

MODELAGEM NUMÉRICA DOS EFEITOS DA CORROSÃO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO

Graeff, A.¹; D'Ávila, V. M. R.,²; Silva Filho, L. C. P.²

¹ Department of Civil and Structural Engineering, The University of Sheffield

² Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul



RESUMO

A corrosão de armaduras destaca-se entre as manifestações patológicas pela sua grande incidência e pelo seu caráter deletério. Neste trabalho foi efetuada uma modelagem numérica dos efeitos da propagação da corrosão em um programa pré-existente destinado a simular o comportamento de vigas de concreto armado. A implementação do programa foi feita mantendo-se a carga de serviço de uma estrutura constante e aplicando mudanças na seção transversal da armadura longitudinal e na lei que garante a aderência entre as barras e o concreto. Os resultados obtidos demonstraram coerência com a realidade, e foram mostrados através do aumento dos deslocamentos da estrutura.

1- INTRODUÇÃO

A corrosão de armaduras se destaca entre as várias manifestações patológicas que podem se desencadear em estruturas de concreto armado devido à grande incidência e caráter deletério. Isto explica a abundância de pesquisas sobre o tema existentes na literatura.

A corrosão de armaduras pode ser dividida em duas fases distintas: a fase de iniciação e a fase de propagação. A primeira delas se inicia no momento da construção da estrutura até a chegada dos agentes agressivos na armadura, provocando a perda da película passivadora. A fase de propagação se inicia após a despassivação da armadura e se estende até o instante da falha ou quando é atingido o limite do estado de utilização, se a estrutura não for reparada

(Roelfstra et al. 1999). Este período de tempo reservado à fase de propagação é bastante variável, pois depende da taxa de corrosão, da agressividade do ambiente, entre outros fatores. Percebe-se, todavia, que a maioria das pesquisas está voltada para o estudo da fase da iniciação da corrosão, onde as propriedades estruturais ainda não foram afetadas.

Encontra-se no meio literário diversas pesquisas que tratam da análise numérica da corrosão em estruturas de concreto armado. A maioria destas pesquisas tratam do período de iniciação da corrosão, como por exemplo, a simulação da penetração dos agentes agressivos no concreto ou o avanço das frentes de carbonatação, buscando determinar o instante em que ocorre a despassivação do aço (Silva et al. 2003 e Vu e Stewart 2000). Outros modelos de

simulação dos efeitos da corrosão são obtidos através de modelos estatísticos, como a simulação de Monte Carlo, para se prever a vida útil de estruturas (Lorensini e Diniz 2006).

Ênfase bem menor é dada ao estudo da fase da propagação da corrosão, dadas as maiores dificuldades de modelar o avanço do fenômeno nesta fase. Alguns modelos sobre este período da corrosão são encontrados através da simulação da perda da aderência entre o aço e o concreto (Wang e Liu, 2006).

Os principais danos em termos estruturais causados pela corrosão, incluem: a diminuição da área de seção transversal, a perda de aderência entre o concreto e a armadura e a fissuração do concreto provocada pelo acúmulo de produtos de corrosão junto às barras de armadura – que podem levar ao deslocamento do concreto nos estágios mais avançados de deterioração provocada pelo processo corrosivo.

Embora a prevenção seja fundamental, muitas vezes é necessário lidar com estruturas onde o processo corrosivo já se encontra no estágio de propagação, visto que nesta fase ocorrem os danos estruturais que podem levar, em casos mais graves, à ruína. Para analisar estruturas atacadas pela corrosão é fundamental desenvolver modelos de vida útil residual e de perda de desempenho mecânico. O presente trabalho foi concebido com o intuito de aportar mais dados para auxiliar no entendimento da fase de propagação e, conseqüentemente, colaborar com o diagnóstico do estado de conservação destas edificações.

