

SET

13
01
05

PROCEEDINGS



**SIMULAÇÃO NUMÉRICA COMPARATIVA DO COMPORTAMENTO DA
ADERÊNCIA EM MODELOS TRIDIMENSIONAIS E AXISSIMÉTRICOS
DE ARRANCAMENTO**

Vladimir Guilherme Haach

vghaach@sc.usp.br

Josafá de Oliveira Filho

josafa@sc.usp.br

Fernando Menezes de Almeida Filho

ffilho@sc.usp.br

Silvana De Nardin

snardin@sc.usp.br

Ana Lúcia Homce de Cresce El Debs

analucia@sc.usp.br

Departamento de Engenharia de Estruturas - Escola de Engenharia de São Carlos

Universidade de São Paulo

Av. Trabalhador Sancarlene, 400, CEP 13566-590, São Carlos - SP - Brasil

Resumo. A questão quanto à modelagem do comportamento do sistema aço-concreto, freqüentemente é levantada quando da utilização de métodos numéricos para a avaliação de estruturas de concreto armado. Isto se dá principalmente pelo fato deste fenômeno ser de natureza não-linear. Para que a simulação numérica seja representativa é importante que seja bem definido o comportamento constitutivo da interface entre os dois materiais. Este trabalho focaliza a simulação numérica do comportamento da aderência aço-concreto, desenvolvida em modelos de arrancamento, utilizando como ferramenta básica o método dos elementos finitos (MEF). A simulação do contato entre as superfícies da barra de aço e do concreto que a envolve foi feita através de um algoritmo contido no aplicativo Abaqus®, construído com base em técnicas do tipo Newton-Raphson. Os modelos foram construídos com elementos tridimensionais e axissimétricos, para fins de comparação. Resultados de ensaios de modelos de arrancamento, submetidos a carregamento monotônico, foram usados com o intuito de validar a simulação numérica.

Palavras-chave: MEF, interface aço-concreto, aderência, arrancamento, concreto armado.

13 p.

SYSNO	1421099
PROD	003497
ACERVO EESC	

1. INTRODUÇÃO

O material concreto armado deve sua existência à ligação por aderência entre o concreto e o aço. É esta característica fundamental que proporciona o comportamento conjunto e a compatibilidade de deformações entre os dois materiais. Porém este comportamento não é tão fácil de ser explicado, pois inúmeros fatores apresentam influência sobre ele, o que o torna muito complexo.

A aderência é regida basicamente por três mecanismos segundo Leonhardt & Mönig (1973): adesão, atrito e resistência mecânica. A adesão é um mecanismo de coesão entre a barra de aço e a nata de cimento que é destruído tão logo surjam os primeiros deslocamentos relativos. O atrito é o mecanismo que começa a ser solicitado logo em seguida, provocado por tensões de compressão transversais devidas às cargas, pela retração ou pela expansão do concreto. Por fim, surge a resistência mecânica por meio do engrenamento entre a superfície da armadura e o concreto.

Normalmente, a determinação da resistência de aderência é feita por meio de ensaios de arrancamento. Os resultados destes ensaios são mostrados em gráficos de tensão vs. deslizamento ou força vs. deslizamento. O comportamento teórico das tensões de aderência ao longo da barra é apresentado na Fig. 1.

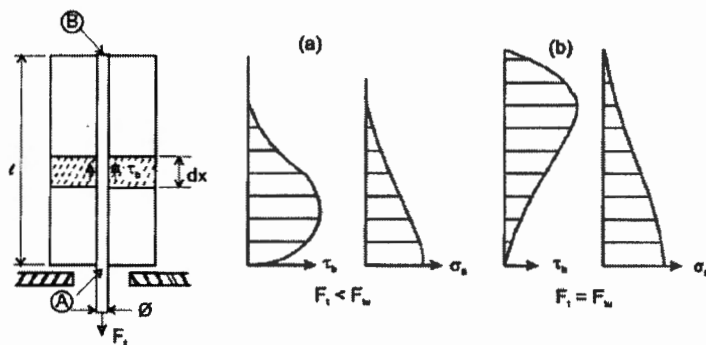


Figura 1 – Distribuição das tensões de aderência no ensaio de arrancamento (Fusco, 1995)

Com o crescente avanço dos métodos numéricos, muitas são as soluções analíticas propostas para a avaliação do comportamento conjunto aço-concreto, principalmente por meio do Método dos Elementos Finitos. A principal dificuldade encontrada para simular o comportamento de aderência está na idealização de um modelo constitutivo para esta interface. Inúmeros são os trabalhos apresentando diferentes representações do contato existente entre os materiais (Désir *et al.*, 1999; Kwak & Kim, 2001; Salari & Spacone, 2001; Kwak & Filippou, 1997; Yankelovsky, 1997; Neto & Assan, 2003; Girard & Bastien, 2002; Kotsovos & Pavlovic, 1995; etc), todavia muitos são os parâmetros envolvidos, o que torna o assunto ainda com grande potencial para a pesquisa. A Fig. 2 ilustra alguns modelos constitutivos para a interface aço-concreto.

O objetivo deste trabalho é representar o comportamento da interface aço-concreto, por meio do aplicativo *Abaqus*[®], com a utilização de modelos tridimensionais e axissimétricos. A modelagem de barras nervuradas dispense um esforço muito grande na geração da malha e no processamento do modelo, desta forma procura-se representar o contato entre uma barra de aço nervurada e o concreto por meio da modelagem de barra lisa. Assim, esta pesquisa procura comparar os resultados obtidos numericamente com modelo experimental de arrancamento.

