

## UM MODELO ELASTO-PLÁSTICO PARA A ADERÊNCIA DA INTERFACE ENTRE CONCRETO E BARRAS DE FIBRAS DE POLÍMEROS (FRP)

**Daiane de Senna Brisotto<sup>a</sup>, Eduardo Bittencourt<sup>b</sup>, Virgínia M. Rosito d'Ávila Bessa<sup>c</sup>**

<sup>a</sup>*Centro de Mecânica Aplicada e Computacional, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre, RS, Brasil, daiabrisotto@yahoo.com.br*

<sup>b</sup>*Centro de Mecânica Aplicada e Computacional, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre, RS, Brasil, eduardo.bittencourt@ufrgs.br*

<sup>c</sup>*Centro de Mecânica Aplicada e Computacional, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Av. Osvaldo Aranha 99, Porto Alegre, RS, Brasil, vichy@ufrgs.br*

**Palavras Chave:** mecânica da fratura, modelos coesivos, plasticidade, concreto armado.

**Resumo.** Em virtude das suas propriedades, o uso de barras de fibras de polímeros (FRP) como reforço em estruturas de concreto tem sido considerado como uma alternativa ao uso de barras de aço em determinadas situações, como por exemplo, em estruturas expostas à corrosão. Neste trabalho, para a representação do fenômeno da aderência entre o concreto e barras de fibras de polímeros (FRP), o modelo de aderência anteriormente desenvolvido pelos autores para reforço com barras de aço é modificado. Este é um modelo de interface bidimensional, onde ambos, concreto e armadura, são tratados como contínuos, e a interação mecânica entre os materiais é levada em conta indiretamente através de uma homogeneização da interface. Utilizando a teoria elasto-plástica, superfícies de ruptura são explicitamente definidas para representar os modos de falha da aderência (arrancamento, fendilhamento). Assim, a relação tensão de aderência x escorregamento é obtida automaticamente como resultado da análise, ao invés de ser um dado de entrada, como nos modelos usuais. Como resultado, com poucos parâmetros de entrada, o modelo é capaz de capturar os mecanismos de ruptura da aderência, com a vantagem de permitir um melhor entendimento do processo de falha sem a discretização explícita das nervuras ou outro tipo de acabamento superficial das barras. Uma análise da influência do tipo de superfície da barra e da resistência à compressão do concreto nas curvas tensão de aderência x escorregamento obtidas foi realizada. O modelo foi implementado no Método dos Elementos Finitos e os resultados numéricos mostram que o mesmo é capaz de capturar de forma satisfatória o processo de falha da aderência em barras de fibras de polímeros.

## 1 INTRODUÇÃO

Em virtude das suas propriedades, o uso de barras de fibras de polímeros (FRP) como reforço em estruturas de concreto tem sido considerado como uma alternativa ao uso de barras de aço em determinadas situações. Além de permitirem cobrimentos menores e possibilitarem menor custo de manutenção, outras vantagens no seu uso podem ser citadas, tais como: pequeno peso específico, alta resistência à tração, não condutibilidade elétrica, térmica e magnética, entre outras. Entretanto, as formulações utilizadas nas normas de projeto de estruturas de concreto armado não fazem prescrição em relação ao seu uso como armadura, levando a necessidade do desenvolvimento de normas abrangendo esta situação.

Tanto em estruturas de concreto reforçado com barras de aço quanto com barras não-metálicas, a aderência entre a armadura e concreto desempenha papel de fundamental importância no comportamento estrutural. A importância do estudo da aderência entre o concreto e os diferentes tipos de barras de FRP cresce quando se observa que inexiste uma padronização quanto às características superficiais ideais das fibras. Além disso, estudos prévios (Challal e Benmokrane, 1993; Bakis et al., 1998; Tepfers, 2006) mostram que os mecanismos de aderência no caso de barras de FRP não são, em geral, os mesmo encontrados no caso de barras de aço.

Apesar dos grandes avanços e vasto conhecimento tecnológico relacionado ao estudo do concreto, modelos capazes de simular o comportamento da interface concreto-barras de FRP são ainda escassos comparados com modelos para barras de aço (por exemplo, Cox et al., 2003). Além disso, estes modelos são baseados na hipótese de aderência perfeita ou, então, em relações tensão de aderência  $\times$  escorregamento que são definidas a priori (Faoro, 1992; Malvar, 1994; Rosetti et al., 1995). Contudo, estas relações dependem de vários fatores (como confinamento do concreto, forma e disposição dos reforços, etc), tornando questionável o caráter preditivo destes modelos.

O modelo empregado neste trabalho será adaptado de um modelo mesoscópico, previamente desenvolvido pelos autores, para a simulação da aderência concreto-aço (Brisotto et al., 2010), que não padece de tais limitações. Neste modelo são propostas relações constitutivas de interface no qual se define superfícies de ruptura capazes de identificar os processo de colapso da aderência (fendilhamento e arrancamento) com base somente no estado de tensões na interface. As relações tensão de aderência versus escorregamento são automaticamente obtidas, sem a necessidade de serem definidas a priori. Para a aplicação do modelo à barras de FRP, alguns parâmetros do modelo original foram modificados. Esta nova calibração dos parâmetros foi realizada com base em experimentos apresentados na literatura (Baena et al., 2009; Malvar et al., 2003; Achilides e Pilakoutas, 2004; Hao et al., 2007; etc).