2- DESCRIÇÃO DO TRABALHO

O presente trabalho tem por finalidade a análise dos efeitos estruturais da corrosão de armaduras através de uma análise numérica realizada em um programa existente baseado no Método dos Elementos Finitos. O programa foi inicialmente concebido para rodar peças de concreto armado submetidas aos esforços normais e de flexão. Realizou-se uma

adaptação no programa para que o mesmo incorpore os danos da fase de propagação da corrosão através da alteração das propriedades estruturais afetadas pelo processo corrosivo. A intenção deste trabalho é fazer com que na simulação numérica se represente a evolução do efeito da corrosão através de incrementos de deterioração ao invés de aplicar incrementos de carga.

Primeiramente foi realizada uma avaliação experimental para se quantificar o valor dos danos causados pela corrosão através da modificação das seguintes propriedades estruturais:

- aderência entre o aço e o concreto;
- área de seção transversal das barras de armadura;
- resistência à tração do aço

Os resultados detalhados obtidos nesta fase podem ser obtidos através do trabalho de Graeff (2007).

O aumento dos danos devido à corrosão de armaduras acontece, nos casos reais, quando as estruturas se encontram em capacidade de serviço e utilização, com poucas alterações de carregamento – salvo casos específicos de alteração da finalidade do uso provocado pelo usuário.

O objetivo desta avaliação numérica é seguir normalmente a metodologia original do programa (através de incrementos de carga) até que seja atingida a carga de serviço do elemento. A partir deste instante se inicia um novo tipo de incremento: o de dano causado pelo processo corrosivo. Estes danos serão implementados através da alteração contínua da área de seção transversal e da alteração a partir dos resultados obtidos experimentalmente da resistência à tração das barras de armadura e da aderência entre o concreto e o aço. Os efeitos da corrosão através da modificação destas três propriedades estruturais são analisados individualmente e conjuntamente.

No instante em que a corrosão começa a se instalar na estrutura, duas análises são feitas, como descritas a seguir:

1) referente à manutenção da carga de serviço da estrutura quando inicia os incrementos de deterioração: com a finalidade de obter a resposta através dos deslocamentos e da fissuração dos elementos – que seria a simulação de uma situação real;

2) referente à não manutenção da carga de serviço quando inicia os incrementos de deterioração: a resposta do programa será através da diminuição da capacidade de carga e dos deslocamentos da estrutura – nesta análise se obtém a perda real da capacidade de suporte de carga para as várias etapas do processo corrosivo.

2.1 - Descrição do modelo empregado no programa

O programa trata exclusivamente de peças de concreto armado que podem estar submetidas aos esforços de tração e de flexão, como por exemplo, tirantes e vigas de concreto armado. O programa se baseia no método dos elementos finitos e trabalha com o modelo de fissura incorporada, baseado nos estudos de Dvorkin et al. (1990).

- Concreto:

O modelo constitutivo utilizado para simular o comportamento do concreto intacto foi o de Ottosen [9], que inclui o efeito dos três variantes de tensão, considera a dilatação, prevê realisticamente as tensões de ruptura, de fornecer curvas tensão-deformação contínuas e ser aplicável a todos os estados de tensão. Trata-se de um modelo elástico não-linear tridimensional que utiliza valores secantes dos parâmetros do material. O modelo se baseia no conceito do índice de não-linearidade β , que é uma medida da proximidade do estado de tensão com a superfície de ruptura. A determinação do valor de β é feita pela relação entre o valor da tensão atual σ pelo valor correspondente da tensão na ruptura σ_f , mantendo-se constantes σ_1 e σ_2 . Os valores de $\beta < 1$, $\beta = 1$ e $\beta > 1$ correspondem, respectivamente, a estados

de tensão localizados dentro, sobre e fora da superfície de ruptura.

- Aço:

O modelo constitutivo implementado para simular o comportamento das barras de aço que compõem a armadura é do tipo elasto-plástico com endurecimento linear. Emprega-se um modelo unidimensional, pois no modelo de elementos finitos empregado para simular a armadura (modelo de armadura incorporada) as barras de aço resistem apenas a esforços normais (de tração ou compressão).

