em que os deslocamentos radiais do concreto devido à formação da camada dos produtos de corrosão são dados em função do ângulo que descreve a superfície da armadura (ver Figura 5).

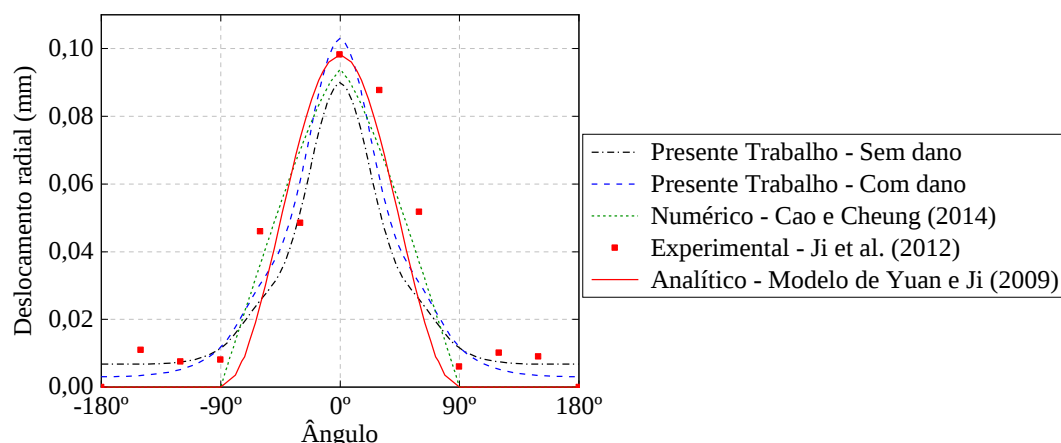


Figura 7 – Deslocamentos radiais no concreto

Os valores aferidos foram confrontados com os resultados experimentais determinados por Ji et al. (2012) e numéricos obtidos por Cao e Cheung (2014). A análise numérica conduzida pela referência abordou a formação dos produtos de corrosão por meio de modelos embasados nos processos eletroquímicos. A partir da máxima espessura da camada dos produtos de corrosão, determinada experimentalmente, os resultados analíticos providos do modelo de semi-elipse proposto por Yuan e Ji (2009) também são apresentados. Os resultados obtidos se mostraram próximos aos valores da literatura, em especial, considerando a não linearidade física da matriz.

Nota-se que os deslocamentos radiais tendem a ser mais acentuados para os ângulos próximos de 0, os quais representam a superfície da armadura mais próxima do meio externo. Também observa-se que, para $-180^\circ \leq \theta < -90^\circ$ e $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$, os resultados determinados apresentaram valores diferentes de 0, contrariando a simplificação adotada pelo modelo analítico. Este comportamento ocorre devido à estratégia de expansão da armadura. Apesar das deformações serem impostas somente nos pontos de integração da metade da armadura voltada para o meio externo, a reação mecânica do concreto de cobrimento promove uma redistribuição de esforços, de tal modo que surge, por conseguinte, um campo de tensões na interface entre a superfície oposta da armadura e o concreto, promovendo a movimentação das partículas. No entanto, este fato resultou em uma melhor aproximação quando comparado aos resultados experimentais, tendo em vista que a corrosão também afeta a superfície do aço situada opostamente ao concreto de cobrimento, embora com uma menor intensidade.

Particularizando para o modelo considerando a danificação da matriz, os mapeamentos dos deslocamentos obtidos ao final do período analisado podem ser observados na Figura 8, segundo escalas de cores. Nota-se que a interferência da corrosão nos campos de deslocamentos ocorre somente nas proximidades da armadura, com maior intensidade no concreto de cobrimento. Este comportamento pode acarretar no destacamento do cobrimento, efeito também conhecido como “*spalling*”. Para evidenciar o fenômeno, a Figura 9 apresenta o mapeamento da variável de dano para 12, 30 e 150 dias.