Na seção 2 será descrita a metodologia adotada; na seção 3 serão mostradas experimentações numéricas realizadas de diferentes processos de arrancamento. O trabalho é finalizado com considerações finais.

## 2 METODOLOGIA

Na interface concreto-armadura se desenvolvem vetores tensões (ou *tractions* do inglês) na direção da barra e normal à mesma, que serão aqui respectivamente denominadas tensões normais ou de separação ( $t_n$ ) e tensões tangenciais ou de aderência ( $t_t$ ). Os deslocamentos normais (dilatação) serão denominados  $u_n$  e os tangenciais (escorregamento)  $u_t$ . Vetorialmente estas grandezas serão representadas em negrito como  $\mathbf{t}$  e  $\mathbf{u}$ . No cálculo destas tensões serão aqui consideradas duas relações constitutivas: elástica e elasto-plástica.

## 2.1 Relação constitutiva elástica

Para baixos níveis de carregamento, as relações constitutivas de interface podem ser consideradas elásticas. Esta relação é definida, segundo Lundgren (1999), como:

$$\begin{bmatrix} t_n \\ t_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{11} & \frac{|u_t|}{u_t} D_{12} \\ 0 & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_n \\ u_t \end{bmatrix} \quad (1)$$

Cox e Herrmann (1998) também fornecem uma expressão similar, porém admitindo que a mesma é simétrica.

Tensões normais  $t_n$  são consideradas positivas quando tracionam o concreto (abertura da interface). Estas tensões são causadas por duas parcelas, uma relacionada ao deslocamento  $u_n$  (rigidez  $D_{11}$ ) e outra causada pelo escorregamento  $u_t$  (rigidez  $D_{12}$ ). Teoricamente, se  $u_n$  é positivo, há separação na zona de interface e  $D_{11}$  deve ser nulo. No caso se  $u_n$  negativo, há interpenetração na zona de interface e  $D_{11}$  deve ser um valor infinitamente elevado. Neste caso  $D_{11}$  seria unicamente um fator de penalização. Para evitar instabilidades numéricas devido à mudança brusca no seu valor, uma transição (ou regularização) puramente numérica é empregada. Na Figura 1 é mostrada a relação usada neste trabalho, empregada tanto para reforço de aço quanto para barras de FRP com diferentes acabamentos superficiais, onde  $E_c$  é o módulo de elasticidade longitudinal do concreto.

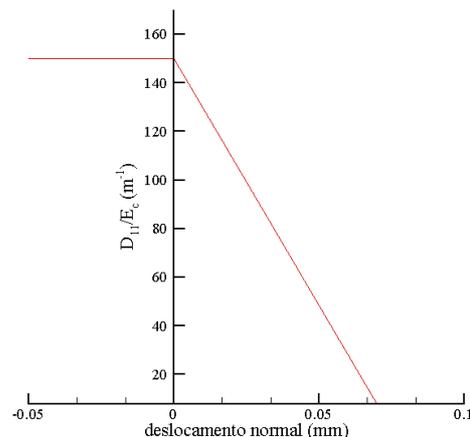


Figura 1: Relação entre deslocamento e rigidez  $D_{11}$ .

A rigidez  $D_{12}$  fornece o quanto de tensão normal será produzida por um dado escorregamento. Este valor é normalmente negativo, significando que o escorregamento em qualquer direção irá causar  $t_n$  negativo, ou seja, forças compressivas no concreto. Da Eq. (1), podemos dizer que:

$$t_n = D_{11} u_n + D_{12} |u_t| \quad (2)$$

Considerando uma relação de atrito entre as componentes de tensão, no limite, pela lei de Coulomb podemos dizer que  $t_n = -t_t/\mu$ , logo pode-se definir  $D_{12} = -D_{22}/\mu$  onde  $\mu$  é o coeficiente de atrito entre as superfícies do reforço e do concreto. Como esta é uma relação limite, normalmente emprega-se  $D_{12} > -D_{22}/\mu$ . Para reforço de aço, esse valor é assumido por ser  $D_{12} = -0,5D_{22}/\mu$ . Já para barras de FRP este parâmetro assume diferentes valores em função do acabamento superficial da barra.

Analiticamente pode ser demonstrado que a rigidez  $D_{22}$  é função linear do módulo de elasticidade longitudinal do concreto. Este valor também pode ser medido experimentalmente

como a rigidez de descarga da curva aderência-escorregamento. No caso de barras nervuradas de aço, é assumido que este valor depende também do diâmetro da barra e espaçamento entre nervuras. Para barras de FRP, além de ser função do módulo de elasticidade do concreto, este valor depende também do acabamento superficial da barra.

O procedimento de cálculo aqui descrito é válido para níveis baixos de tensão. Quando as tensões atingem o limite de ruptura, correções plásticas (devido aos fenômenos dissipativos de ruptura) são aplicadas.