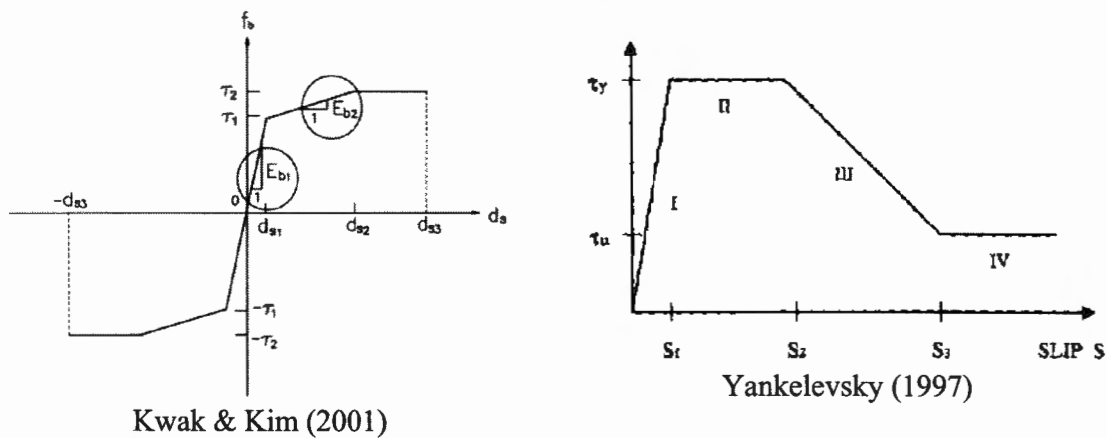


Figura 2 – Modelos constitutivos para a interface aço-concreto

2. SIMULAÇÃO NUMÉRICA

2.1 Materiais

O comportamento de uma estrutura sob carregamento depende essencialmente da relação constitutiva dos seus materiais; de maneira resumida é necessário conhecer os diagramas tensão vs. deformação.

A simulação numérica foi realizada levando em consideração o comportamento linear dos materiais e não-linear do contato.

A Tabela 1 ilustra o comportamento dos materiais obtidos na pesquisa de Fernandes (2000).

Tabela 1. Valores adotados para os materiais com comportamento linear

Parâmetro	Concreto	Aço
Módulo de elasticidade longitudinal (kN/cm ²)	2568	20717
Coefficiente de Poisson	0,2	0,3

Concreto

Consideraram-se, para o comportamento constitutivo do concreto, as características observadas por Fernandes (2000) em sua investigação experimental.

Aço

A armadura, entretanto, pode ser considerada com comportamento linear, pois: consiste de uma conveniência para reduzir o custo computacional e o comportamento de elementos estruturais de concreto armado é fortemente influenciado pelo escoamento da armadura (Kwak & Kim, 2001). Desse modo, a Tabela 1 ilustra o valor adotado para o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson da armadura.

Interface aço-concreto

Numa análise utilizando o MEF como ferramenta básica, as condições de contato se colocam como uma classe especial de restrições que permitem a transmissão de forças entre superfícies do modelo. Estas restrições são descontínuas porque são aplicadas apenas quando as duas superfícies estão em contato. A análise deve ser capaz de detectar quando duas superfícies estão em contato e aplicar corretamente as restrições e, do mesmo modo, removê-las quando estiverem separadas. O aplicativo utiliza o seguinte algoritmo para a análise do contato, baseado em técnicas do tipo Newton-Raphson.

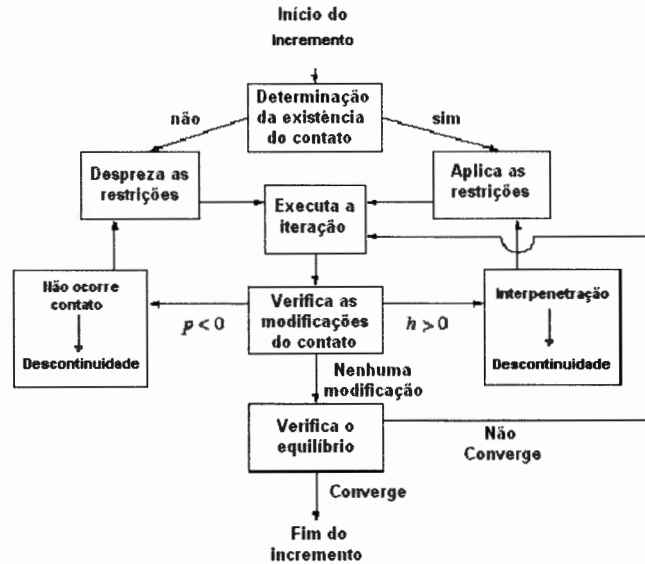


Figura 3 – Algoritmo utilizado na análise do contato

Na interface aço-concreto foram definidas propriedades quanto ao comportamento normal e tangencial.

Para o comportamento normal adotou-se o modelo “*HARD CONTACT*” permitindo a separação das superfícies após o contato. Este modelo faz as seguintes considerações:

$$\begin{aligned} p = 0 &\rightarrow h < 0 \\ h = 0 &\rightarrow p > 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Onde p é o valor da pressão de contato e h é a interpenetração das superfícies em contato.

Para o comportamento tangencial foi utilizado o modelo de atrito de Coulomb. Este considera que não ocorrerá nenhum escorregamento entre as superfícies enquanto a tensão de cisalhamento equivalente (τ_{eq}) for menor que um valor crítico ($\tau_{critico}$) definido pelo coeficiente de atrito (μ) entre as superfícies e a pressão de contato (p).

$$\tau_{eq} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \quad (2)$$

$$\tau_{critico} = \mu * p \quad (3)$$

Onde τ_1 e τ_2 representam as tensões nas duas direções paralelas à superfície em questão.

