

Bond steel-concrete: simulation analysis of the pull-out tests and APULOT using the program ATENA

Aderência aço-concreto: simulação numérica dos ensaios de arrancamento pull-out e APULOT usando o programa ATENA

A. J. TAVARES ^a
alyssontavares@hotmail.com

M. P. BARBOSA ^a
mbarbosa@dec.feis.unesp.br

T. N. BITTENCOURT ^b
tbitten@gmail.com

M. LORRAIN ^c
michel.lorrain@insa-toulouse.fr

Abstract

The bond between steel and concrete is essential for the existence of reinforced concrete structures, as both materials act together to absorb structural strain. The bond phenomenon is considered to be complex regarding many factors that affect it. Several types of bond tests have been proposed over years. One is the modified proposed of pull-out test, which was elaborated by Lorrain and Barbosa [1] called APULOT test (Appropriate pull-out-test). Based on experimental results obtained by Vale Silva [2] either by conventional pull-out tests, or by modified pull-out test, APULOT, seeks to know the numeric behavior of bond steel-concrete through a numerical simulation using a calculation code ATENA which is based on the Finite Element Method (FEM). The numerical simulation provided better evaluate the stress distribution and cracking that occurs during the test, thereby becoming a valuable tool to support the experimental project that aims to validation, validation partially or not recommend the modified bond test steel-concrete - APULOT test – as quality control test of structural concrete. The numerical results showed good representation compared to experimental results.

Keywords: bond steel-concrete, numerical analysis, pull-out, APULOT, pull-out test.

Resumo

A aderência entre o aço e o concreto é fundamental para a existência das estruturas de concreto armado, uma vez que os dois materiais atuam em conjunto para absorver os esforços solicitantes. O fenômeno da aderência é considerado complexo no que se refere aos vários fatores que o influenciam. Vários tipos de ensaios de aderência foram propostos ao longo dos anos. Um deles é a proposta modificada do ensaio de arrancamento pull-out-test, que foi elaborada por Lorrain e Barbosa [1] denominado de ensaio APULOT (Appropriate Pull-Out-Test). Com base nos resultados experimentais obtidos por Vale Silva [2] para os ensaios pull-out convencionais e para o ensaio pull-out modificado, APULOT, procura-se conhecer o comportamento numérico da aderência aço-concreto através de uma simulação numérica utilizando um código de cálculo chamado ATENA que é baseado no Método dos Elementos Finitos (MEF). A simulação numérica permitiu melhor avaliar a fissuração e a distribuição de tensões que ocorre durante o ensaio de arrancamento, tornando-se com isso, uma ferramenta de apoio preciosa ao projeto experimental que visa à validação, validação parcial, ou não recomendação do ensaio de aderência aço-concreto modificado – Ensaio APULOT – como ensaio de controle de qualidade do concreto armado. Os resultados numéricos obtidos apresentaram boa representatividade quando comparados aos resultados experimentais.

Palavras-chave: aderência aço-concreto, análise numérica, pull-out, APULOT, ensaio de arrancamento.

^a Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, SP, Brasil;

^b Departamento de Estruturas e Geotécnica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, SP, Brasil;

^c INSA-Toulouse, Departament de GenieCivi., Toulouse, France.

1. Introdução

O estudo da aderência entre o aço e o concreto vem sendo pesquisado ao longo do tempo em vários países, estando intimamente ligados a própria evolução do concreto armado. Os primeiros artigos científicos sobre aderência aço-concreto datam do início do século XX [Carl Von Bach (1905), Bach(1905), Koenen(1905), Kollbohm e Mautner(1907)] e hoje, o tema é motivo de reuniões científicas, como o BIC2012 (Bond in Concrete2012, Bresquia-Itália) apoiados pelo ACI, FIB e RILEM. Isso se justifica pela sua importância nas peças de concreto armado e protendido, já que, para se garantir um bom comportamento dessas peças, é fundamental que se tenha uma excelente compreensão do fenômeno da aderência, para que elas sejam dimensionadas de modo a garantir a ancoragem das armaduras, e por sua vez sua segurança. Um dos ensaios mais conhecidos e tradicionais de aderência é o de arrancamento direto denominado de *pull-out test*, normalizado pelo RILEM/CEB/FIP RC6 [3] e pela ASTM [4]. Trata-se de um ensaio sobre o material composto concreto armado, destinado a avaliar a resistência da ligação entre o concreto e a armadura.

Baseados em estudos realizados, Lorrain e Barbosa [1] e Lorrain et al. [5] apresentaram uma alternativa simplificada para o ensaio *pull-out-test*, denominada de ensaio APULOT a ser realizado em canteiro de obras. Os procedimentos deste novo ensaio estão sendo estudados, aprimorados e discutidos por alguns grupos de pesquisa localizados no Brasil, França, Espanha, Tunísia e Paraguai. Acredita-se que a validação deste novo ensaio, poderá proporcionar uma alternativa para a avaliação do controle de qualidade do concreto armado nas construções civis.

Vale Silva [2] investigou a proposta feita por Lorrain e Barbosa [1] comparando os dois tipos de ensaios de aderência aço-concreto: o ensaio *pull-out* e o ensaio APULOT. Os resultados mostraram que nos ensaios *pull-out*, o tipo de ruptura observada foi sistematicamente o deslizamento, para todos os diâmetros. Já os resultados obtidos para o ensaio APULOT apresentaram comportamento diferenciado para barras de diâmetro de 8,0mm, 10,0mm e 12,5mm. O autor acredita que a variação deste comportamento ora deslizamento da barra, ora fendilhamento do concreto está relacionado

com o diâmetro dos corpos de prova elaborados, usando garrafas PET como moldes, os quais não apresentavam dimensões adequadas para suportar as tensões provocadas com o aumento do diâmetro das barras das armaduras de aço, ou ao fato, do comprimento de ancoragem usado nos ensaios estar inadequado. Em função destes resultados, este trabalho procura, através de uma análise numérica detalhada, avaliar e melhor compreender a distribuição de tensões que ocorre nestes dois casos.

A simulação numérica dos ensaios de aderência *pull-out* e APULOT é uma ferramenta de apoio ao projeto experimental que visa a validação total, validação parcial, ou não recomendação do ensaio de aderência APULOT, como opção de ensaio de controle de qualidade do concreto armado. Essas simulações, comparadas com os resultados experimentais, auxiliam na escolha de alguns parâmetros que influenciam no comportamento da aderência aço-concreto tais como: a resistência do concreto, o diâmetro das armaduras, a variação do comprimento de ancoragem, entre outros.

