

# Influence of steel fibers on the reinforcement bond of straight steel bars

## *Influência da adição de fibras de aço na tensão de aderência de barras de aço retilíneas*

D. L. ARAÚJO <sup>a</sup>  
dlaraujo@eec.ufg.br

A. R. DANIN <sup>b</sup>  
alicedanin@gmail.com

M. B. MELO <sup>c</sup>  
tidemelo@gmail.com

P. F. RODRIGUES <sup>d</sup>  
pfer@furnas.com.br

### Abstract

Bonding between steel bars and concrete makes the two materials compatible, enabling the use of reinforced concrete as a construction material. If the bond is good, there will be less cracks, and the reinforcing bar will be better protected by the surrounded concrete. The aim of this research was to analyze the influence of steel fibers on concrete-steel bond strength. Therefore, pull-out tests were performed with thirty-three prismatic specimens measuring 200 mm x 300 mm x 150 mm. The variables analyzed were: bar diameter (10 mm, 12.5 mm, 16 mm and 20 mm); bond length (five and ten times the diameter); and the volume of steel fibers added to the concrete (1% and 2%). Short, steel, hooked fibers were used, 35 mm in length and with aspect ratio of 65. Based on the pull-out tests assays, the form and force of the rupture was determined in each specimen. Computational simulations of the specimens were also performed with bars of 100 mm in diameter. Both the results of the experimental tests and the modeling showed that the addition of fibers had little effect on the bond strength between the bar and the concrete. On the other hand, when the bond rupture occurred by splitting of the concrete cover, the influence of the steel fibers was significant.

**Keywords:** reinforced concrete, steel fibers, bond.

### Resumo

A aderência entre a barra de aço e o concreto permite que haja a compatibilização entre os dois materiais, validando o uso do concreto armado como material de construção. Quanto melhor a aderência, menores são as aberturas das fissuras e mais protegida fica a armadura. Assim, busca-se nessa pesquisa investigar a influência das fibras de aço na aderência aço-concreto. Para tanto, foram ensaiados trinta e três corpos de prova, com dimensões de 200 mm x 300 mm x 150 mm, dos quais foi arrancada uma barra de aço neles concretada. As variáveis analisadas foram o diâmetro da barra (10 mm, 12,5 mm, 16 mm e 20 mm), o comprimento aderente (cinco e dez vezes o diâmetro da barra) e o volume de fibras de aço adicionadas ao concreto (1% e 2%). Foram utilizadas fibras de aço com ganchos nas extremidades, comprimento de 35 mm e relação de aspecto igual a 65. Dos ensaios de arrancamento foi determinada a forma e a força de ruptura em cada um dos modelos. Adicionalmente, foram feitas simulações computacionais dos ensaios realizados com barra de 10 mm de diâmetro. Tanto os resultados dos ensaios experimentais quanto da modelagem mostraram que as fibras estudadas exercem pequena influência na tensão de aderência entre a barra e o concreto. Por outro lado, quando a ruptura da aderência se dá pelo fendilhamento do cobrimento de concreto, a influência das fibras é significativa.

**Palavras-chave:** concreto armado, fibras de aço, aderência.

<sup>a</sup> Professor Doutor, Programa de Pós-Graduação em Geotecnia, Estruturas e Construção Civil, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Praça Universitária, s/n, Setor Universitário, 74605-220, Goiânia, GO. E-mail: dlaraujo@eec.ufg.br;

<sup>b</sup> Mestre, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, alicedanin@gmail.com;

<sup>c</sup> Mestre, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, tidemelo@gmail.com;

<sup>d</sup> Engenheiro Civil, Gerente de P&D, Furnas Centrais Elétricas S. A., pfer@furnas.com.br.

## 1. Introdução

A aderência entre barras de aço e o concreto adjacente permite que haja compatibilização entre os dois materiais, validando o uso do concreto armado como material de construção. Quanto melhor a aderência, menores são as aberturas individuais das fissuras e mais protegida fica a armadura.

Costuma-se separar a aderência em três parcelas: adesão, atrito e mecânica. Essa divisão se baseia em curvas tensão de cisalhamento *versus* deslocamento relativo (também chamado escorregamento), como mostrado na Figura 1. Nessa figura,  $s_1$ ,  $s_2$  e  $s_u$  representam o deslocamento relativo às tensões resistentes devidas à adesão ( $\tau_1$ ), ao atrito ( $\tau_2$ ) e ao engrenamento mecânico ( $\tau_u$ ), respectivamente.

A aderência por adesão, também chamada de aderência química, corresponde ao trecho inicial (bastante inclinado) da curva e consiste da resistência ao esforço cisalhante entre as partículas de concreto e de aço. Ocorre devido às ligações físico-químicas entre a barra e a pasta de cimento formadas durante a pega. Em comparação às demais parcelas da aderência, a adesão tem valor bastante pequeno, sendo destruída tão logo surjam os primeiros deslocamentos relativos entre aço e concreto.

A aderência por atrito surge quando um material tende a se deslocar em relação ao outro. Portanto, depende do coeficiente de atrito existente na interface aço-concreto e da rugosidade superficial da barra de aço. Já a aderência mecânica (ou engrenamento mecânico) é representada pelo último trecho ascendente inclinado da curva mostrada na Figura 1. Essa parcela decorre da existência de irregularidades na superfície da barra, as quais funcionam como pontos de apoio. Isto significa que quanto mais irregular for a conformação superficial da barra, maior será a aderência mecânica, pois ocorrerá o chamado “efeito de cunha” [1]. A parcela referente à aderência mecânica é a principal responsável pela ancoragem de barras nervuradas de aço no concreto, promovendo certa resistência pós-pico, e varia em função da inclinação, da altura e da distância entre as nervuras.

Há duas formas principais de ruptura da aderência: o arrancamento e o fendilhamento. A ruptura por arrancamento da barra de aço ocorre quando a tensão cisalhante na interface aço-concreto

é maior que a resistência por aderência. Nesse caso, a barra escorrega sem que haja a ruptura por fendilhamento do concreto adjacente. Isso normalmente ocorre para pequenos comprimentos de aderência com a presença de uma pressão externa de confinamento proporcionada, por exemplo, por uma alta relação entre o cobrimento e o diâmetro da barra ( $c/\phi$ ).

Por outro lado, quando o cobrimento de concreto é pequeno ou não há tensões de confinamento no trecho de ancoragem, pode ocorrer a ruptura do concreto por fendilhamento devido às tensões radiais de tração que surgem das nervuras das barras. Essa ruptura é do tipo frágil e costuma ocorrer sem aviso prévio. Os fatores de maior influência na resistência ao fendilhamento são a geometria das nervuras, a resistência do concreto, a tensão de confinamento do concreto e a relação entre o cobrimento do concreto e o diâmetro da barra [2].

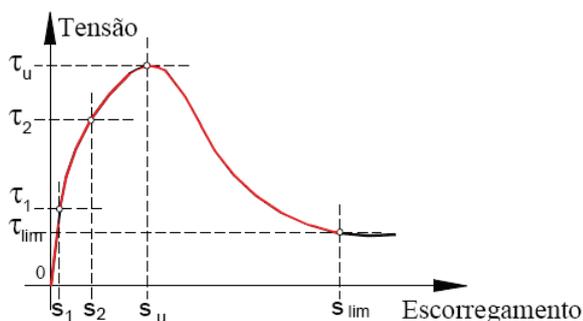
Para elevados valores do comprimento aderente e suficiente cobrimento de concreto, a tensão cisalhante na interface aço-concreto é menor que a resistência por aderência e a barra de aço pode se romper sem que seja arrancada do concreto. Caso o arrancamento da barra ocorra no instante em que ela atinge a sua tensão de escoamento, este comprimento aderente é denominado comprimento básico de ancoragem.

Existem, na literatura, diversos ensaios que permitem determinar a curva tensão de aderência *versus* deslizamento da barra. Esses ensaios podem ser divididos, basicamente, em ensaios de arrancamento de barra [3-10], ensaios de flexão em vigas [6, 11-13] e ensaio de tração direta em tirantes [14]. Este último ensaio consiste na concretagem de duas barras nas extremidades de um prisma de concreto, sendo uma delas arrancada devido ao seu menor comprimento de ancoragem. Tradicionalmente, a tensão de aderência é determinada por meio do ensaio de arrancamento padrão (*pull-out test*) devido à facilidade do processo de execução desse ensaio. Entretanto, ele fornece apenas a tensão de aderência média ao longo do comprimento de ancoragem. Além disso, nesse ensaio o concreto fica confinado na base de apoio do prisma, não permitindo a sua fissuração nem a sua expansão. Outro fator negativo desse ensaio é a dificuldade da garantia da posição da barra durante a concretagem do corpo de prova, o que exige um minucioso processo de fabricação dos corpos de prova de modo a garantir a linearidade da barra.

Podem-se adicionar fibras ao concreto para melhorar seu comportamento pós-fissuração, pois as mesmas atuam como ponte de transferências de tensões, controlando a abertura da fissura ou sua propagação [15]. Nesse sentido, diversas pesquisas abordam a influência das fibras de aço na aderência aço-concreto [8, 9, 16-18]. Em comum, elas concluem que as fibras de aço melhoram a aderência do concreto com a armadura, quando corrugada, inibindo a fissuração na região de transferência de esforços entre a armadura e o concreto. Entretanto, alguns pesquisadores observam que as fibras contribuem de maneira positiva apenas em concreto de resistência mais elevada (65 MPa) e barras de elevado diâmetro (20 mm), podendo inclusive, em alguns casos, proporcionar redução de até 30% na resistência de aderência [8, 19].

