



Análise Numérica - Experimental do Comportamento da Aderência Aço - Concreto

Yadian Menéndez Rosales¹, Dr. Raúl Darío Durand², PhD. Luciano Mendez Bezerra³

¹ Universidade de Brasília (UnB) / Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) / yadian.menendez@gmail.com

² Universidade de Brasília (UnB) / Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) / durand@unb.br

³ Universidade de Brasília (UnB) / Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil (PECC) / lmbz@unb.br

Resumo

A aderência é uma das características fundamentais do funcionamento do concreto armado como material estrutural, através da qual se transmitem esforços do concreto para o aço. Durante os últimos anos, várias pesquisas vêm estudando este fenômeno com a finalidade de estabelecer e determinar os parâmetros que permitam expressar a evolução da tensão de aderência em função do deslizamento da barra. Por outro lado, a criação e validação de modelos numéricos é de grande importância. Através da simulação numérica torna-se possível mensurar a influência de diferentes parâmetros e condições nas estruturas, em tempo reduzido. Este trabalho faz um estudo experimental das propriedades do contato aço-concreto, de forma que as mesmas possam ser utilizadas em modelos numéricos. Para este fim, inicialmente foram realizados ensaios de arrancamento direto em laboratório utilizando corpos de prova com diferentes geometrias e diferentes diâmetros de barra. Posteriormente, após a identificação dos parâmetros necessários à modelagem numérica foram realizadas simulações utilizando o Método dos Elementos Finitos de forma a verificar os resultados numéricos com os experimentais. Por outro lado, após uma série de análises, observou-se que o modelo numérico proposto conseguiu reproduzir com sucesso as principais características do arrancamento, especialmente antes da ruptura.

Palavras-chave

Aderência aço-concreto; estudo experimental, interface; elementos finitos

Introdução

O concreto é um dos materiais mais utilizados no setor da construção, especialmente pela sua resistência à compressão; entretanto, este é um material frágil e com baixa ductilidade. A capacidade resistente à tração do concreto é baixa, de apenas 5% a 10% da sua resistência à compressão. Esta característica provoca que as estruturas precisem ser reforçadas. O reforço de uma estrutura de concreto é necessário dado que só o concreto não é capaz de resistir com segurança aos esforços solicitantes que lhe são impostos.

O concreto armado baseia-se no princípio da ação solidária entre a armadura e o concreto. Esse efeito é possível devido à aderência entre os dois materiais, uma vez que para absorver os esforços solicitantes, os dois materiais atuam em conjunto como uma peça única.

O interesse em se conhecer o complexo mecanismo da aderência entre o aço e o concreto nas estruturas, vem a partir da década de 40, crescendo substancialmente até nossos dias. Através



de análises teóricas e/ou ensaios práticos, pesquisadores têm tido como interesse a explicação desse fenômeno para estabelecer parâmetros que expressem a evolução da tensão de aderência em função do deslizamento da barra de aço, e permita o desenvolvimento de métodos e modelos que serão aplicados na análise comportamental e no cálculo de estruturas

Segundo MONTROYA *et al.* (2001) em virtude do fenômeno da aderência, as armaduras são capazes de absorver as solicitações em um estágio inicial de forma conjunta com o concreto; esta ligação assegura a aderência perfeita entre a armadura e o concreto circunvizinho sob a ação de cargas. Em seguida, quando o processo de fissuração começa, as armaduras absorvem as tensões de tração distribuídas ao longo da peça e de forma mais ou menos regular.

Esta aderência é responsável pela ancoragem da armadura no concreto, pelo equilíbrio na zona de ancoragem com as bielas de compressão, que se propagam pelo concreto a partir da extremidade da armadura, e ainda, serve para impedir o escorregamento dessa armadura nos segmentos entre fissuras, mantendo a união entre os materiais nessas zonas, limitando a abertura de fissura, e uma melhor distribuição das mesmas ao longo da peça, podendo evitar flechas excessivas e rupturas localizadas.

Em geral, o estudo do problema de ancoragem das barras solicitadas à tração, de forma a permitir que os esforços sejam transmitidos ao restante da estrutura, é bastante complexo. Atualmente ele se baseia, em grande parte, na realização e modelagem numérica dos resultados de ensaios de arrancamento de barras de aço de blocos de concreto, cujo objetivo é verificar como responde uma barra isolada ao incremento de tensões de tração. O ensaio mais comum e simples é o de arrancamento, também conhecido como ensaio “*pull-out test*”.