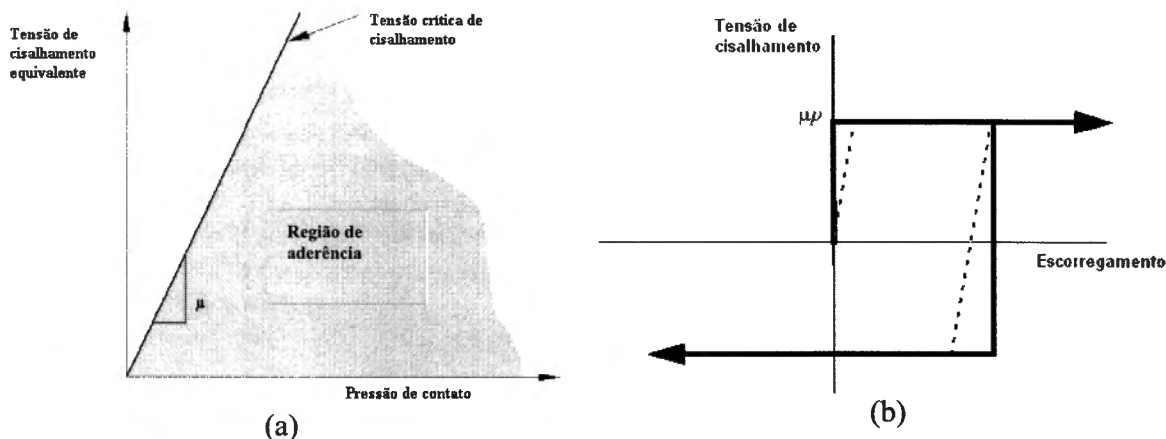


Figura 4 – Modelo de atrito de Coulomb

Leonhardt & Mönning (1973) sugerem que o coeficiente de atrito devido à rugosidade da superfície do aço seja um valor compreendido entre 0,3 e 0,6. No presente estudo adotou-se um coeficiente de atrito igual a 0,4.

Com o intuito de representar efeitos como: retração, engrenamento de agregados, coesão entre outros, foram aplicadas tensões de confinamento apenas na região aderente do modelo, correspondente a resistência à compressão do concreto. Observou-se que sem a aplicação de pressões de confinamento não ocorre convergência, pois o contato não fica definido, gerando movimento de corpo rígido já que a barra modelada é lisa. Conforme o modelo “*HARD CONTACT*”, se a pressão de contato é nula a interpenetração entre as superfícies é negativa o que significa que estas não estão em contato.

2.2 Geometria

A geometria do modelo experimental é mostrada na Fig. 5a.

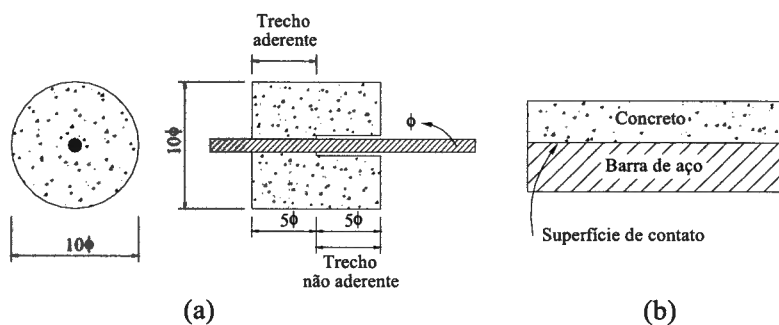


Figura 5 - Geometria do modelo (a) e consideração da interface aço-concreto (b)

De acordo com a pesquisa de Fernandes (2000), foi utilizado o modelo de arrancamento padronizado pelo Código do Rilem-Ceb-Fib (1973) com barras de diâmetro igual a 10 mm. Assim, o comprimento de ancoragem utilizado foi de 5 cm. Ainda, a Fig. 5b ilustra o modelo de interação aço-concreto adotado. Esse modelo não leva em consideração as nervuras da barra de aço, pois, *a priori*, esse é um modelo simplificado e, seu objetivo é o de avaliar a influência dos parâmetros numéricos do contato.

2.3 Discretização e elementos utilizados

Cada tipo de elemento usado na composição da malha de um determinado modelo é reconhecido por algumas características próprias. O nome de cada elemento está associado à família a que pertence, aos graus de liberdade, ao número de nós, à formulação empregada e ao modo de integração. Na análise serão utilizados basicamente elementos axisimétricos e tridimensionais (Fig. 6).

O **C3D8** é um elemento contínuo (C), tridimensional (3D), com oito nós (8) e formulação baseada numa interpolação linear. O **C3D20** é um elemento contínuo, tridimensional, com 20 nós e interpolação quadrática. Opcionalmente a integração pode ser reduzida (**R** depois do 8 ou do 20).

Para a simulação numérica foram utilizados elementos *C3D8R* (modelos tridimensionais) e *CAX4R* (modelos axissimétricos), da biblioteca do ABAQUS®, para o concreto e para o aço. Para a representação do contato o programa possibilita dois métodos para simulação: elementos de contato ou superfícies, dentre os quais o segundo foi o utilizado.

Optou-se por simular apenas ¼ do modelo tridimensional, devido à simetria, para diminuir o esforço computacional. A discretização das malhas do modelo tridimensional e axissimétricos é mostrada na Fig 7.

