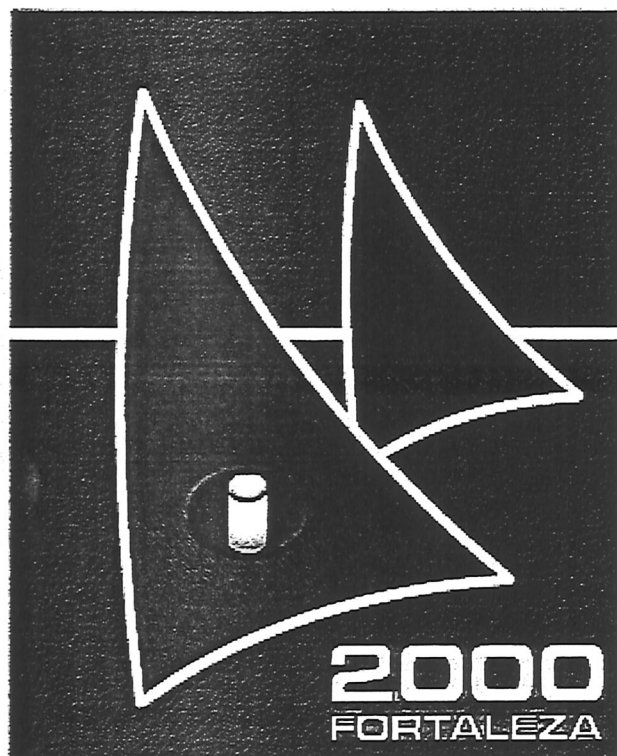


42º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO



13 A 18 DE AGOSTO
Centro de Convenções
do Ceará

Realização:



IBRACON

INSTITUTO BRASILEIRO DO CONCRETO

Av. Prof. Almeida Prado, 532 - casa 44

cep: 05508-901 - São Paulo - SP

Telefax: (11) 3714-2149

(11) 3765-0099

Site: <http://www.ibracon.org.br>

e-mail: office@ibracon.org.br

Produzido por Arto Informatica
www.artoinformatica.com.br

INFLUÊNCIA DA BRITA 2 EM CONCRETOS COM FIBRAS DE AÇO

Paulo Sérgio dos Santos Bastos⁽¹⁾

B 327 i

Libânio Miranda Pinheiro⁽²⁾

(1) Prof. Dr., Dep. Eng. Civil, UNESP - Bauru/SP. pbastos@bauru.unesp.br

(2) Prof. Dr., Dep. Eng. de Estruturas, EESC - USP - São Carlos/SP. libanio@sc.usp.br

RESUMO

Esta pesquisa foi desenvolvida para avaliar a influência da brita 2 nos compósitos com fibras de aço, para potencial aplicação em dormentes ferroviários de concreto protendido. A dois diferentes concretos, um com brita 1 e outro com respectivamente 50 % de britas 1 e 2, foram incorporadas fibras de aço nos teores de 40 e 60 kg/m³. Foram avaliadas a tenacidade e as propriedades dos concretos e dos compósitos, nos estados fresco e endurecido. As misturas com britas 1 e 2 apresentaram maior mobilidade. As fibras diminuíram bastante o abatimento medido no tronco de cone. O ensaio com o tronco de cone invertido mostrou ser simples e adequado para a medida da consistência dos compósitos. Os compósitos com brita 1 apresentaram valores significativamente maiores para a resistência de primeira fissura e módulo de ruptura. Com fibras no teor de 60 kg/m³, o módulo de ruptura superou a resistência de primeira fissura em 30 %, mostrando ótimo desempenho à flexão. Os índices de tenacidade relativos aos dois compósitos resultaram próximos, com leve vantagem para o compósito com brita 1.

1. INTRODUÇÃO

Uma importante aplicação dos compósitos está nos elementos pré-fabricados. Ao controlar a fissuração e intensificar as resistências mecânicas, as fibras melhoram a durabilidade dos elementos. Para um elemento que trabalha exposto às intempéries, como os dormentes ferroviários, isto é primordial.

Os resultados aqui apresentados fazem parte de um estudo mais amplo (BASTOS - 1999), feito com o propósito de escolher um compósito, com ou sem brita 2, com maior resistência à flexão e maior absorção de energia (tenacidade). Este compósito seria aplicado

1107025
071200

SYSNO	1107025
PROD	000714
ACERVO EESC	

em dormentes ferroviários. Os dormentes de concreto são elementos pré-fabricados e, na via ferroviária, são submetidos à fadiga e a altíssimas forças de impacto. Como as fibras de aço melhoram significativamente a resistência dos concretos à fadiga e ao impacto, as fibras foram aplicadas nos dormentes a fim de melhorar o seu comportamento estrutural.