Por outro lado, com o surgimento do computador e os softwares de análise estrutural, tornou-se possível à utilização de modelos mais refinados de cálculo, com o objetivo de aproximar os modelos numéricos à edificação real. Com a utilização do computador, associado a um maior rigor nos cálculos, os resultados são apresentados de forma mais rápida e precisa, simulando as diferentes situações que serão impostas na estrutura.

Procedimentos numéricos computacionais são importantes ferramentas na análise de estruturas de concreto armado. Um dos métodos mais difundidos e mais versáteis é o de elementos finitos, que consiste na discretização de sistemas complexos em elementos menores, analisando cada um destes separadamente e posteriormente, através de condições de interconectividade, permite representar o comportamento de toda a estrutura.

Materiais e métodos

Os materiais utilizados para a fabricação dos corpos de prova foram o concreto e o aço. O concreto empregado foi de densidade normal, com resistência à compressão de 31,61 MPa e módulo de elasticidade de 23,97 GPa aos 28 dias. Ademais, foram utilizados aços CA-50 de 8, 10 e 12 mm de diâmetro. A Tabela 1 se mostra os resultados dos ensaios de caracterização do aço.

Tabela 1 – Características mecânicas do aço.

| Material | Diâmetro da barra | Es (GPa) | Fy (kN) | fy (MPa) | ey (%) |
|----------|-------------------|----------|---------|----------|--------|
| Aço | 8 | 198,40 | 28,19 | 561,20 | 2,83 |
| | 10 | 194,50 | 42,41 | 531,10 | 3,04 |
| | 12 | 195,30 | 68,23 | 558,70 | 3,07 |

Corpos de prova

Para avaliar as características do contato, foram fabricados corpos de prova cilíndricos de 100 e 150 mm de diâmetro, com barras de 8, 10 e 12 mm de diâmetro, colocadas no centro do cilindro. O comprimento de ancoragem adotado para todos os corpos de prova foi de 100 mm (metade do comprimento do cilindro). Para fixar esse comprimento de ancoragem foi colocado um tubo de PVC de 100 mm de comprimento nas barras de aço, o objetivo deste tubo foi impedir o contato entre a barra de aço e o concreto.

Os corpos de prova foram identificados de acordo com o diâmetro do cilindro de concreto e o diâmetro da barra utilizada em cada caso, conforme Figura 1. Para a identificação dos corpos de prova, inicialmente foi colocado o número do diâmetro do cilindro, a seguir, o número do diâmetro da barra de aço. Por exemplo, a nomenclatura 200_12 refere-se a um corpo de prova de diâmetro 200 mm que contém barra de 12 mm.

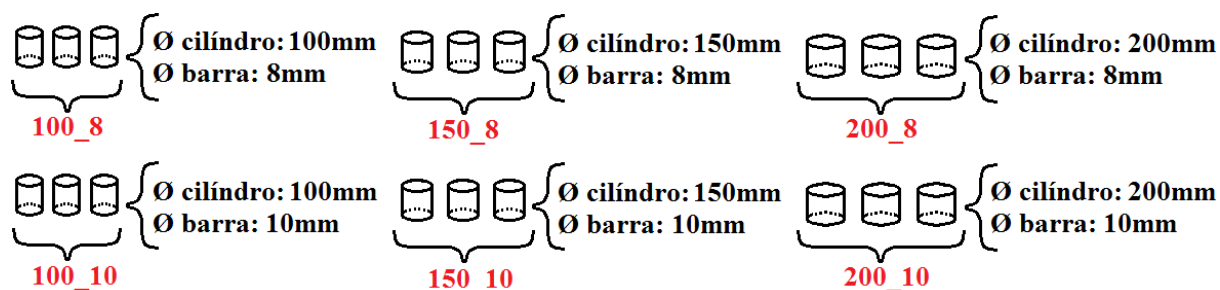


Figura 1 – Distribuição dos corpos de prova para o programa experimental.

Ensaio experimentais

Para o ensaio de arrancamento foi utilizada a Máquina de Ensaio Universal Multiaxial (MTS Landmark 370.10) de capacidade máxima de 100 kN, mostrada na Figura 2a. Esta máquina está instrumentada na garra superior com *Linear Variable Differential Transducer* (LVDT) para capturar os deslocamentos atuantes. Também, está equipada com um controlador e um sistema de aquisição de dados “*Station Manager*” que permite a obtenção e armazenamento dos dados do ensaio conforme Figura 2b.