Do ponto de vista da modelagem computacional de estruturas de concreto armado, vários modelos constitutivos para representar a tensão de aderência *versus* deslizamento de barras imersas no concreto simples estão disponíveis na literatura e já incluídos em códigos de projeto [20]. Esses códigos, entretanto, não consideram a presença das fibras de aço e a sua influência na curva

Figura 1 – Curva tensão de cisalhamento *versus* deslocamento relativo



tensão de aderência *versus* deslizamento. Neste caso, pode-se utilizar de modelos constitutivos relatados na literatura [21].

## 2. Programa experimental

Para essa pesquisa foram moldados trinta e três corpos de prova prismáticos com dimensões de 300 mm x 200 mm x 150 mm, conforme listado na Tabela 1. O concreto foi confeccionado com 3% da massa de cimento substituída por sílica ativa e outros 13% da massa de cimento substituída por cinza volante. A substituição pela cinza volante se deu com o objetivo de se reduzir o consumo de cimento e, conseqüentemente, o calor gerado durante o processo de hidratação do cimento. O agregado graúdo utilizado

possuía dimensão máxima de 12,5 mm de modo a garantir que o mesmo representasse cerca de um terço do comprimento da fibra de aço, a qual possuía ganchos nas extremidades, relação de aspecto igual a 65 e comprimento de 35 mm.

Os corpos de prova prismáticos foram moldados na posição horizontal e o concreto foi adensado com vibrador de imersão de modo a evitar o alinhamento preferencial das fibras em um plano específico (Figura 2). O concreto fresco foi caracterizado quanto ao abatimento do tronco de cone (*slump test*), segundo a norma ABNT NBR NM67:1998 [22], quanto ao teor de ar na mistura, conforme a norma ABNT NBR NM47:2002 [23] e quanto à massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 9833:2008 [24]. As matrizes sem fibras eram auto-adensáveis, e por essa razão foram caracterizadas

Tabela 1 – Variáveis dos ensaios de arrancamento e de fendilhamento

Corpo de prova	Diâmetro da barra - $\Phi$ (mm)	Comprimento aderente - $l_a$		Volume de fibras (%)
CP10.5.0.A1 CP10.5.0.A2	10	5 $\phi$	5cm	0
CP10.5.1.A1 CP10.5.1.A2	10	5 $\phi$	5cm	1
CP10.5.2.A1 CP10.5.2.A2	10	5 $\phi$	5cm	2
CP10.10.0.A1 CP10.10.0.A2 CP10.10.0.A3 CP10.10.0.A4	10	10 $\phi$	10cm	0
CP10.10.1.A1 CP10.10.1.A2 CP10.10.1.A3 CP10.10.1.A4	10	10 $\phi$	10cm	1
CP10.10.2.A1 CP10.10.2.A2 CP10.10.2.A3 CP10.10.2.A4	10	10 $\phi$	10cm	2
CP12,5.10.0.A1 CP12,5.10.0.A2 CP12,5.10.0.A3	12,5	10 $\phi$	12.5cm	0
CP16.10.0.A1 CP16.10.0.A2 CP16.10.0.A3	16	10 $\phi$	16cm	0
CP20.10.0.A1 CP20.10.0.A2 CP20.10.0.A3	20	10 $\phi$	20cm	0
CP20.10.1.A1 CP20.10.1.A2 CP20.10.1.A3	20	10 $\phi$	20cm	1
CP20.10.2.A1 CP20.10.2.A2 CP20.10.2.A3	20	10 $\phi$	20cm	2

Figura 2 – Moldagem dos corpos de prova para o ensaio de arrancamento



quanto ao espalhamento pelo método do cone de Abrams (*slump flow test*), conforme a norma ABNT NBR 15823-2:2010 [25]. Os resultados desses ensaios são mostrados na Tabela 2.

No centro de cada corpo de prova foi moldada uma barra de aço, cujo diâmetro variou entre 10 mm, 12,5 mm, 16 mm e 20 mm. A tensão de escoamento média dessas barras, determinada previamente segundo a norma ABNT NBR ISO 6892:2002 [26], era de 592 MPa, 572 MPa, 616 MPa e 505 MPa, respectivamente.

Os ensaios com barras de diâmetro superior a 10 mm foram denominados ensaios de fendilhamento, realizados buscando-se avaliar a influência das fibras quando a ruptura da aderência se dá pelo fendilhamento do concreto de cobertura. A relação entre o cobrimento de concreto da armadura e o seu diâmetro ( $c/\phi$ ) variou, nos ensaios, entre 7,0, 5,5, 4,2 e 3,25, respectivamente para as barras de 10 mm, 12,5 mm, 16 mm e 20 mm. As demais variáveis analisadas foram o comprimento aderente da barra no concreto (cinco e dez vezes o diâmetro da barra) e o volume de fibras de aço adicionado (1% e 2%, o que corresponde a um consumo de fibras de 78,5 kg/m<sup>3</sup> e 157,0 kg/m<sup>3</sup>, respectivamente). O comprimento aderente de  $5\phi$  foi utilizado para se determinar a tensão de aderência da barra, conforme recomendação

da literatura [3], enquanto o comprimento aderente de  $10\phi$  foi utilizado para se confirmar o comprimento básico de ancoragem da barra.

Os ensaios de arrancamento foram realizados com controle de descolamento em uma máquina universal de ensaio com capacidade de carga de 300 kN. O esquema de ensaio é mostrado na Figura 3. Aplicou-se o carregamento na direção perpendicular à moldagem, posto que os corpos de prova foram moldados na posição horizontal. Para permitir a fixação do corpo de prova à máquina de ensaio, foram utilizadas duas barras de 25 mm (distanto 75 mm da barra ensaiada) presas a um aparato metálico, conforme adaptação de ensaio apresentado na literatura [27]. Para a passagem dessas barras pelo corpo-de-prova, foram deixados dois furos com diâmetro de 25 mm (para corpos de prova com barra de 10 mm) ou 32 mm (para os demais casos). Essas barras foram rosqueadas em chapas de aço, nas quais se apoiava o corpo de prova. Tais chapas possuíam dimensão de 7,5 cm x 7,5 cm para os corpos de prova com barra de 20 mm de diâmetro e 10 cm x 10 cm para os corpos de prova com barras de 10 mm de diâmetro.

A zona sem aderência das barras foi criada envolvendo-a com um tubo de PVC, sendo seu comprimento variado em função do comprimento aderente da barra no concreto (Figura 4 e Tabela 1). Para acompanhar a deformação do aço, foi colado um extensômetro elétrico de resistência no trecho da barra externo ao concreto. O concreto utilizado na pesquisa foi caracterizado quanto a resistência à compressão ( $f_{cm}$ ), segundo a norma ABNT NBR 5739:2007 [28], módulo de elasticidade ( $E_{cm}$ ), segundo a norma ABNT NBR 8522:2008 [29, 30] e resistência à tração por compressão diametral ( $f_{ctm,sp}$ ), segundo a norma ABNT NBR 7222:2010 [31]. Todos esses parâmetros foram obtidos de ensaios em corpos de prova cilíndricos com dimensão de 150 mm x 300 mm. Além deles, foi realizado também o ensaio de flexão sob três pontos de carga com entalhe no meio do vão para determinação da energia no modo I de fratura do concreto simples, conforme esquema de ensaio recomendado em [32]. Todos esses parâmetros foram utilizados na modelagem computacional dos ensaios de arrancamento de barra.

### 3. Resultados e discussão

#### 3.1 Tensão de aderência

Na Tabela 3 são apresentados os resultados da caracterização do concreto, bem como os resultados dos ensaios de arrancamento realizados nos corpos de prova com barra de 10 mm de diâmetro. Observa-se dessa tabela um aumento na resistência à compressão de até 25% quando foi adicionada 1% de fibras de aço (ou 78,5 kg/m<sup>3</sup>), corroborando outros autores que afirmam que a adição de até 120 kg/m<sup>3</sup> de fibras ao concreto aumenta em, aproximadamente, 25% a resistência à compressão do concreto [33]. Já com a adição de 2% de fibras de aço (ou 157 kg/m<sup>3</sup>), observa-se um menor aumento da resistência à compressão, que chegou a no máximo 19%. Por outro lado, observa-se que a incorporação de fibras de aço à matriz provocou um significativo aumento na resistência à tração por compressão diametral, chegando a 80% para 1% de fibras e a 123% para 2% de fibras. Já o módulo de elasticidade do concreto foi pouco influenciado pela adição das fibras de aço. Da mesma forma, o coeficiente de Poisson também não foi influenciado pela adição das fibras de aço, apresentando um valor médio igual a 0,20.

