

## ANÁLISE DA ADERÊNCIA ENTRE O CONCRETO E BARRAS DE FIBRAS POLIMÉRICAS DE CARBONO (CFRP) VIA MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Luís Adélio Argenta (Estudante de Engenharia Civil – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões) E-mail: adelio.arg@gmail.com

Daiane de Sena Brisotto (Professora Doutora - Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões) E-mail: daiabrisotto@uricer.edu.br

Andréia Fátima Tormen (Estudante de Engenharia Civil – Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões) E-mail: andreiatormen@gmail.com

**Resumo:** As barras de aço como armadura em peças de concreto armado têm sido amplamente empregadas devido à vantagem econômica e à eficiência que este material proporciona. Tepfers (2006) afirma que a popularidade adquirida pelas barras de aço deve-se ao fato de que este é um material homogêneo e padronizado. Entretanto, determinadas condições ambientais podem levar à corrosão destas barras. Nesses casos, o uso da barra de fibra polimérica (FRP) tem sido considerado como uma alternativa ao uso de barras de aço como reforço em estruturas de concreto. Em ambos os casos, a aderência entre a armadura e o concreto é um aspecto de fundamental importância no comportamento da estrutura de concreto armado. O objetivo deste trabalho consiste em analisar numericamente o comportamento aderente entre o concreto e barras de fibras poliméricas de carbono com diferentes tratamentos superficiais, através do método dos elementos finitos. Para tal, com base em resultados experimentais disponíveis na literatura, será adaptado e recalibrado o modelo numérico de análise da aderência entre concreto e barras de aço previamente desenvolvido por um dos autores (BRISOTTO, 2012). A influência do acabamento superficial, do diâmetro das barras e da resistência à compressão do concreto foram avaliadas, e os resultados numéricos mostram uma boa concordância com os valores experimentais.

**Palavras-chave:** aderência, concreto armado, barras de fibras poliméricas de carbono, modelo de aderência.

## ANALYSIS OF BOND BEHAVIOR BETWEEN CONCRETE AND CARBON FIBER REINFORCED POLYMER BARS (CFRP) VIA FINITE ELEMENTS METHOD

**Abstract:** The significant wide use of steel bars as a reinforcement in concrete elements is due to the economic advantages and to the physical properties inherent to the material. The popularity of steel bars was achieved due to the fact that steel is a homogeneous and standardized material. In the case of fiber reinforced polymer bars (FRP), the bond behavior is considerably complex and relies on parameters such as pull-out resistance, the concrete element geometry, bar location in the transversal section of the element, concrete covering, reinforcement confinement, bond failure mode and bond stress distribution along the contact area, and, more important, modulus of Elasticity and Poisson's coefficient (TEPFERS, 2006). The purpose of this study is to analyze the bond behavior between concrete and carbon fiber reinforced polymer bars with different surface treatments on pieces of reinforced concrete, through the finite elements method. A proposed model previously developed by one of the authors (BRISOTTO, 2012) will be adapted and recalibrated for this study. The influence of the physical and geometric characteristics of the different types of bars found in the model will be compared to experimental results for its correct calibration. It is concluded that the model works satisfactorily, in the simulation of the bond between carbon fiber bars with different diameters and surface treatments, for normal and high strength resistance concrete.

**Keywords:** bond, reinforced concrete, carbon fiber reinforced polymer bars, bond model.

### 1. INTRODUÇÃO

O concreto armado é um material cujo desempenho está essencialmente relacionado à aderência entre a armadura e o concreto. No caso das barras de fibras poliméricas, devido ao baixo módulo de elasticidade que algumas destas barras possuem e da ausência de uma deformação plástica bem definida no diagrama *tensão versus deformação* (diferente do que ocorre com o aço), o

desempenho das barras depende principalmente da magnitude da ligação que ocorre na interface entre a superfície do concreto e a superfície da barra (TASTANI *et al.*, 2006).

Devido à falta de padronização quanto às características de acabamento superficial (sand coat, ribbed, wrapped, etc.) e composição de materiais (fibra de vidro, carbono e aramida), um estudo aprofundado do comportamento das estruturas que utilizam armaduras com tamanha diversidade é muito importante para uma melhor compreensão de como o comportamento aderente se dá nessa situação. Conforme Brisotto (2011) afirmou, estas propriedades mecânicas são de difícil determinação, pois variam significativamente com o tipo de resina e fibra, orientação da fibra, processo de fabricação e conformação superficial.

Neste trabalho, será analisado o comportamento aderente entre o concreto e barras de fibra de carbono, levando em conta diferentes valores de resistência à compressão do concreto e diferentes diâmetros e acabamento superficial das barras. O modelo que será utilizado neste estudo é um modelo de escala mesoscópica de interface bidimensional que relaciona as componentes normais e tangenciais das tensões na interface, bem como seus respectivos deslocamentos. Com este modelo é possível capturar o processo da falha da aderência por arrancamento e fendilhamento, através da homogeneização da zona de aderência entre concreto e armadura. A figura 1 mostra a idealização interfacial do modelo.