- Fissura:

Os modelos constitutivos empregados para simular a transferência de tensões através da fissura estão relacionados na sequência. Ambos modelos estão de acordo com os princípios da Mecânica da Fratura.

a) Amolecimento linear: a energia de fratura é dada pela área do gráfico tensão x abertura de fissura sobre uma curva definida por uma reta (Figura 1.a).

b) Amolecimento exponencial: a energia de fratura é dada pela área do gráfico tensão x abertura de fissura sobre uma curva definida por uma equação exponencial (Figura 1.b).

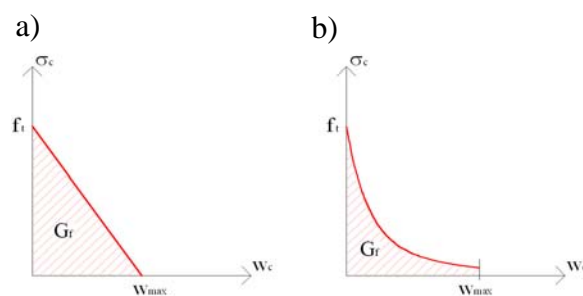


Figura 1 – Modelo constitutivo para fissura: a) com amolecimento linear e b) com amolecimento exponencial.

- Armadura:

O modelo empregado para representar as barras de aço da armadura é o modelo incorporado desenvolvido por Elwi e Hrudrey. A formulação é desenvolvida visando sua aplicação em análise não-linear de estruturas sob estado plano de tensões com solução em deslocamentos.

- Modelo de transferência de tensões por aderência:

A descrição do modelo de transferência de tensão por aderência, proposto por Russo e Romano (1992) apud D'Ávila (2003), Brisotto (2003) e Russo et al. (1990) apud D'Ávila (2003) e Brisotto (2006) está descrito na sequência.

Em peças de concreto armado tracionadas, ocorre um escorregamento relativo entre a armadura e o concreto adjacente sempre que as deformações dos dois materiais têm valores diferenciados. O escorregamento está associado à degradação do vínculo entre concreto e aço e ao aparecimento de fissuras no entorno das barras da armadura. Basicamente, estas fissuras são devidas à tensão de tração proveniente da transferência de tensões do aço para o concreto através da aderência. Para que o concreto fissure em uma determinada seção, a tensão no concreto, nesta seção, deve ser igual à resistência à tração do concreto f_t fazendo com que, conseqüentemente, a deformação de fissuração do concreto ϵ_{ct} seja atingida.

Assim, o estudo do fenômeno da fissuração deve ser baseado na análise da distribuição das deformações ao longo da peça de concreto armado, pois sempre que a deformação no concreto for igual a ϵ_{ct} uma nova fissura se formará. Devido à formação da fissura, a tensão de tração no concreto imediatamente adjacente à fissura deve cair à zero. Novas distribuições de tensão e deformação no concreto e no aço vão acontecer após a fissuração. Se a carga é incrementada além daquela que causou a primeira geração de fissuras, novas fissuras poderão se formar, até que uma

configuração final de fissuras seja estabelecida.

- Modelo de fissura incorporada:

O modelo empregado neste trabalho, proposto por d'Ávila (2003) e modificado por Brisotto (2006), foi baseado no modelo original de fissura incorporada apresentado por Dvorkin et al. (1990)

Os três principais aspectos do modelo original de Dvorkin et al. (1990) são: 1) a localização de deformações envolve o elemento completo como domínio mínimo - forma-se apenas uma fissura por elemento; 2) considera-se a localização de deformações na forma de uma linha de descontinuidade de deslocamentos, que passa pelo centro do elemento; 3) existem duas equações constitutivas definindo o comportamento pós-localização do concreto simples: uma relação tensão-deslocamento para a linha de descontinuidade e uma relação convencional tensão-deformação para o resto do domínio. O elemento finito usado é o QMITC (Quadrilateral with Mixed Interpolation of Tensorial Components). Trata-se de um elemento quadrilátero bidimensional de cinco nós, ver Fig. 2(a), baseado no método de interpolação mista das componentes tensoriais (Dvorkin & Vassolo, 1989). Este elemento adota uma interpolação para os deslocamentos e uma para as deformações e realiza as duas interpolações em conjunto.

