



ESTUDO DA EVOLUÇÃO DA TENSÃO DE ADERÊNCIA EM ENSAIOS DE ARRANCAMENTO DIRETO

Yadian Menéndez Rosales

Dr. Raul Dario Durand Farfan

yadian.menendez@gmail.com

raul.durand@gmail.com

Pós-graduação em Estruturas e Contrução Civil (PECC), Universidade de Brasília, Campus Darcy Riveiro, Brasília 70910-900, Brazil

Abstract. *O ensaio de arrancamento direto "pull-out-test" é um dos ensaios mais utilizados mundialmente, este é recomendado por vários códigos normativos com a finalidade de determinar os parâmetros de aderência entre a barra de aço e o concreto. Este tipo de ensaio permite a determinação das características de aderência entre os materiais envolvidos e é aplicável em problemas de concreto armado, reforço com fibras, solo grampeado, etc. Através de análises teóricas e/ou ensaios práticos, pesquisadores têm tido como interesse estabelecer os parâmetros que expressem a evolução da tensão de aderência em função do deslizamento da barra para desenvolver modelos numéricos de contato que serão aplicados nas análises de estruturas. Este trabalho faz um estudo paramétrico da influência da resistência à compressão do concreto no comportamento da aderência aço-concreto. Para realizar este estudo foram simulados ensaios de arrancamento direto em corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro, com uma barra de aço de 8, 10 e 12 mm de diâmetro no centro do cilindro. No estudo, foi utilizado o "Model Code 2010" para determinar os valores da tensão máxima de aderência e tensão residual em função da resistência à compressão do concreto. Da mesma forma, foi utilizada a ABNT NBR 6118:2014 para determinar o módulo de elasticidade do concreto em função da resistência à compressão do mesmo. Finalmente, verificou-se que as tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem descrevem um comportamento similar na medida que aumenta a resistência à compressão do concreto. Neste artigo se aprecia também uma maior transferência de tensões ao longo do comprimento de ancoragem, conforme aumenta o diâmetro da barra de aço.*

Keywords: *Aderência, Concreto, Interface, Elementos Finitos.*

1 INTRODUÇÃO

A aderência é a responsável pela ancoragem da armadura no concreto, impedindo o escorregamento dessa armadura nos segmentos entre fissuras. A distribuição da "tensão de aderência" ao longo do contato tem importância decisiva em relação à capacidade de carga das peças de concreto armado. Esse conhecimento é essencial para a compreensão do comportamento de ancoragens retas, dos ganchos e das emendas por transpasse das barras da armadura nos elementos estruturais.

Na pesquisa realizada por Rosales (2016) foi feito um estudo experimental das propriedades do contato aço-concreto a partir da realização de 48 ensaios de arrancamento direto (*pull-out-test*). A partir dos parâmetros de contato obtidos em laboratório, o autor fez uma modelagem numérica do ensaio de arrancamento utilizando o Método dos Elementos Finitos. Para simular o contato aço-concreto utilizou-se um modelo de aderência multilinear baseado no modelo de aderência proposto pelo MODEL CODE (2010). Na Figura 1(a) mostra-se o comportamento da tensão de aderência *versus* deslizamento da barra para corpos de prova cilíndricos de diâmetro 100 mm com barras de aço de 10 mm de diâmetro. Nesta figura, também em cor vermelha, representou-se o comportamento numérico da tensão de aderência obtido no modelo numérico para estas condições.

Posteriormente, em outra pesquisa, o modelo de aderência utilizado foi aprimorado levando em consideração o efeito das nervuras das barras e do atrito entre a barra e o concreto após a ruptura da aderência. Sendo assim, foram simulados novamente os ensaios experimentais de arrancamento direto feitos por Rosales (2016). Na Figura 1(b), mostra-se o novo comportamento da tensão de aderência *versus* o deslizamento da barra no modelo numérico elaborado sob as mesmas condições que o ensaio experimental.

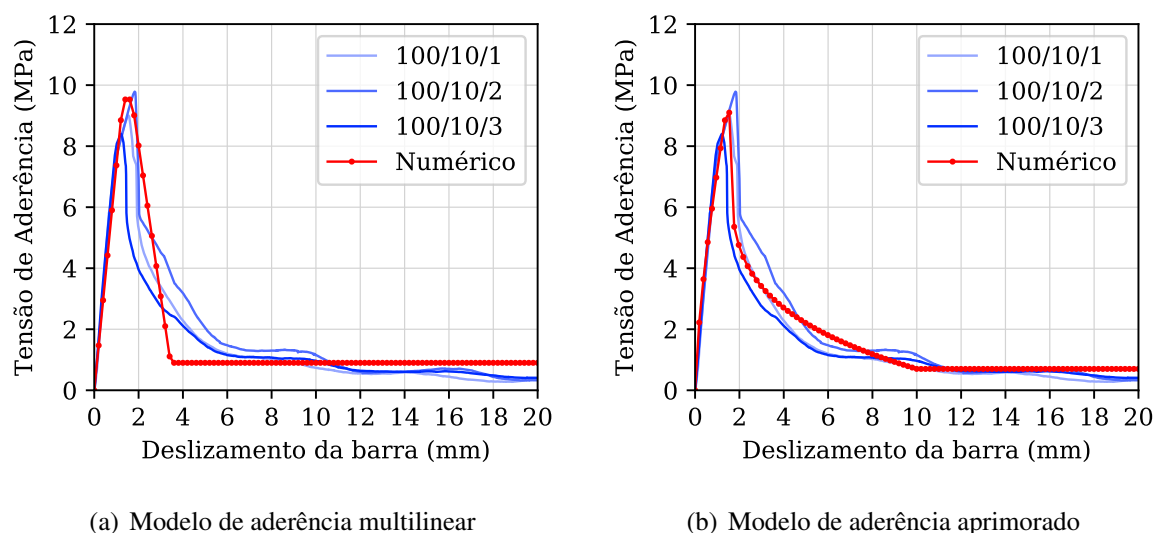


Figure 1: Curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento da barra para corpos de prova cilíndricos de 100 mm de diâmetro com barra de 10 mm de diâmetro.

Levando em consideração o estudo feito por Rosales (2016), este trabalho visa realizar um estudo paramétrico da influencia da resistência à compressão do concreto no comportamento da aderência aço-concreto. Para realizar este estudo utilizou-se o modelo aprimorado de contato aço-concreto, baseado no modelo proposto pelo MODEL CODE (2010).

Após a realização do estudo paramétrico, determinou-se que as tensões de aderência aumentam de maneira gradual, a medida que aumenta a resistência à compressão do concreto. Por outro lado, a medida que aumentam os diâmetros das barras existe maior transferência de tensões, devido que as barras de maior diâmetro apresentam maior superfície de contato e maior rigidez.