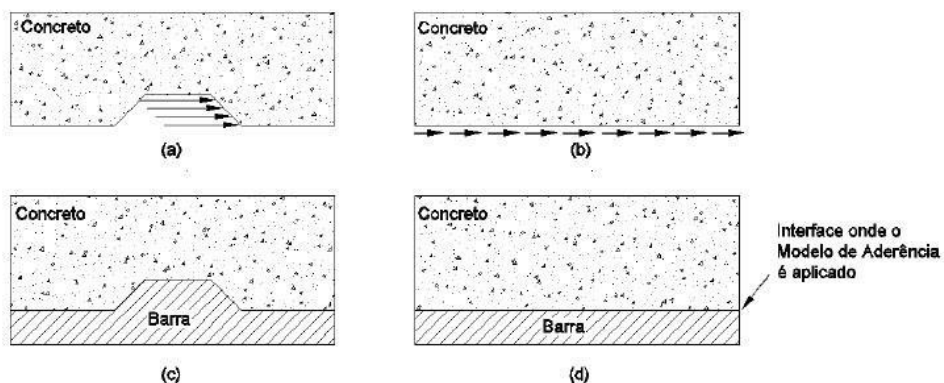


Figura 1- Idealizações do modelo: (a) e (c) distribuição de tensões e deformação da zona de aderência (real); (b) e (d) distribuição de tensões e deformação para um modelo de aderência interfacial.

Fonte - BRISOTTO (2011).

## 2. METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho se dá com base no modelo proposto por Brisotto *et al.*, (2012) para modelagem da aderência em que o concreto e barras de aço nervuradas.

Uma analogia elasto-plástica pode ser feita para a determinação do comportamento da aderência reforço-concreto. O comportamento de aderência é neste caso governado por vetores tensão  $t_i$  na interface entre o concreto e aço. A componente tangencial às barras,  $(t_t)$ , corresponde às tensões de separação. Na faixa elástica  $t_i$  é uma função do escorregamento elástico,  $u_t^e$ , e da abertura elástica,  $u_n^e$ , da interface, de acordo com a seguinte relação:

$$t_i = D_{ij} * u_j^e \tag{1}$$

onde  $t_i = (t_n, t_t)^T$ ,  $u_j^e = (u_n^e, u_t^e)^T$  e  $D_{ij}$  é a matriz elástica. Como aplicações ao método dos elementos finitos é nosso objetivo neste trabalho, elementos serão introduzidos na interface. Tais elementos possuem 4 nós onde, inicialmente, 2 destes são coincidentes criando um

elemento de espessura zero. Neste caso,  $D_{ij}$  pode ser considerada uma matriz de coesão, contendo a rigidez de molas lineares ligadas aos nós. Será considerado que valores positivos de  $u_n$  indicam abertura da interface.

Limites elásticos são definidos por uma ou mais funções  $F$ , que são representadas por linhas no espaço de tensões  $t_i$  versus  $t_n$ . Para evitar problemas de unicidade, tais linhas devem ser convexas.

Para carregamentos ao longo do limites elásticos ( $F = 0, dF = 0$ ), deslocamentos dissipativos ou plásticos  $u_i^p$  ocorrem. Incrementalmente os deslocamentos totais podem ser calculadas como:

$$du_i = du_i^e + du_i^p \tag{2}$$

Uma vez estabelecida uma regra de fluxo para o cálculo de  $du_i^p$ , tem-se um conjunto de equações que pode ser resolvido por métodos de retorno usualmente empregado em plasticidade.

A matriz elástica  $D_{ij}$  é definida na Eq. (3) como:

$$D_{ij} = E_c \begin{bmatrix} K_{11} & -sgn(u_t^e)K_{12} \\ 0 & K_{22} \end{bmatrix} \tag{3}$$

O termo fora da diagonal expressa a interação das componentes de tensão causada pelas nervuras inclinadas. O fator  $-sgn(u_t^e)$  indica que o escorregamento produz um valor simétrico negativo de tensão normal, ou compressão na interface.  $E_c$  é o módulo elástico do concreto e  $K_{11}$ ,  $K_{12}$  e  $K_{22}$  são constantes elásticas da interface.

A rigidez  $K_{11}$  é considerada como função do deslocamento normal e no modelo tem a função de ser apenas um fator de penalização, com o objetivo de evitar instabilidade numéricas. Para valores de deslocamento normal negativos foi definido um valor máximo para  $K_{11}$  e, à medida que ocorre a abertura normal da interface, o valor da rigidez vai diminuindo linearmente, conforme mostra a Figura 2. Como é apenas um fator de penalização, a função mostrada na figura abaixo é adotada para todos os tipos de armadura, independente do material e geometria da barra.

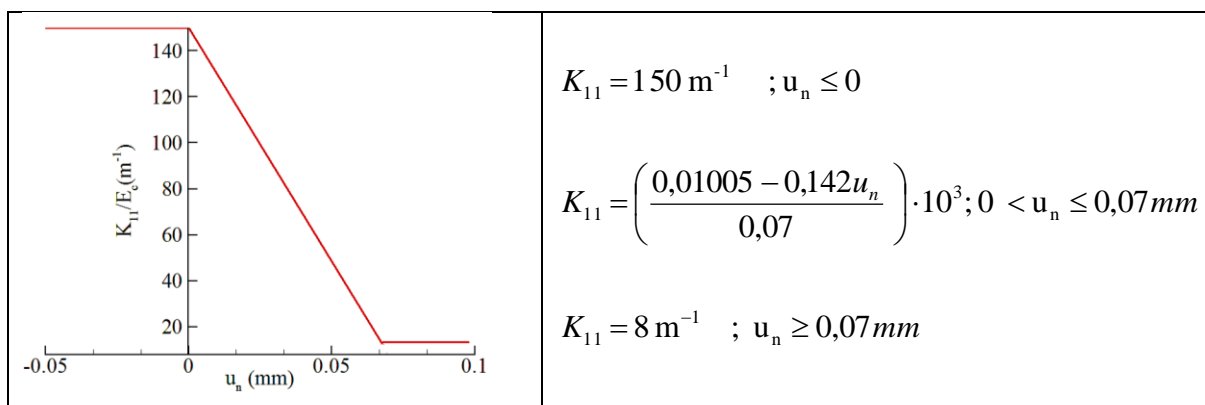


Figura 2 - Rigidez  $K_{11}$ .  
Fonte – Dos autores.