2. Aderência aço-concreto

A aderência entre a armadura de aço e o concreto é um dos mecanismos mais importantes para a existência das estruturas de concreto armado, uma vez que para absorver os esforços solicitantes, os dois materiais devem atuar conjuntamente. Esta aderência é responsável pela ancoragem da armadura no concreto e, ainda, serve para impedir o escorregamento dessa armadura nos segmentos entre fissuras, limitando a abertura destas.

Segundo Tassios[6] e Ducatti[7] o comportamento entre a barra e o concreto a ela circunvizinho, tem importância decisiva com relação à capacidade de carga e de serviço das peças de concreto armado. Este conhecimento é indispensável para chegar-se às regras de cálculo de ancoragens e emendas por transpasse das barras da armadura, para o cálculo das deflexões considerando o efeito de enrijecimento por tração, para o controle da fissuração e, portanto da quantidade mínima de armadura. O que pode, conseqüentemente, ser estendido à durabilidade das estruturas.

Segundo Tassios[6] a eficiência da ligação aço-concreto pode ser favoravelmente quantificada mediante a relação tensão de aderência

Figura 1 – Detalhes do ensaio de arrancamento direto P. (Leonhardt e Mönnig(11))

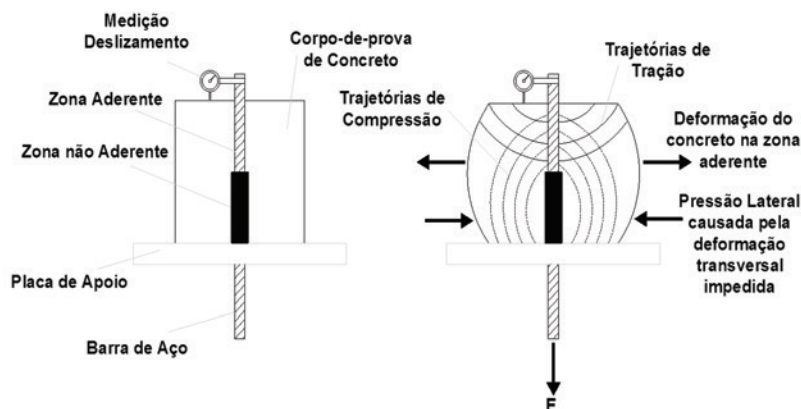
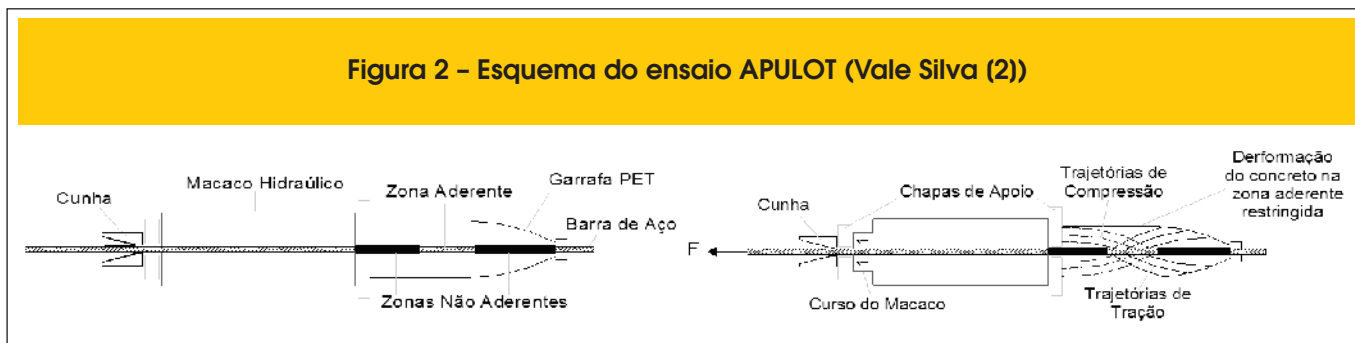


Figura 2 – Esquema do ensaio APULOT (Vale Silva (2))



versus deslizamento, expressando a variação da tensão que surge na interface do aço com o concreto, relacionada ao deslocamento relativo entre a barra de aço e o concreto que a envolve. Deslizamentos pequenos sugerem danos locais ou acomodações da interface. Quando se incrementam, ou seja, quando o deslizamento atinge valor máximo, indica a destruição da aderência, o que pode ser associado a certo estado de deformação e fissuração. Alguns valores limites de deslizamento são apresentados nas normas e procedimentos de projeto estrutural, sendo estes geralmente associados a um estado de deformação e fissuração inaceitável (Caetano [8]).

O deslizamento no início do carregamento é causado em parte pela deformação elástica do concreto; entretanto, para cargas mais altas, ele é causado pelo esmagamento do concreto frente às nervuras da barra. Nas barras sem nervuras a aderência ocorre, a priori, em razão da adesão química entre a pasta de cimento e a barra. Quando a adesão química se rompe, surge uma resistência aos deslizamentos devido ao atrito. Quando esta resistência se esgota, o fendilhamento não é total, mas a barra é arrancada, deixando

atrás de si um orifício quase intacto dentro do concreto (Goto[9]). Nas barras nervuradas, desenvolvidas para produzir maior aderência do que as barras lisas, o fenômeno da aderência acontece de modo fundamentalmente diferente. Ainda que nessas barras se desenvolvam a adesão e o atrito, a resistência aos deslizamentos nas barras nervuradas depende, sobretudo, da ação mecânica entre o concreto e as nervuras. A consequência da adesão química é pequena e o atrito não ocorre até que haja escorregamento entre a barra e o concreto (Vale Silva [2]).

2.1 Ensaios de aderência

Entre os diversos tipos de ensaios propostos [ensaio de arrancamento excêntrico; Ensaio de flexão (beam test); ensaio de arrancamento com anel circunferencial –ring test- out test; entre outros, que determinam os valores da tensão de aderência entre a armadura de aço e o concreto, pode-se destacar o ensaio de arrancamento direto denominado de ensaio *pull-out-test*. Este ensaio consiste em arrancar uma barra de aço posicionada no centro de um prisma de concreto. As duas extremidades da barra de aço ficam para fora do prisma de concreto onde é aplicada a carga a um extremo e lido o deslizamento no outro extremo. Neste ensaio de arrancamento, surge uma componente de compressão longitudinal e para minimizar este efeito, considera-se uma zona não aderente logo após a placa de apoio. Em zonas de ancoragem da armadura de tração de vigas submetidas à flexão essa componente não existe (Fusco[10]).