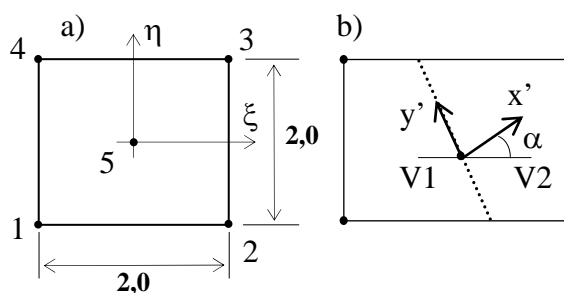


Figura 2 – a) Elemento QMITC; b) Elemento com a linha de descontinuidade.

Na Fig. 2(b), está representado o elemento finito com a linha de descontinuidade de deslocamentos - a fissura. A fissura, que passa pelo nó central

(nó 5), divide o elemento em dois subdomínios: V1 e V2.

A fissuração em estruturas de concreto armado é caracterizada pelo aparecimento de várias fissuras espalhadas ao longo da peça. A inclusão da armadura causa significativas modificações no processo de formação e crescimento das fissuras e, conseqüentemente, na força transmitida através das mesmas. Para representar esta situação, mudanças foram feitas no modelo original de fissura incorporada, descrito anteriormente. As duas principais modificações feitas foram: permitir que o modelo seja capaz de representar um número variável de fissuras em cada elemento; e, incluir a contribuição da armadura no equilíbrio interno de forças. O modelo de transferência de tensão apresentado anteriormente foi usado para introduzir estas modificações.

2.2 - Descrição do modelo estrutural

O programa que servirá de base para esta trabalho é capaz de analisar estruturas contidas no plano; a entrada dos dados do modelo é feita através de um arquivo de texto, onde são fornecidos inicialmente o número de nós e o número de elementos finitos escolhidos para discretização da viga, além das conectividades destes elementos e das coordenadas dos nós e das barras de armadura. As propriedades dos materiais, as condições de apoio, carregamento e outras informações específicas também são dados a serem fornecidos para o programa.

A estrutura analisada neste trabalho consiste em um modelo reduzido de uma viga de seção retangular, de dimensão igual a 7x14x130cm, com vão entre apoios igual a 120cm. O esquema que representa o carregamento é o mostrado na Figura 3, composto por duas cargas concentradas localizadas nos pontos que delimitam o terço médio da viga. Os dados referentes às propriedades do concreto e da armadura estão descrito na Tabela 1. A escolha por esta geometria de estrutura foi feita com base nos ensaios preliminares realizados na pesquisa original de Graeff (2006).

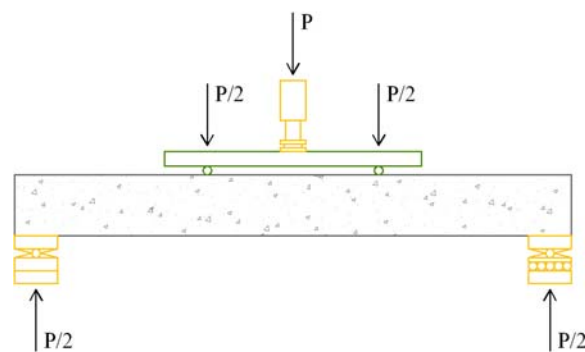


Figura 3 – Esquema do carregamento proposto na estrutura.

Tabela 1 – Propriedades dos materiais utilizados no modelo.

| Material | Propriedade | Valor |
|----------|---|----------|
| Concreto | Módulo de elasticidade (kN/cm ²) | 2600,0 |
| | Coefficiente de poisson | 0,2 |
| | Massa específica (kg/m ³) | 2500,0 |
| | Resistência à compressão (kN/cm ²) | 2,5 |
| | Tensão de escoamento para o aço (kN/cm ²) | 0,179 |
| Aço | Módulo de elasticidade (kN/cm ²) | 21000,0 |
| | Resistência à tração (kN/cm ²) | 50,0 |
| | Área da armadura longitudinal (cm ²) | 2 x 0,5 |
| | Área da armadura de armação e dos estribos (cm ²) | 2 x 0,14 |

Optou-se por trabalhar com metade da viga, dada a existência de um eixo de simetria, a fim de se obter maior rapidez na capacidade de processamento da estrutura. A discretização da malha de elementos finitos foi composta por 24 elementos e 35 nós, como mostra a Figura 4. Os fragmentos de barras que compõem a armadura do elemento também está mostrado na figura abaixo.