A rigidez  $K_{22}$  descreve a relação entre a parte elástica do escorregamento,  $u_t^e$ , e a tensão de aderência,  $t_t$ . Conforme mostrado em Brisotto *et al.*, (2012) este valor pode ser definido pela seguinte expressão:

$$K_{22} = \frac{t_t}{u_t^e} = \frac{2A'}{\pi\phi l_k^2} \tag{4}$$

onde  $A'$  é a área das nervuras projetada transversalmente,  $\phi$  o diâmetro da barra,  $l_k$  a distância longitudinal entre os centros das nervuras.

A rigidez  $K_{12}$  descreve a relação entre a parte elástica do escorregamento,  $u_t^e$ , e tensão normal  $t_n$ . Desta forma, esta descreve o quanto de tensão normal será causada por um dado escorregamento, e seu valor negativo mostra que o escorregamento em qualquer direção irá causar  $t_n$  negativo, ou seja forças compressivas irradiando do concreto:

$$K_{12} = \frac{-\beta K_{22}}{\mu_{m\acute{a}x}} \tag{5}$$

onde  $\mu_{m\acute{a}x}$  (coeficiente de atrito máximo) e  $\beta$  são valores que dependem do tipo de barra de armadura e são calibrados através de resultados experimentais.

Os limites elásticos são definidos pelas funções  $F_1$  e  $F_2$  abaixo:

$$F_1 = |t_t| + \mu t_n = 0 \tag{6}$$

$$F_2 = t_t^2 + t_n^2 + ct_n = 0 \tag{7}$$

A representação destas funções é mostrada na Figura 3. A função  $F_2$  representa a situação onde a resultante dos vetores tensões  $t_t$  e  $t_n$  atingem uma tensão limite  $c$ , associada à resistência à compressão média do concreto,  $f_{cc}$ .

A função  $F_1$  representa a fricção causada pelo engrenamento das nervuras ou saliências das barras. A variável  $\mu$  representa o coeficiente de atrito, definido a partir de dados experimentais.

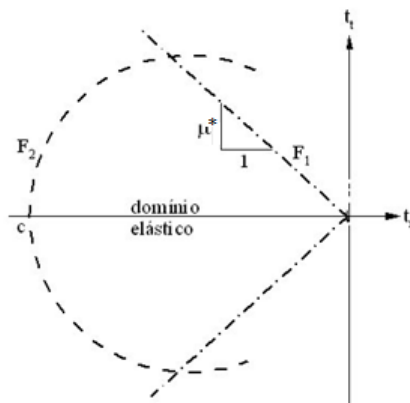


Figura 3- Superfície de ruptura para o modelo- representação dos limites elásticos.  
Fonte - BRISOTTO (2011).

Como a falha por fendilhamento degrada o engrenamento entre nervuras e concreto, esta falha é associada a  $F_1 = 0$ , e como a falha por arrancamento é ligada ao esmagamento do concreto, esta é associada a  $F_2 = 0$ .

Carregamento ao longo dos limites elástico leva a deslocamentos plásticos ou dissipativos  $u_t^p$ . Uma regra de fluxo associada é assumida para carregamentos ao longo de  $F_2$  ( $F_2 = 0, dF_2 = 0$ ), o que conduz à deformações plásticas como segue:

$$du_t^p = d\lambda \frac{\partial F_2}{\partial t_i} \quad (8)$$

onde  $d\lambda$  é um multiplicador plástico. Para carregamentos ao longo de  $F_1$  ( $F_1 = 0, dF_1 = 0$ ), uma regra não-associada é assumida.

$$du_t^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial t_i} \quad (9)$$

onde

$$G = |t_t| + \eta t_n = 0 \quad (10)$$

e  $\eta$  é fixado em 0,04.

No modelo de Brisotto *et al.* (2012),  $c$  e  $\mu$  são calibrados para a interface entre o aço e o concreto de resistência normal, assim como as propriedades elásticas ( $K_{11}, K_{12}$  e  $K_{22}$ ). Baseado em dados experimentais (Baena *et al.* (2009); Lee *et al.* (2009); Couto (2007); entre outros), estes valores foram recalibrados para a análise da aderência entre o concreto e barras de fibras de carbono. Foram analisadas barras com o acabamento superficial granular (R1) e texturizado (R3), mostradas na figura 4. Além disso, levando em consideração a diferença no comportamento aderente entre concretos de resistência normal (em torno de 30 MPa), chamado de C<sub>1</sub>, e concretos de alta resistência (maior que 50 MPa), chamado de C<sub>2</sub>, estes parâmetros também foram recalibrados levando-se em conta o tipo de concreto empregado.



Figura 4 - Acabamento superficial das barras analisadas.  
Fonte - BAENA *et al.*, (2009).

### 3. EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA

Nesta seção, são mostradas experimentações numéricas com o objetivo de verificar a aplicabilidade dos procedimentos expostos no item anterior, ou seja, comprovar se o modelo é capaz de representar a falha de aderência entre o concreto e barras de fibras de carbono. Neste trabalho, os resultados experimentais apresentados por Baena *et al.* (2009), foram avaliados com o modelo proposto.