2. OBJETIVOS

Os objetivos da pesquisa foram os seguintes: a) determinar o traço de dois diferentes concretos, um com brita 1 e outro com britas 1 e 2 combinadas, para uma resistência de dosagem à compressão aos 28 dias de 55 MPa; b) determinar a influência da brita 2 sobre as propriedades no estado fresco e endurecido dos concretos e dos compósitos com fibras de aço, nos teores de 40 e 60 kg/m³ (0,5 e 0,75 % por volume); c) investigar o comportamento estático à flexão, incluindo resistência de primeira fissura, módulo de ruptura e tenacidade; e) comparar as medidas da tenacidade conforme os critérios sugeridos pela ASTM C 1018 (1994), JSCE - SF 4 (1984) e uma nova proposição de BANTHIA & TROTTIER (1995).

3. COMPATIBILIDADE ENTRE O AGREGADO GRAÚDO E AS FIBRAS

FIGUEIREDO (1997) recomenda que o comprimento da fibra seja superior a duas vezes a dimensão máxima do agregado graúdo. Isso possibilita a atuação da fibra como reforço do concreto e não apenas como reforço da argamassa. Como as fissuras surgem preferencialmente nas proximidades da interface do agregado graúdo com a pasta, a fibra deve ter comprimento suficiente para atuar como ponte de transferência de tensões nas fissuras, ou seja, deve “costurar” as fissuras (ver fig. 1 e 2).

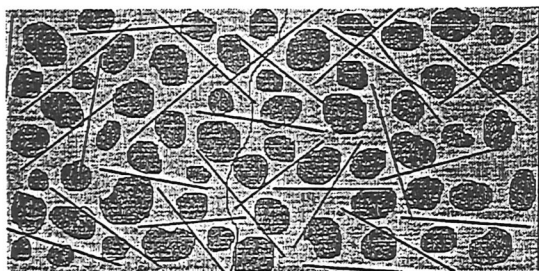


Fig. 1 - Concreto com compatibilidade entre fibras e agregados graúdos (FONTE: FIGUEIREDO - 1997).

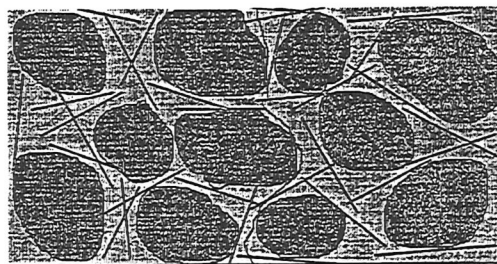


Fig. 2 - Concreto sem compatibilidade entre fibras e agregados graúdos (FONTE: FIGUEIREDO - 1997).

4. TENACIDADE E RESISTÊNCIA À TRAÇÃO NA FLEXÃO

Os dois métodos de ensaio mais utilizados para a determinação da tenacidade e da resistência à tração na flexão estão nas normas ASTM C 1018 (1994) e JSCE - SF 4 (1984). Por serem as duas normas já bem conhecidas, os seus respectivos critérios para avaliação da tenacidade não serão aqui apresentados.

BANTHIA & TROTTIER (1995) propuseram um novo critério para a medida da tenacidade, objetivando eliminar possíveis erros de julgamento humano quanto ao correto instante do aparecimento da primeira fissura. Segundo este critério, a curva força x deslocamento (fig. 3) deve ser subdividida em duas regiões: a região pré-pico (área da curva até a força máxima alcançada) e região pós-pico (área da força máxima até um deslocamento correspondente a uma fração (m) do vão L). Obtidas as áreas (energias) pré e pós-pico, determinam-se as resistências pós-fissura (*post-crack strengths* - PCS_m) nos vários deslocamentos. O valor de PCS para um determinado deslocamento L/m é definido como:

$$PCS_m = \frac{(E_{pos,m})L}{\left(\frac{L}{m} - \delta_{pico}\right)bh^2}$$

onde: PCS_m = resistência pós fissuração correspondente à fração m do vão L (N/mm²);

$E_{pos,m}$ = energia pós-pico (N.mm ou J);

L = vão da viga durante o ensaio (mm);

m = fração do vão L ;

δ_{pico} = deslocamento correspondente à força máxima (mm);

b, h = largura e altura da viga prismática (mm).