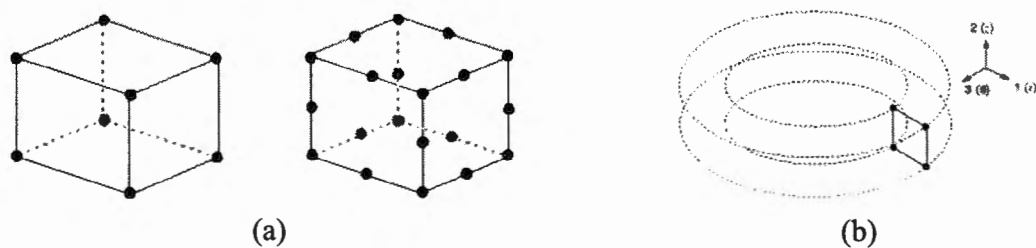


Figura 6 – Elementos tridimensionais (a) elemento axissimétrico (b)

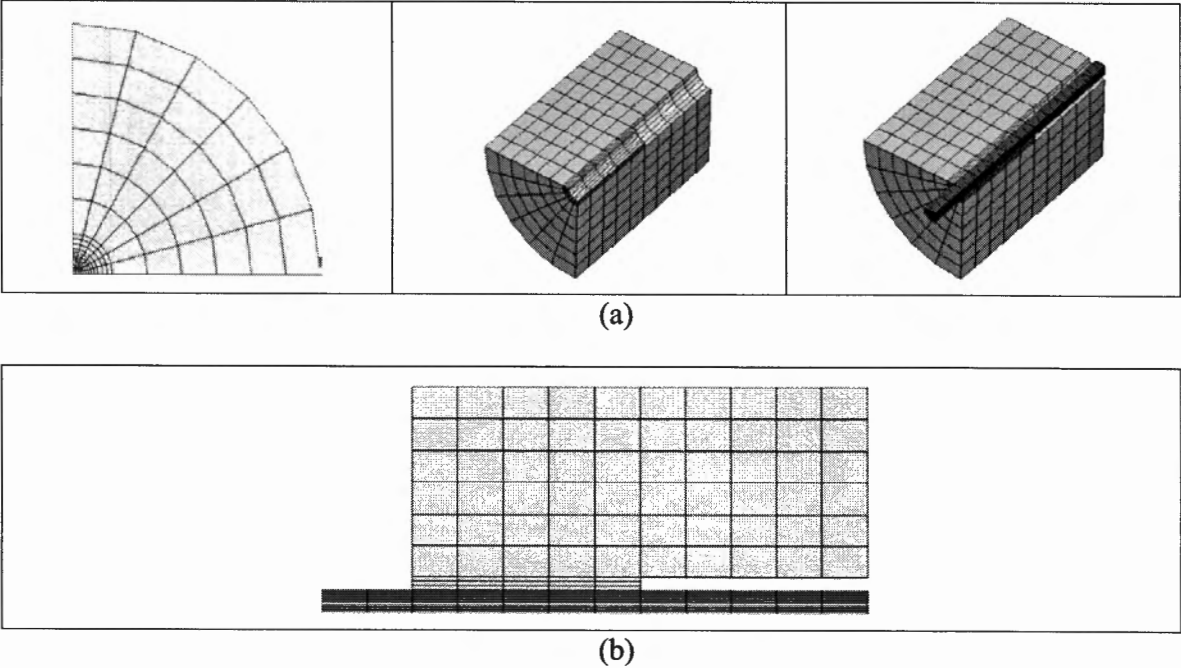


Figura 7 - Discretizações adotadas para os modelos numéricos: tridimensional (a) axissimétrico(b)

A Tabela 3 ilustra a quantidade de elementos utilizados para cada exemplo.

Tabela 3. Quantidade de elementos utilizados para cada modelo numérico

Elemento	Tridimensional	Axissimétrico
Concreto	450	75
Aço	540	108

2.4 Carregamento

O carregamento aplicado no modelo numérico procurou ao máximo representar o mesmo utilizado no programa experimental, onde a barra de aço é presa à máquina de ensaios universal e um dispositivo acoplado a mesma puxa o prisma de concreto (Fig. 8a).

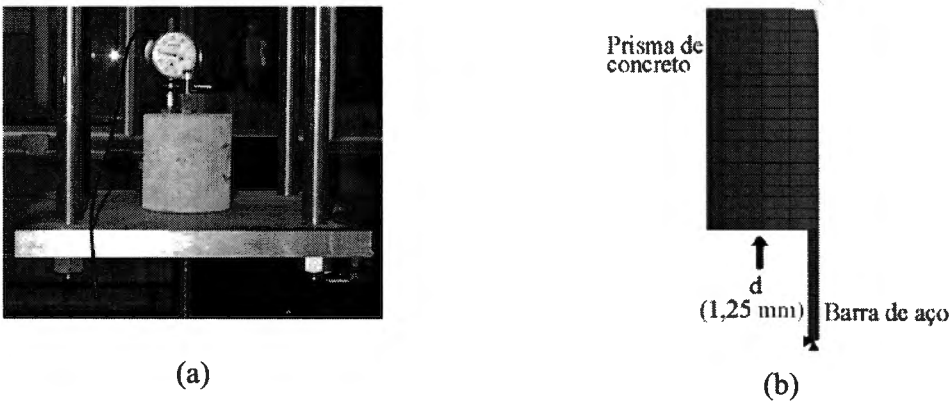


Figura 8 – Vista do ensaio do modelo experimental (a) e esquema do modelo numérico (b)

A aplicação do carregamento foi feita por meio de aplicação de deslocamento do prisma de concreto e engastamento da barra de aço, para representar o esquema de ensaio da Fig. 8a.

O deslocamento aplicado foi de 1,25 mm, valor máximo de deslizamento encontrado no modelo experimental de arrancamento correspondente à tensão máxima de aderência (Fig. 8b).