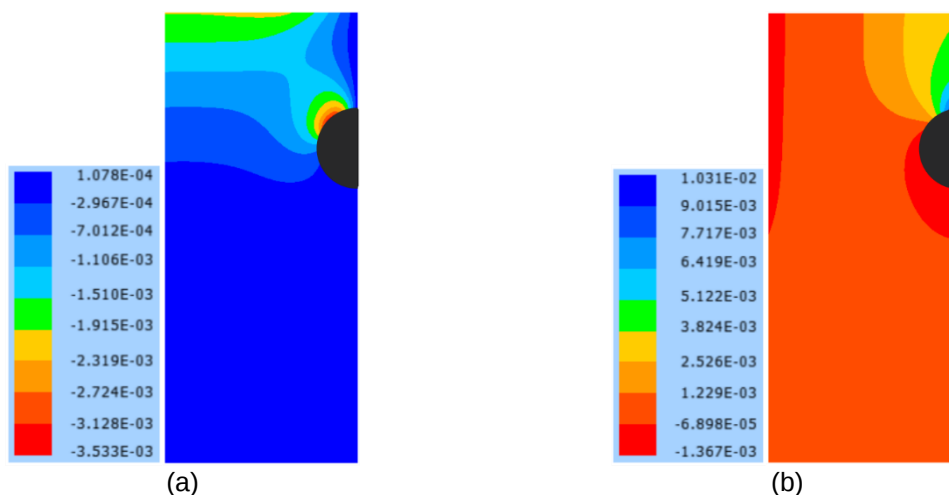


Figura 8 – Mapeamento dos deslocamentos para a matriz danificada: (a) deslocamentos horizontais (cm);
(b) deslocamentos verticais (cm)

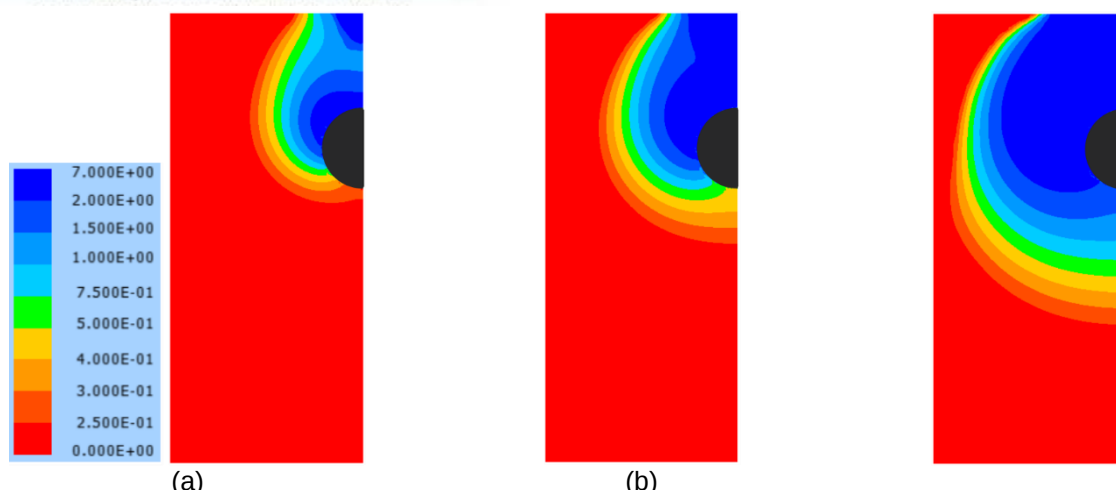


Figura 9 – Mapeamento da variável de dano: (a) 12 dias; (b) 30 dias; (c) 150 dias

Analisando a Figura 9.a, observa-se inicialmente a formação de uma pseudofissura na direção diagonal, partindo da armadura, e na direção vertical, com início na face superior do corpo de prova. Nas Figuras 9.b e 9.c o dano se encontra em um estágio mais avançado, apontando a degradação total do concreto de cobertura. Para uma melhor observação do direcionamento das fissuras, apresenta-se a Figura 10. A distribuição das tensões principais de tração é mostrada na Figura 10.a, enquanto que o mapeamento da variável de deformação equivalente, responsável por mensurar a deformação de alongamento, é apresentada na Figura 10.b. As imagens apontam claramente as regiões de concentração de tração e as respectivas deformações de alongamento geradas, indicando o perfil de propagação das fissuras no concreto de cobertura.