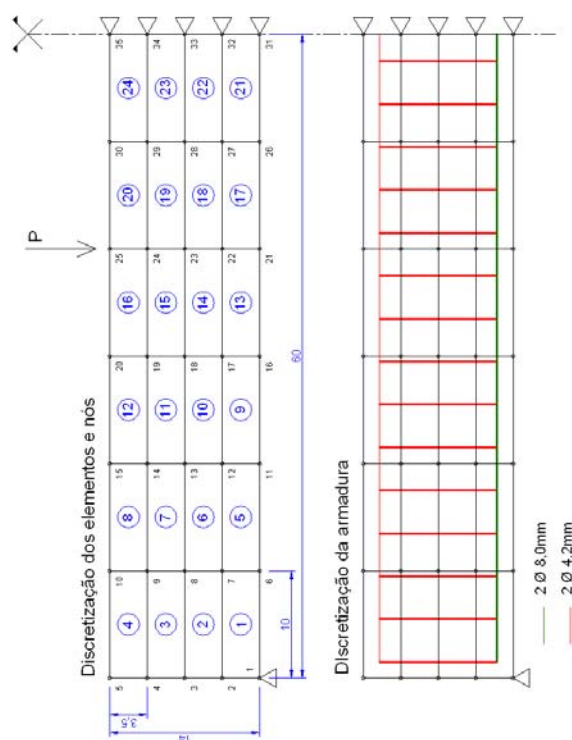


Figura 4 – Discretização da malha de elementos finitos e da armadura.

A carga de serviço da estrutura foi calculada de acordo com os procedimentos de dimensionamento de estruturas de concreto armado da Norma Brasileira NBR 6118 (Associação Brasileira de Normas Técnicas 2006), e o valor obtido foi de 21kN.

3- APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Os incrementos de perda de seção, de aderência e de resistência à tração foram adicionados no trecho da armadura correspondente ao comprimento de 400mm do terço médio da estrutura, e sempre de maneira constante. Ou seja, não serão analisados os efeitos pontuais da corrosão, como a perda de seção mais significativa em um determinado ponto.

A diminuição da área da seção transversal da armadura foi a primeira propriedade a ser modificada no programa. A área da seção transversal foi continuamente forçada a diminuir em incrementos negativos de 1% de área. A

Figura 5 mostra a resposta do programa com relação à carga aplicada em função dos deslocamentos no centro do vão. Nota-se que os deslocamentos são maiores quando a perda de seção é maior. Inicialmente a resposta da estrutura frente à corrosão, através dos deslocamentos, não é significativa, enquanto que a partir de 40% de perda de seção a estrutura começa a se deformar consideravelmente.