3. RESULTADOS

A força que solicita o modelo, equivalente ao deslocamento aplicado, por simples equilíbrio, é igual a reação calculada no apoio. Sendo assim os resultados são apresentados em função do crescimento gradual desta reação.

3.1. Modelo tridimensional

Tensões de aderência ao longo do comprimento aderente

A figura 9 mostra o comportamento das tensões de aderência ao longo do eixo da barra, sob influência apenas do confinamento.

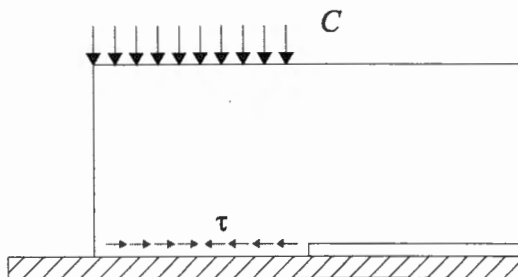
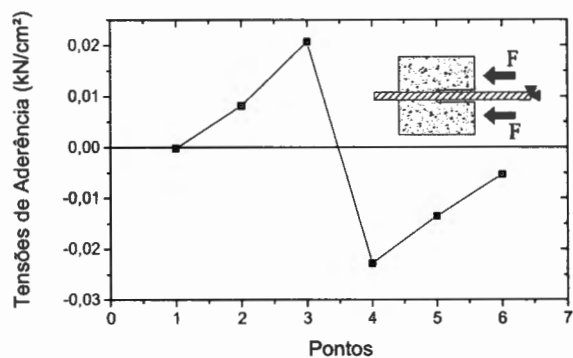


Figura 9 – Variação da tensão de aderência na região de contato devido ao confinamento

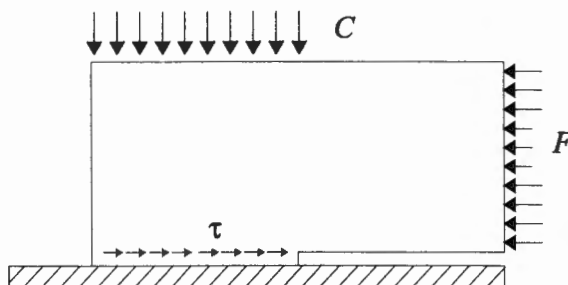
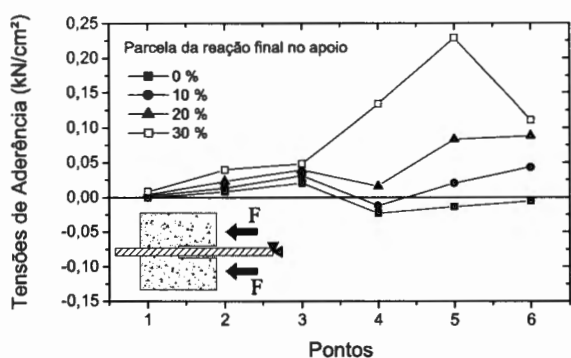


Figura 10 – Mudança de direção das tensões de aderência na região do contato próximo ao carregamento.

Como se pode ver, o confinamento gera tensões de cisalhamento no bloco de concreto em sentidos opostos em relação ao centro da área aderente (Fig. 9), apresentando assim um trecho com tensões de aderência negativas como já era esperado, devido o efeito de Poisson. Desta forma, à medida que o carregamento aumenta, as tensões nesta região trocam de sinal (Fig. 10).

Com a figura 11 se pode observar o comportamento gradual das tensões de aderência.

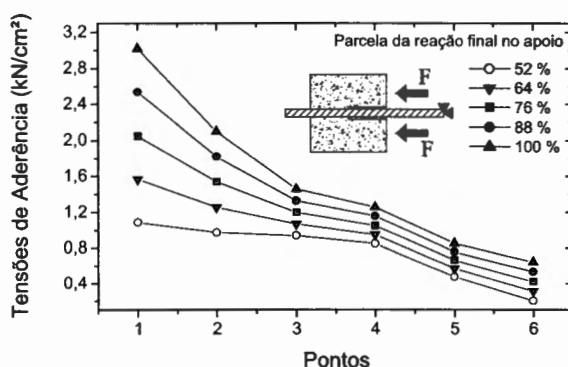
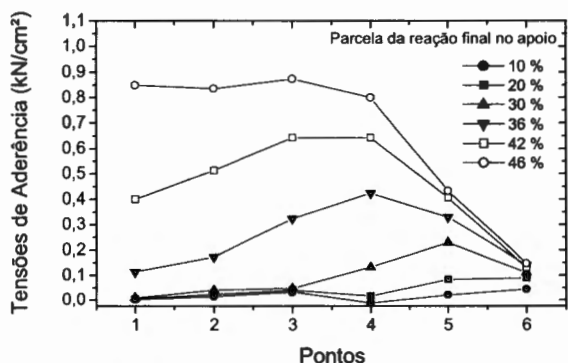