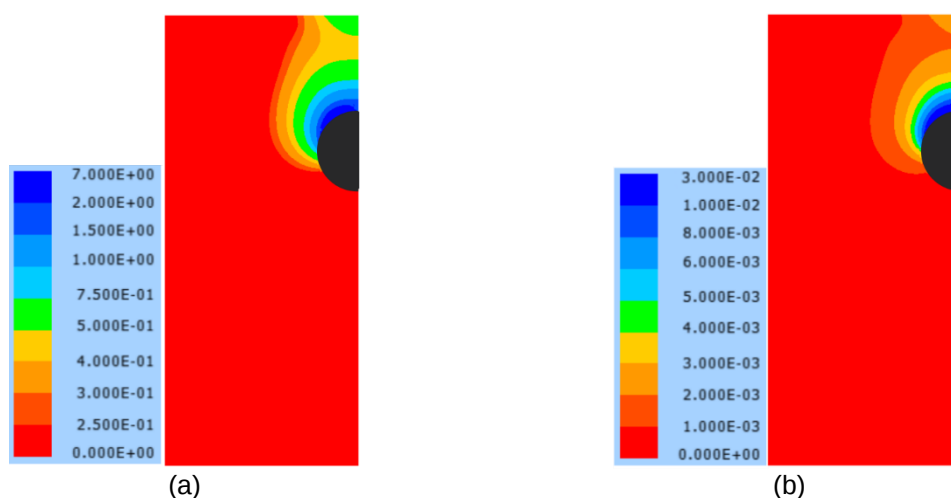


Figura 10 – Mapeamento dos deslocamentos para a matriz danificada: (a) tensões principais de tração (kN/cm^2); (b) deformações equivalentes

Os deslocamentos verticais máximos aferidos na face superior em função do tempo são mostrados na Figura 11, considerando os modelos com a matriz danificada e em regime elástico linear. Observa-se o decrescimento da taxa de deslocamento. Esta característica

está associada com o comportamento exponencial da corrente de corrosão, a qual é mais intensa nos períodos iniciais e atenua-se com o tempo.

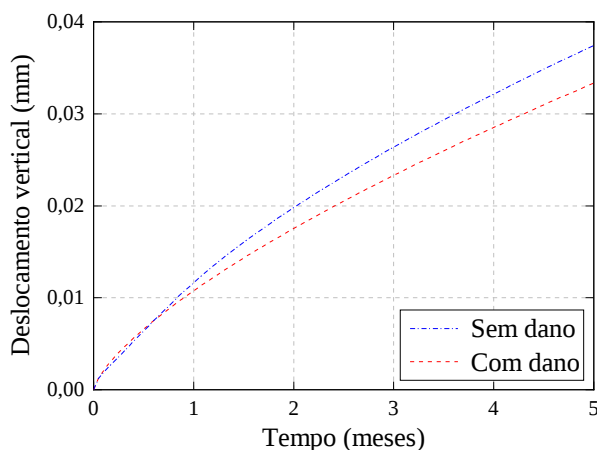


Figura 11 – Deslocamentos radiais no concreto

Diante das discussões apresentadas, verifica-se uma boa concordância dos resultados obtidos com a literatura especializada, demonstrando a acurácia do código desenvolvido na análise da fase da propagação da corrosão não uniforme desencadeada pelos íons cloreto. No próximo exemplo, a fim de demonstrar a aplicabilidade da formulação, a seção transversal de uma viga de concreto armado sujeita à corrosão não uniforme é modelada.

4.2 Corrosão não uniforme em seção transversal

Neste exemplo o modelo desenvolvido é aplicado na análise do comportamento mecânico de uma viga biapoiada de concreto armado sujeita à corrosão não uniforme. Para analisar o processo de degradação localizada, ocasionada pelos íons cloreto, a seção transversal do centro da viga é modelada. A corrosão é considerada somente na armadura inferior, tendo em vista que o carregamento de serviço promove o surgimento de fissuras na região inferior do elemento estrutural, em virtude da manifestação das tensões de tração no concreto. As fissuras constituem-se em uma rota preferencial para os agentes agressivos, intensificando a potencialidade das reações eletroquímicas na armadura inferior. Devido ao fato da corrosão influenciar os campos mecânicos somente nas regiões próximas às armaduras, apenas a metade da seção transversal foi simulada, reduzindo o custo computacional para o processamento do modelo numérico. Para este exemplo, a entrada dos agentes agressivos foi considerada em todas as faces do elemento. A geometria da seção transversal e os detalhes do modelo estático adotado são expostos na Figura 12.