1.1 ESTUDOS NUMÉRIOS PREVIOS SOBRE ADERÊNCIA

No desenvolvimento de modelos para a análise de estruturas de concreto armado, as considerações associadas ao comportamento da aderência podem determinar a precisão da resposta numérica. Um dos primeiros modelos de aderência foi apresentado por Bresler & Bertero (1968). Neste modelo as propriedades elásticas da interface foram reduzidas para levar em consideração a deterioração progressiva da aderência. Desde então, os modelos tratam a região de contato como contínua. Na maioria dos modelos usados na atualidade as leis da aderência definidas dependem somente da relação entre a tensão tangencial e o deslizamento da barra.

Cox & Herrmann (1998) desenvolveram um modelo baseado na teoria da plasticidade. A superfície limite de ruptura do modelo é definida por uma função complexa que leva em conta o dano, o endurecimento cinemático e o endurecimento isotrópico da superfície da interface. Os autores adotaram uma única variável interna d , que representa a degradação da ligação. Desta forma, para pequenos valores de dano no concreto o mecanismo predominante é a aderência química, já para danos consideráveis, predomina a aderência por atrito. Devido à elevada complexidade do modelo, este apenas permite realizar simulações monotônicas do ensaio de arrancamento. O modelo foi calibrado e validado a partir de vários resultados experimentais.

Sena-Cruz *et. al* (2009) estudaram o contato aço-concreto em aços convencionais, aços galvanizados e aços galvanizados com revestimento epoxy. Para cada tipo de barra, os corpos de prova foram ensaiados aos 3, 7 e 28 dias de idade do concreto. Posteriormente o autor desenvolveu um modelo computacional baseado nos trabalhos efetuados por Russo *et. al* (1990), Sena-Cruz & Barros (2004) e no modelo de aderência proposto pelo CEB-FIP (1990) para a determinação da relação tensão de aderência *versus* deslizamento da barra de forma que a diferença entre as curvas experimentais e os resultados numéricos tenham um erro mínimo. O autor obteve numericamente o comportamento do contato ao longo do comprimento de ancoragem como mostra a Figura 2.

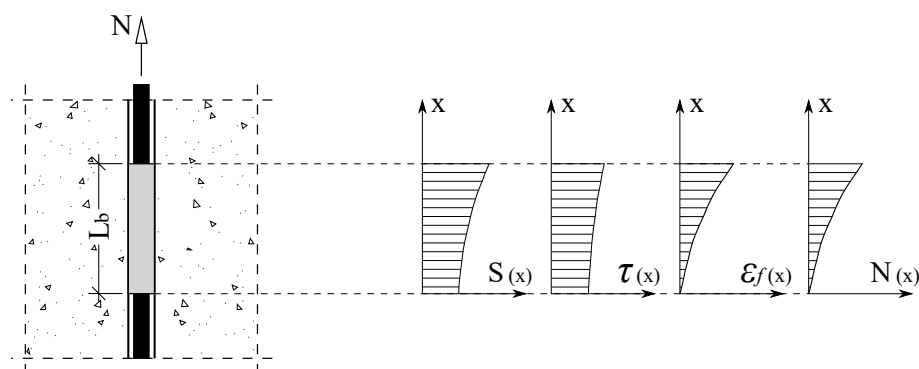


Figure 2: Comportamento do contato no modelo analítico - Sena-Cruz *et. al* (2009).

Jendele & Cervenka (2006) utilizaram o software *ATENAS*[®] para simular numericamente vigas de concreto armado usando modelos de aderência. Os autores também simularam numericamente ensaios experimentais de arrancamento para validar o modelo de contato escolhido. Esse modelo de contato foi desenvolvido por Bigaj (1999), baseado igualmente no modelo proposto pelo CEB FIP (1990). Os autores reproduziram satisfatoriamente o comportamento da tensão de aderência ao longo do comprimento de contato como mostrado na Figura 3.

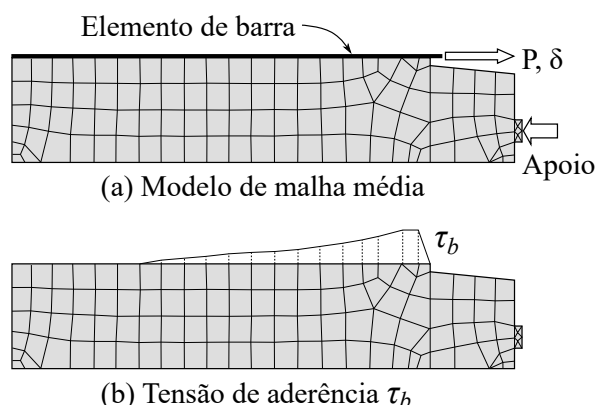


Figure 3: Comportamento da Tensão de Aderência para um deslocamento de 0,8 mm. Modelo de Bigaj - Modificado - Jendele & Cervenka (2006).

Brisotto (2011) utilizou um modelo de interface bidimensional que relaciona as componentes normais e tangenciais das tensões de interface assim como seus respectivos deslizamentos. O modelo foi desenvolvido utilizando a teoria de elasticidade e plasticidade através da definição de uma resposta elástica da superfície de ruptura e sua evolução. As superfícies de ruptura foram delimitadas por duas funções F_1 e F_2 que representam as parcelas de aderência por atrito e aderência mecânica respectivamente. O autor desprezou a parcela correspondente à aderência por adesão química, argumentando que essa parcela é muito pequena. Finalmente, o autor conseguiu reproduzir curvas de tensão de aderência *versus* deslizamento da barra de ensaios experimentais. O mesmo concluiu que o modelo foi capaz de representar as falhas por arrancamento e fendilhamento que aparecem nos elementos de contato em função da perda de aderência.

Tavares (2012) utilizou o software *ATENAS*[®] para simular numericamente ensaios de arrancamento "Pull-Out-Test" e ensaios de arrancamento modificados "Apull-Out-Test", realizados anteriormente por Vale-Silva (2010) e Soudais (2011). O modelo usado para simular a interface foi um modelo baseado no critério de Mohr-Coulomb, com tensão cisalhante onde a superfície de ruptura inicial corresponde à condição de Mohr-Coulomb. Após a tensão atingir essa condição, esta superfície torna-se uma superfície residual que corresponde unicamente a aderência por atrito. O autor utilizou a formulação de Lundgren (2002), que define essas superfícies de ruptura empregando duas funções F_1 e F_2 . A função F_1 , descreve as combinações de tensões que definem o início do escorregamento por atrito, incluindo a adesão f_a . A outra função, F_2 , descreve o limite da falha por deslizamento. O autor concluiu que, os resultados numéricos ficaram muito próximos dos resultados experimentais, tanto para os ensaios de arrancamento quanto para os ensaios de arrancamento modificado. O código de cálculo utilizado permitiu reproduzir os diferentes tipos de falha de aderência (deslizamento e fendilhamento).