Figura 11 – Variação gradual da tensão de aderência na região de contato

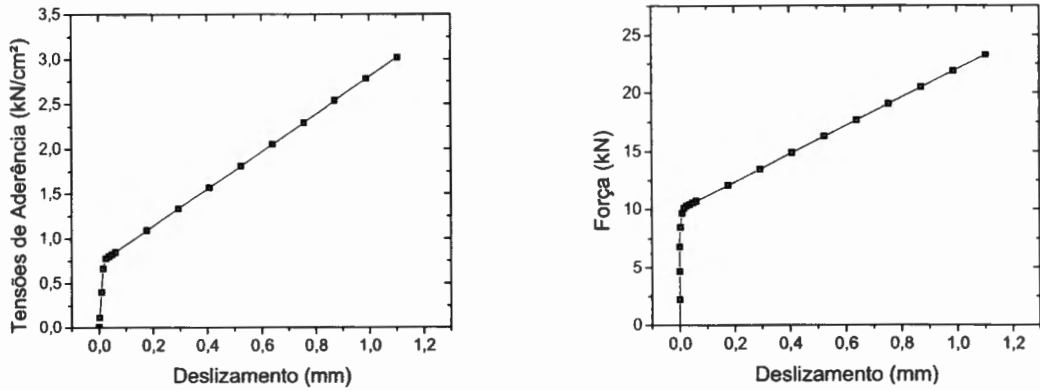


Figura 12 – Variação da Tensão de aderência e da Força vs deslizamento

3.2 Modelo Axissimétrico

Tensões de aderência ao longo do comprimento aderente

As Fig. 13a e 13b mostram o comportamento das tensões de aderência ao longo do eixo da barra sob influência apenas do confinamento e sob a influência do confinamento e carregamento, respectivamente.

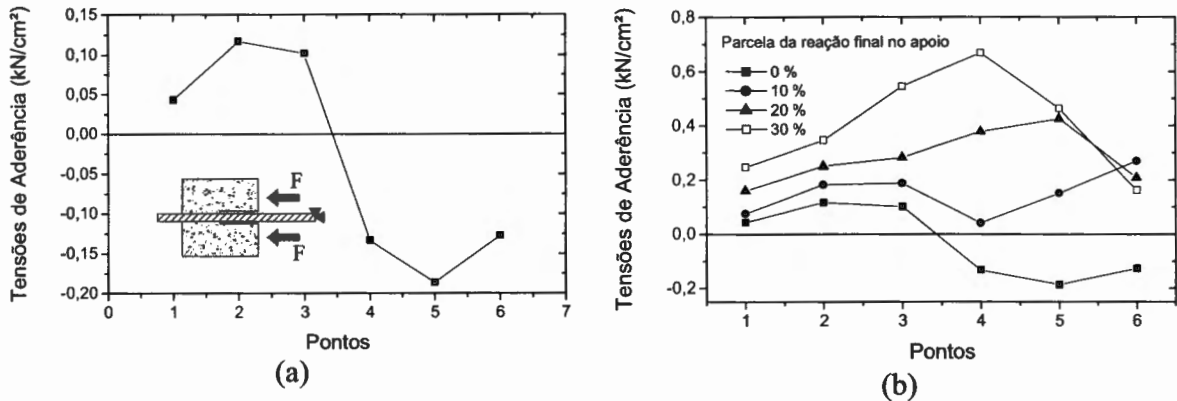


Figura 13 – Variação da tensão de aderência na região de contato devido ao confinamento (a) e Mudança de direção das tensões de aderência (b).

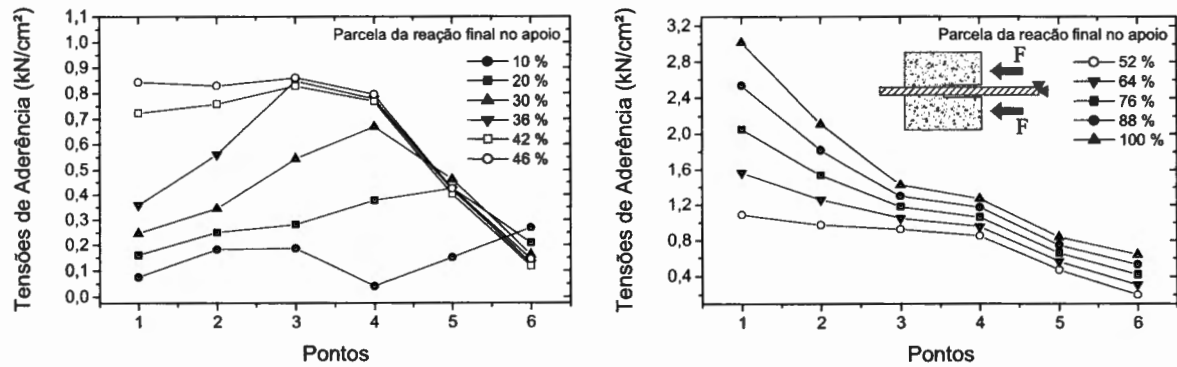


Figura 14 – Variação gradual da tensão de aderência na região de contato

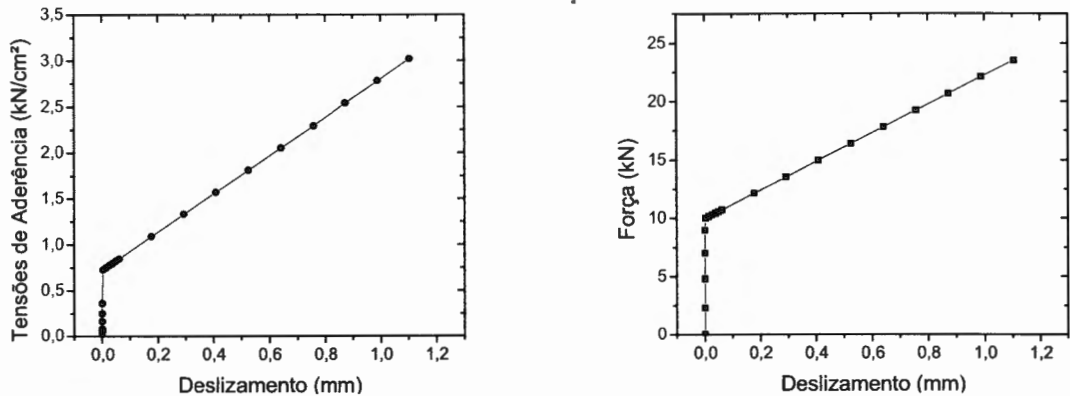


Figura 15 – Variação da Tensão de aderência e da Força vs deslizamento

3.3 Comparação entre os modelos tridimensional e axissimétrico

Com o objetivo de demonstrar a similaridade entre os modelos tridimensional e axissimétrico as figuras abaixo apresentam a comparação das tensões de aderência em três pontos do contato. Pode-se observar que o modelo axissimétrico absorve maiores tensões no início do carregamento (até o passo de 40% da reação final no apoio), contudo após esta etapa as tensões apresentam exatamente o mesmo comportamento do modelo tridimensional.