## 2.2 Relação constitutiva elasto-plástica

Os limites elásticos do modelo são definidos por uma superfície de ruptura delimitada pelas funções  $F_1$  e  $F_2$  no espaço de tensões  $t_n, t_t$ , como mostra a Figura 2. Estas funções representam, respectivamente, as parcelas do atrito e da interação mecânica provenientes do fenômeno da aderência. A parcela correspondente a adesão química, por ser muito pequena, foi desprezada. A função  $F_1$  é definida através da lei de atrito de Coulomb por

$$F_1 = |t_t| + \mu t_n = 0 \quad (3)$$

onde  $\mu$  é um coeficiente de atrito aparente. Se  $F_1 > 0$ , deslocamento plásticos se desenvolvem e um processo de retorno radial é realizado. Assumimos para a análise plástica uma regra de fluxo-não associada, ou seja, aparecem deslocamentos plásticos ou dissipativos, definidos como:

$$d\mathbf{u}^p = d\lambda \frac{\partial G}{\partial \mathbf{t}} \quad (4)$$

$$G = \frac{|u_t|}{u_t} t_t + \eta t_n = 0 \quad (5)$$

onde  $G$  é a função potencial plástico,  $d\lambda$  é um multiplicador plástico incremental, a ser determinado. O parâmetro  $\eta$  define a direção dos deslocamentos plásticos. A hipótese usual em problemas de atrito é admitir que  $\eta$  é igual a zero, ou seja, não ocorrem processos dissipativos na direção normal. Porém, devido às irregularidades na superfície de escorregamento, considera-se que deslocamentos plásticos advêm também dos deslocamentos normais (este fenômeno também é conhecido como dilatância). Isto é válido apenas macroscopicamente pois microscopicamente a dissipação do atrito só pode ter origem no escorregamento.

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 seguinte expressão:

$$F_2 = t_n^2 + t_t^2 + ct_n = 0 \quad (6)$$

onde a variável  $c$  representa a resistência à compressão do concreto. Se  $F_2 > 0$ , novamente deslocamentos plásticos se desenvolvem e, neste caso, para a determinação da deformação plástica é empregada uma regra de fluxo associada, onde os deslocamentos plásticos são dados por:

$$d\mathbf{u}^p = d\lambda \frac{\partial F_2}{\partial \mathbf{t}} \quad (7)$$

Para a região compreendida entre as duas funções é aplicada a regra de Koiter. Neste caso, a combinação das duas leis é usada, e a deformação plástica é dada por

$$d\mathbf{u}^p = d\lambda_1 \frac{G}{\partial \mathbf{t}} + d\lambda_2 \frac{\partial F_2}{\partial \mathbf{t}} \quad (8)$$

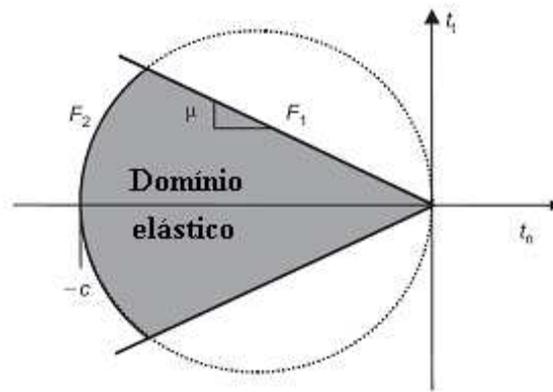


Figura 2 - Superfícies de escoamento.

As funções  $c$  e  $\mu$  descrevem a evolução da superfície de ruptura do modelo. A função  $c$ , apresentada na Figura 3, é definida em função da resistência à compressão do concreto e representa a variação da tensão nos consoles de concreto resultante da interação mecânica entre os materiais. Assim, através de calibração, seu valor máximo é adotado como sendo igual à resistência à compressão do concreto  $e$ , à medida que o escorregamento entre os materiais aumenta, este valor é reduzido. Tanto para barras de aço, quanto para barras de FRP é adotada a mesma relação.

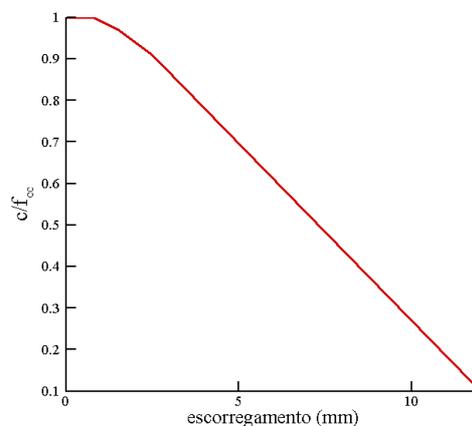


Figura 3: Variação da variável  $c$  em função do escorregamento ( $f_{cc}$  é a resistência à compressão do concreto).

A função  $\mu$  descreve a relação entre a tensão normal e tangencial da interface. Este valor depende do tipo de barra de armadura empregada. Desta forma, em função da superfície da barra de FRP, diferentes curvas são adotadas. Será visto mais adiante que a resistência do concreto também tem influência nas curvas de atrito. A Figura 4 apresenta a curva adotada para a situação onde é empregada armadura com barras de aço.