A simulação da corrosão na armadura central segue conforme o exemplo anterior, considerando a manifestação da corrosão somente na direção vertical, em virtude dos agentes agressivos presentes na face inferior do elemento. Para as armaduras de canto, considera-se a corrosão nas duas direções, por meio da superposição dos efeitos, de acordo com a proposta apresentada no artigo de Xia et al. (2012). Para analisar a influência da distância entre as armaduras, três modelos foram elaborados, com os seguintes valores

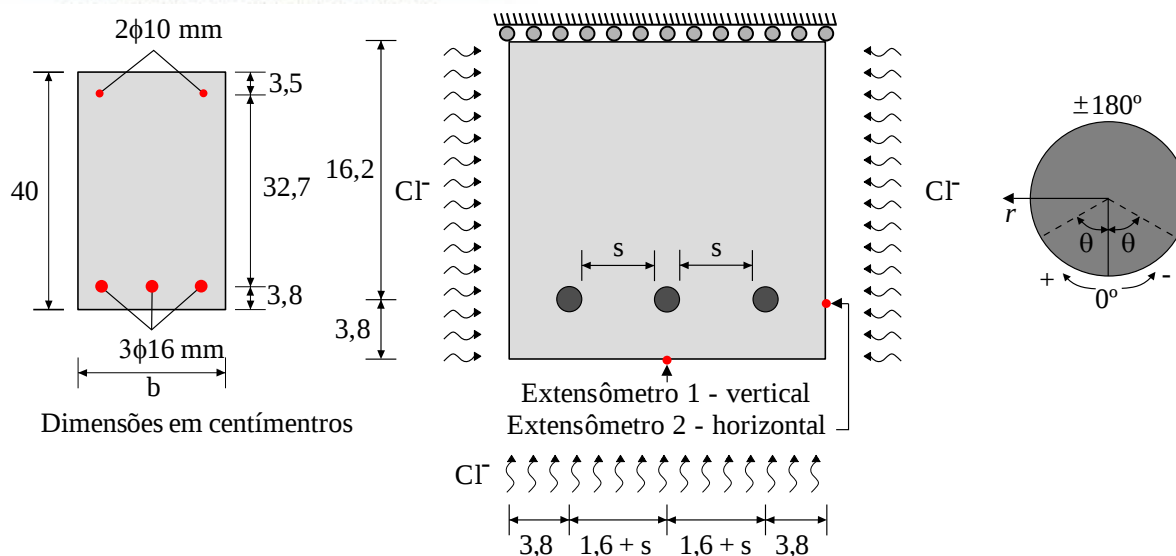


Figura 12 – Geometria da seção transversal

para os espaçamentos entre as barras: $s = 3,6$, $s = 6,1$ e $s = 8,6$. Com isso, a largura da seção transversal assumiu os valores de $b = 20$ cm, $b = 25$ cm e $b = 30$ cm. As malhas de elementos finitos adotadas para cada modelo são apresentadas na Figura 13.