A armadura é constituída de barras de fibra de carbono com diferentes acabamentos superficiais. O concreto é modelado como sendo elástico linear, portanto toda não-linearidade e efeitos de ruptura estão considerados apenas na região da interface. Devido à geometria cilíndrica, elementos finitos axissimétricos foram empregados nas simulações numéricas. No concreto, os elementos finitos são triângulos constantes, enquanto que na armadura os elementos são quadriláteros lineares.

Embora a distribuição de tensões na interface varie ao longo do comprimento aderente, esta distribuição pode ser considerada aproximadamente constante para pequenos comprimentos de aderência. Nas curvas tensão de aderência versus escorregamento, apresentadas aqui, é indicado este valor médio da tensão, definido por:

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot \phi \cdot l_b} \quad (11)$$

onde P é a carga aplicada,  $\phi$  é o diâmetro da barra, e  $l_b$  é o comprimento aderente.

Em todas as análises, as barras de armadura estavam inseridas dentro de um cubo de concreto de 200mm x 200mm. O comprimento incorporado da armadura era de 5 vezes o diâmetro da barra. A figura 5 mostra a geometria e malha de elementos finitos empregada na análise. A face superior do concreto tem os deslocamentos em y restringidos. Devido à simetria, os nós à esquerda no aço tem os deslocamentos em x restringidos. A barra de aço é deslocada para cima, na direção y, conforme indicado na figura.

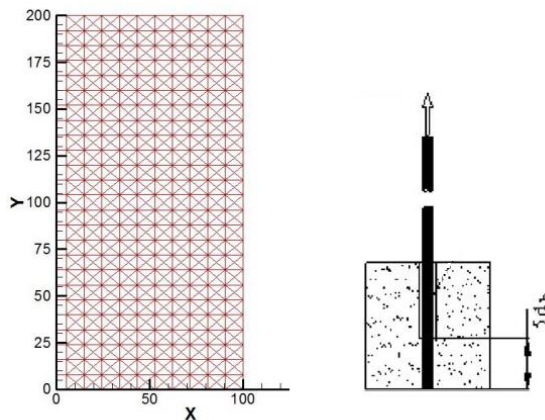


Figura 5 - Malha de elementos finitos e geometria empregada na análise.

Fonte – Dos autores.

Foi estudado o comportamento de barras de fibra de carbono com superfície texturizada e com revestimento granular. Para todas as barras a análise foi realizada com dois tipos de concreto: concreto C1 (baixa resistência) e concreto C2 (alta resistência). As propriedades mecânicas dos materiais empregados na análise são apresentadas na tabela abaixo.

Tabela 1 – Propriedades mecânicas e geométricas das barras e concretos analisados.

		Concreto (MPa)				Armadura	
		C1		C2			
		f <sub>cc</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>cc</sub> (MPa)	E <sub>c</sub> (MPa)	f <sub>y</sub> (MPa)	E <sub>s</sub> (MPa)
Sand Coat	11 mm	27,80	25300	54,93	34800	1596	120000
	13 mm	27,80	25300	54,93	34800	1899	144000
Textured surface	9 mm	27,80	25300	54,93	34800	2068	124000
	13 mm	27,80	25300	54,93	34800	2068	124000

Fonte - adaptado de BAENA et al. (2009).

### 3.1. BARRA COM SUPERFÍCIE TEXTURIZADA

Para a análise das barras com superfície texturizada, foi necessário redefinir os valores das variáveis do modelo:  $\mu$ ,  $c$ ,  $K_{12}$  e  $K_{22}$ . Como a rigidez  $K_{11}$  é apenas um valor de penalização, foi adotada a mesma lei empregada para as barras nervuradas (figura 2).

As figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, as novas leis obtidas para o atrito  $\mu$  e para a variável  $c$ . Conforme pode-se observar, para este tipo de barra, a lei do atrito não depende do diâmetro e do tipo do concreto empregado. A influência do diâmetro e do tipo de concreto é capturada através da variável  $c$ .