O deslocamento é indicado estar entre $L/3000$ e $L/150$. Os valores indicados para m são: 3.000, 1.500, 1.000, 750, 600, 400, 300, 200 e 150. A vantagem deste critério sobre os índices da ASTM é que a energia $E_{pos,m}$ é obtida subtraindo E_{pre} da energia total ($E_{total,m}$), ao invés da divisão pela energia até a primeira fissura. Isto elimina erros de julgamento humano da primeira fissura. O valor m pode ser escolhido em função da aplicação ou pode coincidir com o valor de 150 da JSCE.

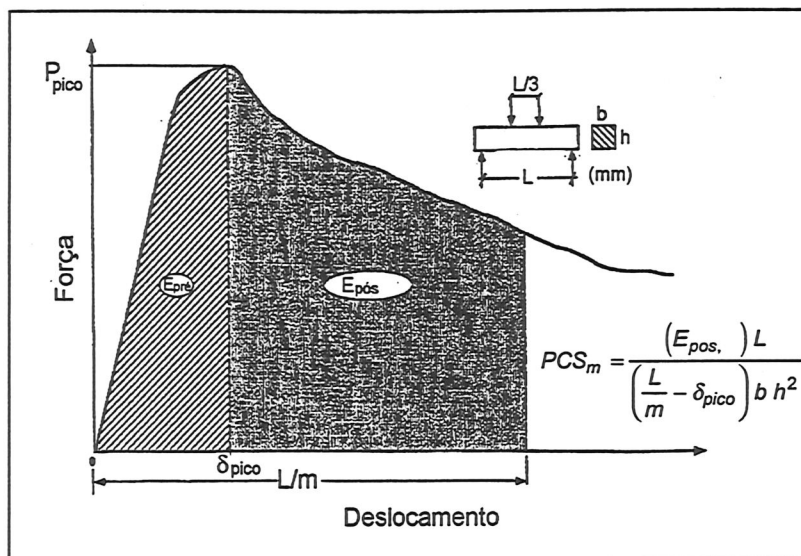


Fig. 3 - Critério proposto por BANTHIA & TROTTIER (1995).

5. MATERIAIS

Foi utilizado um cimento de alta resistência inicial e um aditivo superplastificante. As características físicas dos agregados empregados encontram-se na Tabela 1. A fibra de aço, com ganchos nas extremidades, tinha comprimento de 60 mm e diâmetro de 0,75 mm (fator de forma 80).

Tabela 1 - Características físicas dos agregados.

Característica	Norma	AREIA	BRITA	BRITA 2
Massa Unitária Solta (kg/dm ³)	NBR 7251/82	1,45	1,48	1,47
Massa Unitária Compactada (kg/dm ³)	NBR 7810/83	1,64	1,65	1,67
Massa Específica (kg/dm ³)	NBR 9776/87	2,60	2,88	2,92
Dimensão Máxima (mm)	NBR 7217/87	2,4	19,0	25,0
Módulo de Finura	NBR 7217/87	2,21	6,63	7,37

6. DEFINIÇÃO DO TRAÇO DOS CONCRETOS

Dois concretos, um com brita 1 e outro com britas 1 e 2 combinadas (50 % para cada), tiveram seus traços definidos segundo o método de dosagem descrito em HELENE & TERZIAN (1995). Os concretos deveriam apresentar as seguintes características: abatimento próximo de 60 mm, resistência média de dosagem à compressão aos 28 dias igual a 55 MPa e

um teor de argamassa um pouco acima daquele considerado ideal, além do fator água/cimento menor ou igual a 0,45.

Para os concretos sem brita 2 e com britas 1 e 2, os teores de argamassa de 55 e 51 % foram considerados os teores ideais, respectivamente. No entanto, a fim de propiciar uma melhor trabalhabilidade quando ao concreto fossem acrescentadas as fibras de aço, preferiu-se adotar um teor um pouco acima (59 e 55 %, respectivamente).

As figuras 4 e 5 mostram o diagrama de dosagem para os dois diferentes concretos, onde m representa a soma dos agregados graúdos e miúdos, para uma unidade de cimento. C representa o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. A quantidade adotada para o aditivo superplastificante foi de 0,6 % da massa de cimento. Do estudo realizado, para uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 50 MPa, definiram-se os traços em massa, indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - Traços dos concretos e consumo de materiais (kg) por metro cúbico de concreto.