Casanova *et al.* (2012) implementaram um modelo baseado na evolução da tensão de aderência em função do deslizamento da barra. Para levar em conta este enfoque é necessário introduzir forças internas na direção dos elementos de barra que simulam o concreto. Os autores dividiram a implementação do modelo em quatro etapas:

1. Avaliação do deslocamento relativo " s " entre o aço e o concreto.
2. Cálculo das forças nodais na direção dos elementos de barra que representam o aço.
3. Introdução de relações cinemáticas na direção normal ao deslocamento.
4. Implementação do modelo dentro da teoria dos pequenos deslocamentos.

Os autores conseguiram reproduzir satisfatoriamente o padrão global de fissuração dos corpos de prova simulados, assim como o padrão de aparição da primeira fissura. Por outro lado, o modelo proposto representou com aceitável precisão a transferência de forças do concreto para o aço.

Murcia-Delso *et al.* (2013) desenvolveram um modelo de aderência baseado em uma lei semi-empírica de tensão de aderência *versus* deslizamento da barra para simular o comportamento da aderência em elementos armados e concretos confinados. Posteriormente, Murcia-Delso & Shing (2015) aprimoraram este modelo, o novo modelo de aderência proposto leva em consideração o dano do concreto sob a ação de cargas cíclicas, a tensão de escoamento das barras e a fissuração do concreto. As melhorias introduzidas incluem a habilidade de simular as tensões normais provocadas pela ação do tempo, as nervuras das barras e a influência das aberturas das fissuras no concreto circunvizinho. Este modelo foi implementado no programa computacional ABAQUS®.

2 PROCEDIMENTOS E MÉTODOS

Neste estudo foi avaliada numericamente a influência na tensão de aderência de diferentes resistências à compressão do concreto (20, 25, 30, 35, 40, 45 e 50 MPa). Neste sentido, foram simulados numericamente ensaios de arrancamento direto "*pull-out-test*" utilizando corpos de prova cilíndricos de 150 mm de diâmetro e comprimento de 200 mm. No centro dos mesmos simulou-se uma barra de aço de diâmetro 8, 10 e 12 mm respectivamente, com comprimento de ancoragem de 100 mm (metade do comprimento do corpo de prova). Na Figura 4 pode-se observar a geometria utilizada para a simulação dos ensaios.

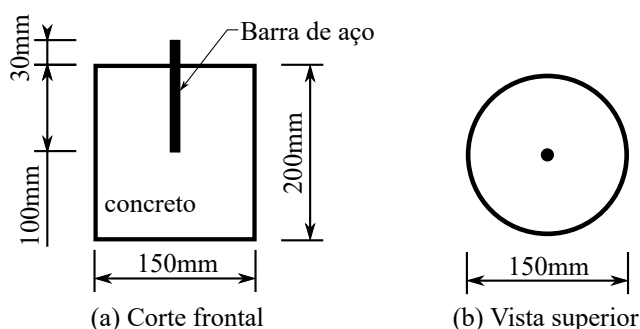


Figure 4: Geometria dos modelos para a simulação dos ensaios de arrancamento "pull-out-test".

Por outro lado, em função da resistência à compressão do concreto, foram calculados novos valores de módulo de elasticidade (E_c), tensão máxima de aderência (τ_{max}) e tensão residual

(τ_{res}); dado que estes parâmetros dependem diretamente da resistência à compressão do concreto. Para calcular os novos valores de (E_c) utilizou-se a ABNT NBR 6118:2014 e para calcular os valores de (τ_{max}) e (τ_{res}) utilizou-se o MODEL CODE (2010).

De acordo com a ABNT NBR 6118:2014 o módulo de elasticidade (E_c) pode ser determinado como:

$$E_c = \alpha_i \cdot E_{ci} \quad (1)$$

onde E_{ci} é o módulo de elasticidade tangente inicial e α_i é um coeficiente que depende da resistência à compressão do concreto.

A Norma estabelece também que o módulo de elasticidade tangente inicial (E_{ci}) pode ser calculado como:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_c} \quad \text{para } f_c \text{ de } 20 \text{ MPa a } 50 \text{ MPa} \quad (2)$$

onde α_E é um coeficiente que depende da natureza do agregado graúdo e f_c é a resistência à compressão do concreto.

Já para o contato, o código modelo MODEL CODE (2010) estabelece que a tensão máxima (τ_{max}) e tensão residual (τ_{res}) de aderência podem ser obtidas como:

$$\tau_{max} = 2,5 \cdot \sqrt{f_c} \quad (3)$$

$$\tau_{res} = 0,4 \cdot \tau_{max} \quad (4)$$

Sendo assim, na Tabela 1 são mostrados os valores dos parâmetros E_c , τ_{max} e τ_{res} calculados em função das diferentes f_c utilizadas nas simulações.

Table 1: Parâmetros calculados em função das diferentes f_c .

f_c (MPa)	E_c (GPa)	τ_{max} (MPa)	τ_{res} (MPa)
20	23,55	11,18	2,24
25	25,20	12,50	2,50
30	26,76	13,69	2,74
35	28,24	14,79	2,96
35	28,24	14,79	2,96
40	29,67	15,81	3,16
45	31,05	16,77	3,35
50	32,39	17,67	3,53

3 MODELAGEM DO CONCRETO ARMADO VIA MEF

As estruturas de concreto armado são sistemas que envolvem o comportamento de dois materiais que precisam interagir de forma adequada para que o compósito atinja as exigências

estruturais requeridas. Na geração da malha para aplicação do MEF, as barras de aço representam uma descontinuidade dentro do elemento concreto, dado que este material normalmente está distribuído de forma irregular na estrutura, portanto, se faz necessário uma análise que considere a influência da armadura bem como a interação entre os componentes. Existem vários métodos para simular numericamente a armadura dentro do concreto armado, dentre eles se destaca o método homogeneizado, o método discreto e o método embutido (Kwak & Filippou, 1990).

O método semi-embutido, apresentado por Durand (2008) combina características do método discreto e do método embutido. Neste método a armadura atravessa livremente os elementos sólidos e é discretizada em segmentos (elementos de barra), correspondentes para cada elemento atravessado. Estes elementos são conectados aos elementos sólidos através de elementos de interface que, fisicamente, representam o contato aço-concreto. Variando as propriedades de rigidez da interface é possível simular diversos níveis de aderência no contato. Por outro lado, cada porção de barra contida dentro de cada elemento é considerada como um elemento finito independente, conforme demonstrado na Figura 5, possibilitando a aplicação de condições de contorno nodal, como por exemplo, forças e deslocamentos impostos. Desta forma, torna-se possível a simulação de ensaios de arrancamento. Este método também possibilita a obtenção dos campos de tensões e deformações nas barras e ao longo do contato assim como o deslizamento das barras.