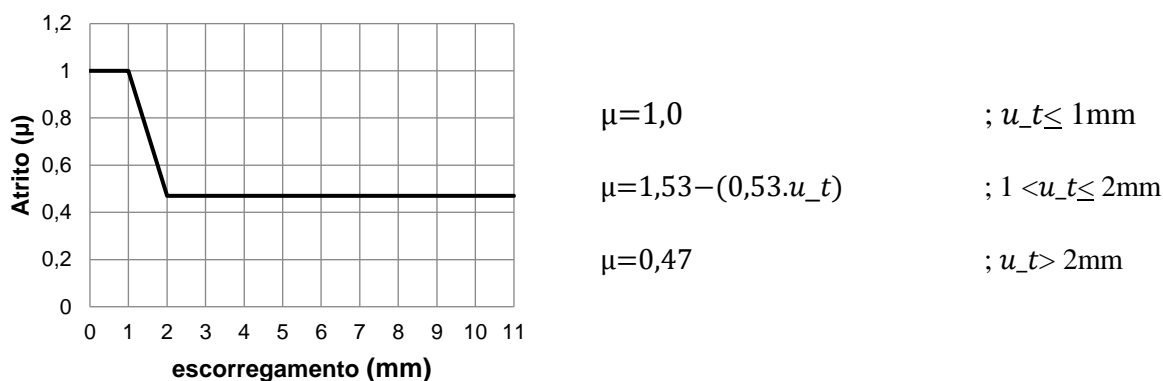
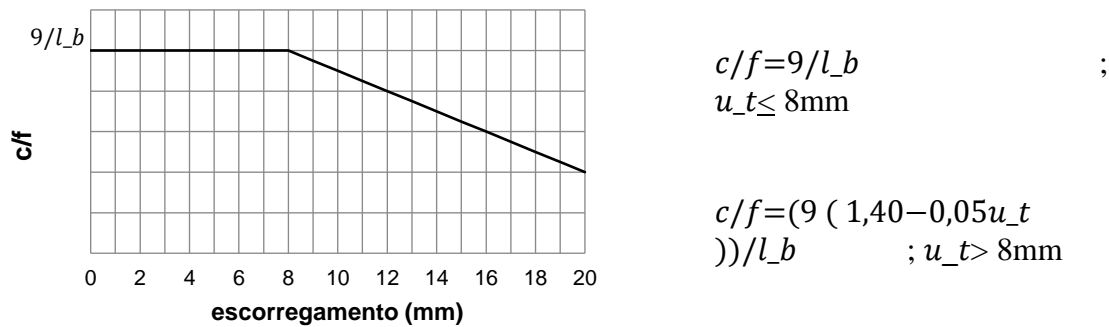


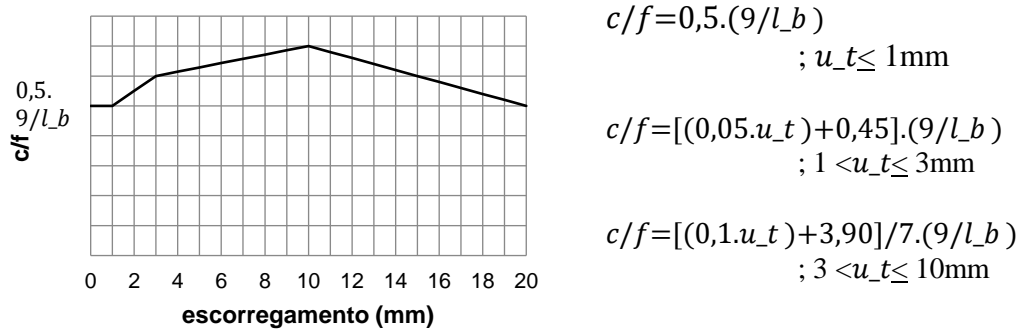
Figura 6 - Variação do atrito para a barra com acabamento superficial texturizado.

Fonte - Dos autores.





(a)



(b)

Figura 7 - Variação do parâmetro c para a barra com acabamento superficial texturizado: (a) concreto C1, (b) concreto C2.

Fonte - Dos autores.

Para a rigidez  $K_{22}$  foi adotado um valor constante e igual a  $0,006m^{-1}$ , uma vez que a equação 4 não se aplica devido à ausência de nervuras. Já para a rigidez  $K_{12}$ , foi empregada a equação 5 com o valor de  $\beta$  igual a 0,5.

Através da implementação destas leis no modelo, foi possível obter a curva tensão de aderência versus escorregamento para a barra com acabamento texturizado. A figuras 8 mostra estas curvas para as barras com diâmetro de 9mm e 13mm, bem como para concretos de resistência normal (C1) e alta resistência (C2). Os resultados mostram que com a recalibração dos parâmetros do modelo foi possível capturar de forma satisfatória o comportamento da aderência.