Concreto com brita 1 sem brita 2		Concreto com britas 1 e 2
1:1,66:1,84:0,40:0,6 % SP		1:1,48:1,01:1,01:0,40:0,6 % SP
cimento	500,0	502,9
areia	830,0	744,3
brita 1	920,0	507,9
brita 2	-	507,9
água	197,2	198,4
aditivo	3,48	3,50

7. CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO FRESCO

Nenhum problema foi observado na mistura dos compósitos, os quais se apresentaram bem homogêneos. A relação a/c dos compósitos foi mantida igual à dos concretos de controle, a/c 0,40. Porém, a fim de manter a trabalhabilidade, a quantidade de aditivo superplastificante foi aumentada de 0,6 % nos concretos de controle para 1,5 % nos compósitos.

Nas tabelas e comentários seguintes, C1-0 indica o concreto de controle com brita 1 e C1-40 e C1-60 indicam os compósitos com brita 1 e os teores de fibra de 40 e 60 kg/m³, respectivamente. Do mesmo modo, as notações C12 indicam as misturas com britas 1 e 2. A Tabela 3 mostra os resultados da consistência dos concretos e dos compósitos.

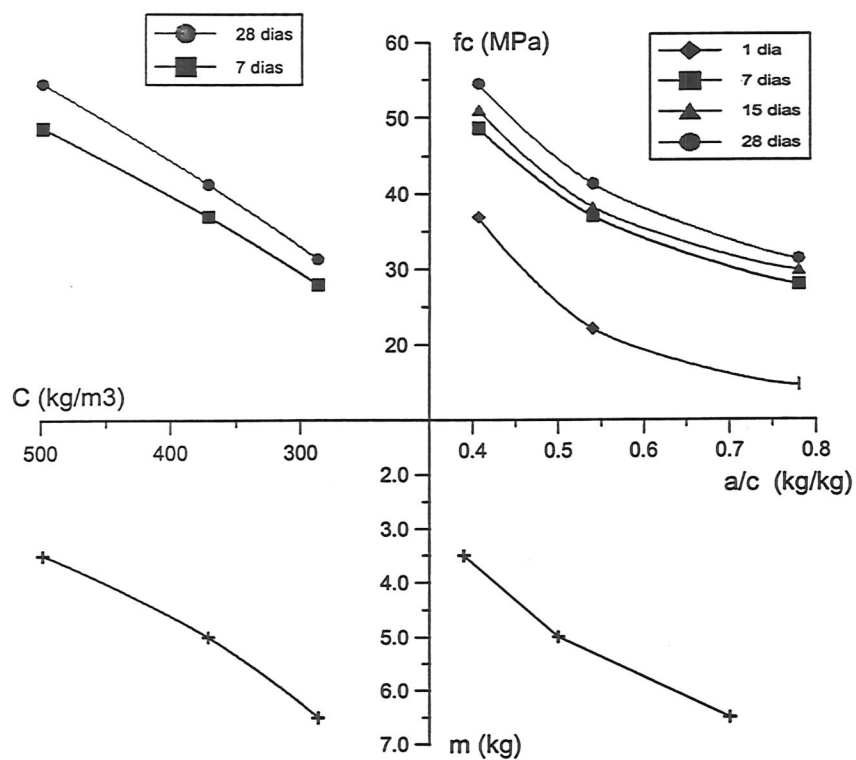


Fig. 4 - Diagrama de dosagem do concreto com brita 1 sem brita 2.

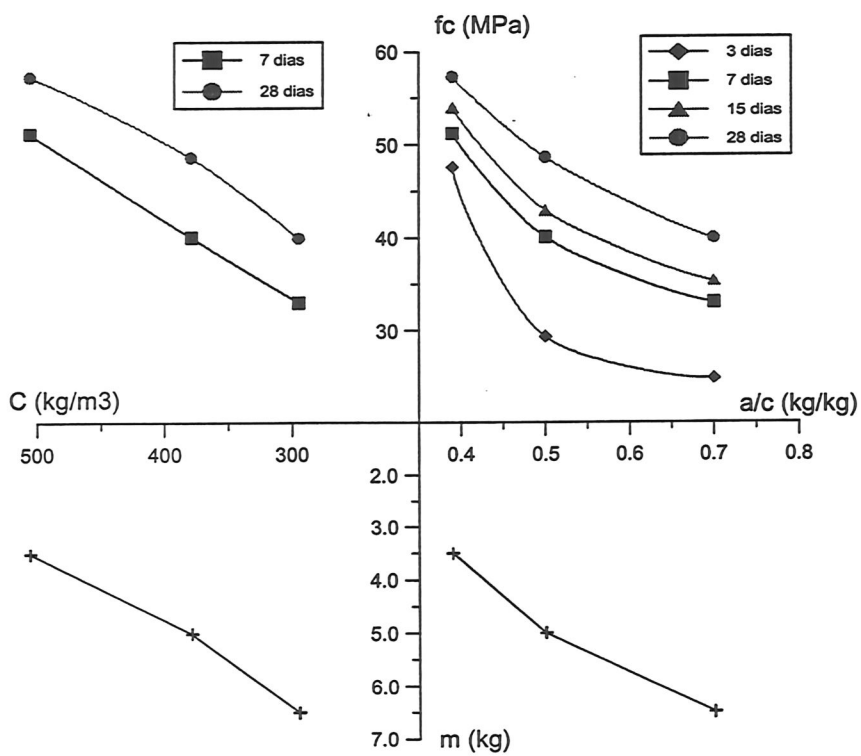


Fig. 5 - Diagrama de dosagem do concreto com britas 1 e 2.