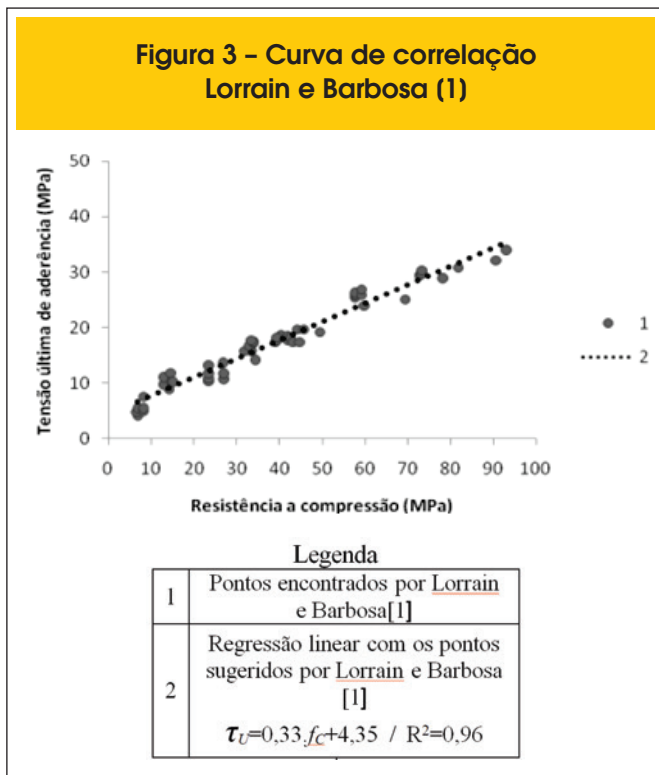
A Figura 1 ilustra o ensaio de arrancamento direto, com as trajetórias de tensões de tração e compressão.

Uma vez rompida a ligação aço-concreto, a barra se desloca com mais ou menos facilidade dentro do bloco de concreto dependendo da rugosidade da sua superfície envolvida (armadura lisa ou armadura nervurada). O valor do pico de resistência permite calcular convencionalmente a tensão última (máxima) da ligação (τ_t), obtida pela divisão da força máxima aplicada pela superfície nominal de ancoragem.

2.2 Ensaio APULOT (Pull-out test modificado)

Lorrain e Barbosa [1] e Lorrain et al. [5] propuseram uma modificação do ensaio *pull-out*, o qual foi denominado de ensaio APULOT. Este ensaio usa como molde, garrafas de plástico PET cilíndricas descartadas na natureza, com diâmetro mínimo de 8 cm e se possível com um formato mais homogêneo na zona aderente. A Figura 2 ilustra o ensaio “APULOT”, com a localização da zona aderente e as trajetórias de tensões de tração e compressão. Uma alteração introduzida nesse ensaio é o fato do corpo de prova se manter dentro do invólucro de plástico da garrafa PET, o que leva a uma diminuição

Figura 3 – Curva de correlação Lorrain e Barbosa (1)



da deformação lateral do mesmo. No ensaio APULOT o comprimento de ancoragem (zona aderente), vai depender da resistência a compressão do concreto (f_{cm}) e do diâmetro da barra de aço (ϕ), baseando-se no conceito de equilíbrio das tensões necessárias para ancorar uma barra de aço no concreto, conforme Equação 1.

$$L = \frac{f_y \cdot \phi}{4 \cdot \tau_u} \quad (1)$$

onde: L = Comprimento de ancoragem (mm); f_y = Tensão de escoamento do aço (MPa); ϕ = diâmetro da barra (mm); τ_u = Tensão última de aderência (MPa);

Para a determinação de L , o valor da tensão última de aderência é obtido pela curva de correlação adotada por Lorrain e Barbosa [1] (Figura 3).

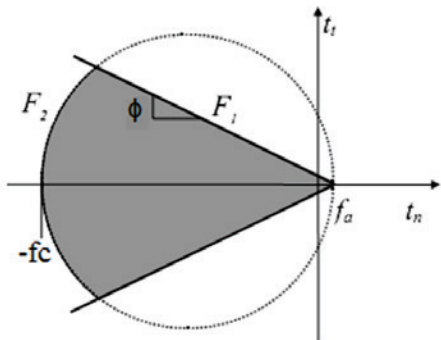
Na determinação do comprimento de ancoragem utilizando a Equação 1, adota-se os valores de resistências dos materiais utilizados conforme idade prevista do ensaio. Vale Silva [2] utilizou em seus ensaios experimentais o valor de $L = 10\phi$ para o concreto de resistência a compressão média (f_{cm}) de 27,8 MPa aos 28 dias e 6ϕ para o concreto com resistência a compressão média (f_{cm}) de 49,3 MPa aos 28 dias. Estes dados são utilizados para a análise numérica deste ensaio.

3. Análise numérica

3.1 Código de cálculo: ATENA

O código de cálculo ATENA (Advanced Tool for Engineering Nonlinear Analysis) vem sendo utilizado na engenharia estrutural para simulação do comportamento do concreto e de estruturas de concreto armado incluindo a fissuração do concreto. Utiliza o Método dos Elementos Finitos na análise não-linear de estruturas, simulando o comportamento real das estruturas quer seja através de análises lineares e não-lineares. A ação total atuante é definida pela integral no tempo de incrementos de forças, com aplicação dos Métodos Newton-Rhapson ou Arc-Length.

Figura 4 – Superfícies de escoamento (baseado em Lundgren (14))



Os materiais são definidos por meio de propriedades e parâmetros físicos, divididos em grupos de acordo com suas características constitutivas.

Dentre as propriedades do aço estão a relação tensão-deformação no regime elástico-linear ou multilinear, com ou sem patamar de escoamento definido, o modelo não-linear de ciclos de carregamento e descarregamento, e o critério de escoamento de von Mises.

Para o concreto, dentre suas propriedades estão: a lei de tensão-deformação e o plano de ruína da estrutura, determinados pelos critérios de plasticidade (compressão) de Drucker-Prager e de falha (tração) de Rankine. O programa permite a combinação dos dois modelos descritos acima de modo a simular a ruptura e a fissuração do concreto. Os modelos constitutivos de cada material estão descritos em Cervenka [12].

Para esta pesquisa, foi adotado o critério de análise de Newton-Rhapson com incrementos de deslocamentos de 0,06 mm a cada passo. O método Newton-Rhapson adota o conceito de incrementos de força em que são realizados, a cada etapa de carregamento, cálculos iterativos até que haja uma convergência entre as variáveis da função diferencial. A cada nova iteração de um passo de carga, a força é mantida constante e o deslocamento é redefinido até que a reta tangente do incremento de força encontre a curva força versus deformação.