Com relação aos ensaios de arrancamento com comprimento aderente igual a  $5\phi$ , em todos os ensaios a ruptura ocorreu devido à

perda de aderência entre a barra e o concreto. Isto é, a ruptura se deu pelo arrancamento da barra sem a presença de fendilhamento do concreto e com o aço ainda em regime elástico linear. Com a adição de 1% de fibras de aço, houve um pequeno aumento de 9% na tensão de aderência média, que passou de 20,53 MPa para 22,28 MPa. Apesar do aumento do volume de fibras ter melhorado as propriedades mecânicas do concreto, em especial a resistência à tração indireta, essa melhoria não se refletiu no aumento da tensão de aderência

média entre a barra e o concreto, calculada pela Eq.(1), uma vez que com 2% de fibras a tensão de aderência média permaneceu praticamente a mesma dos corpos de prova sem fibras (20,18 MPa).

$$f_b = \frac{F_{\max}}{\pi \ell_d \phi} \quad (1)$$

Tabela 2 – Propriedades do concreto no estado fresco

Volume de fibras (%)	Corpo de prova	Propriedades			
		Slump (mm)	Teor de ar (%)	Massa específica (kg/m <sup>3</sup> )	Slump Flow (cm)
0	CP10.5.0.A1				
	CP10.5.0.A2				
	CP10.10.0.A1	–	2,40	2330	65
	CP10.10.0.A2				
	CP20.10.0.A1				
	CP20.10.0.A2				
	CP10.10.0.A3	–	1,90	2332	64
	CP10.10.0.A4				
	CP20.10.0.A3				
	CP12,5.10.0.A1	–	1,80	2316	69
	CP12,5.10.0.A2				
	CP12,5.10.0.A3				
	CP16.10.0.A1	–	1,10	3318	69
	CP16.10.0.A2				
	CP16.10.0.A3				
	Média	–	1,80	2324	67
1	CP10.5.1.A1				
	CP10.5.1.A2	185	1,90	2396	–
	CP10.10.1.A1				
	CP10.10.1.A2				
	CP10.10.1.A3	150	1,60	2395	–
	CP10.10.1.A4				
	CP20.10.1.A1	175	1,30	2404	–
	CP20.10.1.A2	140	1,00	2390	–
	CP20.10.1.A3				
	Média	163	1,45	2396	–
2	CP10.5.2.A1				
	CP10.5.2.A2	115	1,70	2455	–
	CP10.10.2.A1				
	CP10.10.2.A2				
	CP20.10.2.A1	70	1,20	2453	–
	CP20.10.2.A2				
	CP10.10.2.A3	50	1,60	2457	–
	CP10.10.2.A4				
	CP20.10.2.A3	85	0,80	2455	–
	Média	80	1,33	2455	–

Figura 3 – Esquema do ensaio de arrancamento (dimensões em mm)

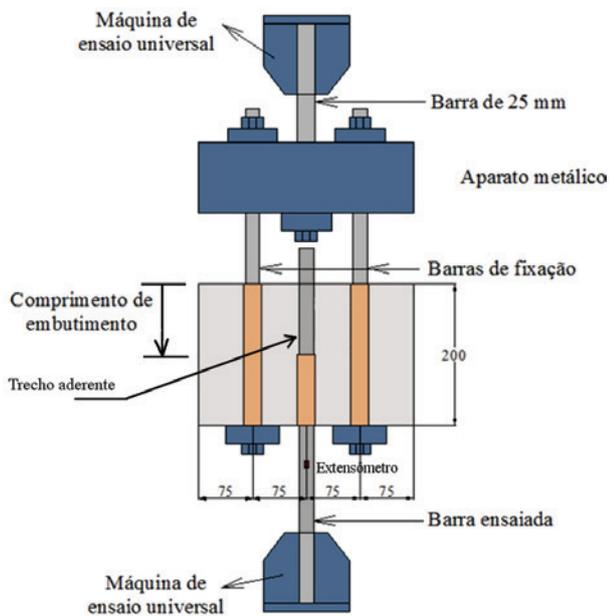


Figura 4 – Detalhe da preparação do corpo de prova



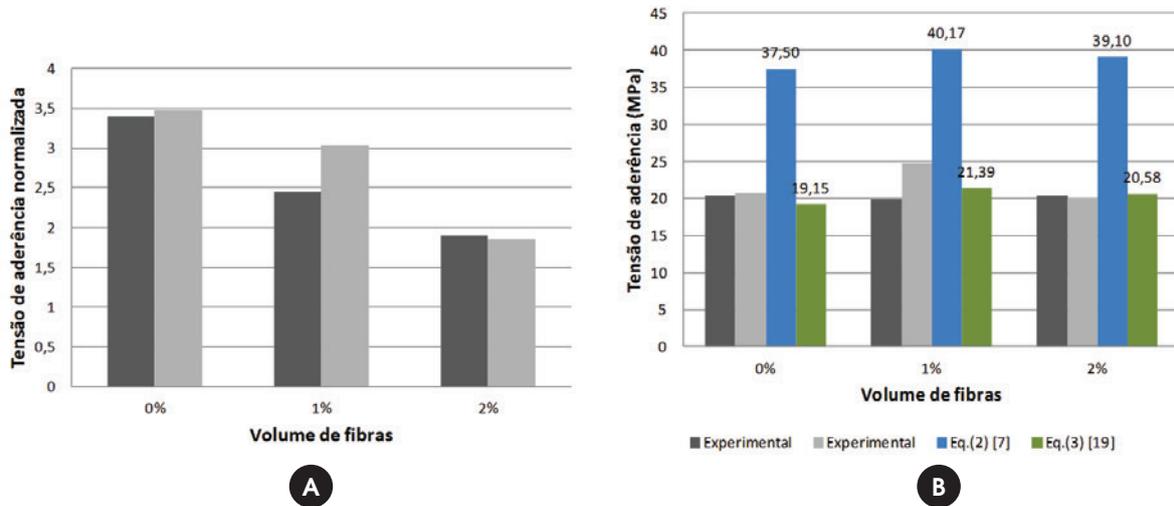
Sendo,  $f_b$  a tensão de aderência média;  $F_{max}$  a força de arrancamento;  $\ell_d$  o comprimento aderente e  $\phi$  o diâmetro da barra de aço. Essa mesma conclusão pode ser obtida quando se compara a tensão de aderência normalizada, obtida pela relação entre a tensão de aderência e a resistência à tração indireta do concreto (Figura 5). Neste caso, nota-se uma redução de até 45% na tensão de aderência normalizada com a adição de 2% de fibras de aço, mos-

Tabela 3 – Resultados da caracterização do concreto e do ensaio de arrancamento

Corpo de prova	Comprimento aderente	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{ctm,sp}$ (MPa)	$E_{cm}$ (GPa)	$G_f$ (N.m/m <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (kN)	$f_b$ (kN)
CP10.5.0.A1 <sup>(1)</sup>		58,70±3,86	5,98±0,05	28,33±0,35	0,062±0,019	31,9	20,31
CP10.5.0.A2 <sup>(1)</sup>						32,6	20,75
CP10.5.1.A1 <sup>(1)</sup>	5 $\phi$	73,20±2,72	8,12±1,08	30,97±0,21	-	31,2	19,86
CP10.5.1.A2 <sup>(1)</sup>						38,8	24,70
CP10.5.2.A1 <sup>(1)</sup>		67,80±0,98	10,80±0,46	30,00±0,60	-	32,0	20,37
CP10.5.2.A2 <sup>(1)</sup>						31,4	19,99
CP10.10.0.A1 <sup>(2)</sup>		58,70±3,86	5,98±0,05	28,33±0,35	28,33±0,019	46,9	14,93
CP10.10.0.A2 <sup>(2)</sup>						50,5	16,07
CP10.10.0.A3 <sup>(1)</sup>		58,90±3,32	4,84±0,44	29,03±0,48	ND	39,1	12,45
CP10.10.0.A4 <sup>(2)</sup>						46,1	14,67
CP10.10.1.A1 <sup>(2)</sup>	10 $\phi$	73,20±2,72	8,12±1,08	30,97±0,21	-	52,8	16,81
CP10.10.1.A2 <sup>(2)</sup>						51,4	16,36
CP10.10.1.A3 <sup>(2)</sup>						48,7	15,50
CP10.10.1.A4 <sup>(2)</sup>						48,7	15,50
CP10.10.2.A1 <sup>(1)</sup>		67,80±0,98	10,80±0,46	30,00±0,60	-	34,0	10,82
CP10.10.2.A2 <sup>(1)</sup>						31,3	9,96
CP10.10.2.A3 <sup>(3)</sup>		69,96±1,39	9,17±0,39	34,67±0,40	-	45,9	-
CP10.10.2.A4 <sup>(3)</sup>						51,4	-

ND: valor não determinado. (1) O arrancamento da barra se deu antes do escoamento do aço; (2) O arrancamento da barra se deu após o início do escoamento do aço, porém antes da sua ruptura. (3) a ruptura ocorreu na barra, sem que a mesma fosse arrancada.

Figura 5 – (A) Tensão de aderência normalizada pela resistência à tração indireta do concreto; (B) Comparação com equações empíricas



trando que a tensão de aderência não foi influenciada pelo aumento da resistência à tração do concreto proporcionado pelas fibras. Uma possível justificativa para isso é o pequeno comprimento do trecho aderente da barra (50 mm) quando comparado ao comprimento da fibra (35 mm), o que não permite a mobilização da fibra antes do arrancamento da barra.

O mesmo comportamento foi observado por outros pesquisadores [8], que constataram que a adição de 0,75% (60 kg/m<sup>3</sup>) de fibras de aço de 35 mm de comprimento e relação de aspecto igual a 64 aumentou em, no máximo, 16% a tensão de aderência entre a barra e o concreto. Neste caso, os resultados foram obtidos de ensaios de arrancamento, conforme prescrição da literatura [3], em barras de 8 mm e 20 mm diâmetro embutidas em concreto com resistência à compressão de até 93 MPa. Apesar desse aumento pontual, de modo geral esses pesquisadores observaram redução de até 45% no valor da tensão de aderência normalizada devido à adição das fibras de aço.