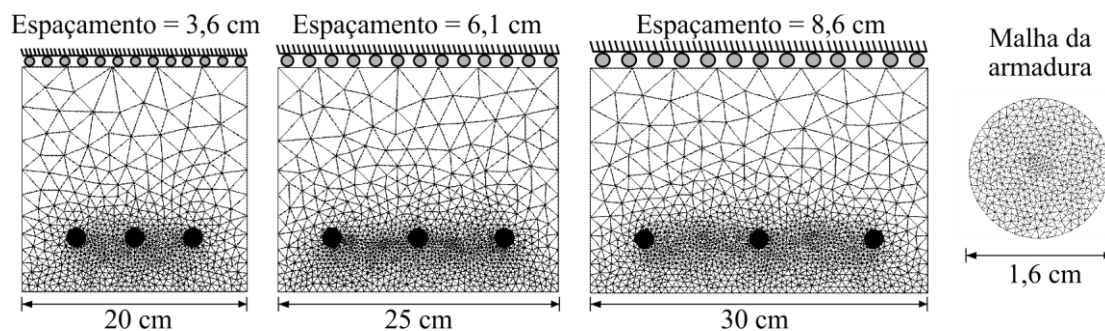


Figura 13 – Detalhamento das malhas adotadas

As matrizes de concreto foram discretizadas por elementos triangulares com ordem de aproximação cúbica, enquanto que as armaduras foram representadas por elementos com aproximação linear. Na seção transversal referente à $s = 3,6$ cm, a matriz foi discretizada com 1510 elementos e 6880 nós, para $s = 6,1$ cm empregou-se 2239 elementos e 10174 nós, e para $s = 8,6$ utilizou-se 2561 elementos e 11635 nós. Em todas os modelos as armaduras foram discretizadas por 2410 elementos e 1286 nós. Com relação às propriedades dos materiais, os seguintes valores foram empregados: $a/c = 0,40$, $f_{ck} = 20$ MPa, $E_c = 24700$ MPa, $E_s = 210000$ MPa, $\nu_c = 0,20$, $\nu_s = 0,00$, $\varepsilon_{d0} = 6,5 \times 10^{-5}$, $A_T = 0,995$, $A_C = 1,13$, $B_T = 8000$ e $B_C = 1643,5$.

A análise foi conduzida admitindo um único período de iniciação da corrosão para todas as armaduras, ou seja, assumindo que elas foram despassivadas simultaneamente. A fase de propagação foi simulada considerando um período de tempo $t_p = 10$ anos, incrementados gradualmente, de forma uniforme, por 40 passos de tempo equivalentes à três meses. Os

deslocamentos radiais do concreto, originalmente em contato com o aço, são expostos na Figura 14.

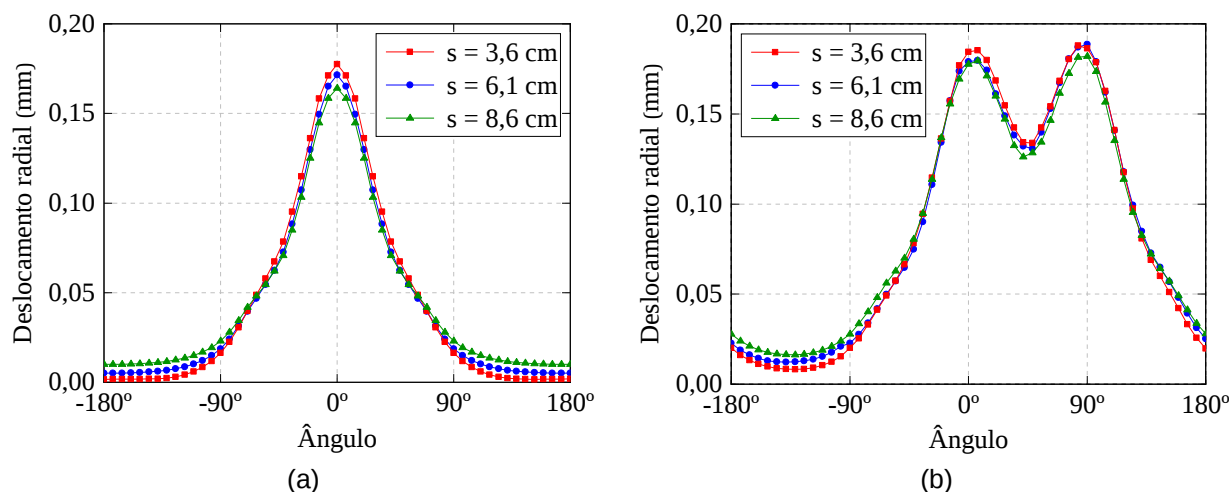


Figura 14 – Deslocamentos na seção transversal devido à corrosão: (a) armadura central (b) armaduras de canto

Nota-se na Figura 14.a que o perfil dos deslocamentos para a armadura central foi semelhante ao encontrado no exemplo anterior. Na Figura 14.b as curvas representam os deslocamentos radiais da armadura de canto localizada próxima à face esquerda da seção transversal. Observa-se que os máximos valores obtidos coincidem com as direções horizontais e verticais (ver Figura 12), demonstrando que a superposição das deformações foi incorporada com sucesso. Ademais, constata-se que o espaçamento entre as armaduras não influenciou significativamente os resultados.

Os deslocamentos verticais e horizontais aferidos pelos extensômetros 1 e 2, respectivamente, são mostrados na Figura 15. Percebe-se que somente o deslocamento vertical foi influenciado substancialmente pelo espaçamento entre as barras de aço.