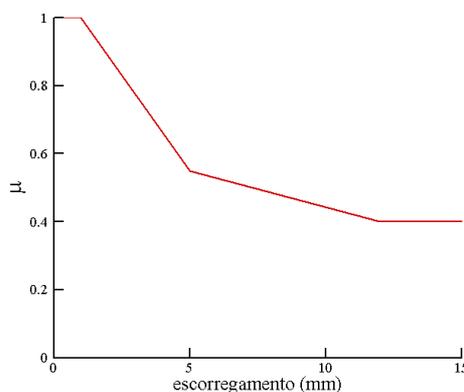


Figura 4: Variação do coeficiente de atrito em função do escorregamento.

Como estes parâmetros são decrescentes, a superfície de ruptura vai diminuindo com o processo de deformação. Isto corresponde a um "amolecimento" da relação constitutiva com os processos dissipativos.

Com todos os parâmetros definidos, pode-se determinar os valores de tensão na interface admitindo-se que o incremento de tensões de interface seja definido como:

$$dt = D(du - du^p) \quad (9)$$

onde  $D$  é a matriz de rigidez elástica, definida na Eq.(1). Substituindo-se na equação acima as equações 4, 7 ou 8 (dependendo da região) e, uma vez integradas no tempo, o resultado substituído na correspondente equação da superfície (Eq. 3 ou 6), pode-se obter os valores de  $dt$ , a partir do qual todas as variáveis do problema podem ser determinadas.

### 3 EXPERIMENTAÇÃO NUMÉRICA

Nesta seção são mostradas experimentações numéricas com o objetivo de verificar a aplicabilidade dos procedimentos expostos no capítulo anterior, ou seja, comprovar se o modelo é capaz de representar a falha da aderência em barras de fibras de polímeros (FRP).

Nestes testes, a armadura é constituída de barras de fibra de vidro 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 x escorregamento apresentadas aqui é indicado este valor médio da tensão, definido por:

$$\tau = \frac{P}{\pi \cdot d \cdot l_d} \quad (10)$$

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

### 3.1 Baena et al. (2009)

Neste exemplo os resultados experimentais apresentados por Baena et al. (2009) foram analisados com o modelo proposto. Primeiramente foi estudado o comportamento de barras de fibra de vidro com a superfície revestida de areia, aqui chamadas de barras R2. Posteriormente, foi analisado o comportamento de barras de fibra de vidro nervuradas (barras R5). A superfície de ambas as barras pode ser vista na Figura 5.



Figura 5: Superfície das barras de fibra de vidro analisadas.

Em ambos os casos, a análise foi realizada com dois tipos de concreto: concreto C1 (baixa resistência) e concreto C2 (alta resistência). O diâmetro das barras era de 12 mm, e estas estavam inseridas dentro de um cubo de concreto de 200 mm x 200 mm. O comprimento incorporado da armadura era de 5 vezes o diâmetro da barra. A Figura 6 mostra a geometria do problema analisado e a malha de elementos finitos empregada na análise. A face superior do concreto tem os deslocamentos em  $y$  restringidos. Devido a simetria, os nós à esquerda na barra têm os deslocamentos em  $x$  restringidos. A barra é deslocada para cima, na direção  $y$ , conforme indicado na figura. Os pontos  $A$  e  $B$  indicam os limites da zona de interface concreto-armadura.

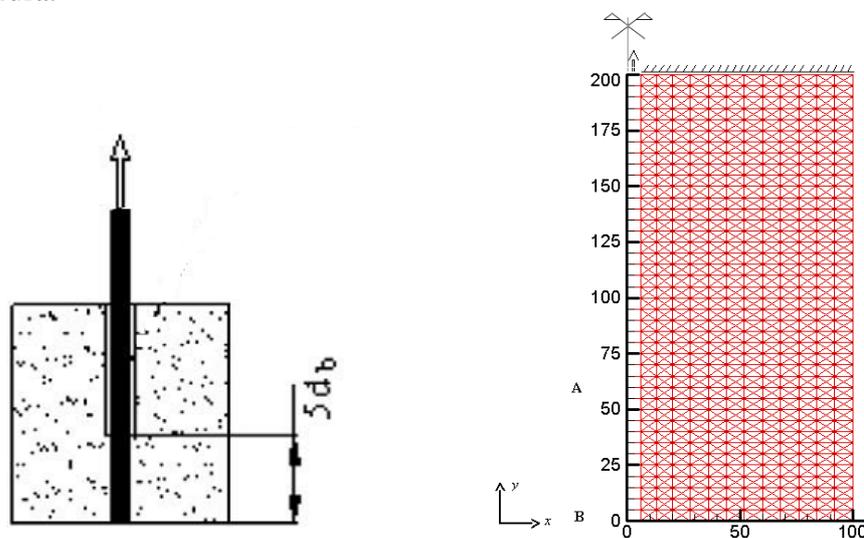


Figura 6: Geometria e malha empregada na análise.