Na Figura 5, a tensão de aderência média entre a barra e o concreto obtida dos ensaios também é comparada com a tensão de aderência recomendada nas referências [8] e [21] para concretos reforçados com fibras de aço. As equações (2) e (3) mostram as expressões para cálculo da tensão de aderência recomendadas por essas duas referências, respectivamente:

$$f_b = 3,22 \left[ \frac{(50 \text{ RIA})^2}{f_{\text{cube}}^{0,4}} \left( \frac{\phi}{c} \right)^{-0,4} + f_{\text{cube}}^{0,70} \left( \frac{\phi}{c} \right)^{0,37} \right] - 25,62 \quad (2)$$

$$f_b = 2,5 f_{\text{cm}}^{0,5} \quad (3)$$

Sendo,  $f_b$  a tensão de aderência média em MPa;  $f_{\text{cm}}$  a resistência à compressão do concreto obtida de corpos de prova cilíndricos

em MPa;  $f_{\text{cube}}$  a resistência à compressão do concreto obtida de corpos de prova prismáticos (admitido igual a  $f_{\text{cm}}/0,8$ ); RIA a relação entre a altura das nervuras ( $h_r = 0,64$  mm) e a distância entre nervuras ( $s_r = 6,1$  mm) da barra de aço;  $\phi$  o diâmetro da barra de aço (10 mm); e  $c$  o cobrimento de concreto (70 mm)

Comparando os valores obtidos por meio da Eq.(2) com os valores experimentais, nota-se que essa expressão superestima a tensão de aderência em 85%, em média. Por outro lado, os valores obtidos por meio da Eq.(3) diferem dos valores experimentais em apenas 3%, em média. Isso mostra que esta última expressão apresenta-se adequada para a avaliação da tensão de aderência de barras imersas em concretos com e sem fibras de aço.

### 3.2 Comprimento de ancoragem básico

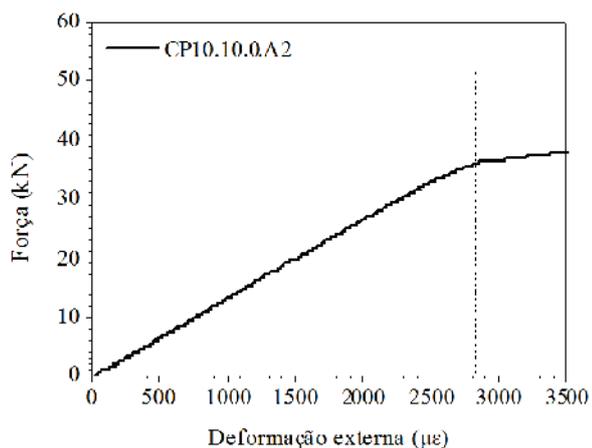
Na Tabela 3 são apresentados os resultados dos ensaios de arrancamento das barras com 10 mm de diâmetro e comprimento aderente igual a 10 cm, isto é, dez vezes o diâmetro da barra ( $10\phi$ ). Na grande maioria, as barras foram arrancadas do concreto depois de atingirem a tensão de escoamento do aço (Figura 6), independentemente da presença das fibras de aço. Graças ao elevado cobrimento de concreto em torno da barra ( $c/\phi = 7$ ), em nenhum dos ensaios foi observado o fendilhamento do concreto. Apesar de nesses ensaios a barra ter sido arrancada após o escoamento do aço, ainda assim foi calculada a tensão de aderência média entre a barra e o concreto. Isso se justifica pelo fato de se desejar obter desses ensaios o comprimento de ancoragem básico, definido como o comprimento reto de uma barra de armadura necessário para ancorar a força limite  $A_s f_y$  nessa barra, admitindo, ao longo desse comprimento, resistência de aderência uniforme [34]. Além disso, outros pesquisadores afirmam que a tensão de aderência obtida do ensaio de arrancamento sem o escoamento da armadura fornece valores de resistência de aderência bem superiores aos valores normativos [8].

Dos corpos de prova com fibras, nota-se que a adição de 1% de fibras aumentou a resistência de aderência média no instante do arrancamento da barra em apenas 10%, enquanto a adição de 2%

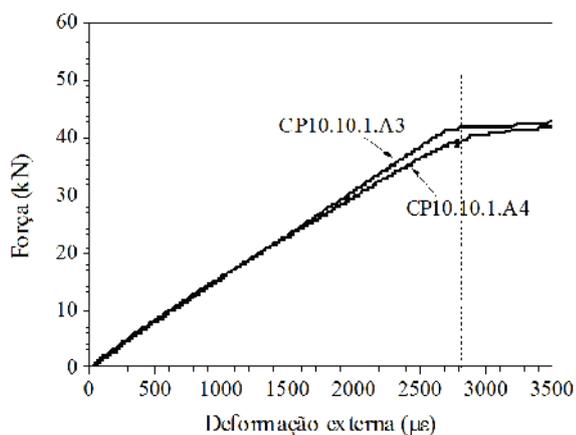
de fibras aumentou essa mesma resistência de aderência em apenas 7%. Para os corpos de prova com 2% de fibras foram desconsiderados aqueles que foram arrancados antes do escoamento do aço (CP10.10.2.A1 e CP10.10.2.A2). Esse pequeno aumento observado pode estar relacionado à capacidade resistente residual do aço depois de atingida a sua resistência ao escoamento. Isto é, o aumento se deve à maior resistência do aço no momento em que a barra foi arrancada. Além disso, a proximidade dos valores sugere que o volume de fibras adicionadas não teve influência sobre a resistência média de aderência.

Tendo em vista que na maioria dos ensaios as barras atingiram a tensão de escoamento antes de serem arrancadas, pode-se concluir que o comprimento aderente de  $10\phi$  foi superior ao comprimento básico de ancoragem da armadura, independente da presença e do volume de fibras. Vale ressaltar que em dois corpos de prova com 2% de fibras (CP10.10.2.A3 e CP10.10.2.A4) as barras

Figura 6 – Curva Força versus Deformação da barra para corpos de prova com barra de 10 mm e ancoragem igual a  $10\phi$



A Concreto sem fibras



B Concreto com 1% de fibras

Figura 7 – Rompimento da barra



A CP10.10.2.A3



B Detalhe da barra do CP10.10.2.A3



C CP10.10.2.A4

Tabela 4 – Comprimento básico de ancoragem para barras de 10 mm de diâmetro

Volume de fibras (%)	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{cm,sp}$ (MPa)	Resistência de aderência - $f_{bd}$ (MPa)		Comprimento básico de ancoragem (cm)	
			NBR 6118 (34)/Eurocode 2 (35)	ACI 318 (35)	NBR 6118 (34)/Eurocode 2 (35)	ACI 318 (36)
0	58,90	4,84	9,80	6,59	15	22
	58,70	5,98	12,11	6,58	12	22
1	66,98	8,74	17,70	7,03	8	21
	73,20	8,12	16,44	7,35	9	20
2	69,96	9,17	18,57	7,18	8	21
	67,80	10,80	21,87	7,07	7	21

não foram arrancadas do bloco de concreto, sendo rompidas no trecho sem aderência (Figura 7). Isso sugere que as fibras de aço podem ter melhorado a resistência de aderência nesses corpos de prova o suficiente para provocar o rompimento da barra de aço. Entretanto, esse aumento residual da resistência de aderência não é de interesse, uma vez que se deseja apenas que a barra atinja a sua tensão de escoamento antes de ser arrancada.

Na Tabela 4 são mostrados os valores do comprimento básico de ancoragem determinados pelas normas brasileira e europeia de estruturas de concreto armado, além do código *American Concrete Institute* -ACI. Tanto a norma brasileira NBR 6118 [34] quanto a norma europeia Eurocode 2 [35] empregam a Eq.(4) para o cálculo da resistência de aderência aço-concreto.

$$f_{bd} = \eta_1 \eta_2 \eta_3 f_{ctd} \quad (4)$$

Sendo,  $f_{bd}$  resistência de aderência de cálculo;  $\eta_1$  o coeficiente de conformação superficial da barra ( $\eta_1 = 2,25$  para barras nervuradas);  $\eta_2$  o coeficiente conforme a região onde a armadura se localiza no concreto ( $\eta_2 = 1$  para regiões de boa aderência); e  $\eta_3$  o coeficiente que considera o diâmetro da armadura ( $\eta_3 = 1$  para  $\phi < 32$  mm). Para efeito de comparação, a resistência à tração de cálculo do concreto foi tomada igual a 90% da resistência à tração indireta do concreto ( $f_{cm,sp}$ ).