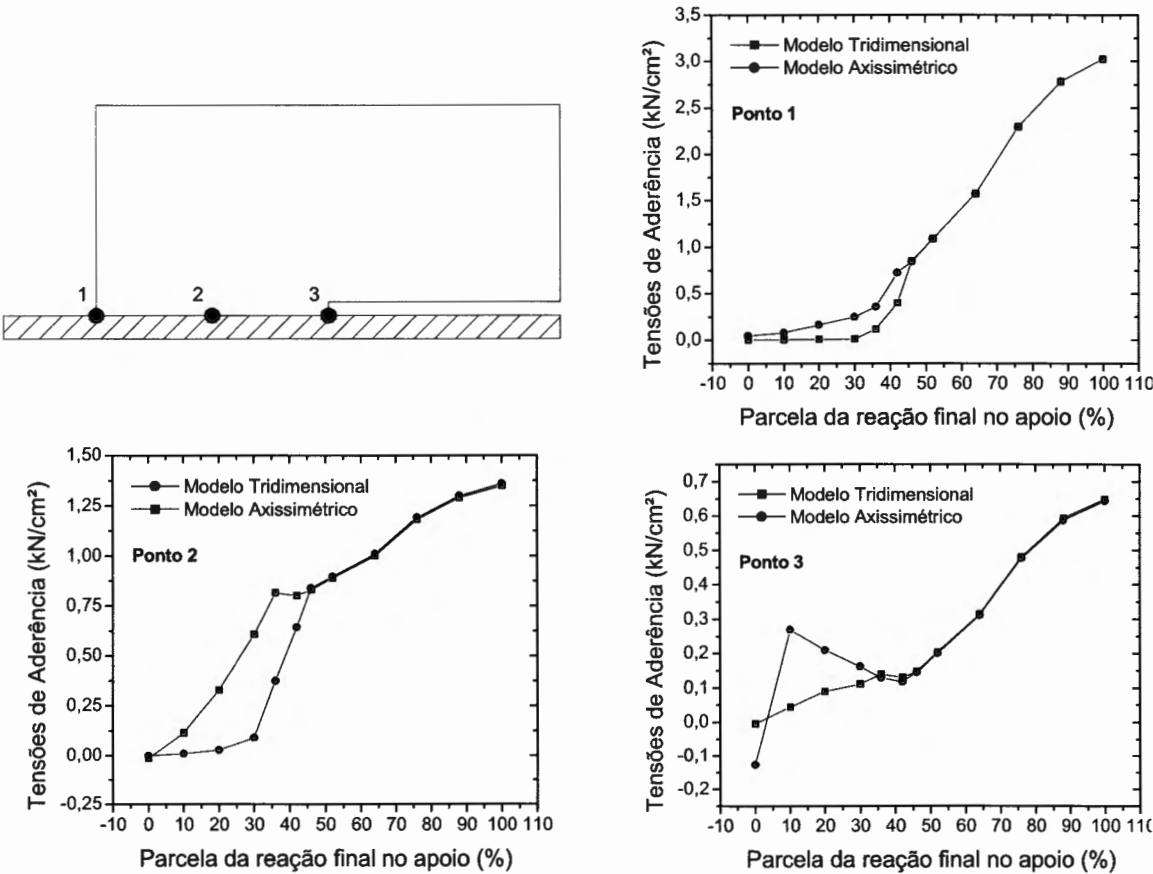


Figura 16 – Comparação dos resultados de tensão de aderência entre os modelos axissimétrico e tridimensional

4. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS NUMÉRICOS COM OS EXPERIMENTAIS

As Fig. 17a e 17b apresentam a comparação dos diagramas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento obtidos pelos modelos numéricos com os obtidos na investigação experimental. Para a apresentação do resultado numérico será mostrada uma única curva, pois o modelo axissimétrico e o modelo tridimensional se comportam exatamente da mesma forma.