As propriedades da barra, do concreto e as propriedades elásticas da interface utilizadas durante a análise numérica para as barras R2 e R5, respectivamente, são apresentadas nas Tabelas 1 e 2. As propriedades elásticas da interface,  $D_{12}$  e  $D_{22}$ , assim com as curvas que definem a variação do coeficiente de atrito em função do escorregamento, foram calibradas através de resultados experimentais.

Concreto C1	$f_c = 27 \text{ MPa}$
	$E_c = 27500 \text{ MPa}$
Concreto C2	$f_c = 53 \text{ MPa}$
	$E_c = 33400 \text{ MPa}$
Armadura	$f_y = 782 \text{ MPa}$
	$E_s = 46000 \text{ MPa}$
Propriedades da interface p/ concreto C1	$D_{22} = 3. E_c \text{ m}^{-1}$
	$D_{12} = (2,2.D_{22})/1,85 \text{ m}^{-1}$
Propriedades da interface p/ concreto C2	$D_{22} = 3. E_c \text{ m}^{-1}$
	$D_{12} = (2,2.D_{22}) \text{ m}^{-1}$

Tabela 1: Propriedades dos materiais e interface para as barras R2

Concreto C1	$f_c = 29,35 \text{ MPa}$
	$E_c = 28360 \text{ MPa}$
Concreto C2	$f_c = 50,5 \text{ MPa}$
	$E_c = 33000 \text{ MPa}$
Armadura	$f_y = 1000 \text{ MPa}$
	$E_s = 60000 \text{ MPa}$
Propriedades da interface p/ concreto C1	$D_{22} = 3. E_c \text{ m}^{-1}$
	$D_{12} = (1,2.D_{22}) \text{ m}^{-1}$
Propriedades da interface p/ concreto C2	$D_{22} = 3. E_c \text{ m}^{-1}$
	$D_{12} = (1,2.D_{22}) \text{ m}^{-1}$

Tabela 2: Propriedades dos materiais e interface para as barras R5

A Figura 7 apresenta as diferentes curvas *atrito x escorregamento* obtidas para as barras R2 e R5, para os dois tipos de concreto empregados. Nos dois casos observamos que para o concreto de alta resistência (C2) o atrito entre os materiais, para os diferentes valores de escorregamento é menor.

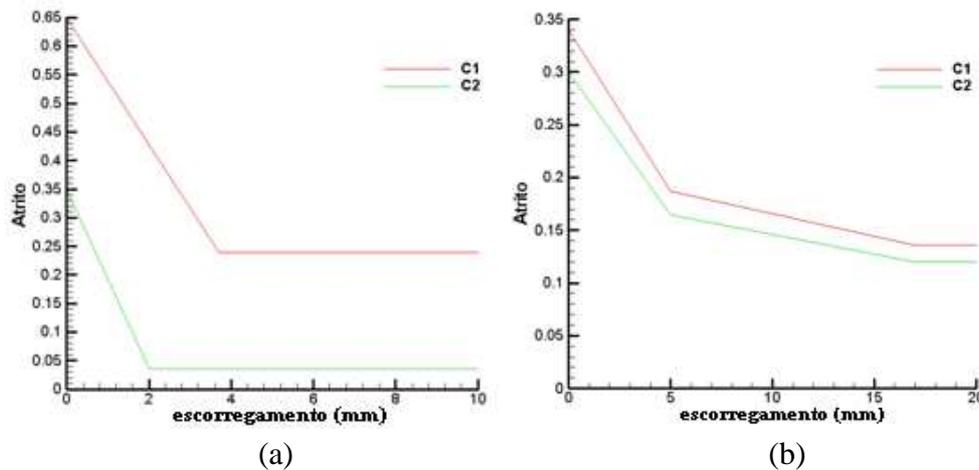


Figura 7: Curvas Atrito x escorregamento adotadas. (a) barras R2 e (b) barras R5

A Figura 8 mostra as curvas *tensão de aderência x escorregamento* obtidas para as barras R2 pela análise numérica, bem como os resultados experimentais obtidos para os dois tipos de concreto, C1 e C2. Observa-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Nesse caso, como se trata de uma barra de reforço sem nervuras, a transferência de carga entre a armadura e o concreto se dá predominantemente por atrito e a ruptura da aderência tende a ocorrer por arrancamento. Como era de se esperar, a *curva tensão de aderência x escorregamento* apresenta um trecho inicial quase linear, onde a tensão máxima de aderência é obtida para níveis de escorregamento relativamente pequenos. Uma vez que esta tensão máxima é alcançada, o revestimento de areia presente na superfície da armadura se descola da camada de resina, o que explica a queda abrupta das tensões de aderência observada na curva. Esse comportamento é observado independente do valor da resistência à compressão do concreto. Entretanto, para o concreto de menor resistência (C1), o trecho pós-pico apresenta uma queda mais suave comparada com o concreto de maior resistência (C2). Isso pode ser explicado pelo fato de que quando usamos o concreto C2 observamos o abrupto descolamento de toda a camada de revestimento de areia da camada de resina. Já para o concreto C1 este descolamento ocorre mais suavemente.