O comprimento de ancoragem básico ( $\ell_b$ ) é calculado segundo a Eq.(5). Neste caso, para a tensão de escoamento do aço ( $f_y$ ) foram utilizados os valores obtidos experimentalmente.

$$\ell_b = \frac{\phi f_y}{4 f_{bd}} \quad (5)$$

De acordo com o item 12.2.3 do ACI 318M-08 [36], o comprimento de ancoragem de barras retas tracionadas longitudinalmente deve ser calculado de acordo com a Eq.(6).

$$\ell_b = \left( \frac{f_y}{1,1\lambda\sqrt{f_{cm}}} \frac{\psi_t \psi_e \psi_s}{\left( \frac{c + K_{tr}}{\phi} \right)} \right) \phi \quad (6)$$

Utilizando a Eq.(5), a resistência de aderência média segundo o ACI 318M-08 [36] pode ser estimada por meio da Eq.(7).

$$f_{bd} = \frac{1,1\lambda\sqrt{f_{cm}} \left( \frac{c + K_{tr}}{\phi} \right)}{4\psi_t \psi_e \psi_s} \quad (7)$$

Sendo  $\lambda$  o coeficiente que leva em consideração a densidade do concreto ( $\lambda = 1,0$  para concretos de densidade normal);  $K_{tr}$  o coeficiente que leva em conta o confinamento do concreto ( $K_{tr} = 1,0$  na

ausência de estribos); a relação  $\left( \frac{c + K_{tr}}{\phi} \right)$  não deve ser maior

que 2,5;  $\psi_t = 1,0$  quando menos de 300 mm de concreto fresco é lançado abaixo do trecho de ancoragem;  $\psi_e = 1,0$  quando a armadura não é revestida;  $\psi_s = 0,8$  para barras com diâmetro de 10 mm. Para o caso dos ensaios realizados, a Eq.(7) pode ser simplificada na Eq.(8).

$$f_{bd} = \frac{1,1\sqrt{f_{cm}} \cdot 2,5}{4 \cdot 0,8} = 0,859\sqrt{f_{cm}} \quad (8)$$

Comparando-se os resultados da Tabela 4, percebe-se que o ACI 318M-08 é mais conservador, propondo comprimentos de ancoragem mais altos do que os estipulados pelas normas brasileira e europeia. Estas, por outro lado, apresentaram comprimento de ancoragem próximo ao valor utilizado no ensaio, isto é, 10 cm (ou  $10\phi$ ). Além disso, a resistência de aderência recomendada pela NBR 6118 e pelo Eurocode 2 encontra-se próxima da tensão de aderência obtida do ensaio, com uma diferença de 25% a menos para o concreto sem fibras e de apenas 6% a mais para o concreto com 1% de fibras. Dessa forma, pode-se inferir que o valor de 10 cm (ou  $10\phi$ ) representa o comprimento de ancoragem básico retilíneo da barra ensaiada e as expressões dessas normas podem ser utilizadas para avaliar o comprimento de ancoragem básico de barras imersas em concreto fibroso, desde que conhecido a resistência à tração do compósito.

Atenção especial deve-se dar ao adensamento do concreto fibroso em torno da barra para evitar prejuízos na tensão de aderência. Tal fato correu nas barras dos corpos de prova CP10.10.2.A1 e CP10.10.2.A2, com 2% de fibras, que não alcançaram a tensão de escoamento do aço. Isso mostra que a aderência entre a barra de aço e o bloco de concreto neste caso pode ter sido prejudicada, talvez por problemas durante a moldagem, tais como a formação de película de água na interface entre a barra e o concreto causada por vibração excessiva. Nos outros dois corpos de prova nos quais o concreto fibroso possuía menor abatimento (Tabela 2), as barras romperam sem que fossem arrancadas do concreto.

Tabela 5 – Resultados da caracterização do concreto e do ensaio de fendilhamento

Corpo de prova	$f_{cm}$ (MPa)	$f_{cm,sp}$ (MPa)	$E_{cm}$ (MPa)	$G_f$ (N.m/m <sup>2</sup> )	$F_{max}$ (kN) <sup>(1)</sup>	Forma de ruptura
CP12,5.10.0.A1					61,2	Arrancamento
CP12,5.10.0.A2	53,0±7,67	4,99±0,95	29,60±0,62	0,080±0,034	55,7	Arrancamento
CP12,5.10.0.A3					58,4	Arrancamento
CP16.10.0.A1					95,1	Fendilhamento
CP16.10.0.A2	60,77±4,71	5,94±0,28	31,00±0,82	0,040±0,012	81,0	Fendilhamento
CP16.10.0.A3					88,6	Arrancamento
CP20.10.0.A1					64,2	Fendilhamento
CP20.10.0.A2	58,90±3,32	4,84±0,44	29,03±0,48	ND	61,3	Fendilhamento
CP20.10.0.A3	58,70±3,86	5,98±0,05	28,33±0,35	0,062±0,019	68,9	Fendilhamento
CP20.10.1.A1	73,20±2,72	8,76±0,24	30,83±0,23	–	119,7	Fendilhamento
CP20.10.1.A2					131,1	Fendilhamento
CP20.10.1.A3	73,07±3,43	9,38±0,04	30,15±0,49	–	139,1	Fendilhamento
CP20.10.2.A1					179,7	Fendilhamento com escoamento
CP20.10.2.A2	77,97±2,02	9,84±1,23	31,10±0,53	–	180,1	Fendilhamento com escoamento
CP20.10.2.A3	67,80±0,98	11,10±0,46	30,27±0,32	–	140,0	Fendilhamento

ND: valor não determinado. (1) Representa a força última obtida no ensaio que, no caso do concreto fibroso, é maior que força de fissuração da matriz.

### 3.3 Ensaios de fendilhamento do concreto

Os resultados dos ensaios de fendilhamento do concreto, isto é, com barras de diâmetro superior a 10 mm, bem como das propriedades mecânicas do concreto são mostrados na Tabela 5. Nesses ensaios, o comprimento aderente foi mantido constante e igual a 10φ, pois se buscava a ruptura da ancoragem por fendilhamento do concreto e não a determinação da tensão de aderência entre a barra e o concreto.

Analisando a influência do cobrimento do concreto, nota-se que nos ensaios com barras de 12,5 mm de diâmetro (cφ = 5,5) todos os corpos de prova apresentaram ruptura da aderência entre a barra e o concreto, visto que a barra foi arrancada sem a presença de fendilhamento no concreto. Já nos ensaios com as barras de 16 mm de diâmetro (cφ = 4,2), dois corpos de prova romperam por fendilhamento do concreto (Figura 8) e em um deles a barra foi arrancada sem que houvesse o fendilhamento do concreto.

Como o ensaio anterior não foi conclusivo quanto à ruptura por fendilhamento do concreto, o diâmetro da armadura foi aumentado para 20 mm, o que representa uma relação entre o cobrimento e o diâmetro da armadura (cφ) igual a 3,25. Observa-se na Tabela 5 que devido à redução do cobrimento, em todos os ensaios foi observado o fendilhamento do concreto. Por essa razão, esse diâmetro foi utilizado para analisar a influência das fibras na resistência ao fendilhamento do concreto.

Vale observar que, com a barra de 20 mm, o comprimento aderente era de 20 cm e igual à altura do corpo de prova. Com isso, não havia o trecho sem aderência da barra com o concreto. Resultados anteriores de ensaios com esse mesmo corpo de prova e barra de 20 mm de diâmetro, porém com comprimento aderente

igual a 10 cm (ou 5φ), apresentaram tensão de aderência muito superior aos valores reais. Isso aconteceu devido à forma de moldagem do corpo de prova que introduziu mecanismos resistentes adicionais que não apenas a aderência entre a barra e o concreto [37]. Por essa razão, optou-se por manter a altura do corpo de prova, mesmo sem o trecho não aderente.

Dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que a incorporação de 1% de fibras à matriz propiciou um aumento médio de 100% na força de ruptura, enquanto a incorporação de 2% aumentou em 157% essa mesma força. Realizando uma análise de variância nesses resultados (com um intervalo de confiança de 95%), conclui-se que tanto a adição de fibras quanto o seu volume tiveram influência significativa na resistência ao fendilhamento do concreto.

Esse aumento da resistência ao fendilhamento do concreto está relacionado com o aumento da resistência à tração do concreto determinado do ensaio de tração por compressão diametral. A partir da teoria da elasticidade [38], é possível escrever a Eq. (9) que fornece a tensão máxima circunferencial (σ<sub>θ,max</sub>) em uma seção circular, de raio *b*, com um furo circular, de raio *a*, ao qual é aplicada uma pressão interna *p<sub>i</sub>*, distribuída ao longo de todo o furo interno. Neste caso, a tensão máxima ocorre na face do furo interno.

$$\sigma_{\theta,max} = \frac{P_i (a^2 + b^2)}{b^2 - a^2} \tag{9}$$

Substituindo nessa expressão as dimensões do corpo de prova ensaiado, isto é, a = 10 mm (metade do diâmetro da barra)

Figura 8 – Ruptura por fendilhamento dos corpos de prova



A Barra de 16 mm e concreto sem fibras

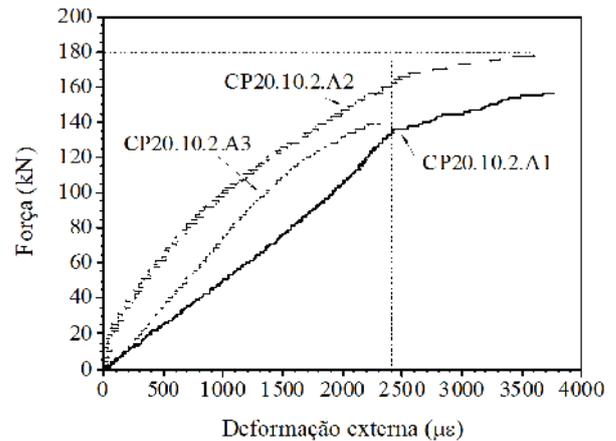


B Barra de 20 mm e concreto sem fibras



C Barra de 20 mm e concreto com 2% de fibras

Figura 9 – Curva Força versus Deformação da barra para corpos de prova com barra de 20 mm



e  $b = 75$  mm (menor distância da face da barra à face do corpo de prova, ou seja, o cobrimento), chega-se em  $\sigma_{\theta, \max} = 1,036p_i$ . A pressão radial atuante no furo interno pode ser relacionada com a tensão de aderência da barra ( $f_b$ ) a partir do conhecimento da inclinação das nervuras da barra ( $\beta$ ), isto é,  $p_i = f_b / \text{tg } \beta$ . Admitindo que a barra possua a menor inclinação de nervuras permitida para barras de alta aderência, isto é  $\beta = 45^\circ$  [1], chega-se que  $p_i = f_b$ . Para o corpo de prova sem fibras, a tensão de aderência pode ser calculada por meio da Eq.(1) e vale 5,1 MPa, de onde se conclui que a tensão máxima circunferencial nesse modelo vale 5,3 MPa. Este valor é apenas 2% inferior à resistência à tração indireta média do concreto utilizado nos corpos de prova, isto é, 5,41 MPa (Tabela 5). Isso indica uma boa correlação entre a força medida no ensaio e a resistência à tração do concreto.