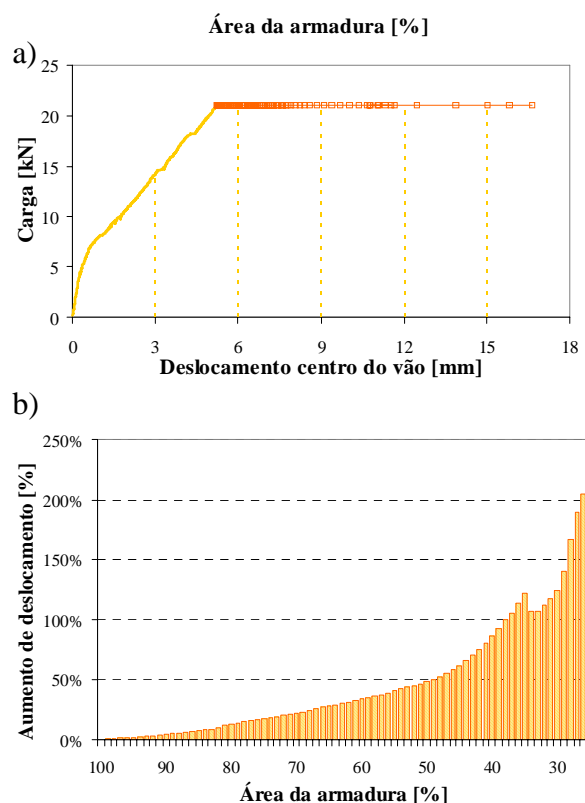


Figura 5 – Gráficos do aumento dos deslocamentos para manutenção da carga: incrementos de perda de seção.

Para o mesmo exemplo foi incrementada a diminuição da aderência somada à diminuição da área de seção.

Na Figura 6a se percebe que os deslocamentos mantêm a mesma magnitude que o gráfico anterior até aproximadamente 40% de perda de seção (60% de área restante), e que os mesmos aumentam consideravelmente para graus de corrosão maior.

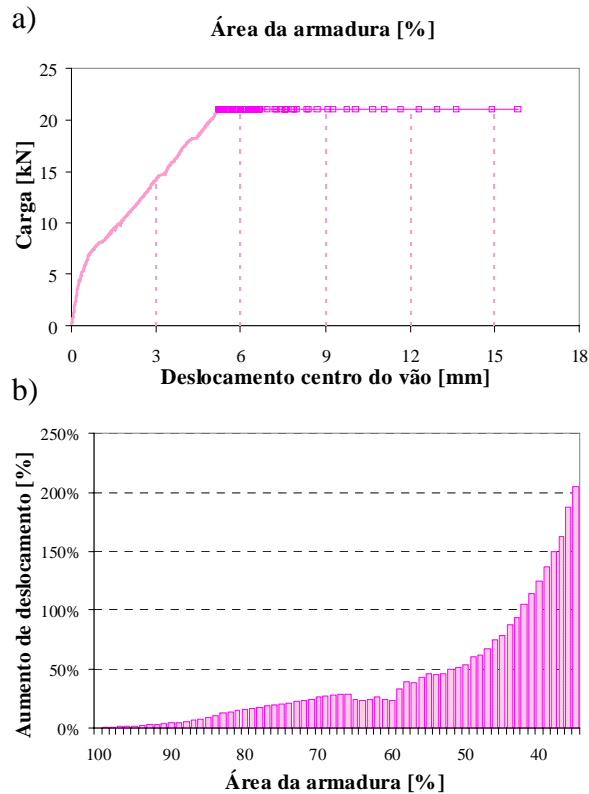


Figura 6 – Gráficos do aumento dos deslocamentos para manutenção da carga: incrementos de perda de seção e de aderência.

O incremento de perda de resistência à tração também foi adicionado à análise para graus de corrosão mais elevados (de acordo com os dados obtidos experimentalmente). Na Figura 7a se percebe que existe um grande deslocamento da estrutura após os 20% de perda de seção, que continua a aumentar consideravelmente após este patamar, enquanto que para perdas de seção menores que 20% os deslocamentos são praticamente iguais aos mostrados nos gráficos anteriores.