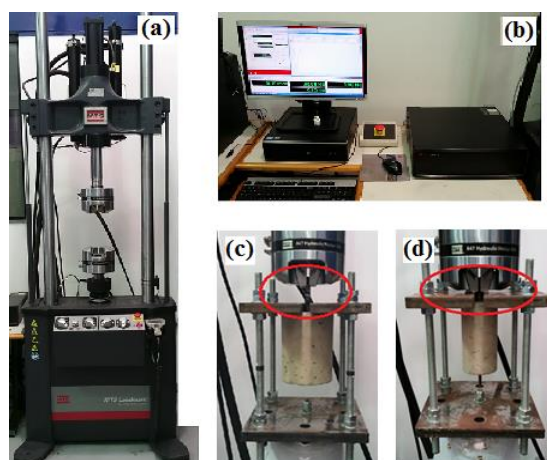


Figura 2 – (a) Máquina MTS Landmark 370.10 utilizada, (b) Controlador de dados e computador com software profissional, (c) Ensaio dos corpos de prova de diâmetro 150 mm, (d) Ensaio para os corpos de prova de diâmetro 100 mm.



Para a realização do ensaio de arrancamento foi necessário construir uma estrutura adicional, cujo objetivo foi impedir o movimento do bloco de concreto durante o ensaio. Esta estrutura está composta por duas chapas de aço de espessura de 1 polegada que são ligadas mediante quatro barras roscadas de aço de diâmetro 20 mm, porcas e arruelas de pressão pesada. As chapas são de aço SAE 1045 e as barras roscadas de aço SAE 1020. As dimensões das chapas de aço e o diâmetro das barras laterais permitem que a rigidez da estrutura seja muito alta, e de fato, muito maior que a rigidez da “ligação” entre o aço e o concreto. Por esse motivo pode-se considerar que a estrutura se mantém rígida durante o ensaio de arrancamento. Os ensaios de arrancamento foram realizados conforme a Figura 2c e Figura 2d para os corpos de prova de 150 e 100 mm respectivamente.

As curvas de tensão de aderência versus deslizamento foram obtidas por meio do monitoramento experimental da força de arrancamento e do deslizamento. A tensão de aderência τ foi determinada como a tensão média desenvolvida ao longo de uma área de superfície de contato equivalente, dada pela expressão:

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot d_b \cdot l_d} \quad (1)$$

onde P é a força atuante, d_b é o diâmetro da barra e l_d é o comprimento de ancoragem.

Modelagem numérica

A modelagem numérica foi realizada utilizando a biblioteca FemLab, que permite a análise em 2D e 3D de elementos isoparamétricos, aplicável em estruturas de concreto armado. Esta biblioteca foi desenvolvida na linguagem de programação “Julia”. Julia é uma linguagem de programação dinâmica, de alto nível e alto rendimento para cálculos científicos e técnicos. Este tem um compilador avançado, mecanismos para a execução em paralela e uma extensa biblioteca de funções matemáticas.

Para cada simulação numérica usando o FemLab foi necessário elaborar um arquivo de entrada (*script* escrito em Julia) com as características individuais de cada ensaio. Neste *script* foi primeiramente definida a geometria e as características dos tipos de elementos que compõe o modelo: elementos sólidos, de barra e de interface. Posteriormente foram definidos os modelos constitutivos para cada material e atribuídos os valores dos parâmetros requeridos em cada modelo constitutivo. A seguir, foram definidas as condições de contorno essenciais (restrições de deslocamento) e as condições de contorno naturais (forças impostas). Finalmente, cada arquivo de entrada de dados é executado para obter os resultados da análise: arquivos de saída contendo os estados de deslocamento, tensão e deformação do domínio.

Modelagem dos materiais

Para a simulação do concreto foi utilizado o modelo elástico linear, este modelo apresenta algumas limitações como por exemplo, a não previsão de ruptura e de deformações. Em todo caso, foi utilizado este modelo porque o objetivo deste trabalho centra-se na “ligação” entre o aço e o concreto. O modelo elástico linear utiliza como parâmetros apenas o módulo de elasticidade (E_c) e o coeficiente de Poisson (ν)

O modelo utilizado para simular o comportamento do aço foi o modelo elástico perfeitamente plástico que depende do Módulo de Young (E_s) e a tensão de escoamento (σ_s). Este modelo é

frequentemente utilizado para representar o comportamento das barras de reforço da armadura e o comportamento é estudado a partir do diagrama tensão versus deformação.