3.2 Modelo constitutivo da interface

O modelo do material de interface presente no ATENA pode ser usado para simular o contato entre dois materiais. O material de interface é baseado no critério de Mohr-Coulomb com a tensão cisalhante. A relação constitutiva para um caso geral tridimensional é dada em termos de forças de tração em planos da interface e deslocamentos relativos de correr e abrir (Equação 2).

$$\begin{Bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \sigma \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{tt} & 0 & 0 \\ 0 & K_{tt} & 0 \\ 0 & 0 & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta v_1 \\ \Delta v_2 \\ \Delta u \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Onde τ é a tensão cisalhante e σ é a tensão normal. O K_{nn} , K_{tt} denotam a rigidez elástica inicial normal e de cisalhamento, respectivamente, e os deslocamentos relativos cisalhante é representado por Δv e o deslocamento normal é representado por Δu .

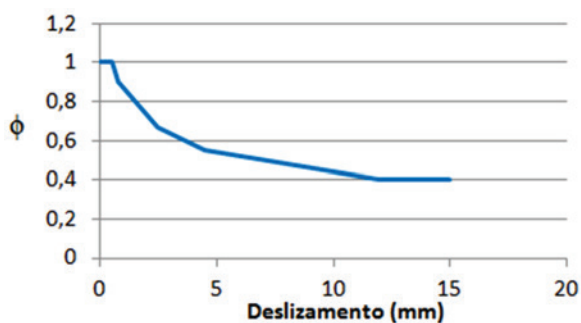
A superfície de ruptura inicial corresponde a condição de Mohr-Coulomb (Equação 3), com elipsóide em regime de tensão. Depois da tensão violar esta condição, esta superfície colapsa em uma superfície residual que corresponde a seco atrito.

$$\begin{aligned} |\tau| &\leq c - \sigma \cdot \phi, \text{ if } \sigma \leq 0 \\ \tau &= \tau_0 \sqrt{1 - \frac{(\sigma - \sigma_c)^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}, \tau_0 = \frac{c}{\sqrt{1 - \frac{\sigma_c^2}{(f_t - \sigma_c)^2}}}, \sigma_c = -\frac{f_t^2 \phi}{c - 2f_t \phi}, \text{ if } 0 < \sigma < f_t \\ \tau &= 0, \text{ if } \sigma > f_t \end{aligned} \quad (3)$$

O critério de falha é substituído por um elipsóide, que cruza o eixo da tensão normal no valor de f_t com a tangente vertical e o eixo de cisalhamento é interceptado no valor de c (coesão) com o equivalente a tangente.

Os limites das tensões são definidos por "superfícies de ruptura"

Figura 5 - Variação do coeficiente de atrito em função do escorregamento (baseado em Lundgren (14))

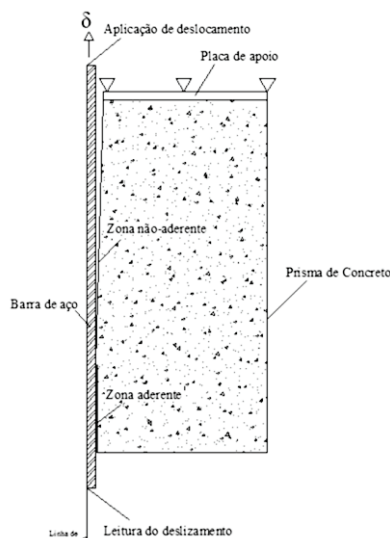


no espaço de Mohr. Cox [13] define tais superfícies através de uma única função enquanto Lundgren[14] emprega duas funções F_1 e F_2 . Segundo Lundgren[14], embora o processo de aderência em barras nervuradas seja por engrenamento mecânico, pode-se considerar o problema de forma aproximada como sendo controlado por atrito. A função F_1 descreve as combinações de tensões que definem o início de escorregamento por atrito, incluindo a adesão f_a . Esta função (Equação 4) é definida por:

$$F_1 = |t_t| + \phi \cdot (t_n - f_a) = 0 \quad (4)$$

Onde: ϕ é um coeficiente de atrito aparente, t_n é a tensão normal, t_t é a tensão de aderência e f_a a adesão. Esta superfície está, geralmente, associada à falha por fendilhamento.

Figura 6 - Demonstração da parte analisada para a barra de 8 mm de diâmetro



A outra função, F_2 , descreve o limite da falha por arrancamento. Esta função é determinada a partir do equilíbrio das forças resultantes da interação mecânica entre a barra de aço e o concreto, resultando a Equação 5:

$$F_2 = t_t^2 + (t_n + f_c) \cdot (t_n - f_a) = 0 \quad (5)$$

Figura 7 - Comparação dos resultados numéricos com a faixa de resultados experimentais de Vale Silva (2) - Concreto de 27,8 MPa e barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio pull-out