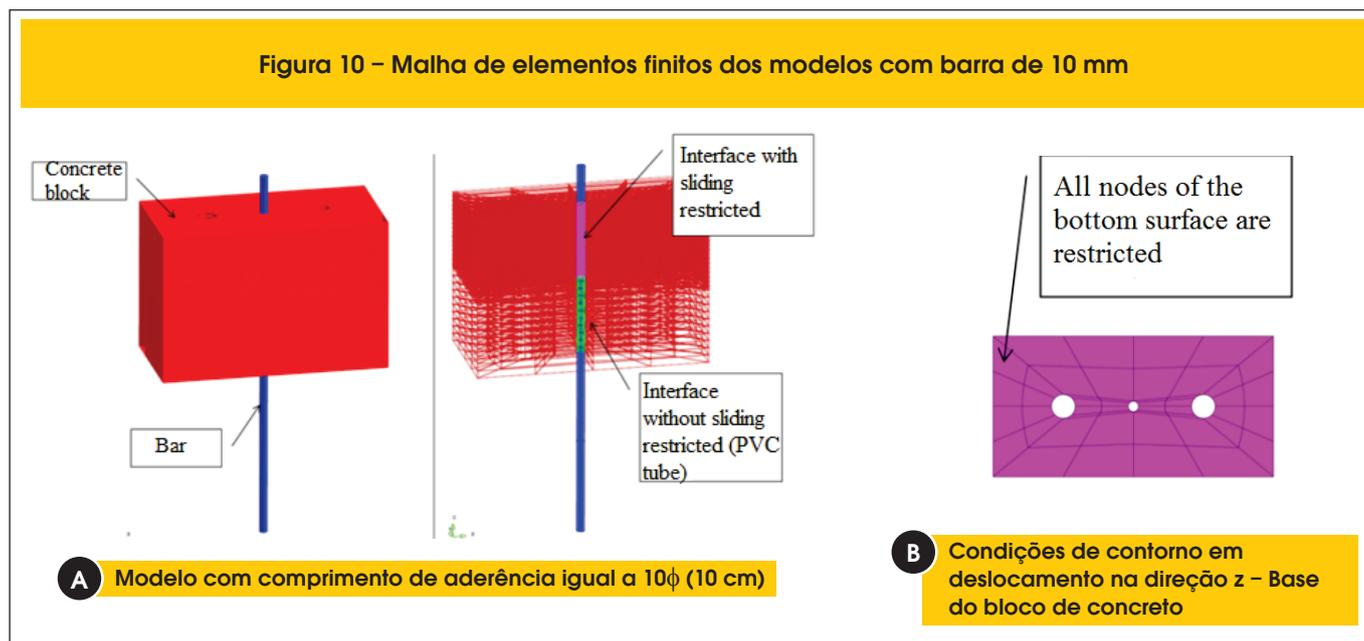
No caso dos modelos com fibras de aço, a tensão máxima circunferencial vale 10,7 MPa para o corpo de prova de 1% de fibras e 13,8 MPa para o corpo de prova de 2% de fibras. Esses valores são 18% e 32% maiores que a resistência à tração indireta média do concreto (Tabela 5). Entretanto, os concretos fibrosos apresentaram aumento de resistência após a fissuração da matriz, o que justifica essa diferença, já que a Eq.(9) é válida para materiais frágeis.

A incorporação das fibras, além de propiciar um aumento da resistência ao fendilhamento do concreto, também influenciou a forma de ruptura, que se tornou menos brusca que no concreto sem fibras (Figura 8). Além disso, a adição de 2% de fibras permitiu que a barra atingisse a tensão de escoamento do aço antes da ruptura por fendilhamento do concreto, conforme registrado pelo extensômetro colado no trecho da barra externo ao bloco (Figura 9). Isso demonstra o efeito positivo das fibras no confinamento do concreto na região de ancoragem.

### 3.4 Modelagem computacional

A modelagem computacional dos ensaios de arrancamento e de fendilhamento foi realizada no programa DIANA® 9.3, baseado no método dos elementos finitos [39]. Para representar o concreto e a barra de aço, foram utilizados elementos finitos sólidos isoparamétricos do tipo

Figura 10 – Malha de elementos finitos dos modelos com barra de 10 mm



CHX60 e para representar a interface entre a barra de aço e o concreto foi utilizado o elemento finito de interface do tipo CQ481, disponíveis na biblioteca do programa. Vale ressaltar que nessa modelagem não foi considerada a possibilidade de escorregamento entre a barra e o concreto, isto é, foi admitida a aderência perfeita entre os dois materiais. Em uma etapa preliminar, os modelos foram processados sem a representação das nervuras das barras. Nesse estudo, verificou-se que a representação física das nervuras da barra exercia influência nos resultados obtidos [37]. Dessa forma, todas as modelagens computacionais aqui apresentadas consideram a presença das nervuras das barras. Na Figura 10 é mostrada a malha de elementos finitos utilizada na modelagem do ensaio de arrancamento da barra de 10 mm de diâmetro. A escolha pela modelagem apenas dessa barra se deu pelo fato de se desejar avaliar numericamente a forma da distribuição da tensão de aderência entre a barra e o concreto quando a mesma é arrancada do concreto sem fendilhamento. O tamanho da malha de

elementos finitos foi definido em função das dimensões das nervuras e em função do volume mínimo para o elemento finito tridimensional admitido no Programa DIANA® 9.3. Nessa mesma figura é mostrado o esquema de vinculação do modelo computacional, que foi restringido em toda a extensão da sua base. Para representar o comportamento à tração do concreto com fibras, foi empregado o modelo constitutivo de Hordijk, disponível no programa DIANA® 9.3 e que utiliza uma curva exponencial para a representação do amolecimento do concreto [39]. Nesse caso, a energia no modo I de fratura do concreto fibroso ( $G_f^F$ ) foi calculada usando a Eq.(10), disponível na literatura [40].

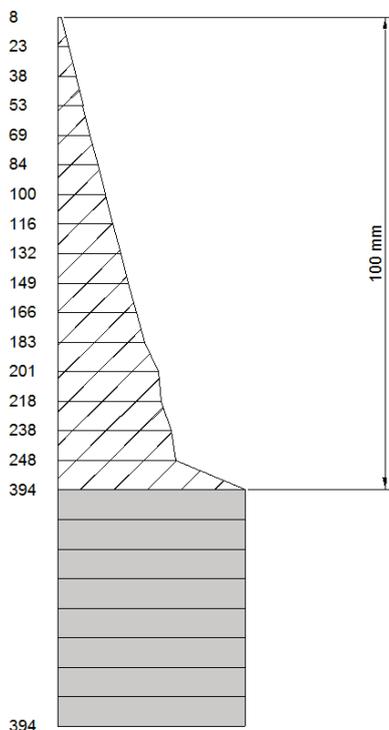
$$\frac{G_f^F}{G_f^0} = 1 + 27,41V_f \tag{10}$$

Tabela 6 – Resultados dos modelos computacionais com barra de 10 mm

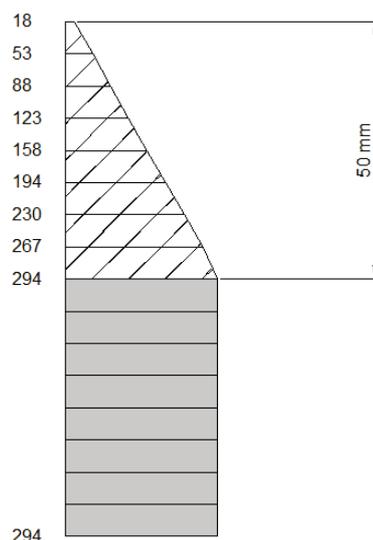
Comprimento aderente	Volume de fibras (%)	Força máxima experimental média $F_{exp}$ (kN)	Força máxima numérica $F_u$ (kN)	$\frac{F_{exp}}{F_u}$	$f_{b,n}^{(1)}$ (MPa)	$f_{b,m}^{(2)}$ (MPa)
5φ	0	32,2	23,0	0,71	13,8	18,7
	1	35,0	25,7	0,73	15,4	20,9
	2	31,7	29,3	0,92	17,4	23,8
10φ	0	45,6	30,9	0,68	9,6	9,6
	1	50,4	31,5	0,63	9,8	9,9
	2	48,6	33,0	0,68	9,9	10,3

(1)  $f_{b,n}$  é a tensão de aderência média, correspondente à força máxima numérica, determinada por meio da eq.(12);  
 (2)  $f_{b,m}$  é a tensão de aderência, correspondente à força máxima numérica, determinada no elemento de interface CQ481 entre a barra e o concreto.