Já, a interface foi simulada utilizando um modelo “Tensão de aderência-deslizamento” baseado no modelo recomendado no código europeu CEB-FIP (2010). O modelo utilizado é multilinear e está dividido em quatro trechos delimitados pelos valores de deslizamento característicos s_1 , s_2 e s_3 . O primeiro trecho corresponde ao carregamento elástico com rigidez k_s . O segundo e terceiro trechos estão associados com a plastificação do contato quando a tensão atinge o valor máximo $\tau_{m\acute{a}x}$ e a posterior perda de aderência. Já o último trecho corresponde à resistência residual do contato τ_{res} . A Figura 3 mostra o gráfico do comportamento da aderência utilizado.

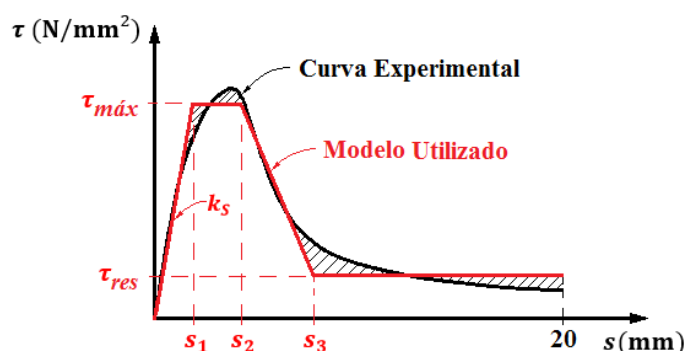


Figura 3 – Modelo numérico utilizado para simular o contato aço-concreto.

Resultados e discussão

Resultados experimentais

Na Tabela 2 são mostrados os resultados das médias das tensões máximas de aderência e da força máxima de arrancamento obtida nos ensaios.

Tabela 2 – Resultados dos ensaios de arrancamento.

| Ø da barra | Nome do corpo de prova | Média da força máxima de arrancamento (kN) | Média da tensão máxima de aderência (MPa) |
|------------|------------------------|--|---|
| 8 | 100_8 | 24,03 | 9,56 |
| | 150_8 | 27,21 | 10,83 |
| 10 | 100_10 | 28,50 | 9,07 |
| | 150_10 | 35,51 | 11,30 |
| 12 | 100_12 | 35,65 | 8,93 |
| | 150_12 | 42,97 | 10,77 |

Analisando os resultados obtidos nestes ensaios, comprova-se que existe um aumento das tensões quando aumenta o volume de concreto ao redor da barra de aço. Para os corpos de prova com barras de Ø8 mm se registrou um aumento total de 13%, nos corpos de prova com barras de Ø10 mm o incremento foi de 25% e nos corpos de prova com barras de Ø12 mm o aumento foi de 21%. Sendo assim, pode-se afirmar que o aumento de volume provoca um aumento significativo do confinamento passivo sobre a barra.

Por outro lado, na Figura 4 são mostrados os valores das tensões máximas de aderência em função do diâmetro das barras e do diâmetro dos corpos de prova. Nos corpos de prova de diâmetro 100 mm as tensões tendem a diminuir, este comportamento pode ser provocado

porque na medida que aumenta o diâmetro das barras nestes corpos de prova, o cobrimento vai se aproximando ao cobrimento crítico para a ocorrência de ruptura do contato por fendilhamento do concreto (3Ø barra). Nos corpos de prova 150 mm diâmetros as tensões se mantêm praticamente constante.

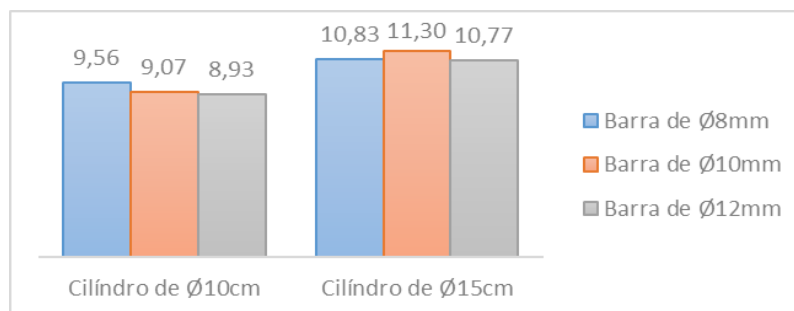


Figura 4 – Influência da variação do diâmetro da barra nas tensões de aderência.