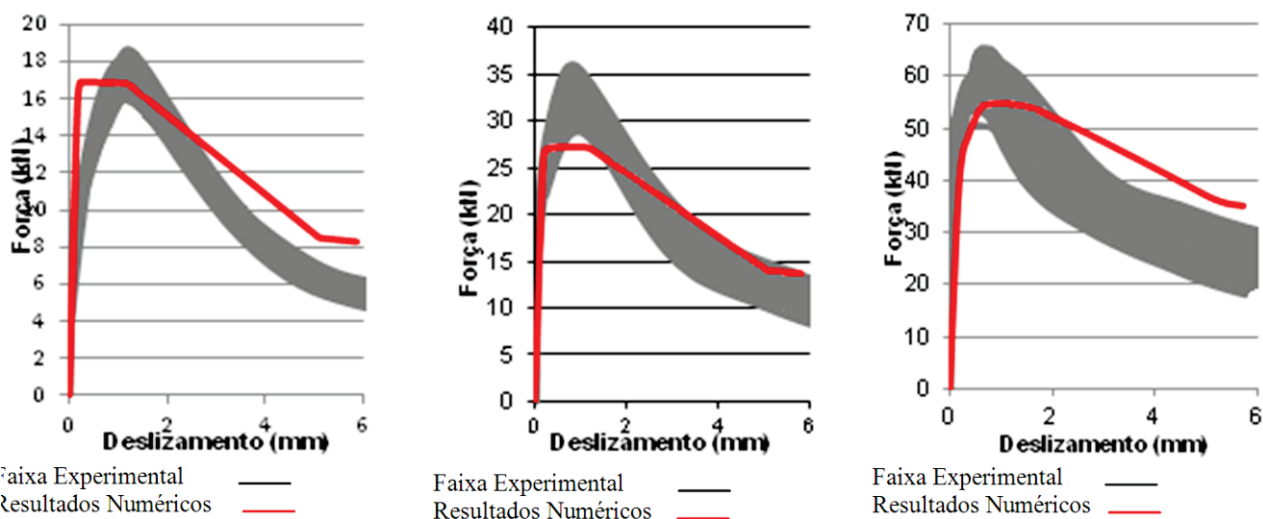
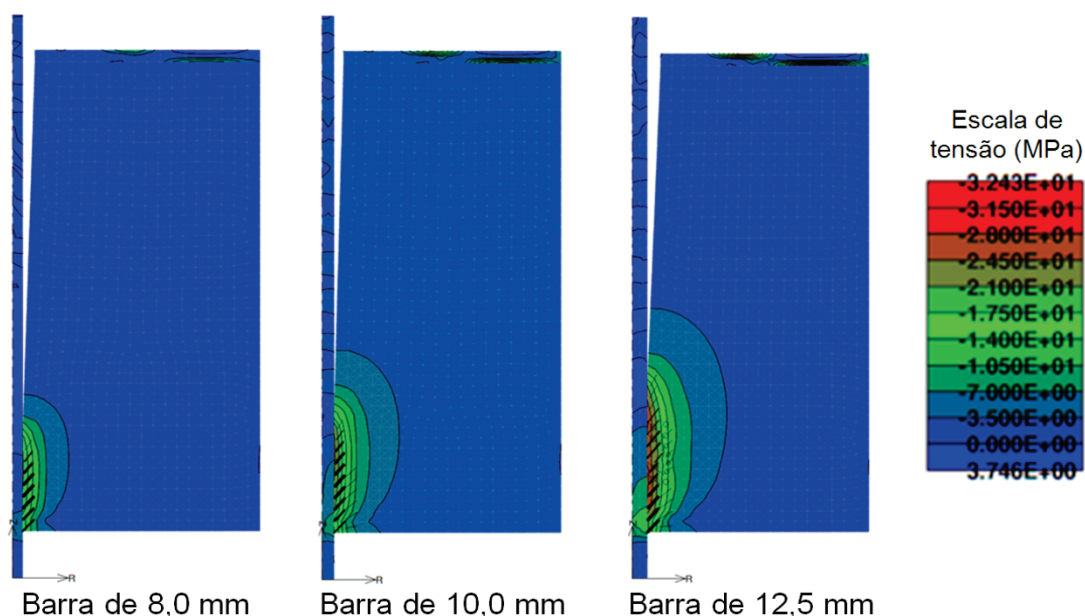


Figura 8 - Distribuição de tensões e fissuração. Concreto de 27,8 MPa - barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio pull-out



Onde f_c é a resistência à compressão do concreto
 A Figura 4 mostra as superfícies de ruptura, definida pelas funções F_1 e F_2 .
 O coeficiente de atrito (ϕ) é definido por Lundgren [14] conforme Figura 5.
 Como este parâmetro é decrescente, a superfície de ruptura vai diminuindo com o processo de deformação. Isto corresponde a

um “amolecimento” da relação constitutiva com os processos dissipativos.

4. Simulação numérica

Realizou-se um estudo numérico do comportamento dos ensaios de arrancamento *pull-out* e APULOT comparando com

Figura 9 - Comparação dos resultados numéricos com a faixa de resultados experimentais de Vale Silva (2) - Concreto de 49,3 MPa e barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio pull-out

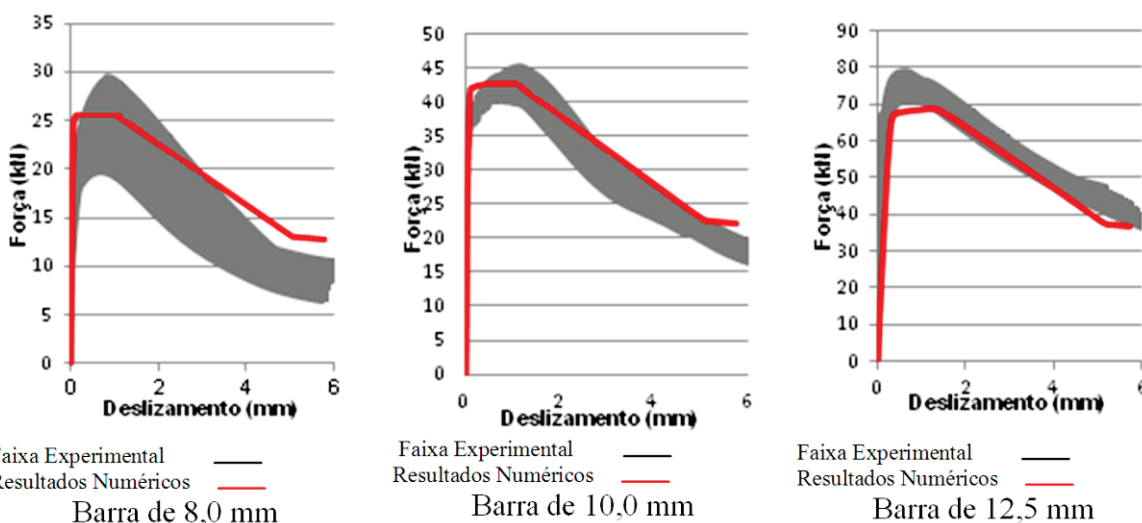
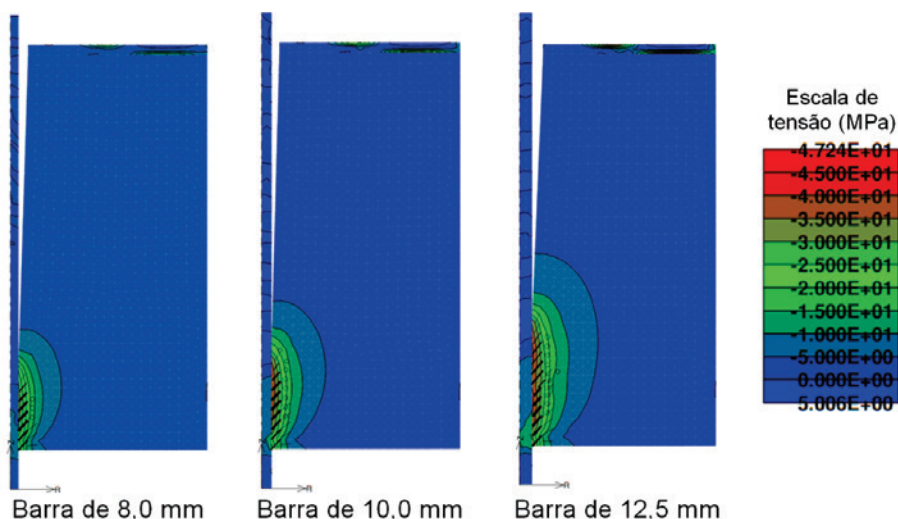


Figura 10 - Distribuição de tensões e fissuração. Concreto de 49,3 MPa - barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio pull-out



resultados obtidos experimentalmente por Vale Silva [2].