Figura 11 – Perfil de tensão de tração nas barras de 10 mm



**A** Modelo sem fibras, comprimento aderente igual a  $10\phi$  – Tensões em MPa



**B** Modelo sem fibras, comprimento aderente igual a  $5\phi$  – Tensões em MPa

Sendo  $G_f^0$  a energia de fratura para o concreto sem adição de fibras e  $V_f$  o volume de fibras, em porcentagem.

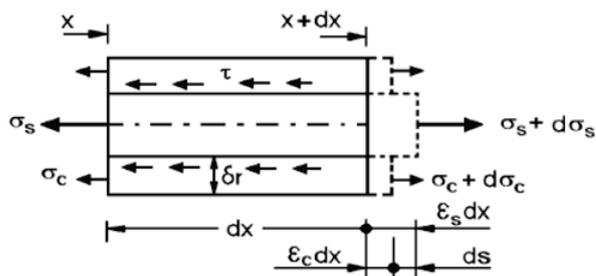
Para o concreto sem fibras, foi utilizado um modelo constitutivo à tração com amolecimento linear, sendo utilizado o valor da energia no modo I de fratura determinado do ensaio de caracterização do concreto ( $G_f^0$ ). Para representar o comportamento do aço, foi empregado um modelo constitutivo com comportamento elastoplástico perfeito, com a tensão de escoamento igual aos valores determinados experimentalmente.

Na Tabela 6 são mostradas as forças máximas obtidas do ensaio e da modelagem computacional. De forma geral, a força máxima obtida da modelagem computacional representou cerca de 70% da força máxima obtida do ensaio. Isso se deve ao fato que na modelagem houve intensa fissuração do concreto na região próxima à barra, o que resultou na falta de convergência do processo numérico. Apesar disso, nota-se que no modelo com comprimento aderente igual a  $5\phi$  as fibras apresentaram uma pequena influência na resistência de aderência, com um aumento de 12% quando se compara o modelo com 1% de fibras com o modelo sem fibras e de 14% quando se compara o modelo com 2% de fibras com o modelo com 1% de fibras. Por outro lado, quando se analisa o modelo com

comprimento aderente igual a  $10\phi$ , nota-se que as fibras não influenciaram a resistência de aderência.

Na Figura 11 é apresentado o perfil de tensões de tração ao longo da barra no instante em que foi atingida a força máxima numérica. O trecho hachurado representa a região aderente entre o aço e o concreto. A tensão de aderência entre a barra e o concreto pode ser determinada por meio do equilíbrio

Figura 12 – Tensão de aderência aço-concreto



do elemento de concreto armado ilustrado na Figura 12. Para uma barra de aço com diâmetro  $\phi$ , tem-se:

$$d\sigma_c A_c + d\sigma_s A_s = \tau dx \pi \phi \tag{11}$$

Desprezando-se a contribuição do concreto tracionado e substituindo a área de aço pelo valor da seção circular, tem-se:

$$\tau = \frac{d\sigma_s}{dx} \frac{\phi}{4} \tag{12}$$

A partir da Eq.(12) e dos perfis de tensão apresentados na Figura 11, foi determinada a tensão de aderência média numérica ( $f_{b,n}$ ) mostrada na Tabela 6. Assim como a força máxima numérica, essa tensão de aderência representou cerca de 70% da tensão de aderência média determinada dos ensaios. Nota-se dessa figura que o perfil de tensões para a modelo com comprimento aderente igual a  $5\phi$  apresenta um decaimento aproximadamente linear, o que comprova que a tensão de aderência nesse caso pode ser considerada constante. Já no modelo com comprimento aderente igual a  $10\phi$ , há uma acentuada perda de tensão na barra logo no início do trecho aderente e, em seguida, um decaimento aproximadamente linear no restante do trecho aderente. Isso mostra a mudança no perfil da tensão de aderência quando o comprimento de ancoragem é maior que o comprimento de aderência básico. O mesmo comportamento pode ser observado da Figura 13, que mostra as tensões principais de tração no concreto para os dois modelos no instante da força máxima numérica. Nota-se uma maior concentração da tensão de tração no início do trecho aderente para o modelo com comprimento aderente igual a  $10\phi$ ,

enquanto no modelo com comprimento aderente igual a  $5\phi$  a tensão principal de tração se distribui ao longo do trecho aderente. Isso comprova que o comprimento aderente igual a  $10\phi$  de fato era maior que o comprimento básico de ancoragem da barra.

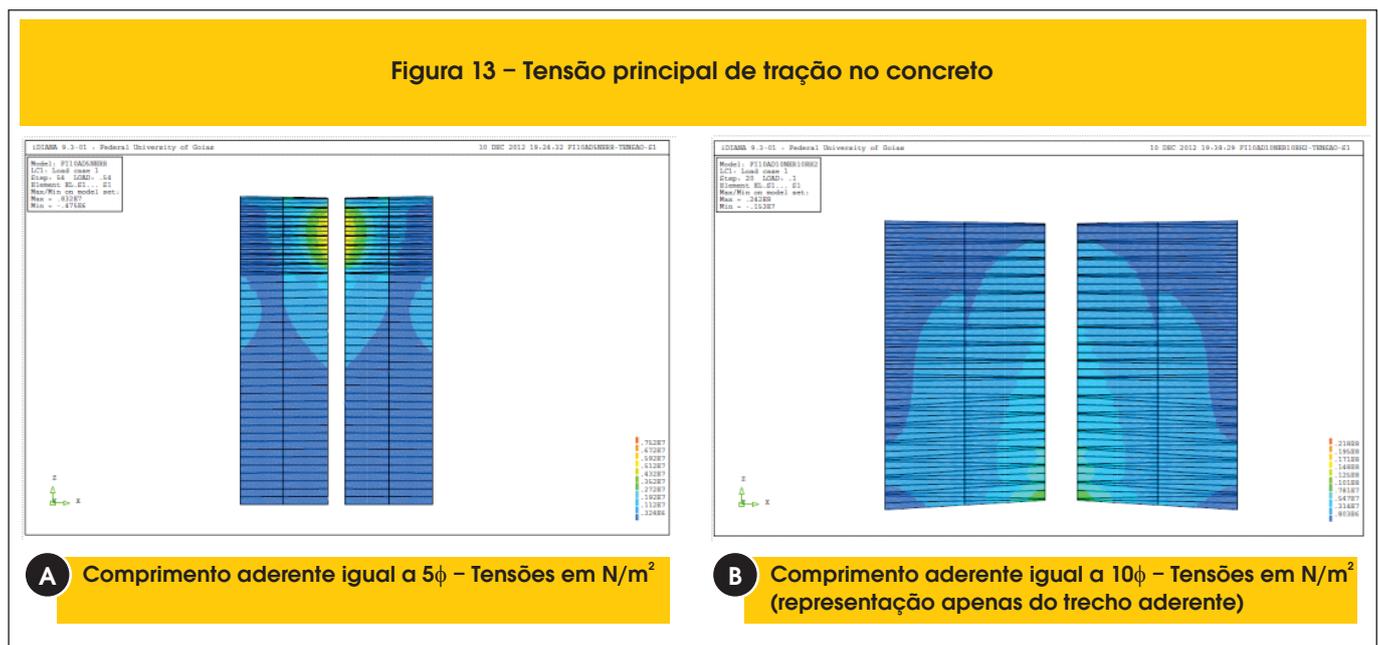
Ainda na Tabela 6, é mostrada a tensão cisalhante medida no elemento de interface entre a barra e o concreto para a força máxima numérica ( $f_{bm}$ ). Essa tensão foi, em média, 36% maior que a tensão de aderência média numérica ( $f_{b,n}$ ) do modelo com comprimento aderente igual a  $5\phi$ . Isso mostra que, de fato, nos ensaios onde há arrancamento da barra, a tensão de aderência em regiões localizadas da barra pode atingir valores superiores à sua tensão de aderência média. Já nos modelos com comprimento aderente igual a  $10\phi$ , a tensão de aderência na interface ( $f_{bm}$ ) foi praticamente igual à tensão de aderência média numérica ( $f_{b,n}$ ), mostrando uma menor concentração de tensão na interface com a barra quando o comprimento aderente é maior que o comprimento básico de ancoragem.

### 4. Conclusões

Este artigo tratou da influência das fibras de aço na tensão de aderência entre barras de aço retilíneas e o concreto, bem como da influência dessas mesmas fibras na resistência ao fendilhamento do cobrimento de concreto. As principais conclusões obtidas foram:

- A partir do ensaio dos corpos de prova com barra de 10 mm e comprimento aderente igual a 5 cm ( $5\phi$ ), conclui-se que as fibras não influenciaram a tensão de aderência entre a barra de aço e o concreto. Quando se analisa a tensão de aderência normalizada, obtida pela relação entre a tensão de aderência e a resistência à tração indireta do concreto, conclui-se que ela foi reduzida em até 45% devido à adição das fibras de aço.
- Um dos objetivos desse artigo era avaliar o comprimento mínimo de ancoragem das barras quando imersas no concreto fibroso, razão pela qual foram realizados os ensaios com comprimento aderente igual a  $10\phi$ . Desses ensaios, conclui-se que

Figura 13 – Tensão principal de tração no concreto



um comprimento de ancoragem de apenas  $10\phi$  foi suficiente para promover a ancoragem das barras, tendo em vista que elas atingiram o escoamento do aço antes de serem arrancadas. Devido ao maior comprimento aderente, nesse ensaio as fibras de aço apresentaram influência positiva, tendo em vista que com 2% de fibras as barras se romperam sem serem arrancadas do concreto.