Tabela 3 - Medidas da consistência dos concretos e dos compósitos.

Mistura	Quantidade de aditivo (%)	Abatimento (mm)		Tempo do tronco de cone invertido* (seg)
		sem fibras	com fibras	
C 1-0	0,6	60	-	20
C 1-40	1,5	150	75	30
C 1-60	1,5	140	35	35
C12-0	0,6	85	-	13
C12-40	1,5	175	105	17
C12-60	1,5	160	90	28

* Altura de queda do concreto igual a 75 mm (altura da base do cone ao piso).

As fibras de aço diminuíram muito o abatimento, o que foi corrigido com o aditivo superplastificante. Porém, todos os compósitos apresentaram homogeneidade e boa aparência visual. Os compósitos com britas 1 e 2 (C12-40 e C12-60) apresentaram maior mobilidade em relação aos compósitos com brita 1 sem brita 2 (C1-40 e C1-60). O tempo de fluxo no tronco de cone invertido do compósito C1-60 (35 seg) superou o tempo máximo de 30 seg, recomendado pelo ACI 544 - 2R (1989); porém, o compósito apresentou ótimas características de trabalhabilidade.

8. CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO ENDURECIDO

Para cada uma das seis misturas foram moldados dez corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 15 x 30 cm e quatro vigas prismáticas com dimensões 15 x 15 x 50 cm. Os corpos-de-prova cilíndricos foram moldados em dois níveis e compactados em mesa vibratória. As vigas prismáticas foram moldadas conforme as recomendações da norma JSCE - SF 2 (1984), em um nível apenas, e adensadas em mesa vibratória por um minuto e vinte segundos.

8.1 Resistências Mecânicas

A Tabela 4 mostra as resistências médias à compressão e à tração por compressão diametral e o módulo de ruptura, alcançadas pelos concretos e pelos compósitos. O ganho de resistência à compressão proporcionado pelas fibras foi pequeno e não significativo.

Considerando a média das seis misturas, as resistências aos 3 e 7 dias em relação aos 28 dias foram de 74 e 83 %, respectivamente.

Tabela 4 - Resistências mecânicas dos compósitos.

Mistura	Resistência à compressão (MPa)			Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)
	3 dias	7 dias	28 dias		
C1-0	45,29	47,50	58,61	4,33	7,24
C1-40	46,08	51,45	58,96	4,23	7,31
C1-60	46,28	53,50	60,06	5,55	9,41
C12-0	39,84	43,82	57,37	3,93	5,87
C12-40	45,25	51,05	62,98	4,99	6,34
C12-60	43,20	49,77	59,91	5,26	7,60

Os resultados obtidos para a resistência à tração por compressão diametral não mostraram influência da brita 2. BACCIN (1998) concluiu que a equação do ACI C.363, $0,53\sqrt{f'_c}$, fornece bons resultados para a estimativa da resistência à tração por compressão diametral dos concretos. A equação fornece os valores de 4,09 e 4,01 MPa, para os concretos de controle C1-0 e C12-0, respectivamente. Esses resultados são muito próximos aos valores medidos.

No caso da resistência máxima à tração na flexão (módulo de ruptura), os compósitos com brita 1 mostraram ser significativamente melhores que compósitos com britas 1 e 2. O compósito C1-60 por exemplo, com módulo de ruptura de 9,41 MPa, foi 24 % superior ao compósito C12-60. BACCIN (1998) recomenda a equação $0,94\sqrt{f'_c}$ de Carrasquillo para a estimativa do módulo de ruptura dos concretos. A equação fornece os valores de 7,20 e 7,12 MPa, para o módulo dos concretos C1-0 e C12-0, respectivamente. O resultado é excelente para o concreto com brita 1 (C1-0), porém, é ruim para o concreto com britas 1 e 2 (C12-0).