Cálculo da resistência do contato (k_s)

A rigidez do contato (k_s) é o principal parâmetro que define o comportamento da ligação entre o aço e o concreto. Esta rigidez é simplesmente a relação que existe entre a variação da tensão de aderência e a variação de deslizamento correspondente e pode ser determinada como a inclinação da curva da tensão de aderência *versus* o deslizamento da barra no domínio elástico, expresso pela seguinte equação:

$$k_s = \Delta\tau/\Delta s \quad (2)$$

onde k_s é a rigidez do contato, $\Delta\tau$ é a variação da tensão de aderência e Δs é a variação de deslizamento da barra. A continuação, na Tabela 3 são mostrados os valores de k_s obtidos.

Tabela 3 – Valores obtidos da rigidez do contato (k_s).

| Ø da barra | Nome do corpo de prova | Média da rigidez do contato (N/mm ³) | Desvio padrão da rigidez do contato (N/mm ³) |
|------------|------------------------|--|--|
| 8 | 100_8 | 7,21 | 0,38 |
| | 150_8 | 7,07 | 0,43 |
| 10 | 100_10 | 8,29 | 0,24 |
| | 150_10 | 7,95 | 0,38 |
| 12 | 100_12 | 8,61 | 0,36 |
| | 150_12 | 8,57 | 0,32 |

Estes resultados evidenciam que existe aumento da rigidez do contato a medida que aumenta o diâmetro da barra, possivelmente provocado pelo aumento da superfície de contato e maiores nervuras, o que causa maior travamento. Esse aumento pode ser provocado também pelo aumento das dimensões das nervuras na medida que aumenta o diâmetro das barras. Por outro lado, pode-se observar que ao aumentar o diâmetro do corpo de prova, para um mesmo diâmetro de barra, a rigidez do contato (k_s) não apresenta variações significativas. Essa tendência foi observada nos três diâmetros de barra estudados nesta etapa.

Resultados numéricos

O comportamento da tensão de aderência para os corpos de prova de diâmetro 100 e 150 mm e barras de 8 mm são mostrados nas Figura 5a e Figura 5b respectivamente. As curvas

intituladas com os nomes dos corpos de prova correspondem aos ensaios experimentais, a curva intitulada de “NUMÉRICA” corresponde aos resultados dos modelos numéricos elaborados utilizando os parâmetros dos materiais e do contato obtido experimentalmente.

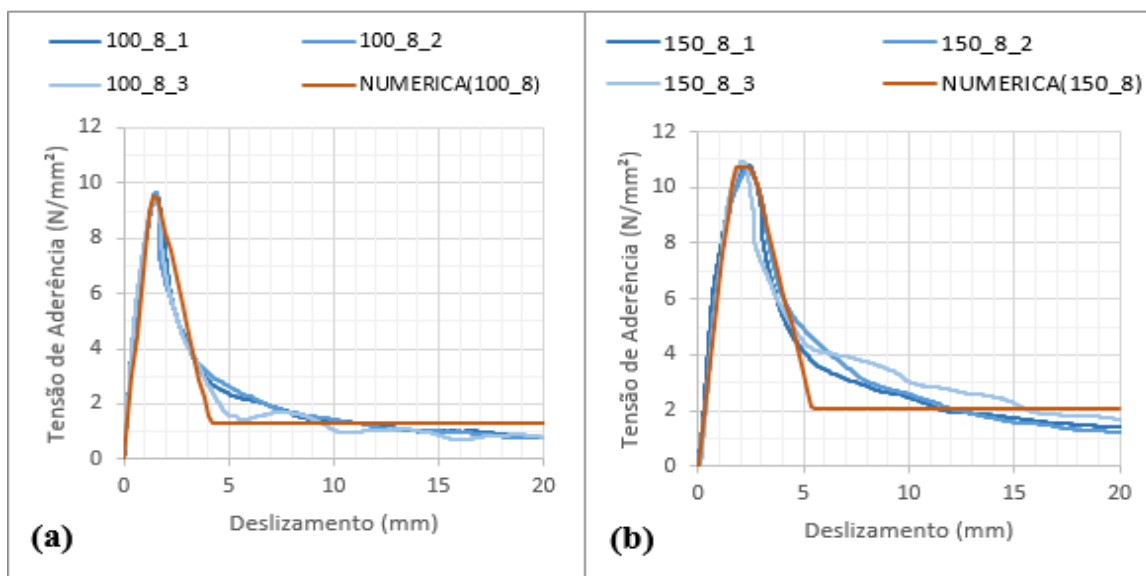


Figura 5 – (a) Comportamento da aderência nos corpos de prova de diâmetro 100 mm e barras de 8 mm de diâmetro (100_8), (b) Comportamento da aderência nos corpos de prova de diâmetro 150 mm e barras de 8 mm de diâmetro (150_8).