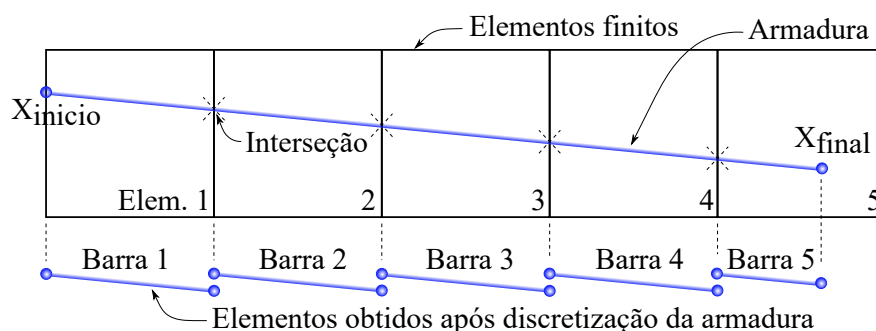


Figure 5: Discretização das armaduras - Durand & Farias (2012).

A formulação das armaduras segue a modelagem convencional do MEF, em que são utilizados elementos de barra 1D, já a interface requer uma formulação específica. Dentro do método semi-embutido existem duas formulações para modelar a interface, a primeira, denominada como "modelagem pontual da interface", introduzida por Durand (2008); e a segunda, "modelagem contínua da interface" aperfeiçoada por Durand & Farias (2012). Dado que a segunda abordagem permite uma simulação mais realista, esta é utilizada nesta pesquisa.

A Figura 6 exemplifica o funcionamento do elemento contínuo de ligação. O número de nós deste elemento é variável, pois corresponde a soma do número de nós do elemento de barra e do elemento atravessado.

Nesta figura, os nós representados em cor azul correspondem aos que estão conectados ao elemento sólido. Analogamente, os nós vermelhos são conectados ao elemento de barra. Por último, os círculos brancos representam a posição inicial dos nós do elemento de barra no elemento sólido (nós de controle). É importante notar que este elemento de interface se sobrepõe ao elemento sólido atravessado.

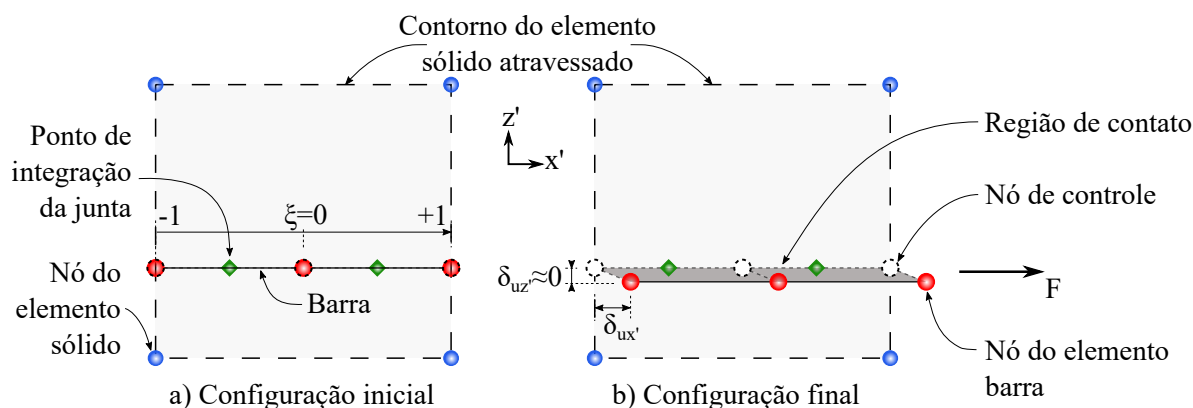


Figure 6: Interface representada por um elemento contínuo.

4 MODELO DE ADERÊNCIA UTILIZADO

A interface aço-concreto foi simulada utilizando um modelo de aderência baseado no modelo proposto pelo MODEL CODE (2010). Este modelo é semi-empírico, o qual baseia-se em resultados de ensaios experimentais. Sob condições definidas, neste modelo, é possível obter a relação entre a tensão de aderência e o deslizamento da barra. Para carregamento monotônico, as tensões de aderência locais podem ser obtidas em função do deslizamento " s " como mostra a Figura 7(a). Este modelo é dividido em 4 trechos onde as tensões de aderência podem ser obtidas em função das seguintes equações:

Para o caso em que $0 \leq s \leq s_1$:

$$\tau = \tau_{max} \cdot (s/s_1)^\alpha \quad (5)$$

No caso em que $s_1 \leq s \leq s_2$:

$$\tau = \tau_{max} \quad (6)$$

Se $s_2 \leq s \leq s_3$, utiliza-se a seguinte equação:

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_{res}) \cdot \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right) \quad (7)$$

Finalmente, quando $s \geq s_3$:

$$\tau = \tau_{res} \quad (8)$$

Já o modelo utilizado neste trabalho apresenta uma pequena modificação no terceiro trecho. Neste trecho foi introduzido um coeficiente β , com o objetivo de levar em consideração o efeito provocado pelas nervuras das barras e pelo atrito existente entre a barra e o concreto após a ruptura da aderência. Com a aparição do fator β , os resultados numéricos aproximam-se de maneira considerável aos resultados experimentais obtidos em laboratório. Neste sentido, as tensões de aderência no terceiro trecho foram obtidas seguindo a seguinte equação:

Se $s_2 \leq s \leq s_3$:

$$\tau = \tau_{max} - (\tau_{max} - \tau_{res}) \cdot \left(\frac{s - s_2}{s_3 - s_2} \right)^\beta \quad (9)$$

Na Figura 7(b) pode-se apreciar uma representação esquemática do modelo desenvolvido para simular o contato aço-concreto neste trabalho.