- De forma geral, as expressões utilizadas para avaliar o comprimento básico de ancoragem de barras de aço presentes nas normas brasileira e europeia para estruturas de concreto armado se mostraram adequadas para determinar o comprimento de ancoragem das barras imersas no concreto fibroso, desde que se utilize nessas expressões a resistência à tração do concreto fibroso.
- As fibras tiveram influência significativa no aumento da resistência ao fendilhamento do concreto. Com a adição de 2% de fibras, a barra de 20 mm de diâmetro e cobrimento igual a  $3,25\phi$  conseguiu alcançar o escoamento do aço antes da ruptura por fendilhamento. Isso representou um aumento de 157% na resistência ao fendilhamento quando comparado à mesma barra imersa em concreto sem fibras.
- A tensão de aderência média determinada por meio da modelagem computacional foi cerca de 30% inferior à tensão de aderência média determinada no ensaio devido à excessiva fissuração do concreto na interface com a barra. Apesar disso, a modelagem das barras com comprimento aderente igual a 5 cm ( $5\phi$ ) indicou uma influência positiva das fibras de aço na tensão de aderência entre a barra de aço e o concreto. Isso mostra que as fibras podem melhorar a aderência aço-concreto se for garantida uma boa ligação entre a barra e o concreto na região de interface entre esses dois materiais.
- Os perfis de tensão de tração na barra obtidos da modelagem computacional mostraram que a tensão de aderência, no instante da ruptura da aderência, de fato é constante ao longo do trecho aderente. Além disso, indicaram que o comprimento de ancoragem igual a  $10\phi$  de fato era maior que o comprimento básico de ancoragem para o concreto utilizado nessa pesquisa.

## 5. Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa Furnas Centrais Elétricas S.A. pelo financiamento dessa pesquisa e pela cessão de seus laboratórios para a realização dos ensaios. Agradecem, ainda, às empresas Mc-Bauchemie e Arcelor Mittal pela doação de materiais utilizados na pesquisa.

## 6. Referências bibliográficas

- [01] FUSCO, P.B. Técnicas de armar as estruturas de concreto. 1ª Ed. São Paulo: PINI, 1995.
- [02] HARAJLI, M. H. Numerical bond analysis using experimental derived local bond laws: a powerful method for evaluating the bond strength of steel bars. *Journal of Structural Engineering*, v.133, n.5, p.695-705, 2007.
- [03] RILEM-FIP-CEB. Bond test for reinforcing steel: 1-Beam test (7-II-28 D). 2-Pullout test (7-II-128): Tentative recommendations. *RILEM Journal Materials and Structures*, v.6, n.32, p.96-105, 1973.
- [04] REHM, G. AND ELIGEHAUSEN, R. Bond of Ribbed Bars under High Cycle Repeated Loads. *ACI Journal*, v.76, n. 2, p.297-309, 1979.
- [05] ROSTÁSY, F. S.; HARTWICH, K. Bond deformed reinforcing bar embedded in steel fibre reinforced concrete. *The International Journal of Cement and Lightweight Concrete*, v.10, n.3, 1988.
- [06] ALMEIDA FILHO, F. M.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C.. Bond-slip behavior of self-compacting concrete and vibrated concrete using pull-out and beam tests. *Materials and Structures*, V. 41, n. 6, p. 1073-1089, 2008.
- [07] ALMEIDA FILHO, F. M.; EL DEBS, M. K.; EL DEBS, A. L. H. C.. Evaluation of the bond strength behavior between steel bars and High Strength Fiber Reinforced Self-Compacting Concrete at early ages. In: *Tailor Made Concrete Structures*. Walraven and Stoelhorst (eds). 2008. Taylor & Francis Group, London. p. 445-451.
- [08] DANCYGIER, A. N.; KATZ, A.; WEXLER, U.. Bond between deformed reinforcement and normal and high-strength concrete with and without fibers. *Materials and Structures*, v.43, n. 6, p. 839-856, 2010.
- [09] DANCYGIER, A. N.; KATZ, A.. Bond over direct support of deformed rebars in normal and high strength concrete with and without fibers. *Materials and Structures*, V. 45, n. 1-2 , p. 265-275, 2012.
- [10] LORRAIN, M. ; BARBOSA, M. P. ; SILVA FILHO, L.C.P. . Estimation of compressive strength based on Pull-Out bond test results for on-site concrete quality control. *IBRACON Structures and Materials Journal*, v. 4, n. 4, p. 582-591, 2011.
- [11] DE LARRARD, F.; SCHALLER, I.; FUCHS, J.. Effect of the Bar Diameter on the Bond Strength of Passive Reinforcement in High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, V. 90, n.4, p. 333-339, 1993.
- [12] HAMZA, A. M.; NAAMAN, A. E.. Bond Characteristics of Deformed Reinforcing Steel Bars Embedded in SIFCON. *ACI Materials Journal*, V. 93, n. 6, p. 1-11, 1996.
- [13] DESNERCK, P.; DE SCHUTTER, G.; TAERWE, L.. Bond behaviour of reinforcing bars in self-compacting concrete: experimental determination by using beam tests. *Materials and Structures*, V. 43, Supplement 1, p. 53-62, 2010.
- [14] EZELDIN, A. S.; BALAGURU, P. N.. Bond behavior of normal and high-strength fiber reinforced concrete. *ACI Materials Journal*, V. 86, n. 5, p. 515-524, 1989.
- [15] BENTUR, A.; MINDESS, S. Fibre reinforced cementitious composites. Elsevier Applied Science, London, 1990.
- [16] HARAJLI, M. H.; SHALLOUKH, K. A. Effects of fibers on developments / splice strength of reinforcing bars in tension. *ACI Materials Journal*, v.94, n.4, p.317-324, 1997.
- [17] HARAJLI, M. H.; HAMAD, B.; KARAM, K. Bond-slip response of reinforcing bars embedded in plain and fiber concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.14, n.6, p.503-511, 2002.
- [18] HARAJLI, M. H.; GHARZEDDINE, O. Effect of steel fibers on bond performance of steel bars in NSC and

- HSC under load reversals. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v.19, n.10, p.864-873, 2007.
- [19] DANCYGIER, A. N.; KATZ, A. The Combined Effect of Concrete Strength and Geometric parameters on Concrete-Reinforcement Bond. In: 8th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH-STRENGTH AND HIGH-PERFORMANCE CONCRETE. S1-1-3, Tokyo, Japan, p.357-362, 2008.
- [20] CEB – COMITÉ EURO-INTERNATIONAL DU BETÓN. CEB-FIP MODEL CODE 1990. Design Code, Thomas Telford, London, 1998.
- [21] HARAJLI, M. H.; HOUT, M. A.; JALKH, W. Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. *ACI Materials Journal*, v.92, n.4, p.343-353, 1995.
- [22] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 67: Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone, Rio de Janeiro, 1998.
- [23] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 47: Concreto – Determinação do teor de ar em concreto fresco – Método pressométrico, Rio de Janeiro, 2002.
- [24] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 9833: Concreto fresco - Determinação da Density, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico, Rio de Janeiro, 2008.
- [25] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15823-2: Concreto auto-adensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams, Rio de Janeiro, 2010.
- [26] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 6892: Materiais metálicos - Ensaio de tração à temperatura ambiente, Rio de Janeiro, 2002.
- [27] AL-TAMIMI, A. Fibre-reinforced connections in precast concrete flat slabs. Thesis (Doctor of Philosophy). School of Civil Engineering, University of Nottingham, Nottingham, UK, 2001.
- [28] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2007.
- [29] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, Rio de Janeiro, 2008.
- [30] FURNAS CENTRAIS ELÉTRICAS S. A., N° 01.008.001: Determinação do Módulo de Elasticidade e Coeficiente de Poisson, Aparecida de Goiânia, 2003, 9 p.
- [31] ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7222: Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos, Rio de Janeiro, 2010.
- [32] RILEM TC-50 FMC. Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams. *Materials and Structures*, v.18, n.106, p. 285-290, 1985.
- [33] BALAGURU, P. N.; SHAH, S. P. Fiber reinforced cement composites. McGraw-Hill, International Editions, New York, 1992, 530p.
- [34] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6118: Projeto de Estruturas de Concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2007.
- [35] COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. Eurocode 2: Design of concrete structures. European Prestandard, Brussels, Belgium, 2004.
- [36] AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. ACI 318M-08: Building Code Requirements for Structural Concrete. Farmington Hills, 2008.
- [37] DANIN, A.R.. Estudo da aderência entre concreto e armadura: Análise da influência das fibras de aço. 277 f. 2010. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Geotecnia e Construção Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- [38] TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N.. Theory of Elasticity. 3<sup>rd</sup> Edition. McGraw-Hill, 1970.
- [39] TNO Building and Construction Research. DIANA User's Manual: Release 9.3. Delft, Netherlands, 2008.
- [40] ARAÚJO, D. L. Cisalhamento entre viga e laje pré-moldadas ligadas mediante nichos preenchidos com concreto de alto desempenho. 2002. 250f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.