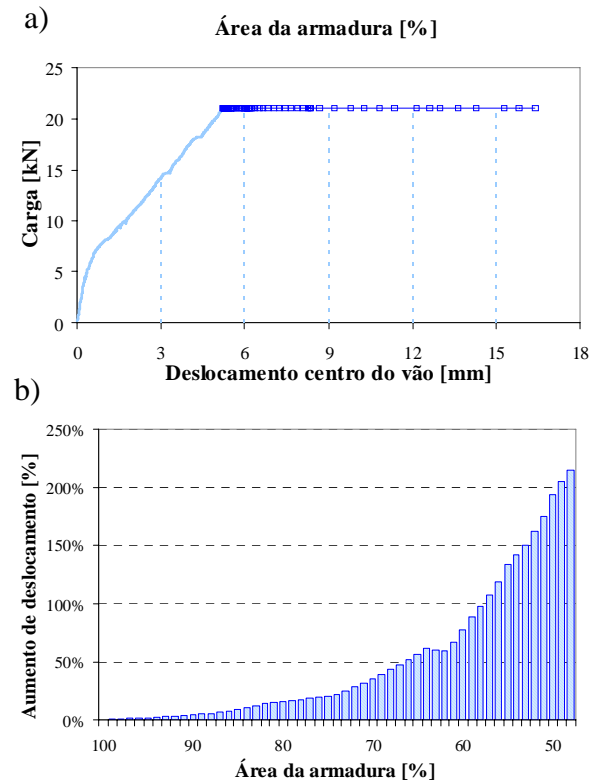


Figura 7 – Gráficos do aumento dos deslocamentos para manutenção da carga: incrementos de perda de seção, aderência e resistência à tração.

A Figura 8 mostra a comparação entre os deslocamentos obtidos com os incrementos de perda de seção, de perda de seção mais a aderência e de perda de seção mais a aderência e mais a resistência à tração. Verifica-se inicialmente que a partir de 14% de perda de área os deslocamentos são maiores quando se incrementa a perda de aderência. Os deslocamentos aumentam ainda mais quando se incrementa a perda de resistência à tração que ocorre a partir de aproximadamente 27% de perda de área.

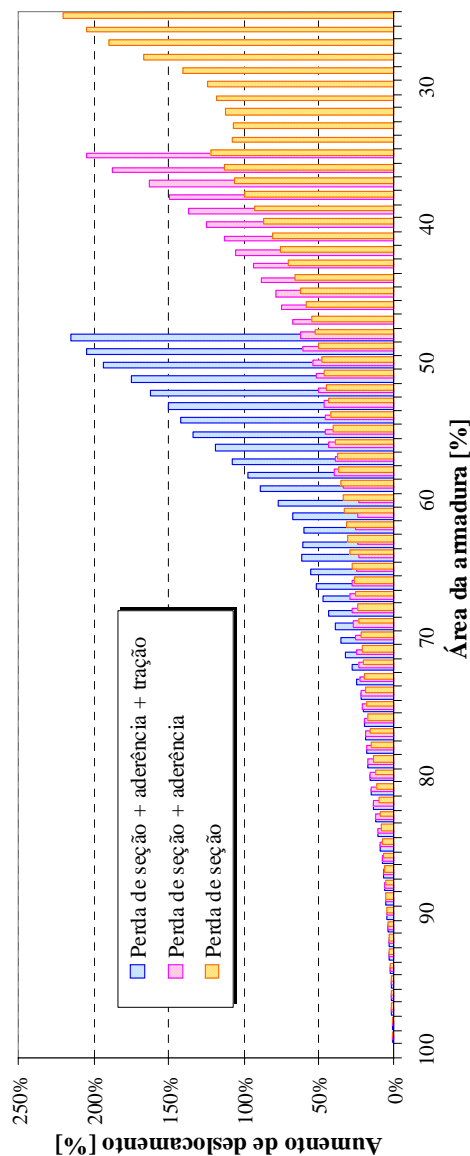


Figura 8 – Comparação do aumento dos deslocamentos para três tipos de incrementos.

Percebe-se nos gráficos acima um período de oscilação, determinado pela diminuição dos deslocamentos para uma contínua perda de área da seção transversal, que pode ser explicado pelo elevado valor de convergência fornecido ao programa para que a estrutura force a continuação do processamento.

Para fins de validação do modelo, foi comparado resultados experimentais com resultados teóricos, referentes ao carregamento de vigas de concreto sem deterioração, como mostra a Figura 9.

Um deflectômetro foi instalado no centro da viga enquanto frações de carga eram aplicadas sobre o elemento.

Percebe-se que as análises apresentaram comportamento bastante semelhante, demonstrando a validade do programa.