4.1 Ensaio pull-out

Realizou-se uma análise com os dados obtidos experimentalmente de Vale Silva [2] para os concretos de resistência à compressão de 27,8 MPa (Concreto T1) e de 49,3 MPa (Concreto T2) aos 28 dias com as barras de aço de diâmetros iguais a 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm e tensão de escoamento (f_y) igual a 625,0 MPa.

Com o objetivo de reduzir o número de elementos, e consequentemente,

o tempo de processamento, optou-se por utilizar o tipo de análise "axial symmetry" do programa ATENA considerando o modelo axissimétrico, com o eixo de simetria axial no centro do corpo de prova. A Figura 6 representa em detalhes o esquema numérico utilizado neste caso.

Analizando as possíveis malhas de elementos finitos a serem utilizadas, optou-se por utilizar uma malha com 943 elementos e 1097 nós. A análise de malhas assim como a análise dos parâmetros dos materiais estão apresentados em Tavares [15].

A Figura 7 apresenta o diagrama força x deslocamento comparando a faixa de resultados experimentais com os numéricos para as

Figura 11 - Comparação dos resultados numéricos com a faixa de resultados experimentais de Vale Silva (2) - Concreto de 27,8 MPa e barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio APULOT

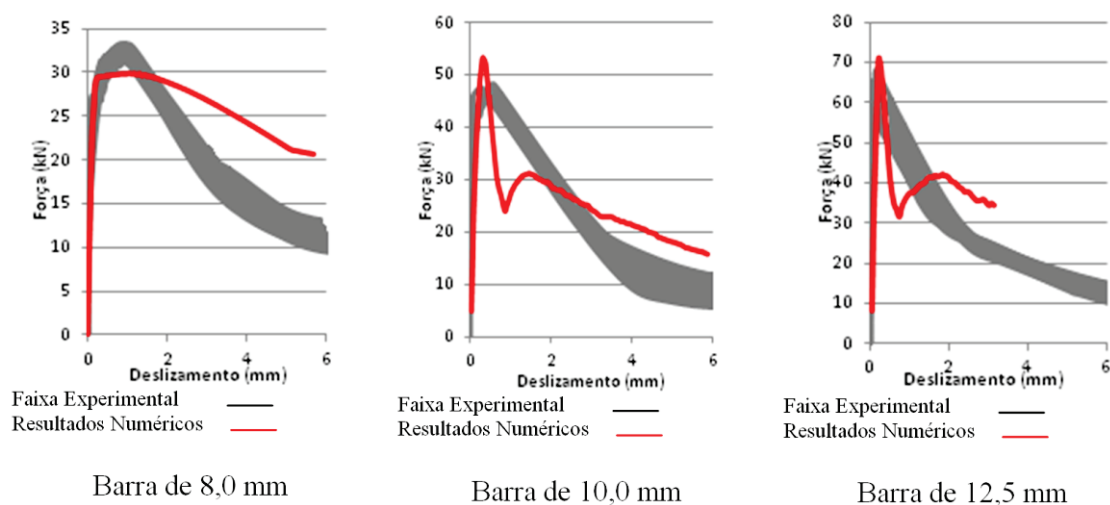
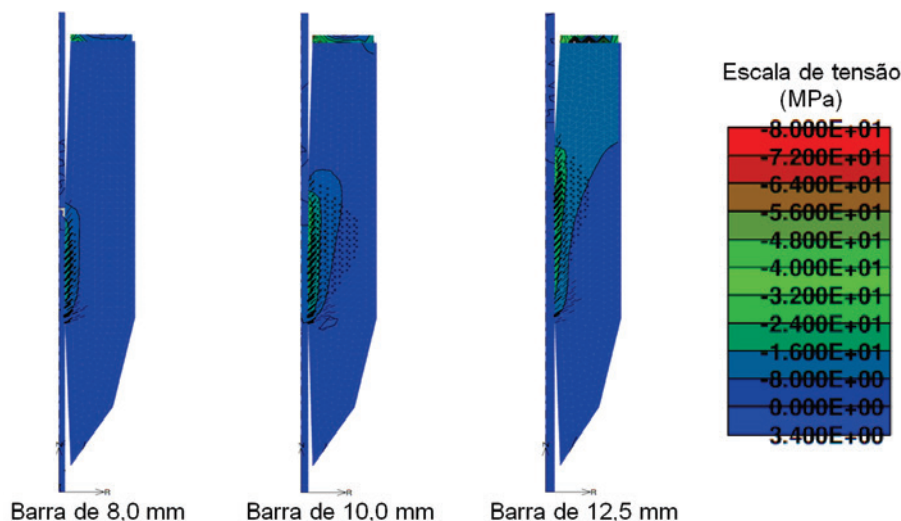


Figura 12 – Distribuição de tensões e fissuração. Concreto de 27,8 MPa – barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio APULOT



barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm e com o concreto de resistência à compressão no valor de 27,8 MPa.