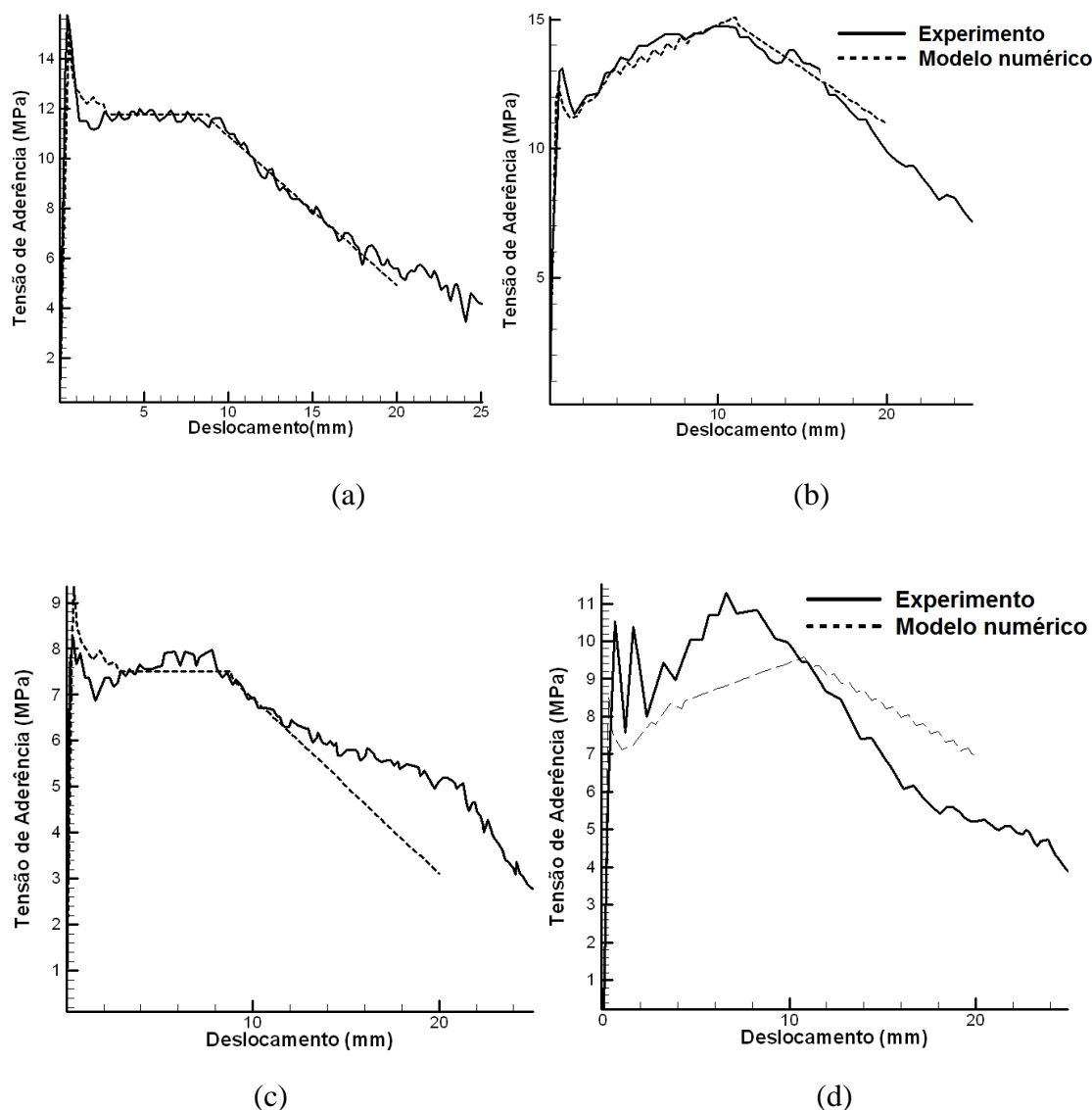


Figura 8 - Curvas tensão de Aderência versus deslocamento para barra com superfície texturizada: (a) 9mm e concreto C1, (b) 9mm e concreto C2, (c) 13mm e concreto C1 e (d) 13mm e concreto C2. Fonte – Dos autores.

Percebe-se para o caso do concreto C1 um certo platô na curva após a tensão máxima de aderência ser atingida, o que demonstra certa resistência da barra a ter seu revestimento rompido. Nos testes apresentados por Baena *et al.* (2009), não é mencionado o exato tipo de revestimento superficial da barra, mas sim que a resina empregada é epoxídica, do que se deduz, a primeira análise, que a resina tenha proporcionado tal desempenho na aderência devido à ductilidade que este tipo de material apresenta.

### 3.2. BARRAS REVESTIDAS COM CAMADA GRANULAR

Semelhante às barras com superfície texturizada, para a análise das barras com superfície granular foi necessário definir uma nova lei para a variável  $\mu$ , variável  $c$  e valores de rigidez  $K_{11}$  e  $K_{22}$ . Como a rigidez  $K_{11}$  é apenas um valor de penalização, foi adotada a mesma lei empregada para as barras nervuradas.

A nova lei para o atrito e para a variável  $c$  são mostradas nas figuras 9 e 10, respectivamente. Diferentemente do caso anterior, a influência do diâmetro e do tipo de concreto é capturada através da variável  $\mu$ , enquanto que o valor da variável  $c$  depende somente do escorregamento entre a barra e o concreto.

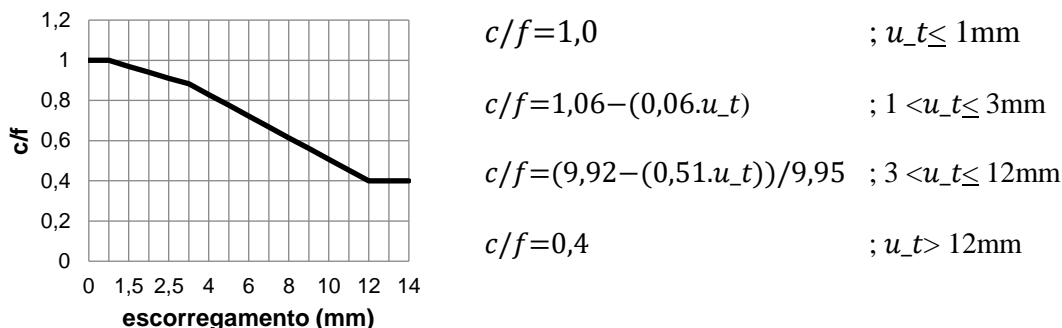


Figura 9 - Curva do parâmetro  $c$  adotada para a barra com acabamento superficial granular.

Fonte – Dos autores.