Nestas figuras pode-se observar que as tensões obtidas numericamente em geral apresentam um comportamento similar às tensões resultantes da investigação experimental. A maior diferença foi observada após a ruptura do contato, onde o modelo numérico assume um comportamento bilinear. A perda de aderência nos corpos de prova ensaiados em laboratório ocorreu gradualmente e de forma exponencial. Essa diminuição gradual da tensão de aderência é dada pela redução do atrito que existe entre as nervuras das barras e o concreto circunvizinho. Desta forma, confirma-se a hipótese da existência de uma componente de atrito durante o deslizamento.

Por outro lado, nas simulações numéricas foi analisado também o desempenho dos elementos de contato ao longo do comprimento de ancoragem. Na Figura 6 pode-se observar para o modelo cilíndrico de 100 mm de diâmetro com barras de 8 mm de diâmetro (100_8) o comportamento das tensões ao longo do comprimento da ancoragem conforme aumenta o deslocamento imposto. Os tons de azuis representam os incrementos de deslocamentos antes da ruptura da aderência e os tons vermelhos correspondem aos incrementos após essa ruptura. Sendo assim, neste modelo a ligação foi rompida no incremento de número sete (inc.7), o qual corresponde a um deslocamento imposto de 1,4 mm. Neste gráfico pode-se observar que a tensão de aderência se comporta de maneira quase regular em todo os elementos de contato. Da mesma forma, o aumento dessa tensão também é de forma regular para cada incremento de deslocamento imposto.

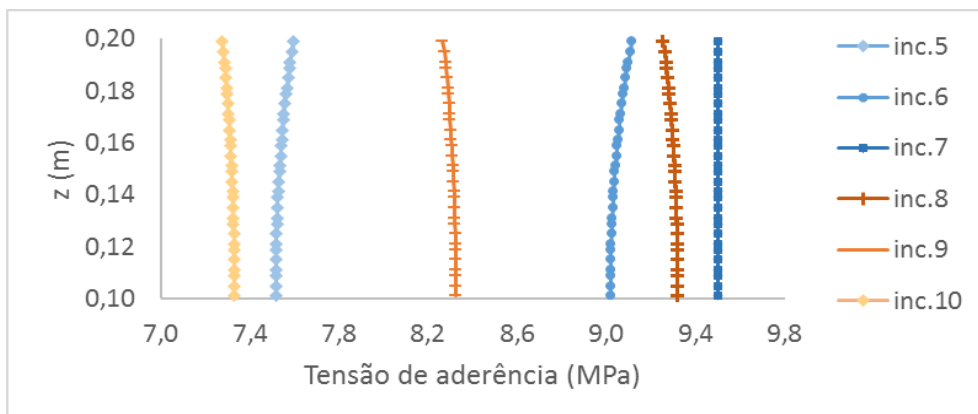


Figura 6 – Distribuição de tensão de aderência ao longo do comprimento de ancoragem. Modelo (100_8).

Na Figura 7 é apresentada-se o comportamento da tensão de aderência um incremento antes e um após a ruptura da ligação aço-concreto.

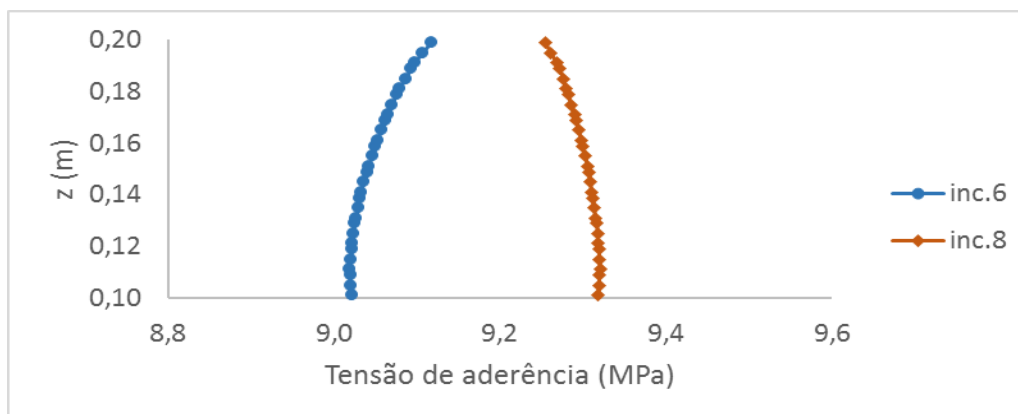


Figura 7 – Distribuição de tensão de aderência ao longo do comprimento de ancoragem antes e depois da ruptura da aderência. Modelo (100_8).