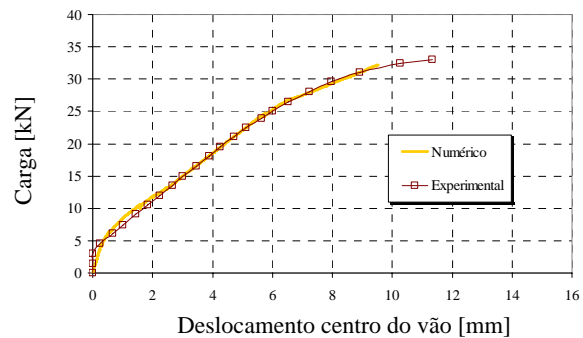


Figura 9 – Comparação entre resultados experimentais e teóricos.

4- CONCLUSÕES

À medida que a corrosão se desenvolve em uma estrutura de concreto armado, quando a mesma se encontra suportando a carga de serviço para a qual foi projetada, percebe-se que uma das respostas se dá através da deformabilidade acentuada conferida pelo aumento dos deslocamentos do elemento estrutural em análise.

Se apenas for considerado a perda de seção da armadura como consequência da corrosão, atinge-se um aumento de 50% da flecha da viga quando a estrutura apresenta 53% de perda de seção; se for considerado a perda de seção acrescida da perda de aderência, o aumento do deslocamento no centro do vão da ordem de 50%, acontece com 48% de perda de seção; e por fim, considerando a perda de seção acrescida da perda de aderência e mais da perda de resistência à tração, o aumento da flecha em 50% acontece para 34% de perda de seção.

A inclusão da perda de resistência à tração altera drasticamente o comportamento da estrutura, quando comparada ao incremento da perda de aderência.

A modelagem que envolveu a implementação das propriedades estruturais afetadas pela corrosão em um programa baseado no método dos

elementos finitos pareceu funcionar adequadamente, e as devidas proporções das consequências individuais das propriedades estruturais puderam ser facilmente observadas.

O objetivo desta análise foi de fornecer uma ferramenta capaz de avaliar e quantificar os danos em uma estrutura infectada pela corrosão de armaduras, através do aumento considerável dos deslocamentos.

5- REFERÊNCIAS

- Roelfstra, G., Adey, B., Hajdin, R. e Brühwiler, E. 1999. The condition evolution of concrete bridges based on a segmental approach, non-destructive test methods, and deterioration models, TRB Transportation Research, Circular 498.
- Silva, S. J. H., Awruch, A. M. e Gomes, H. M. 2003. Análise de estruturas de concreto armado sujeitas à corrosão de armadura por cloretos através do método dos elementos finitos, XXIV Iberian Latin-American Congress on Computational Methods in Engineering, Ouro Preto.
- Vu, K. A. T. e Stewart, M. G. 2000. Structural reliability of concrete bridges including improved chloride-induced corrosion models, Structural Safety, 22, p. 313-333.
- Lorensini, R. V. e Diniz, S. M. C. 2006. Avaliação probabilística da deterioração de estruturas de concreto armado causada pela ação de cloretos, VI Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto.
- Wang, X. e Liu, X. 2006. Bond strength modeling for corroded reinforcements, Construction and Building Materials, 20, p. 177-186.
- Graeff, A. G. 2007. Avaliação experimental e modelagem dos efeitos estruturais da corrosão em elementos de concreto armado, Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2003. Projeto de estruturas de concreto – procedimento, Rio de Janeiro: ABNT/NBR 6118.
- Dvorkin, E. N., Cuitiño, A. M. e Gioia, G. 1990. Finite elements with displacement interpolated embedded localization lines insensitive to mesh size and distortions, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 30, p. 541-564.
- Ottosen, N. S. 1979. Constitutive Model for Short-Time Loading of Concrete, Journal of the Engineering Mechanics Division, 105, p. 127-142.
- d'Ávila, V. M. R. 2003. Estudo sobre modelos de fissuração de peças de concreto via método dos elementos finitos, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Brisotto, D. S. 2006. Um modelo de fissura incorporada para análise da fissuração em peças de concreto armado fletidas via MEF. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.