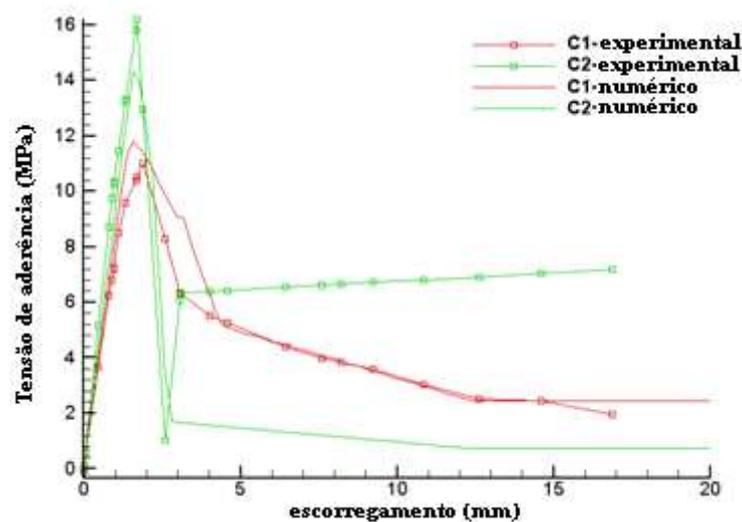


Figura 8: Curvas Tensão de aderência x escorregamento obtidas para as barras R2

Já a [Figura 9](#) mostra as curvas *tensão de aderência x escorregamento* obtidas para as barras R5. Neste situação, devido a presença das nervuras, a aderência se dá quase que exclusivamente pelo engrenamento mecânico entre os materiais. Assim, dependendo do nível de confinamento, a ruptura da aderência pode ocorrer tanto por arrancamento quanto por fendilhamento. No exemplo em questão, como o cobrimento da peça é grande comparado com o diâmetro da barra (diâmetro/cobrimento  $\approx 8$ ) a ruptura ocorre por arrancamento. A curva *tensão de aderência x escorregamento* obtida apresenta um comportamento quase linear até a máxima tensão de aderência ser alcançada. Após esse valor, ocorre a queda da curva devido a deterioração da aderência. Entretanto, comparando com as barras R2, esse trecho de amolecimento apresenta um comportamento mais dúctil para os dois tipos de concreto empregado. Como era de se esperar, com o uso do concreto de maior resistência, a tensão de aderência máxima apresenta um valor maior ao obtido quando se usa o concreto C1.

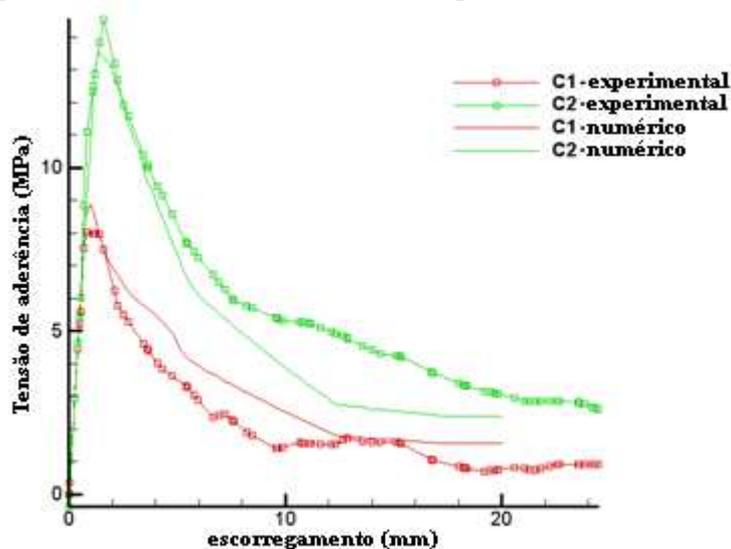


Figura 9: Curvas Tensão de aderência x escorregamento obtidas para as barras R5

### 3.2 Lee et al. (2009)

Os resultados experimentais apresentados por [Lee et al. \(2009\)](#) foram analisados. Foi estudado o comportamento de barras de fibra de vidro com a superfície revestida de areia, como mostra a [Figura 10](#). O diâmetro da barra era de 12,7 mm, e esta estava inserida dentro de um tubo de concreto de 190 mm x 152 mm x 152 mm. O comprimento incorporado da armadura era de 5 vezes o diâmetro da barra. A malha empregada na análise é mostrada na [Figura 11](#). As propriedades da barra, do concreto e as propriedades elásticas da interface utilizados na análise são apresentadas na [Tabela 3](#).