Nesta figura pode-se observar com maior precisão a distribuição de tensões de aderência que apresentam os elementos de junta ao longo do comprimento de ancoragem. O comportamento manifestado pela interface antes e após a ruptura do contato aço-concreto foi oposto. Antes da ruptura da aderência, os elementos de contato mais próximos ao ponto de aplicação da carga apresentam maiores tensões geradas pelo deslizamento da barra; por esse motivo, os elementos mais afastados desse ponto recebem menores solicitações. No entanto, posterior ao pico, os elementos de contato mais próximos ao ponto crítico não suportam maiores tensões provocadas pelo deslizamento da barra; logo, as tensões são transmitidas aos elementos menos solicitados para manter o equilíbrio do sistema, promovendo a ruptura progressiva.

É importante destacar que este comportamento foi observado em todas as simulações realizadas nesta etapa. Desta forma, confirma-se as hipóteses dos campos de tensões desenvolvidos na interface durante o ensaio de arrancamento que alguns pesquisadores obtiveram através de análises numéricas (CRUZ & BARROS (2004) e FONSECA (2014)).

Por outro lado, analisando o comportamento do concreto e do aço durante o ensaio de arrancamento. Na Figura 8 é mostrado o campo de tensões presente no concreto circunvizinho

à barra do modelo (100_8) quando esta atingiu um deslizamento de 1,2 mm (um incremento antes que for rompida a aderência).

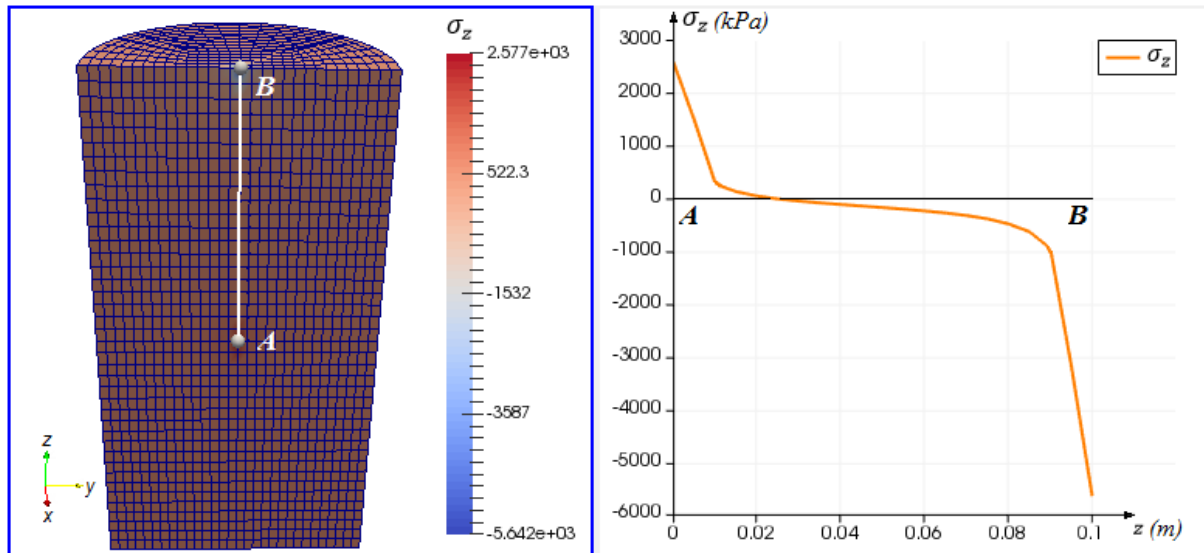


Figura 8 – Comportamento das tensões no concreto circunvizinho à barra, modelo (100_8).