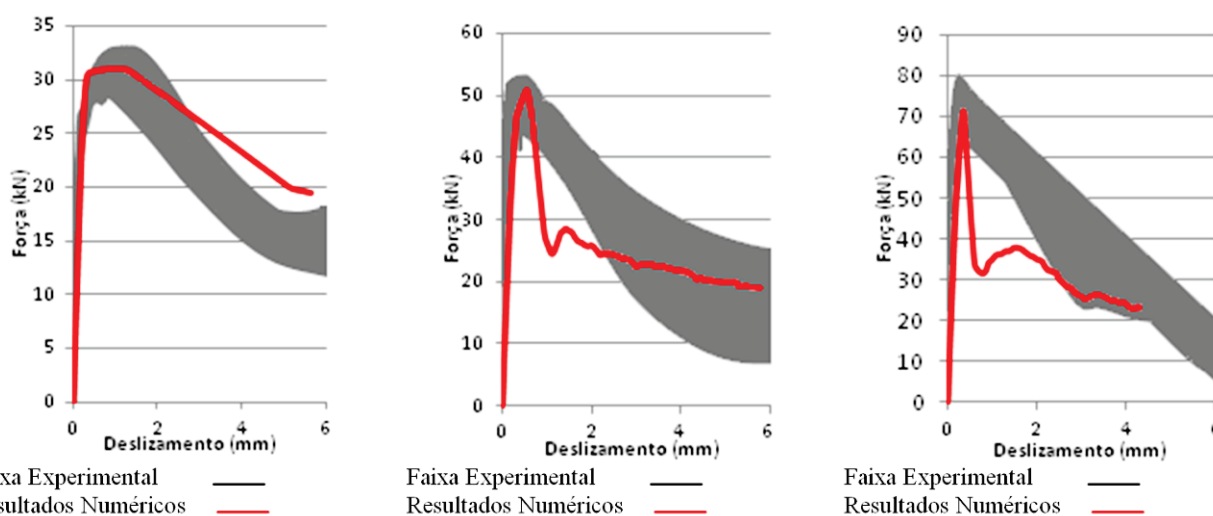
Observa-se na Figura 7 que as curvas dos resultados numéricos aproximam da faixa de resultados experimentais. A Figura 8 apresenta a distribuição de tensões, a fissuração e a deformada da estrutura para as barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm.

Nota-se que houve um aumento no valor da tensão e também na quantidade de fissuras conforme o diâmetro da barra aumenta de 8,0 mm até 12,5 mm, assim como o aumento do comprimento de ancoragem. Este fato pode ser justificado pelo fato de, como as

tensões geradas foram suportadas pelo bloco de concreto, com a maior superfície de contato, há uma maior resistência ao deslizamento aumentando a tensão e a fissuração na carga de pico. Os resultados referentes aos ensaios *pull-out* com o concreto de resistência à compressão aos 28 dias de 49,3 MPa (Figura 9) apresentados nos diagramas força x deslizamento compara a faixa de resultados experimentais com os resultados numéricos, para as barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm.

Nota-se que as curvas dos resultados numéricos estão dentro da faixa dos resultados experimentais até ser atingido o valor máximo

Figura 13 – Comparação dos resultados numéricos com a faixa de resultados experimentais de Vale Silva (2010) – Concreto de 49,3 MPa e barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm. Ensaio APULOT



da tensão de aderência, em que há o deslizamento da barra, porém o pico da curva referente à barra de 12,5 mm ficou ligeiramente abaixo da faixa experimental, o que reduz o valor da tensão última de aderência do resultado numérico em relação ao experimental.

A Figura 10 apresenta a distribuição de tensões no modelo com valores apresentados na legenda em MPa, juntamente com a fissuração e a deformada da estrutura no passo de carga em que é atingido o valor de tensão última de aderência, para os ensaios *pull-out* com o concreto de resistência à compressão igual a 49,3 MPa e com as barras de 8,0, 10,0 e 12,5 mm de diâmetro.

Na Figura 10, verifica-se o mesmo efeito observado para o concreto denominado de T1 ($f_{c28} = 27,8$ MPa) ocorrendo um aumento no valor da tensão e na quantidade de fissuras com o aumento do diâmetro da barra e o, conseqüente, aumento do comprimento de ancoragem. Comparando as Figuras 8 e 10, nota-se que com o aumento da resistência à compressão do concreto houve um aumento da fissuração e um maior valor da tensão no concreto.

4.2 Ensaio APULOT

Nas simulações do ensaio APULOT utilizou-se também a análise axissimétrica com o mesmo tipo de elementos finitos e os mesmos modelos constitutivos para os materiais do ensaio *pull-out*. Os diagramas de força x deslizamento do ensaio APULOT para as barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm e com o concreto de 27,8 MPa de resistência à compressão estão apresentados na Figura 11.

Na simulação com a barra de aço de 8,0 mm, observa-se que a curva do resultado numérico se calibrou com a faixa de resultados experimentais, inclusive na representação pós-pico, mostrando o deslizamento da barra em relação ao concreto. No entanto, os resultados numéricos com as barras de 10,0 mm e de 12,5 mm, embora tenham atingido valores até superiores aos

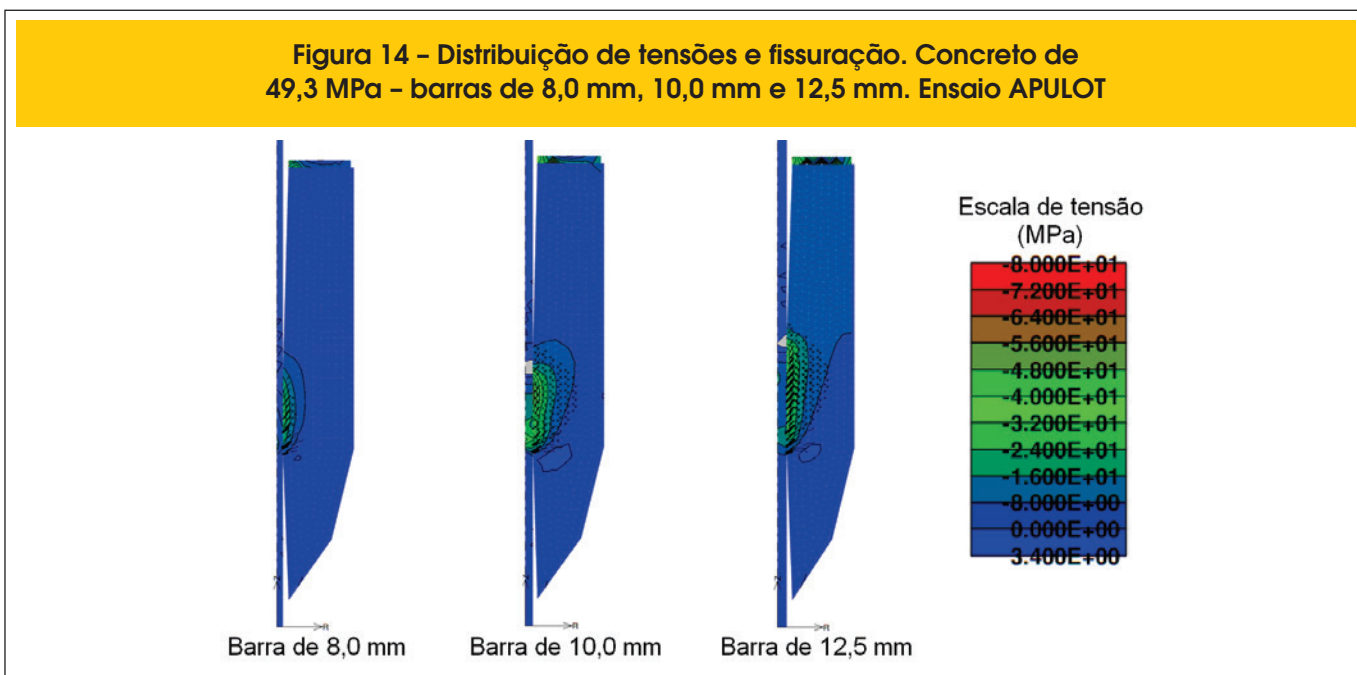
resultados experimentais para a tensão máxima, na região pós-pico, representam o comportamento típico de uma ruptura por fendilhamento, sendo também este o comportamento obtido na maioria dos resultados experimentais, por Vale Silva [2], nesse caso. Com isso, verifica-se que o modelo constitutivo utilizado para representar o concreto e a interface é capaz de simular diferentes modos de falha da aderência, ou seja, consegue capturar os mecanismos de arrancamento e fendilhamento. A distribuição de tensão e fissuração no concreto no passo de carga que é atingido a tensão de aderência é dada na Figura 12.