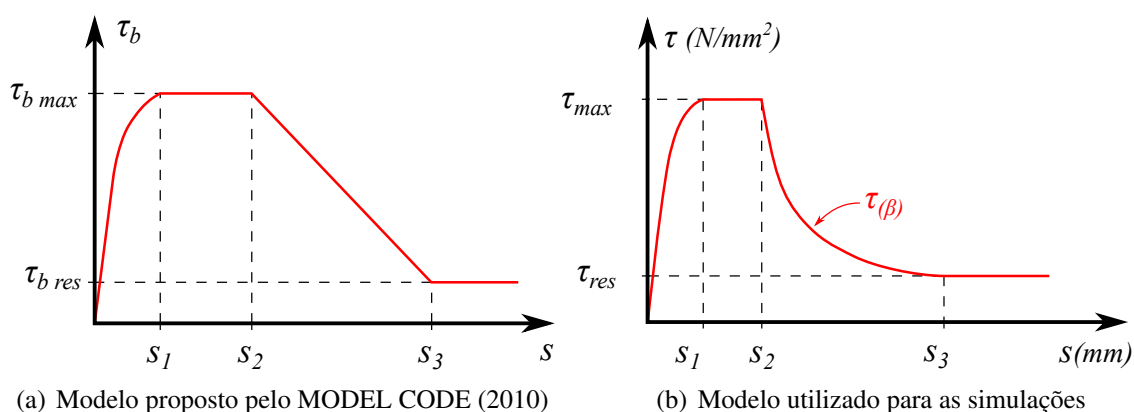


Figure 7: Modelos de aderência aço-concreto.

5 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA SIMULAÇÃO

A modelagem numérica foi realizada utilizando a biblioteca FemLab, que permite a análise em 2D e 3D de elementos isoparamétricos e é aplicável em estruturas de concreto armado. Esta biblioteca foi desenvolvida na linguagem de programação "*Julia*", uma linguagem de programação dinâmica, de alto nível e alto desempenho para cálculos científicos e técnicos (Bezanson *et al.*, 2012).

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 a serem usados para cada material e atribuídos os valores dos parâmetros requeridos em cada modelo. A seguir, foram definidas as condições de contorno. 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.

5.1 Condições de contorno

Na simulação numérica considerou-se a face superior do bloco de concreto sem possibilidade de movimento, sendo assim, restringiu-se o deslocamento tanto no sentido vertical (eixo y) quanto no horizontal (eixo z). Na Figura 8, mostra-se um esquema das condições de contorno essenciais adotadas.

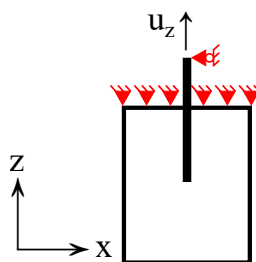


Figure 8: Diagrama de corpo livre dos modelos numéricos.

5.2 Malhas de elementos finitos

As malhas de elementos finitos adotadas para a simulação foram geradas no software *Gmsh*[®]. Um gerador de malhas 3D em elementos finitos de código aberto com mecanismos CAD incorporados. Este gerador é uma ferramenta rápida e leve com entrada paramétrica e recursos avançados de visualização. O usuário pode interagir com o gerador usando tanto a interface gráfica oferecida pelo software quanto por meio de arquivos de textos "*scripts*" escritos em linguagem própria (<http://www.gmsh.info>).

Na Tabela 2 e na Figura 9 mostram-se em detalhes as quantidades de elementos por tipo e a geometria dos corpos de prova gerada para a simulação numérica do ensaio de arrancamento "pull-out-test".

Table 2: Características do modelo numérico.

Nome	Elementos sólidos	Elementos de barra	Elementos de junta
Cylinder_150	1200	21	20

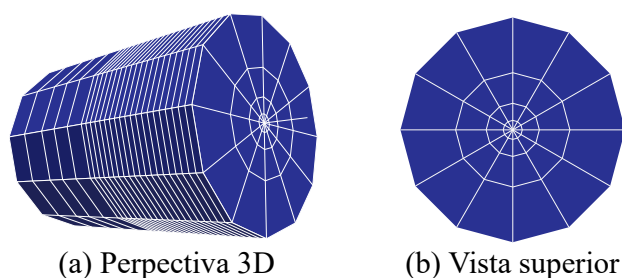


Figure 9: Modelo gerado para as simulações numéricas.

5.3 Tipos de elementos utilizados na simulação

Para modelar o concreto foram utilizados dois tipos de elementos. Na zona ao redor do centro do cilindro foram utilizados elementos de cunha de seis nós (WED6), já o restante do volume foi modelado com elementos hexaédricos de oito nós (HEX8). Para modelar a barra foram utilizados elementos de linha de três nós (LIN3), com dois pontos de integração. Por último, para modelar o contato aço-concreto foram utilizados elementos de junta (LINK3) cujo número total de nós é dado pela soma de dos nós do elemento sólido e do elemento barra, como mostrado na Figura 6. A seguir, são mostrados na Figura 10 os tipos de elementos utilizados para modelar o concreto e o aço nas simulações numéricas dos ensaios de arrancamento.

5.4 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

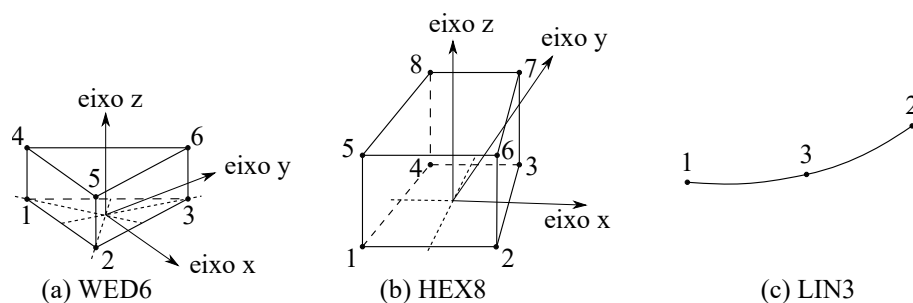


Figure 10: Elementos utilizados para modelar o concreto e o aço nas simulações.

elasticidade (E_c) e o coeficiente de Poisson (ν). O módulo de elasticidade foi calculado em função da resistência à compressão do concreto como explicado anteriormente. Já o coeficiente de Poisson foi assumido com um valor de $\nu = 0.2$, valor geralmente utilizado para concretos ordinários.

O modelo utilizado para simular o comportamento do aço foi o modelo elástico perfeitamente plástico, representado pelo diagrama de tensão *versus* deformação do aço. Este modelo é frequentemente utilizado para representar o comportamento das barras de reforço da armadura. Os valores dos parâmetros adotados para simular o comportamento do aço neste trabalho são mostrados na Tabela 3. Estes valores foram obtidos a partir dos ensaios experimentais feitos no aço na pesquisa de Rosales (2016).

Table 3: Características mecânicas das barras de aço utilizadas nas simulações.