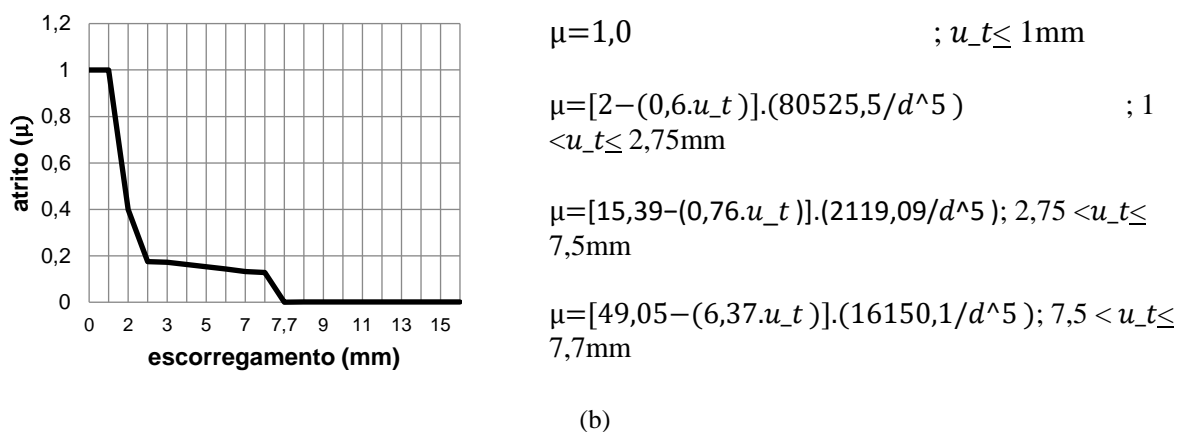
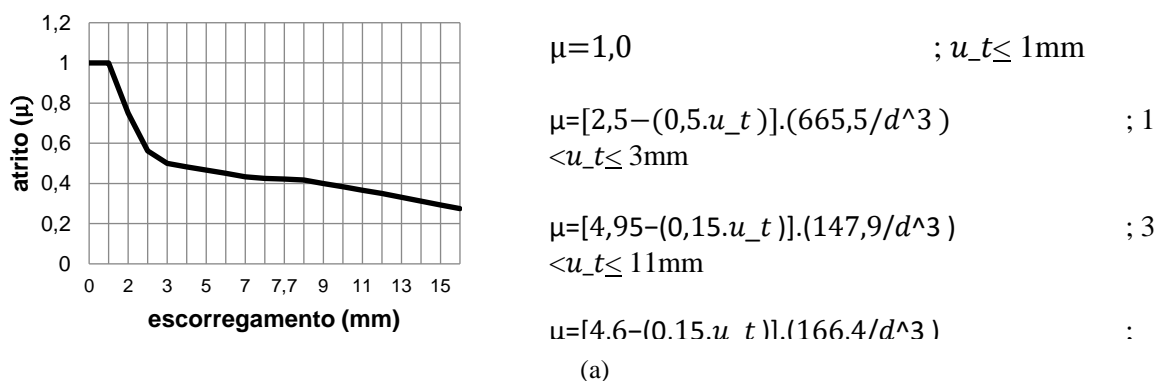


Figura 10 -Variação do atrito para a barra com acabamento superficial granular: (a) concreto C1, (b) concreto C2.

Fonte – Dos autores.

Para a rigidez  $K_{22}$ , foi adotado um valor constante e igual a  $0,014m^{-1}$ , uma vez que a equação 4 não se aplica devido à ausência de nervuras. Já para a rigidez  $K_{12}$ , foi empregada a equação 5 com o valor de  $\beta$  igual a 0,8.

Através da implementação destas leis no modelo, foi possível obter uma curva tensão de aderência versus escorregamento para a barra com acabamento texturizado. A figura 11 mostra estas curvas para as barras com diâmetro de 11mm e 13mm, bem como para concretos de resistência normal e alta resistência.