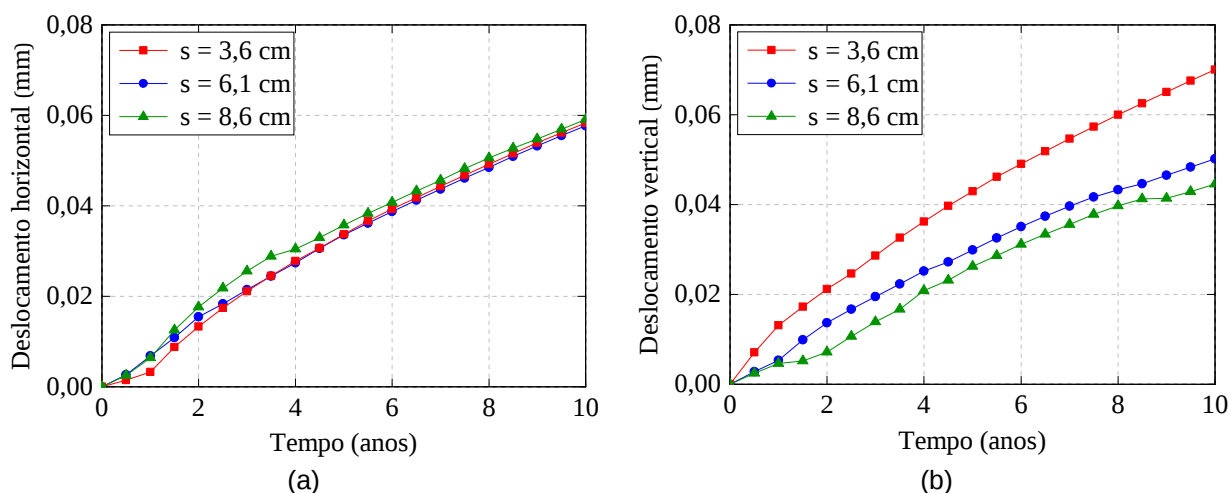


Figura 15 – Deslocamentos na seção transversal devido à corrosão: (a) deslocamentos horizontais; (b) deslocamentos verticais

Na sequência, a Figura 16 apresenta o mapeamento da variável de dano para cada um dos modelos, considerando um tempo de propagação de três anos. Em todos os casos observa-se a tendência do destacamento do cobrimento localizado nos cantos da seção transversal. No entanto, com relação à armadura central, percebe-se que a degradação do cobrimento se propaga mais aceleradamente para seções transversais mais estreitas. Tal comportamento justifica o fato do deslocamento vertical no centro da face inferior aumentar com a redução do espaçamento entre as armaduras.

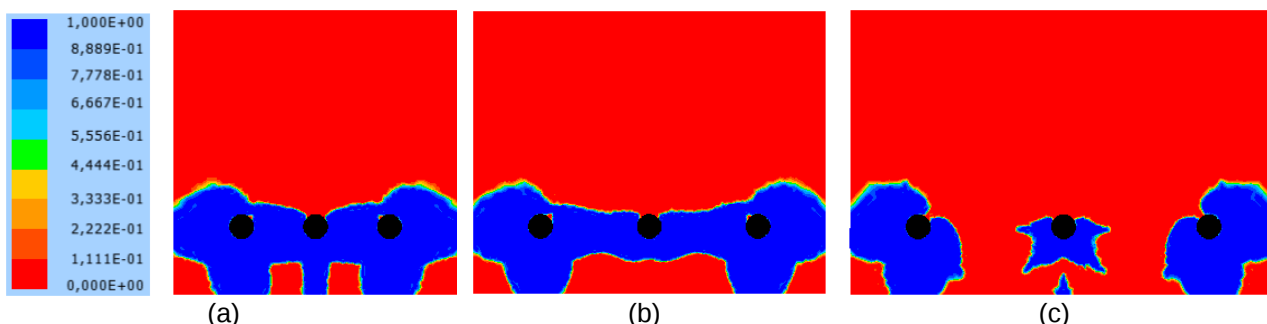


Figura 16 – Comparação da variável de dano para $t_p = 3$ anos: (a) $s = 3,6$ cm; (b) $s = 6,1$ cm; (c) $s = 8,6$ cm