ϕ da barra	E_s (GPa)	f_s (MPa)
8	195,30	561
10	195,40	530
12	190,10	558

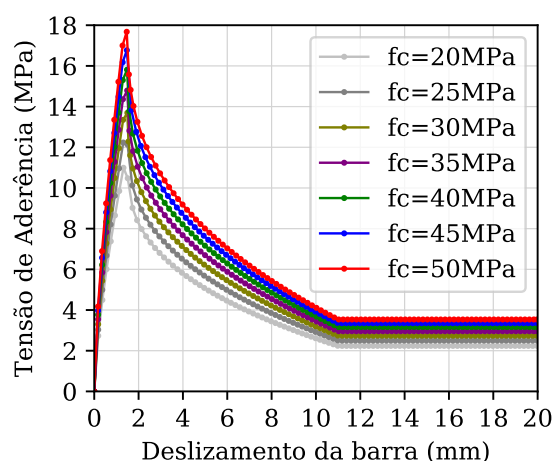
A interface foi simulada utilizando o modelo apresentado anteriormente na seção 4. Os valores de τ_{max} e τ_{res} para simular o contato aço-concreto foram obtidos em função da resistência à compressão do concreto como explicado anteriormente. Já os valores de deslizamento relativo s_3 , s_3 e s_3 ; assim como os valores da rigidez do contato k_s , foram tomados da pesquisa realizada por Rosales (2016). Na Tabela 4, são mostrados os valores adotados para simular o contato aço-concreto.

Table 4: Características mecânicas das barras de aço utilizadas nas simulações.

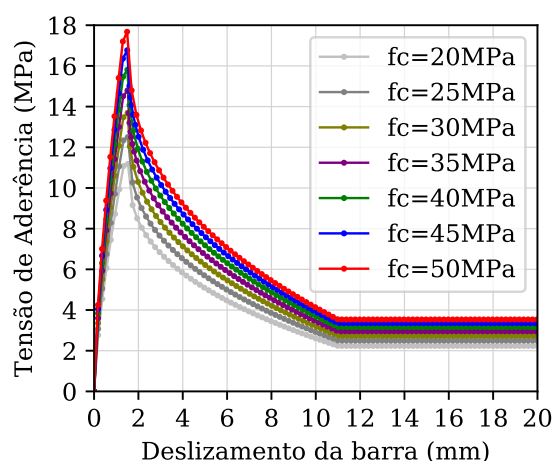
Modelos com barras de ϕ	k_s (N/mm^3)	s_1 (mm)	s_2 (mm)	s_3 (mm)
8	7.30			
10	7.90	1.35	1.45	11.0
12	8.30			

6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

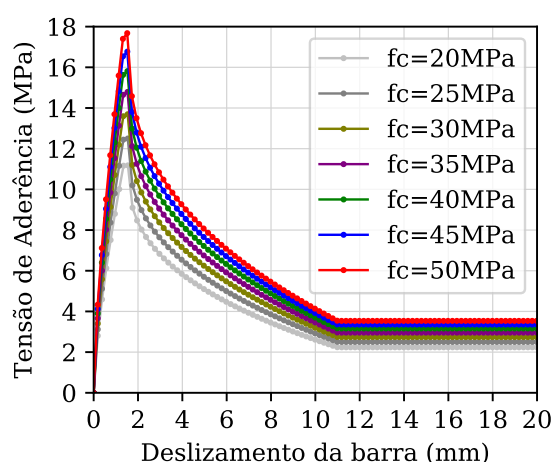
Após realizadas as simulações numéricas, foram representadas graficamente a evolução da tensão de aderência em função do deslizamento da barra para cada caso de estudo. Na Figura 11(a), Figura 11(b) e Figura 11(c) pode-se observar os resultados obtidos nos modelos com barras de 8 mm, 10 mm e 12 mm de diâmetro respectivamente.



(a) Modelos com barras de $\phi 8$ mm



(b) Modelos com barras de $\phi 10$ mm



(c) Modelos com barras de $\phi 12$ mm

Figure 11: Tensão de aderência *versus* deslizamento da barra para diferentes diâmetros de barra.

Nestas figuras, pode-se observar que as tensões de aderência em geral apresentam um comportamento similar. A diferença encontrada em cada caso localiza-se nos valores de tensão máxima e tensão residual, dado que estes valores dependem diretamente da resistência à compressão do concreto como explicado anteriormente. Este aumento das tensões máximas e tensões residuais acontece gradualmente da mesma forma que o aumento da resistência do concreto.

6.1 Comportamento do contato

Observar o comportamento do contato ao longo do comprimento de ancoragem foi um dos objetivos desta pesquisa. No estudo detectou-se que em todos os modelos, o início da ruptura de aderência aconteceu quando o deslocamento imposto atingiu o valor de 1,8 mm. Portanto, estudou-se o comportamento das tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem, um incremento antes do início da ruptura da ligação aço-concreto (1.6 mm). A Figura 12, apresenta a distribuição de tensões de aderência existentes nos elementos de contato para um deslocamento imposto de 1,6 mm em todos os modelos estudados.

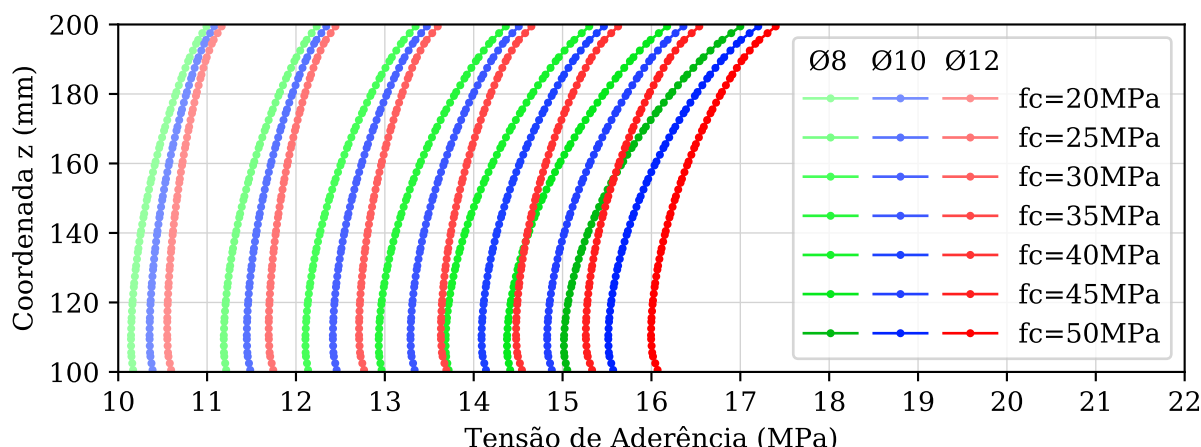


Figure 12: Comportamento do comprimento de ancoragem antes da ruptura da aderência para modelos com barras de 8 mm (curvas de tonalidade verde), com barras de 10 mm (curvas de tonalidade azul) e com barras de 12 mm (curvas de tonalidade vermelha) de diâmetro.