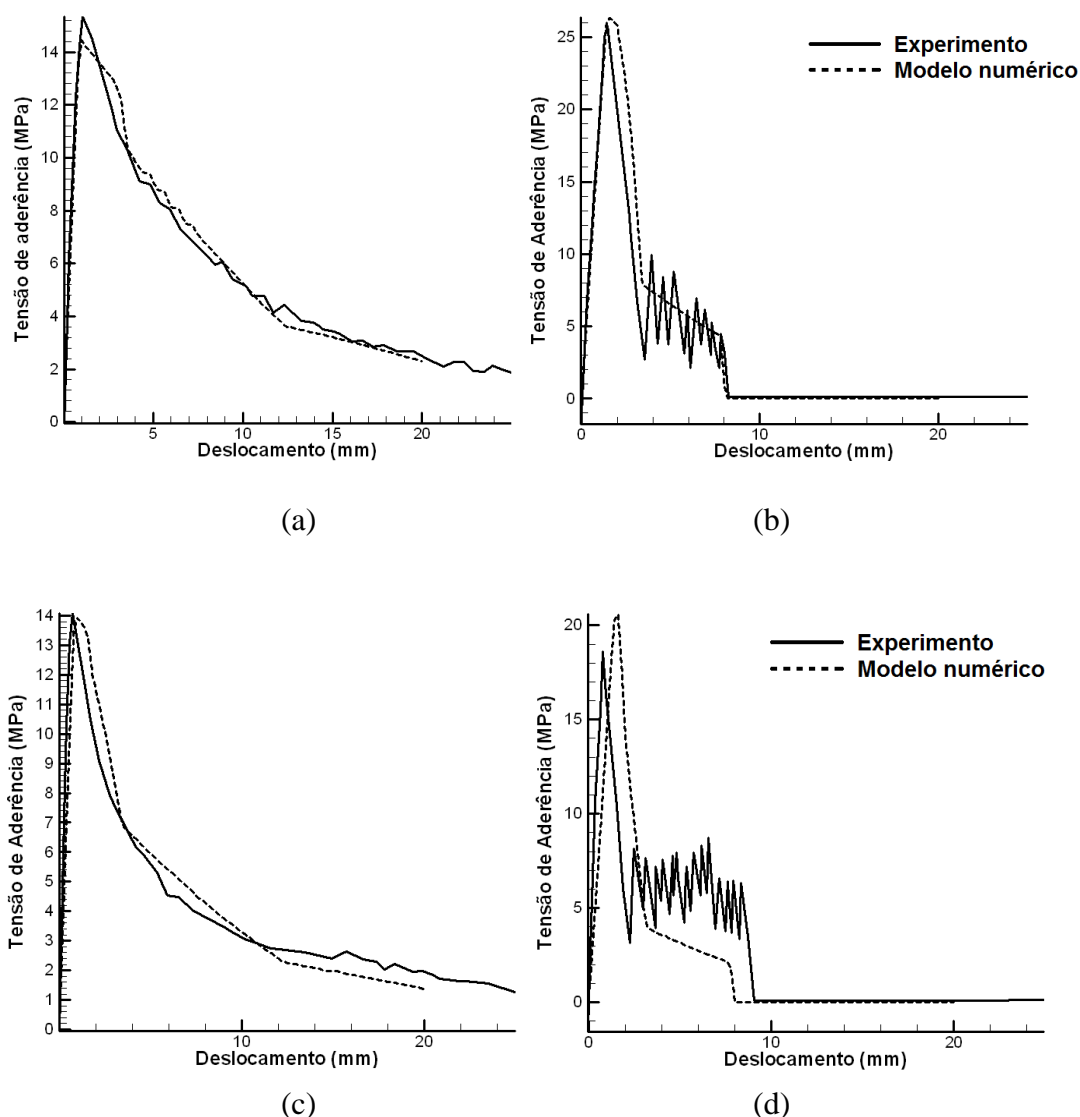


Figura 11 - Curvas tensão de Aderência versus deslocamento para barra com superfície granular: (a) 11mm e concreto C1, (b) 11mm e concreto C2, (c) 13mm e concreto C1 e (d) 13mm e concreto C2.

Fonte – Dos autores.

As curvas acima mostram que, com os novos valores encontrados para as variáveis do modelo, foi possível capturar de forma satisfatória o comportamento experimental apresentado por estas barras.

Observa-se que em todos os casos da barra com acabamento superficial granular ocorre um pico na tensão de aderência, dada devido ao atrito do acabamento com o concreto, seguido de uma queda na tensão, em virtude do descolamento do revestimento da camada de resina

envolvente. No caso de uso do concreto de alta resistência (figuras 11b e 11d), essa ruptura é mais abrupta, mostrando que o descolamento da camada de resina ocorre de forma mais violenta, enquanto que no caso de uso de concreto de resistência normal este ocorre mais suavemente (figuras 11a e 11c).

#### 4. CONCLUSÕES

Os resultados da análise numérica realizada mostrou que o modelo numérico concordou com os resultados experimentais de forma satisfatória, apresentando, contudo, variação maior no caso da barra R3 com diâmetro de 13mm e emprego do concreto de alta resistência (figura 8d). Tal acontecimento pode ter razão tanto na necessidade de refino dos parâmetros de influência do diâmetro quanto nas incertezas decorrentes do próprio teste de arrancamento, uma vez que verificam-se picos e quedas abruptas em sequência, demonstrando novamente que concretos de resistência mais elevada sensibilizam o acabamento superficial das barras.

Avaliando-se os resultados obtidos pelo modelo numérico e comparando-os com os experimentos realizados por Baena *et al.* (2009), conclui-se que o modelo atende, de forma satisfatória, a simulação da aderência entre barras de fibra de carbono com diferentes acabamentos superficiais e diâmetros, e concretos de resistências normais e altas. De acordo com essas variantes, propôs-se aqui também descobrir a influência destas através de um ajuste fino nos valores das propriedades elasto-plásticas do modelo, inserindo-a nas equações do modelo, tendo revelado caráter preditivo quanto aos mecanismos da falha.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões pela concessão do apoio de infraestrutura para o desenvolvimento deste estudo.

#### REFERÊNCIAS

**BAENA, M.; TORRES, L.; TURON, A.; BARRIS, C.** *Experimental study of bond behaviour between concrete and FRP bars using a pull-out test. Composites: Part B* v. 40, p. 784-797, 2009.

**BRISOTTO, D.S.** *Um modelo elasto-plástico para a análise da aderência em peças de Concreto Armado. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2011.*

**BRISOTTO, D. de S.; BITTENCOURT, E.; BESSA, V.M.R.d'A.** *Simulating bond failure in reinforced concrete by a plasticity model. Computers and Structures*, 106-107, p. 81-90, 2012.

**COUTO, I.A.** *Análise teórica e experimental do comportamento da aderência entre o concreto e barras de fibra de vidro impregnada por polímero. Tese (Mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, São Carlos, 2007.*

**LEE, J.Y., YI, C.K., CHEONG, Y.G.** *Experimental study on the FRP-concrete bond behavior under repeated loadings. Mechanics of Composite Materials*, v. 45, p. 609-618, 2009.

**TASTANI, S.P.; PANTAZOPOULOU, S.J.** *Bond of GFRP Bars in Concrete: Experimental Study and Analytical Interpretation. Journal of Composites for Construction, ASCE, September/October*, p. 381-391, 2006.

**TEPFERS, R.** *A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. Division of Concrete Structures, Chalmers University of Technology, Publication 73:2, Göteborg, 1973.*

**TEPFERS, R.** *Bond clause proposals for FRP bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: Design bond stress for FRP reinforcing bars. Structural Concrete, v.7, n. 02, p. 47-55, 2006.*