Particularizando para o modelo com $s = 3,6$ cm e $b = 20$ cm, a evolução do estado de danificação em virtude da progressão da corrosão não uniforme é exposto na Figura 17. Três estágios distintos foram observados durante a análise, e para ilustrá-los, a distribuição da variável de dano é apresentada para os tempos de propagação de 0,5, 1,5 e 2,5 anos. Os estágios revelam o perfil de fissuração da peça por meio da localização da variável de dano escalar. No primeiro estágio, representado pela Figura 17.a, ocorre a formação de uma pseudofissura interna, a qual se propaga entre as barras de aço. Em um segundo instante ocorre a formação de pseudofissuras nas armaduras de canto (Figura 17.b), as quais atingem as faces externas da seção, delimitando as superfícies de possível destacamento do cobrimento. No terceiro estágio, indicado pela Figura 17.c, ocorre a formação de uma pseudofissura que interliga a armadura central ao meio externo.

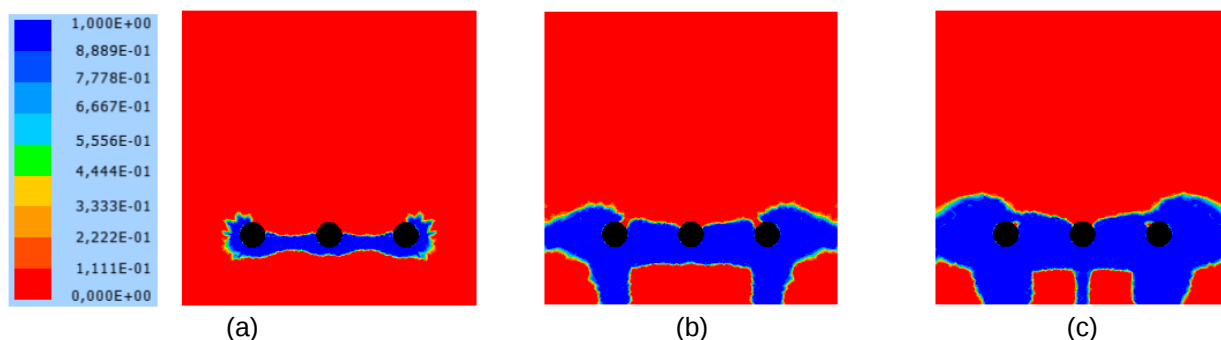


Figura 17 – Comparação da variável de dano para $s = 3,6$ cm: (a) $t_p = 0,5$ anos; (b) $t_p = 1,5$ anos; (c) $t_p = 2,5$ anos

Portanto, os resultados obtidos no presente exemplo demonstraram a consistência e aplicabilidade do modelo proposto na representação do comportamento de seções transversais de elementos de concreto sujeitos à corrosão não uniforme das armaduras.

5 Conclusões

Este trabalho apresentou uma estratégia para a simulação da degradação mecânica das seções transversais de concreto armado sujeitas à corrosão não uniforme, desencadeada pelos íons cloreto. Os resultados obtidos se mostraram satisfatórios, evidenciando a potencialidade do modelo desenvolvido, especialmente na predição do comportamento mecânico frente aos efeitos deletérios manifestados na fase de propagação do processo corrosivo.

A modelagem das tensões expansivas não uniformes por meio da imposição de deformações nos elementos particulados se mostrou adequada para simulação da corrosão por cloretos. A degradação mecânica do concreto em função da formação não linear dos produtos de corrosão foi satisfatoriamente considerada por meio do modelo de dano escalar de Mazars. Assim, em decorrência da localização da variável de dano, foi possível traçar um perfil das zonas preferenciais do processo de fissuração do concreto, permitindo analisar consistentemente a degradação mecânica do cobrimento em virtude das tensões expansivas.

As tensões expansivas nas armaduras de canto foram incorporadas devidamente segundo uma metodologia alternativa e simplificada presente na literatura. Os resultados apontaram que a corrosão nas armaduras de canto provoca danificações mais intensas no concreto, por apresentarem duas regiões de entrada dos agentes agressivos, referentes ao cobrimento, gerando o fenômeno de lascamento.

6 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro fornecido pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 133981/2018-5, CNPq 310564/2018-2 e CNPq 428762/2018-2) e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Referências

CAO, C.; CHEUNG, M. M. S. Non-uniform rust expansion for chloride-induced pitting corrosion in RC structures. *Construction and Building Materials*, v.51, 2014, p.75-81.