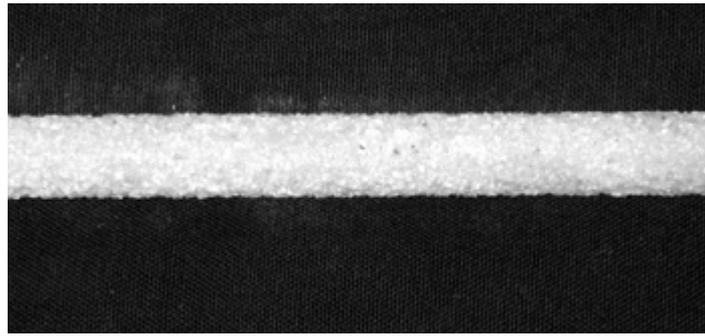


Figura 10: Superfície da barra de fibra de vidro analisada.

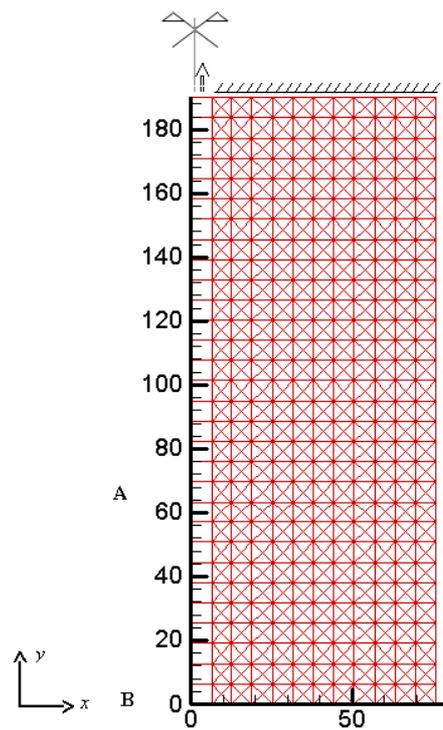


Figura 11: Geometria e malha empregada na análise.

Concreto	$f_c = 43,87 \text{ MPa}$
	$E_c = 31600 \text{ MPa}$
Armadura	$f_y = 690 \text{ MPa}$
	$E_s = 42000 \text{ MPa}$
Propriedades da interface	$D_{22} = 3 \cdot E_c \text{ m}^{-1}$
	$D_{12} = (1,2 \cdot D_{22})$

Tabela 3: Propriedades dos materiais e interface

A Figura 12 apresenta a curva *atrito x escorregamento* adotada. Nota-se que se trata da mesma curva adotada para o exemplo anterior para barras com este tipo de tratamento superficial e concreto de alta resistência.

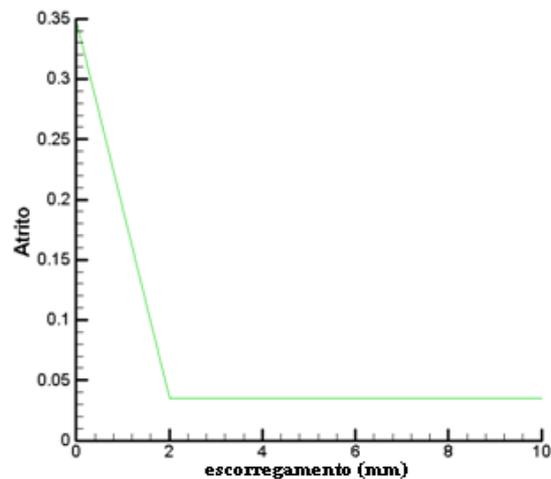


Figura 12: Curva Atrito x escorregamento adotada.

A Figura 13 mostra a curva tensão de aderência x escorregamento obtida pela análise numérica, bem como o resultado experimental obtido com o modelo proposto. Observa-se uma boa concordância entre os resultados. Da mesma forma que o exemplo anterior, no caso onde a barra era revestida de areia, a *curva tensão de aderência x escorregamento* obtida apresenta um trecho inicial quase linear, onde a tensão máxima de aderência é obtida para níveis de escorregamento relativamente pequenos. Uma vez que esta tensão máxima é alcançada, o revestimento de areia se descola da camada de resina, levando à queda abrupta das tensões de aderência na interface.

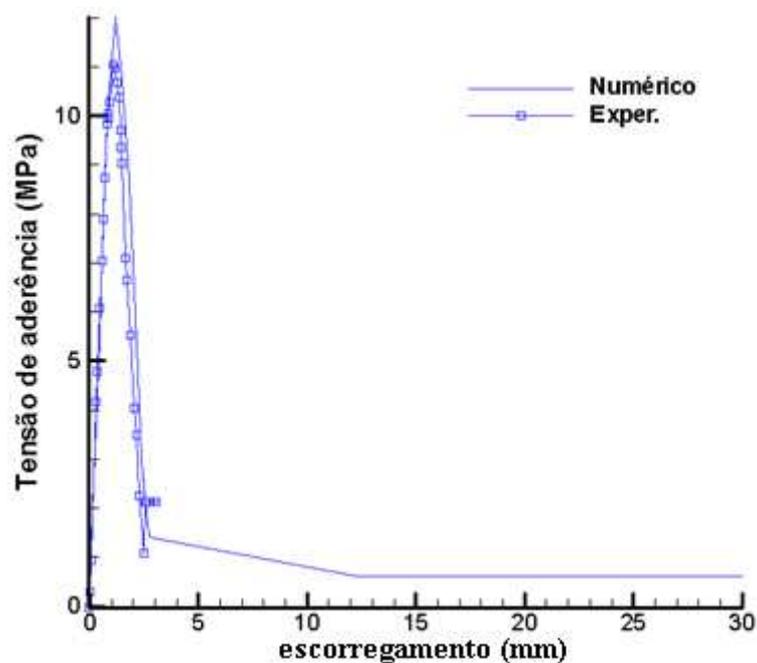


Figura 13: Curvas Tensão de aderência x escorregamento obtidas.