Como se observa na figura, no ponto A (início da interface) aparecem esforços de tração no concreto. Essas zonas tracionadas são provocadas porque a barra tende a levar o concreto circunvizinho a ela produto da aderência aço-concreto. Já na vizinhança do ponto B (fim da interface) existem esforços de compressão no concreto. As tensões de compressão são causadas pela impossibilidade de movimento do concreto no eixo de aplicação da carga. Neste sentido, quando a barra desliza, o concreto também tende a se movimentar junto com a barra, mas a restrição de movimento aplicada na face do concreto o impede. Desta forma, se confirma a hipótese de LEONHARDT & MOMMING (1979) em relação à presença de tensões de tração e compressão no concreto devido ao deslizamento da barra.

Conclusões

Baseado no estudo realizado e nos resultados experimentais e numéricos, chegou-se as seguintes conclusões:

- *O confinamento passivo por meio do aumento do cobrimento de concreto se traduz em aumento das tensões de aderência.* Desta forma de confinamento foram obtidos resultados significativos. Neste sentido, quando aumentou o cobrimento foi registrado um aumento das tensões máximas maior a 10%.
- *A forma de ruptura da aderência em geral foi por deslizamento da barra “bond failure”.* A forma de ruptura da aderência predominante nos ensaios de arrancamento foi por deslizamento da barra. Embora, em um corpo de prova de diâmetro 100 mm com barra de 12 mm a ruptura do contato foi por fendilhamento do concreto “*splitting failure*”.
- *A rigidez do contato (k_s) aumentou na medida que aumentou o diâmetro das barras.* Os valores obtidos confirmam que existe um aumento na rigidez do contato na medida



que aumenta o diâmetro da barra. Acredita-se que este aumento é provocado por que com o aumento do diâmetro da barra, aumenta a área de contato aço-concreto.

- *A simulação numérica conseguiu reproduzir com sucesso o comportamento da tensão de aderência.* Embora o modelo numérico utilizado para simular a interface assume um comportamento linear nos trechos da curva, em geral, foi cumprida a premissa de manter iguais o trabalho realizado pelo deslizamento nas duas curvas (experimental e numérica) no domínio analisado (de 0 a 20 mm).
- *O comportamento dos elementos de junta antes e após a ruptura da aderência é oposto.* Antes da ruptura da aderência, os elementos de contato mais próximos ao ponto de aplicação da carga apresentam maior capacidade de absorver as tensões geradas pelo deslizamento da barra. Depois que a aderência é rompida, os elementos de contato mais próximos ao ponto crítico não são capazes de dissipar as tensões provocadas pelo deslizamento da barra, nesse sentido, as tensões são transmitidas aos elementos menos solicitados para manter o equilíbrio da estrutura.

Referências

- COMITE EURO-INTERNACIONAL DU BETON. Bond Action Bond Behaviour of Reinforcement. Bulletin d'Information 151. 1982.
- CRUZ, J.; BARROS, J. Modeling of bond between near-surface mounted CFRP laminate strips and concrete. Computers and Structures, Vol. 82, n. 17-19, p. 1513-1521, 2004
- DURAND, R.; FARIAS, M. Nonlinear Joint Element for The Analysis of Reinforcement Bars Using Finite Elements. 10th World Congress on Computational Mechanics, p.16, 2012.
- FÉDÉRATION INTERNATIONALE DU BÉTON / INTERNATIONAL FEDERATION FOR STRUCTURAL CONCRETE – CEB-FIP MODEL CODE. 2010.
- FONSECA, A. Método dos Elementos Aplicados na simulação numérica do arrancamento de armaduras. Universidade Nova de Lisboa (UNL), Tese de Mestrado, 2014.
- LEONHARDT, F.; MOMMIG, E. Construções de concreto. Rio de Janeiro: Interciência, Vol. 6, 1979.
- MACGREGOR, J.G.; WIGHT, J.K. Reinforced Concrete. Mechanics & Design. 6th Edition, p.1157, 2012.
- MONTOYA, P.J.; MESEGUER, Á.G.; CABRÉ, F.M. Hormigón Armado. 14 Edición, E. Gustavo Gili, p.846, 2001. P. 61,
- TAVARES, A.J. Aderência Aço-Concreto: Análise Numérica dos Ensaios Pull-Out e Apulot. Universidade Estadual Paulista (UNESP), Tese de Mestrado, p.141, 2012.
- YEIH, W.; HUANG, R.; CHANG, J. J.; YANG, C. C. A Pullout Test for Determining Interface Properties Between Rebar and Concrete. Advanced Cement Based Materials, Vol. 5, No. 96, p.57-65, 1997.