CHENG, X.; SU, Q.; MA, F.; LIU, X.; LIANG, X. Investigation on crack propagation of concrete cover induced by non-uniform corrosion of multiple rebars. *Engineering Fracture Mechanics*, v.201, 2018, p.366-384.

CODA, H. B. O Método dos Elementos Finitos Posicional: Sólidos e Estruturas – Não Linearidade Geométrica e Dinâmica. São Carlos: Editora EDUSP, 2003. 284 p.

FELIX, E. F.; BALABUCH, T. J. R.; POSTERLLI, M. C.; POSSAN, E.; CARRAZEDO, R. Useful life analysis of reinforced concrete structure under uniform corrosion through ANN model coupled to the FEM. Revista ALCONPAT, v.8, n.1, 2018, p.1-15.

GENTIL, V. Corrosão. 6ed. Rio de Janeiro: Editora LCT, 2011. 376 p.

JI, Y. S.; ZHANG, B. Y.; ZHANG, L. L.; MA, H. R.; ZENG, P. Propagation of the corrosion layer and model of corrosion distribution on steel re-enforcing bar in concrete. Zhongguo Kuangye Daxue Xuebao (Journal of China University of Mining & Technology), v.41, n.3, 2012, p.355-360.

KACHANOV, L. M. On the time to failure under creep conditions, izv. AN SSSR, Otd. Tekhn. Nauk, v.8, n.26-31, 1958, p.1-8.

LEMAITRE, J. A course on Damage Mechanics. Springer Science & Business Media, Berlim, 1992.

LEMAITRE, J.; CHABOCHE, J. L.; GERMAIN, P. Mécanique des matériaux solides, Dunod Paris, 1985.

LEMAITRE, J.; DUFAILLY, J. Damage measurements. Engineering Fracture Mechanics, v.28, n.5-6, 1987, p.643-661.

MAZARS, J. Application de la mécanique de l'endommagement au comportement non linéaire et à la rupture du béton de structure, Paris, 1984, Tese (doutorado) - Université Paris 6, 283 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais. São Paulo: Ibracon, 2014. 751 p.

MEIRA, G. R. Corrosão de armaduras em estruturas de concreto: fundamentos, diagnóstico e prevenção. João Pessoa: Editora IFPB, 2017. 130 p.

PACCOLA, R. R.; CODA, H. B. A direct FEM approach for particulate reinforced elastic solids. Composite Structures, v.141, 2016, p.282-291.

RABOTNOV, Y. N. Creep problems in structural members, North-Holland, 1969.

RAUPACH, M. Models for the propagation phase of reinforcement corrosion - An overview. Materials and Corrosion, v.57, n.8, 2006, p.605-613.

RIBEIRO, D. V.; SALES, A.; TUTIKIAN, B. F.; SOUZA, C. A. C.; ALMEIDA, F. C. R.; CUNHA, M. P. T.; LOURENÇO, M. Z.; CASCUDO, O.; HELENE, P. R. L. Corrosão e Degradação em Estruturas de Concreto: Teoria, Controle e Técnicas de Análise e Intervenção. 2ed. Rio de Janeiro: Elsevier Brasil, 2018. 416 p.



Anais do
62º Congresso Brasileiro do Concreto
CBC2020
Setembro / 2020



@ 2020 - IBRACON - ISSN 2175-8182

STEWART, M. G.; ROSOWSKY, D. V. Structural safety and serviceability of concrete bridges subject to corrosion. *Journal of Infrastructure Systems*, v.4, n.4, 1998, p.146-155.

TRAN, K. K.; NAKAMURA, H.; KAWAMURA, K.; KUNIEDA, M. Analysis of crack propagation due to rebar corrosion using RBSM. *Cement and Concrete Composites*, v.33, n.9, 2011, p.906-917.

TUUTTI, K. Corrosion of steel in concrete. Stockholm: Swedish Cement and Concrete Research Institute Stockholm, 1982.

VU, K. A. T.; STEWART, M. G. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models. *Structural Safety*, v.22, n.4, 2000, p.313-333.

XIA, N.; REN, Q.; LIANG, R. Y.; PAYER J.; PATNAIK, A. Non-uniform corrosion-induced stresses in steel-reinforced concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, v.138, n.4, 2012, p.338-346.

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