Analisando a Figura 12, nota-se que, houve um aumento no valor da tensão e também na quantidade de fissuras conforme o diâmetro da barra aumenta de 8,0 mm até 12,5 mm, efeito também notado para o ensaio *pull-out*.

A Figura 13 apresenta os diagramas força x deslizamento comparando o resultado numérico com a faixa de resultados experimentais referente às barras de 8,0 mm, 10,0 mm e 12,5 mm com o concreto de resistência à compressão de 49,3 MPa.

Para estes exemplos referentes ao concreto de 49,3 MPa, o modo de ruptura da aderência foi semelhante aos resultados obtidos para o concreto de 27,8 MPa, ou seja, houve ruptura por deslizamento para a barra de 8,0 mm e ruptura por fendilhamento nas barras de 10,0 mm e de 12,5 mm, o que também ocorreu nos resultados experimentais de Vale Silva [2] para o ensaio APULOT com estas barras. O valor da tensão última de aderência do resultado numérico atingiu o patamar máximo dentro da faixa de resultados experimentais para os três diferentes diâmetros das barras.

A Figura 14 apresenta a distribuição de tensões e a fissuração no passo de carga que é atingido a tensão última de aderência. De acordo com a Figura 14, observa-se que ocorreu o mesmo efeito para o concreto de 27,8 MPa (Figura 12) em que houve o deslizamento para a barra de 8,0 mm e o fendilhamento para as barras de 10,0 mm e 12,5 mm.



5. Conclusões

Analisando os diagramas força x deslizamento, conclui-se que os resultados numéricos apresentam comportamento equivalente aos resultados dos ensaios experimentais, validando a utilização do modelo. Nos ensaios *pull-out* e nos ensaios APULOT observou-se que o aumento do diâmetro da barra para o concreto de mesma resistência mecânica resultou em um aumento das tensões no concreto na região da zona aderente. Já comparando exemplos com barra de mesmo diâmetro e com a resistência do concreto distinta, nota-se que há um aumento na tensão do concreto com o aumento da resistência à compressão deste. Em todos os ensaios *pull-out* a ruptura da aderência foi dada por deslizamento, entretanto, nos ensaios APULOT, a ruptura da aderência para o ensaio com a barra de 8,0 mm foi por deslizamento, enquanto que, nos ensaios referentes às barras de 10,0 mm e 12,5 mm, o modo de ruptura da aderência aconteceu por fendilhamento, para as resistências mecânicas dos concretos utilizados. Isto pode estar ocorrendo devido ao fato do cobrimento de concreto em torno da barra ser maior no ensaio *pull-out* que no ensaio APULOT contribuindo para distribuir melhor as tensões geradas durante o ensaio.

6. Referências bibliográficas

- [01] LORRAIN, M; BARBOSA P. M. Controle de qualidade dos concretos estruturais: ensaio de aderência aço-concreto. *Revista Concreto & Construções*, São Paulo, v.36, n.51, 2008, p.52-57.
- [02] VALE SILVA, B. *Investigação do potencial dos ensaios APULOT e pull-out para estimativa da resistência a compressão do concreto*. 178f. 2010. Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira. 2010.
- [03] COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BÉTON. CEB. *RILEM/CEB/FIP RC6: bond test for reinforcing steel - 1 - pull-out test*. Paris, 1983, 3p.
- [04] AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM. *ASTM C234: standard test method for comparing concretes on the basis of the bond developed with reinforced steel*. Philadelphia. 1991, 5p.
- [05] LORRAIN, M; BARBOSA P. M. SILVA FILHO, L.C.P. Estimation of compressive strength based on Pull-Out bond test results for on-site concrete quality control. *REVISTA IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS - RIEM*, v. 4, p. 582-591. 2011.
- [06] TASSIOS, T. Properties of Bond Between Concrete and Steel under Load Cycles Idealizing Seismic Actions. *CEB, Bulletin d'Information*, Roma, v.1, n. 131, 1979,p. 67-122.
- [07] DUCATTI, V. A. *Concreto de elevado desempenho: estudo da aderência com a armadura*. 1993. 259f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.1993.
- [08] CAETANO, L. F. *Estudo do comportamento da aderência de elementos de concreto armado em condições extremas*. 2008. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2008.
- [09] GOTO, Y. Cracks formed in concrete around deformed tension bars. *ACI Journal Proceedings*, Michigan, v. 68, n.4, 1971, p. 244-251.
- [10] FUSCO, P. B. *Técnica de armar as estruturas de concreto*. São Paulo: PINI, 1995, 265p.
- [11] LEONHARDT, F; MOMMIG, E. *Construções de concreto*. Rio de Janeiro: Interciência.1979.
- [12] CERVENKA, V.; JENDELE, L.; CERVENKA, J. ATENA Program Documentation. Prague: Cervenka Consulting. Part 1. 2011.
- [13] COX, J. V. Development of a Plasticity Bond Model for Reinforced Concrete –Theory and Validation for Monotonic Applications. *Technical Report TR-2036-SHR*. Naval Facilities Engineering Service Centre, Port Hueneme, USA. 1994.
- [14] LUNDGREN, K.; GUSTAVSON, R.; MAGNUSSON, J. Finite element modelling as a tool to understand the bond mechanisms. In: BOND IN CONCRETE – FROM RESEARCH TO STANDARDS, *Proceedings...* Budapest. 2002.
- [15] TAVARES, A. J. *Aderência aço-concreto: análise numérica dos ensaios pull-out e APULOT*.Dissertação (mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Ilha Solteira. 2012.