#### 4 DISCUSSÃO E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando e comparando os resultados apresentados anteriormente, conclui-se que o modelo proposto é capaz de simular a falha da aderência para barras de fibras de polímeros (FRP). Observa-se uma tendência a um colapso mais frágil nos casos de fibras com revestimento de areia, devido ao descolamento deste revestimento, quando comparado com barras nervuradas, especialmente nos casos de concreto de alta resistência.

Dependendo do tipo de superfície da barra, diferentes valores são adotados para os parâmetros elásticos da interface e também para a curva atrito x escorregamento. Esta curva apresenta também a tendência de apresentar valores menores de atrito para concretos de maior resistência, independente do tipo de barra. Uma possível explicação para tal característica pode estar relacionado à tendência de maior fragilidade do concreto de alta resistência, o que leva a um maior nível de fissuração junto à interface quando comparado com os concretos de menor resistência, levando a um coeficiente de atrito aparente menor. Barras nervuradas também tendem a ter um coeficiente de atrito menor que as com revestimento de areia, o que indica que a aderência é controlada pelo engrenamento com o concreto e a falha se dá por arrancamento.

Entretanto, para barras com mesmo tipo de superfície o modelo foi calibrado de forma que os mesmos parâmetros são utilizados. Isso foi demonstrado através dos dois exemplos analisados. Portanto a metodologia apresentada tem um caráter preditivo quanto ao mecanismo de falha.

#### 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPQ pelos recursos financeiros obtidos.

#### 6 REFERÊNCIAS

- Achillides, Z., and Pilakoutas, K., Bond behavior of fiber reinforced polymer bars under direct pullout conditions. *Journal of Composites for Construction*, 8:173-181, 2004.
- Baena, M., Torres, L., Turon, A., and Barris, C., Experimental study of bond behavior between concrete and FRP bars using a pull-out test. *Composites: Part B*, 40:784-797, 2009.
- Bakis, C. E., Uppuluri, V. S., Nanni, A., and Boothby, T. E., Analysis of bonding mechanisms of smooth and lugged FRP rods embedded in concrete. *Composites Science and Technology*, 58:1307-1319, 1998.
- Brisotto, D. S., Bittencourt, E. and d'Avila, V. M. R., Um modelo elasto-plástico não-local para a simulação da aderência concreto-armadura. *Computers & Structures*, 106:81-90, 2010.
- Chaallal O., and Benmokrane B., Pullout and bond of glass-fibre rods embedded in concrete and cement grout. *Mater. Struct.*, 26:165-75, 1993.
- Cox, J. V., and Bergeron Cochran, K., Bond between Carbon Fiber Reinforced Polymer Bars and Concrete. II: Computational Modeling. *Journal of Composites for Construction*, 7:164-171, 2003.
- Cox, J.V., and Herrmann, L.R., Development of a plasticity bond model for steel reinforced. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 3:155 -180, 1998.
- Faoro, M., Bearing and deformation behavior of structural components with reinforcements comprising resin glass fiber bars and conventional ribbed steel bars. *Proc., Int. Conf. on Bond in Concrete*, Riga, Latvia, 3: 8.17-8.26, 1992.
- Hao, Q., Wang, Y., Zang, Z., and Ou, J., Bond strength improvement of GFRP rebars with

- different rib geometries. *Journal of Zhejiang University - Science A*, 8: 1356-1365, 2007.
- Lee, J.Y., Yi, C.K., and Cheong, Y.G., Experimental study on the FRP-concrete bond behavior under repeated loadings. *Mechanics of Composite Materials*, 45:609-618, 2009.
- Lundgren, K., Modelling of Bond: Theoretical Model and Analyses. *Chalmers University of Technology*, Division of Concrete Structures, Report 99:5, Göteborg, 1999.
- Malvar, L. J., Bond stress-slip characteristics of FRP rebars. *TR-2013-SHR, Naval Facilities Engineering Service Center*, Port Hueneme, 1994.
- Malvar, L. J., Cox, J. V., and Bergeron Cochran, K., Bond between carbon fiber reinforced polymer bars and concrete. I: Experimental study. *J. Compos. Constr.*, 7:154-163, 2003.
- Rosetti, V. A., Galeota, D., and Giammatteo, M. M., Local Bond stress-slip relationships of glass fiber reinforced plastic bars embedded in concrete. *Mater. Struct.*, 28:340-344, 1995.
- Tepfers R., Bond clause proposal for FRP-bars/rods in concrete based on CEB/FIP Model Code 90. Part 1: design bond stress for FRP reinforcing bars. *Struct Concrete*, 7:47-55, 2006.