BACCIN (1998) cita que o ACI C.363 recomenda a equação $11,7\sqrt{f'_c}$ (para f'_c em psi) ou $0,97\sqrt{f'_c}$ (para f'_c em MPa) para a estimativa do módulo de ruptura de concretos com f'_c de 21 a 83 MPa. A equação fornece bons resultados apenas para as misturas C1-0 (7,43 MPa), C1-40 (7,45 MPa) e C12-60 (7,50 MPa). Para levar em conta o acréscimo de resistência

proporcionado pelas fibras, no caso do compósito C1-60, a equação teria que ser $1,23\sqrt{f'_c}$ (em MPa) ou $14,8\sqrt{f'_c}$ (em psi).

8.2 Tenacidade

Os ensaios de flexão nas vigas prismáticas, num total de 24, foram executados segundo a metodologia da JSCE – SF 4 (1984). A Tabela 5 apresenta os resultados (média de quatro corpos-de-prova) obtidos para: a resistência à tração na flexão na primeira fissura (f_0), a máxima resistência à tração na flexão ou módulo de ruptura (f_u), a resistência equivalente à tração na flexão ($f_{ct,eq}$), correspondente ao deslocamento de 3 mm para o vão L de 450 mm, e o fator R_{e3} . A tabela também mostra os índices de tenacidade (I) e fatores de resistência residuais (R), conforme definidos pela ASTM C 1018. O fator R_{e3} é definido pela razão $f_{ct,eq} / f_0$. Um fator igual a 100 representa o material elastoplástico perfeito no deslocamento de 3 mm.

Tabela 5 - Resistência à tração na flexão e índices de tenacidade segundo a ASTM C 1018.

Mistura	f_0 (MPa)	f_u (MPa)	$f_{ct,eq}$ (MPa)	R_{e3} (%)	Índices de Tenacidade					Fatores de Resistência Residual			
					I_5	I_{10}	I_{20}	I_{30}	I_{60}	$R_{5,10}$	$R_{10,20}$	$R_{20,30}$	$R_{30,60}$
C1-0	7,24	7,24	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C1-40	7,25	7,31	5,82	80,4	5,6	7,7	14,5	22,0	45,0	41,0	68,5	75,1	76,4
C1-60	7,99	9,41	8,25	103,7	4,4	8,8	18,0	28,0	57,7	88,2	92,4	100,2	98,7
C12-0	5,87	5,87	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
C12-40	6,34	6,34	4,64	72,9	4,3	8,2	14,8	21,9	42,7	78,4	65,2	71,2	69,3
C12-60	6,06	7,60	5,65	94,8	4,3	8,8	18,8	27,7	53,6	89,8	99,3	89,9	86,1

As fig. 6 a 9 mostram duas curvas força x deslocamento para cada um dos compósitos. Os diagramas mostram a posição e o valor dos vários índices de tenacidade, determinados segundo a ASTM C 1018.

A análise dos valores da Tabela 5 permite concluir que, quanto maior o conteúdo de fibras, maiores foram as resistências e a tenacidade dos compósitos. Os compósitos com brita 1, sem brita 2, apresentaram resistência e tenacidade maiores que os compósitos com britas 1 e 2. As fibras no teor de 40 kg/m³ não foram capazes de aumentar a resistência dos compósitos

além da resistência de primeira fissura. No teor de 60 kg/m³, entretanto, houve um aumento expressivo, de 18 % no compósito com brita 1 (C1-60) e 25 % no compósito com britas 1 e 2 (C12-60).

O fator R_{e3} mostra a superioridade dos compósitos com brita 1 sobre os compósitos com britas 1 e 2, destacando-se o compósito C1-60 com o fator 103,7 %, o qual indica um comportamento levemente superior ao elastoplástico perfeito. Levando-se em conta o volume relativamente baixo de fibras, este resultado é excelente, e mostra a eficiência da fibra utilizada. Os valores médios de 57,7 para o índice I_{60} , 100,2 para o fator $R_{20,30}$ e 98,7 para $R_{30,60}$ comprovam também a excelente tenacidade do compósito C1-60, e mais uma vez indicam seu comportamento muito próximo ao elastoplástico perfeito.

Em consequência da forma como os índices de tenacidade da ASTM C 1018 foram definidos, a correta avaliação da energia pré-primeira fissura é extremamente importante. Como a energia até a primeira fissura está no denominador da equação que define o valor para os índices de tenacidade, qualquer pequena diferença na definição do ponto de primeira fissura acarreta uma enorme diferença nos índices de tenacidade calculados. Por exemplo, no compósito C1-60, cp 2 (fig. 7), os índices I_{20} , I_{30} e I_{60} não se mostraram coerentes, o mesmo ocorrendo com o I_{10} , I_{20} , I_{30} e I_{60} do compósito C12-60, cp 1 (fig. 9).