Como pode-se observar nesta figura, os modelos com barras de 12 mm de diâmetro (as linhas vermelhas), apresentam maiores tensões de aderência nos elementos de contato que os modelos com barras de 10 mm (linhas azuis), e estes por sua vez apresentam maiores tensões de aderência que os modelos com barras de 8 mm de diâmetro (linhas verdes). Isso ocorre porque quanto maior for o diâmetro das barras, maior será a área da seção transversal e a superfície de contato das mesmas. Portanto, para atingir os deslocamentos impostos é preciso aplicar maior força axial, porque a rigidez das barras é diretamente proporcional a área da seção transversal das mesmas.

De acordo com o explicado anteriormente, nos modelos com barras de maior diâmetro se aprecia uma maior transferência de tensões dos elementos de contato mais próximo ao ponto de aplicação da carga para os elementos de contato mais afastados. Essa diferença na transferência de tensões é mais acentuada nos elementos de contato mais distantes do ponto de aplicação do carregamento. É importante destacar que o comportamento descrito pelos elementos de contato antes da ruptura da aderência é similar ao comportamento obtido na pesquisa de Sena-Cruz *et al.* (2009) para este tipo de simulação.

Desta forma, também foram analisados os incrementos após a ruptura da aderência. Para realizar esta análise foi escolhido o modelo numérico com barra de 10 mm de diâmetro e resistência do concreto de 30 MPa. Na Figura 13, mostra-se o comportamento dos elementos de contato alguns incrementos antes e após a ruptura da aderência. Nesta figura os tons azuis

representam os incrementos de deslocamento imposto antes da ruptura da aderência e os tons vermelhos representam os incrementos de deslocamento imposto após a ruptura da mesma.

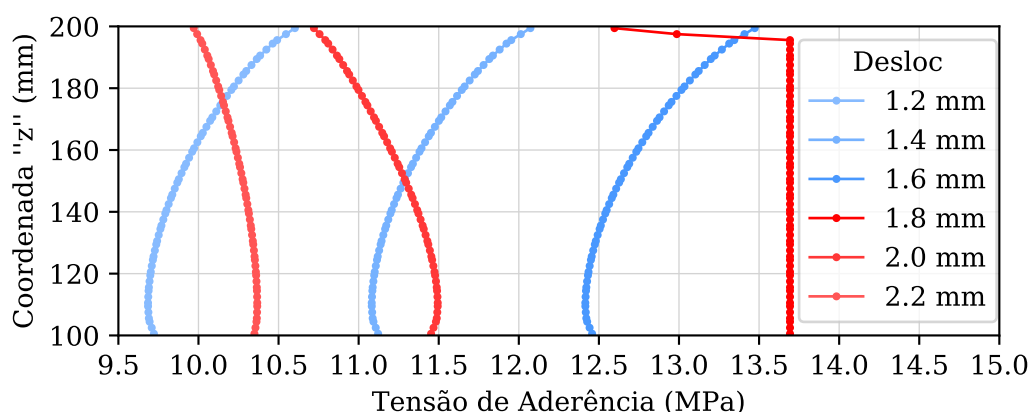


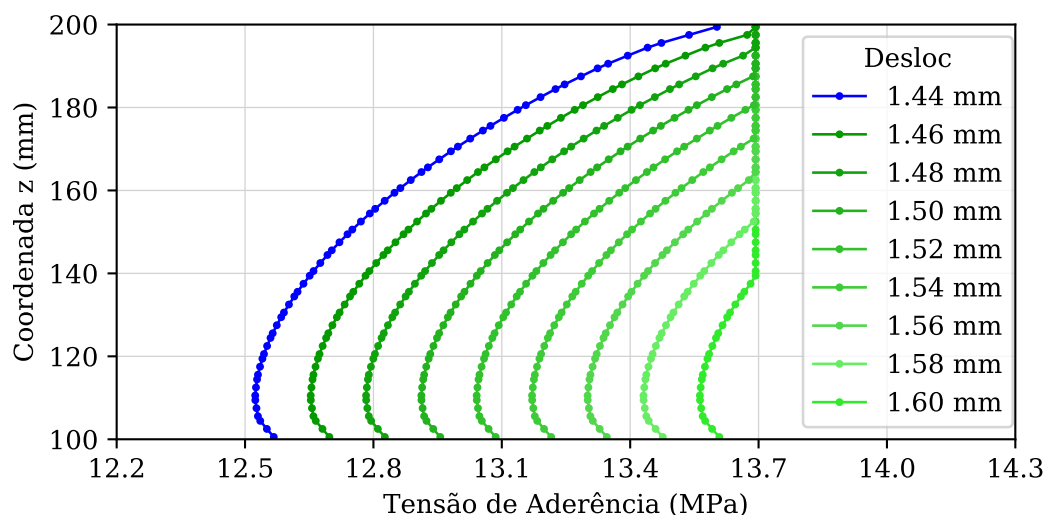
Figure 13: Distribuição da tensão de aderência ao longo do comprimento de ancoragem do modelo com barra de 10 mm de diâmetro e concreto de 30MPa de resistência.

Nesta figura pode-se observar que o padrão de comportamento dos elementos de contato antes da ruptura da aderência é oposto a distribuição das tensões após a ruptura do contato. Isso é dado porque os elementos de contato mais próximos ao ponto de aplicação da carga absorvem maiores tensões geradas pelo deslizamento da barra; por esse motivo, os elementos de contato mais afastados recebem menores solicitações. Entretanto, após a ruptura da aderência, os elementos de contato mais próximos ao ponto crítico não suportam maiores tensões de aderência; logo, essas tensões são transmitidas aos elementos de contato mais afastados.