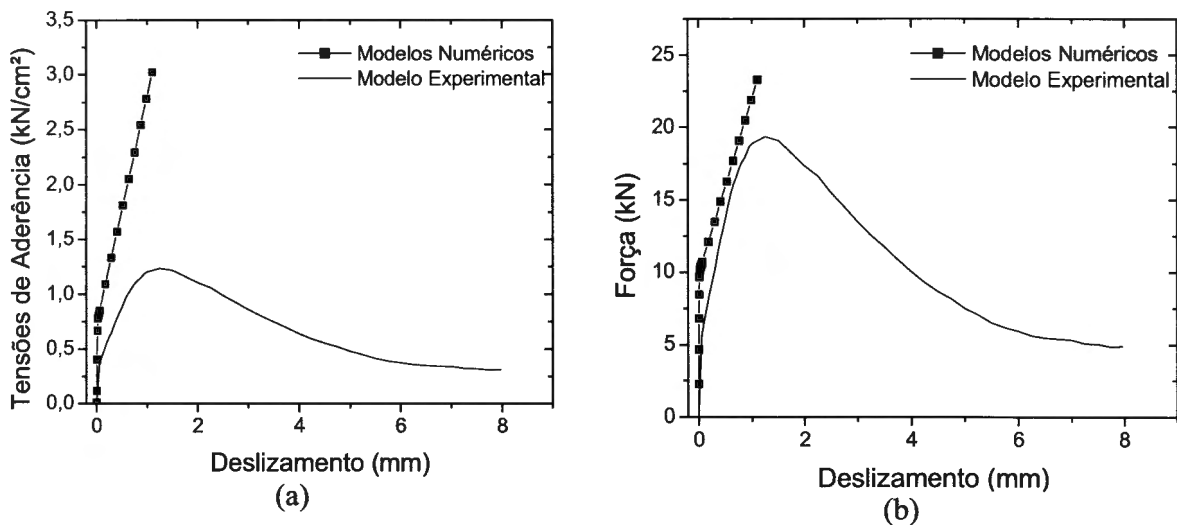


Figura 17 – Diagramas Tensão de aderência e Força vs deslizamento obtidos dos modelos numéricos comparados com os resultados experimentais.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

O modelo axissimétrico e o modelo tridimensional apresentam praticamente o mesmo comportamento, a menos de o primeiro absorver maiores tensões de aderência durante o início do carregamento. Desta forma, para a análise realizada, mostrou-se ser mais vantajoso a modelagem utilizando-se da axissimetria, pois, o tempo de processamento ficou bastante reduzido uma vez que o número de elementos decresceu aproximadamente 1/5 em relação ao modelo tridimensional.

Analisando o comportamento das tensões de aderência ao longo do comprimento aderente com a variação do carregamento, pode-se dizer que o modelo numérico consegue representar o fenômeno apresentado na Fig. 1, ou seja, as tensões de aderência assumem seu valor máximo no ponto mais próximo do carregamento e, conforme o carregamento vai aumentando, um trecho maior da barra é solicitado e desta forma, o ponto de máxima ordenada se desloca para a extremidade contrária.

Os diagramas tensão de aderência vs. deslizamento e força vs. deslizamento permitem observar que o modelo numérico apresenta maior rigidez que o modelo experimental. A análise numérica como realizada não consegue representar o decréscimo da tensão com o deslizamento. Isto se dá, provavelmente, pelo fato de se estar considerando o modelo constitutivo do concreto linear, sem a influência de variáveis como “TENSION STIFFENING”.

Agradecimentos

O grupo de pesquisa agradece a CAPES, ao CNPq e a FAPESP pelo apoio financeiro sem o qual não seria possível o desenvolvimento deste trabalho e, ainda, gostaria de agradecer ao Departamento de Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo pelos equipamentos e corpo docente.

BIBLIOGRAFIA

Abaqus, 2003. Standard User's Manual, versão 6.3. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.

Abaqus, 2003. Theory Manual, versão 6.3. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc.

Désir, J., Romdhane, M. R. B., Ulm, F.-J., & Fairbain, E. M. R., 1999. Steel-concrete interface: revisiting constitutive and numerical models. *Computer and Structures*, V. 71, p. 489-503.

Fernandes, R. M., 2000. *A influência das ações repetidas na aderência aço-concreto*. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 155 p.

Fusco, P.B., 1995. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo, Pini.

Girard, C., & Bastien, J., 2002. Finite element bond-slip model for concrete columns under cyclic loads. *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 128, No. 12, december 1, p. 1502-1510.

Kotsovos, M. D., & Pavlovic, M. N., 1995. *Structural concrete: finite-element analysis for limit-state design*. Trowbridge: Thomas Telford, Redwood Books, 1st Edition, 559 p., ISBN: 0-7277-2027-9.

Kwak, H.-G., & Filippou, F. C., 1997. Nonlinear FE analysis of R/C structures under monotonic loads. *Computer and Structures*, V. 65, No. 1, p. 1-16.

Kwank, H.-G., & Kim, S.-P., 2001. Bond-slip behavior under monotonic uniaxial loads. *Engineering structures*, V. 23, p. 298-309.

Leonhardt, F.; Mönnig, E., 1977. *Construções de concreto: Princípios básicos de dimensionamento de estruturas de concreto armado*. Ed. Rio de Janeiro, Interciência. V. 1, p. 45-60.

Neto, J. M., & Assan, A. E., 2003. Deslizamento entre o aço e o concreto: modelagem computacional de estruturas submetidas à tração uniaxial. IN: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, *Anais...*, PEC/PCC – EPUSP, 7 a 10 de junho de 2003, São Paulo, SP, Brasil, ISBN: 85-86686-18-2, 19 p., [CD-ROM].

Rilem-Fip-Ceb, 1973. Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative recommendations. *RILEM Journal Materials and Structures*, V. 6, No. 32, Março-abril, p. 96-105.

Salari, M. R., & Spacone, E., 2001. Finite element formulations of one dimensional elements with bond-slip. *Engineering Structures*, V. 23, p. 815-826.

Simone, A., Wells, G. N., & Sluys, L. J., 2001. A novel technique for modeling interfaces in reinforced brittle materials. IN: *Fracture Mechanics of Concrete Structures, Proceedings, Fourth International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 28 de maio a 1 de junho, 2001, Cachan, França, Ed.: R. de Borst, J. Mazars, G. Pijaudier-Cabot, J. G. M. Van Mier, Publicado por Swets & Zeitlinger – Lisse, p. 841-846.

Yankelevsky, D. Z., 1997. A two-phase one dimensional model for steel-concrete interaction. *Computer and Structures*, V. 65, No. 6, p. 781-794.