Os índices de tenacidade I_5 e I_{10} não permitem uma análise muito precisa da tenacidade dos compósitos, pois registram uma forte influência da zona de instabilidade pós-pico de força. E segundo BANTHIA & TROTTIER (1995), em um ensaio a extensão da instabilidade não depende somente do volume e da geometria das fibras, mas também da resistência da matriz. Para matrizes de alta resistência, mesmo o índice I_{20} pode ser afetado pela zona instável. Neste caso, os índices I_{30} e I_{60} passam a ser muito importantes na determinação da tenacidade dos compósitos.

Apesar dos problemas descritos anteriormente, nesta pesquisa, os índices de tenacidade I_{20} , I_{30} e I_{60} e os fatores de resistência residuais $R_{20,30}$ e $R_{30,60}$ provaram ser bons indicadores da tenacidade dos compósitos. Tal observação pode ser comprovada com a análise dos índices de tenacidade apresentados nos diagramas das fig. 6 a 9. Porém, deve-se salientar que os índices de tenacidade apresentam uma deficiência importante, isto é, como eles são adimensionais, não há uma relação íntima com a resistência dos compósitos. Os fatores PCS_m , ao contrário, não apresentam esta restrição, como se verá a seguir.

A Tabela 6 apresenta os resultados (média de quatro corpos-de-prova) obtidos para o deslocamento correspondente à força máxima (δ_{pico}), o módulo de ruptura (f_u) e os valores da

resistência pós-fissuração (*PCS*). Os vários fatores *PCS* encontram-se indicados nas fig. 6 a 9, em suas respectivas posições.

Tabela 6 - Resistência pós-fissuração (PCS) conforme BANTHIA & TROTTIER (1995).

Mis- tura	δ_{pico} (mm)	f_u (MPa)	RESISTÊNCIA PÓS-FISSURAÇÃO (MPa)								
			<i>PCS</i> ₃₀₀₀	<i>PCS</i> ₁₅₀₀	<i>PCS</i> ₁₀₀₀	<i>PCS</i> ₇₅₀	<i>PCS</i> ₆₀₀	<i>PCS</i> ₄₀₀	<i>PCS</i> ₃₀₀	<i>PCS</i> ₂₀₀	<i>PCS</i> ₁₅₀
C1-40	0,068	7,31	6,94	6,32	5,92	5,85	5,87	5,99	6,09	6,08	5,93
C1-60	0,070	9,41	8,10	7,83	8,07	8,20	8,36	8,66	8,66	8,55	8,43
C12-40	0,069	6,34	6,05	5,49	5,18	5,12	5,10	5,08	5,07	4,92	4,72
C12-60	0,078	7,60	6,22	6,43	6,72	6,77	6,76	6,70	6,58	6,21	5,87

Os diferentes fatores *PCS* também são afetados pela instabilidade pós-pico, embora uns mais e outros menos. A principal vantagem dos fatores *PCS* sobre os índices de tenacidade está na pequena importância da correta definição do ponto de primeira fissura, o que retira a subjetividade do problema e diminui os erros significativamente. Outra vantagem é que os fatores *PCS* indicam a resistência (em um determinado deslocamento) do compósito e, assim, podem ser comparados com o módulo de ruptura ou com a resistência de primeira fissura. Isso os torna mais úteis ao projeto das estruturas do que os índices de tenacidade.

Assim como já indicado pelos índices de tenacidade e fatores de resistência residuais, com a análise dos valores contidos na Tabela 6, observa-se que os fatores *PCS* também indicaram o excelente comportamento elastoplástico perfeito do compósito C1-60. A resistência correspondente aos 3 mm de deslocamento (*PCS*₁₅₀ de 8,43 MPa) por exemplo, foi apenas 10 % inferior ao módulo de ruptura (f_u de 9,41 MPa).

Todos os fatores *PCS*₁₅₀ exibiram íntima aproximação com a resistência equivalente ($f_{ct, eq}$ - Tabela 5) determinada pela norma JSCE - SF 4. Como se pode ver nas fig. 6 a 9, os vários fatores *PCS* mostraram ser bons indicadores da tenacidade dos compósitos.