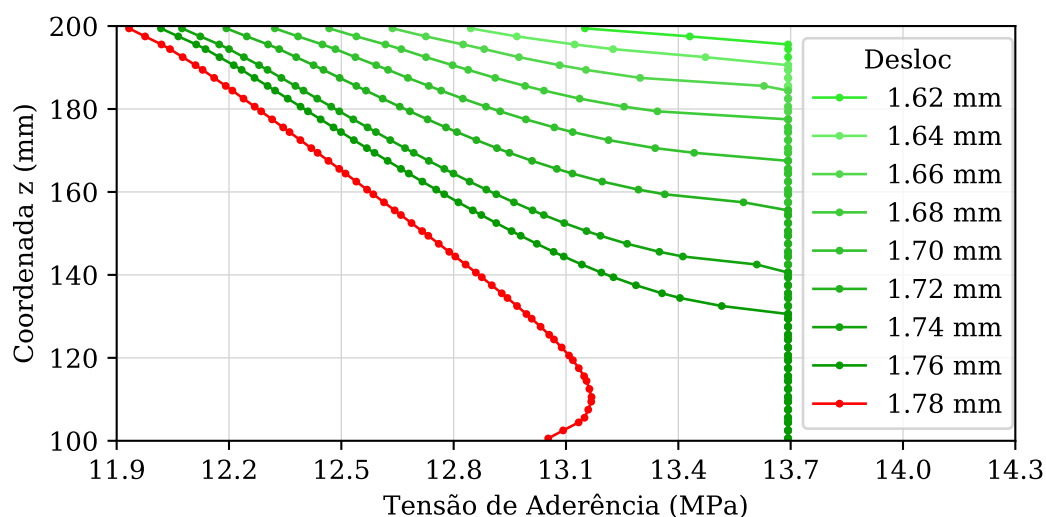
6.2 Ruptura dos elementos de contato

Na Figura 13 acima, o incremento correspondente a um deslocamento imposto de 1,8 mm, nos elementos de contato mais próximos ao ponto de aplicação da carga foi quebrada a ligação, no entanto, os elementos de contato menos solicitados ainda se encontravam sujeitos a tensão máxima de aderência. Neste sentido, com o objetivo de observar com maior detalhe o comportamento dos elementos de contato antes e após da ruptura a aderência, foi realizada uma nova análise no modelo com barra de 10 mm e resistência à compressão do concreto de 30 MPa com uma maior discretização no deslocamento imposto.

Na Figura 14(a) e Figura 14(b) mostra-se as tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem nos incrementos antes e após a ruptura da aderência respectivamente. Antes da ruptura da aderência, Figura 14(a), a medida que os incrementos de deslocamento aumentam, uma maior quantidade de elementos de contato atingem a tensão máxima de aderência. Quando a tensão cisalhante em um elemento de contato alcança a resistência máxima não é capaz de absorver maiores solicitações e começa a transferir essas solicitações para os elementos vizinhos com a finalidade de manter o equilíbrio do sistema. Por outro lado, após a ruptura da aderência, Figura 14(b), a medida que aumentam os incrementos de deslocamento, maior número de elementos de contato são quebrados, produzindo assim uma ruptura progressiva da interface.



(a)



(b)

Figure 14: (a) Comportamento dos elementos de contato antes da ruptura da aderência, (b) Comportamento dos elementos de contato após da ruptura a aderência.

7 CONCLUSÕES

Após a análise dos resultados das simulações, foram definidas as seguintes conclusões:

- *A medida que aumenta a resistência à compressão do concreto, as tensões de aderência aumentam de forma gradual*. Observou-se que o padrão de comportamento das tensões de aderência é similar para as resistências do concreto e os diâmetros de barra de aço estudados.
- *Verificou-se a aplicabilidade do método semi-embutido na simulação de ensaios de arrancamento direto*. Os resultados numéricos das tensões de aderência demonstram

uma aceitável precisão em relação aos resultados experimentais obtidos em laboratório.

- *A transferência de tensões de aderência nos elementos de contato é maior para barras de maior diâmetro.* Verificou-se que nas barras de maior diâmetro existe uma maior transferência de tensões nos elementos de contato, porque as mesmas apresentam maior rigidez.
- *O padrão de comportamento dos elementos de contato antes da ruptura da aderência é similar ao padrão obtido no trabalho de Sena-Cruz (2009).* Os resultados numéricos verificam que, para comprimentos de ancoragem pequenos, não é possível obter o sino teórico de tensões de aderência ao longo do comprimento de ancoragem que deveria existir segundo MacGREGOR (2012).
- *O padrão de comportamento dos elementos de contato antes da ruptura da aderência é oposto ao padrão de comportamento após a ruptura da mesma.* Antes da ruptura da aderência, quando a tensão cisalhante em um elemento de contato alcança a resistência máxima, este elemento não é capaz de absorver maiores solicitações e começa a transferir essas solicitações para os elementos vizinhos. Por outro lado, após a ruptura da aderência os elementos de contato são quebrados gradualmente, quando estes atingem a sua resistência máxima, produzindo assim uma ruptura progressiva da interface.

REFERÊNCIAS

- ABNT, NBR 6118. 2014 Projeto de estruturas de concreto, Procedimento. *Rio de Janeiro*.
- Bresler B. & Bertero V., 1968. Behavior of reinforced concrete under repeated load. *Journal of the Structural Division*. vol. 94, n. 6, pp. 1567-1590.
- Briosotto D., 2011. *Um modelo elasto-plástico para a análise da Aderência em peças de concreto armado*. These de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul/Brasil.
- Casanova A. *et al.*, 2012. Bond slip model for the simulation of reinforced concrete structures. *Engineering Structures*. vol. 39, pp. 66-78.
- Cox J. V. & Herrmann L. R., 1998. Development of a plasticity bond model for steel reinforcement. *Mechanics of Cohesive frictional Materials*. vol. 3, n. 2, pp. 155-180.
- Durand R. D., 2008. *Análise tridimensional de estruturas geotécnicas submetidas a reforço e drenagem*. These de Doutorado, Universidade de Brasília/Brasil.
- Durand R. & Farias M., 2012. Nonlinear Joint Element for The Analysis of Reinforcement Bars Using Finite Elements. *10th World Congress on Computational Mechanics*. p 16.
- Jendele L. & Cervenka J., 2006. Finite element modelling of reinforcement with bond. *Computers & structures*. vol. 84, n. 28, pp. 1780-1791.
- Kwak H. & Filippou F. C., 2012. *Finite element analysis of reinforced concrete structures under monotonic loads*. Berkeley, CA: Department of Civil Engineering, University of California
- MacGREGOR J. G., 2012. Reinforced Concrete. Mechanics & Design. *Sixth Edited*. New Jersey, USA.
- Model Code, 2010. First complete draft. *Bulletin 55*.

- Murcia-Delso J. & Shing P. B., 2015. Bond-Slip Model for Detailed Finite-Element Analysis of Reinforced Concrete Structures. *Journal of Structural Engineering*. vol. 141, n. 4.
- Ngo D., 1967. Finite element analysis of reinforced concrete beams. *Journal Proceedings*. vol. 64, n. 3, pp. 152-163.
- NILSON A.H., 1968. Nonlinear analysis of reinforced concrete by the finite element method. *Journal Proceedings*. vol. 65, n. 9, pp. 757-766.
- Rosales Y. M., 2016. *Análise numérico-experimental do comportamento da aderência aço-concreto*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília/Brasil.
- Sena-Cruz J. *et al.*, 2009. Modelling of bond between galvanized steel rebars and concrete. *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*.
- Tavares A. J., 2012. *Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios Pull-Out e Apull-Out*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista/Brasil.