9. CONCLUSÕES

Com base nos estudos realizados, as seguintes conclusões podem ser apresentadas:

a) A trabalhabilidade de compósitos com fibras de aço longas, como as utilizadas nesta pesquisa, pode ser obtida com a aplicação de aditivos superplastificantes. Com 1,5 % de

superplastificante, todos os compósitos estudados apresentaram boas características visuais e de boa trabalhabilidade;

b) Os compósitos com britas 1 e 2 mostraram maior abatimento e maior mobilidade no ensaio do tronco de cone invertido. Não houve qualquer dificuldade na preparação dos corpos-de-prova com todos os compósitos;

c) O compósito C1-60, apesar de apresentar abatimento de apenas 35 mm e o tempo no tronco de cone invertido ter superado os 30 seg indicados pelo ACI 544.2R, mostrou boa trabalhabilidade sob vibração, não apresentando qualquer problema na moldagem dos corpos-de-prova;

d) Comparados com os concretos de controle, os compósitos com fibras de aço têm maior resistência à primeira fissura, maior módulo de ruptura e significativo ganho de tenacidade. Quanto maior o conteúdo de fibras, melhores foram os resultados;

e) Os compósitos com britas 1 e 2 tiveram desempenho, no que se refere às resistências e à tenacidade, inferior aos compósitos com brita 1, sem brita 2. O compósito com brita 1 e fibra de aço no teor de 60 kg/m^3 apresentou excelentes ganhos de tenacidade e de resistência, com fator R_{e3} de 104 % e aumento de 30 % no módulo de ruptura, em relação ao módulo do concreto de controle;

f) Devido aos problemas de instabilidade pós-pico, para melhor caracterizar a tenacidade dos compósitos, principalmente aqueles com matrizes de média e alta resistência, é necessário determinar também os índices I_{30} e I_{60} . Os fatores R_{e3} , I_{30} , I_{60} , $R_{20,30}$ e $R_{30,60}$ mostraram-se bons indicadores da tenacidade e do comportamento plástico dos compósitos;

g) Por serem pouco influenciados pela energia pré primeira fissura, os fatores PCS indicam a tenacidade dos compósitos com maior exatidão do que os índices de tenacidade da ASTM C 1018.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo), pelo auxílio financeiro à pesquisa (Processo nº 1997/10186-0), à CAPES (Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior), pela concessão de bolsa PICD a Paulo S.S. Bastos, e às empresas Belgo Mineira Bekaert Arames Finos Ltda., Reax Indústria e Comércio Ltda. e Cimin S.A., pelo fornecimento gratuito de materiais.

Agradecimentos também à empresa Alphageos – Geologia, Geotecnia e Comércio Ltda., pela execução dos ensaios de flexão com deformação controlada.

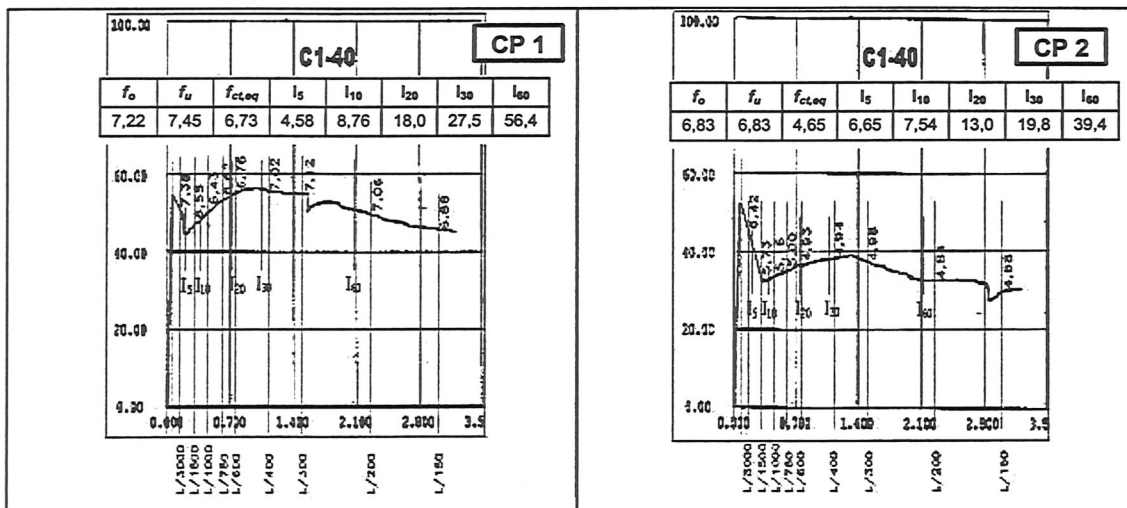


Fig. 6 - Diagrama Força (eixo y - kN) x Deslocamento (eixo x - mm) do compósito C1-40, com os fatores PCS_m e os índices de tenacidade I.

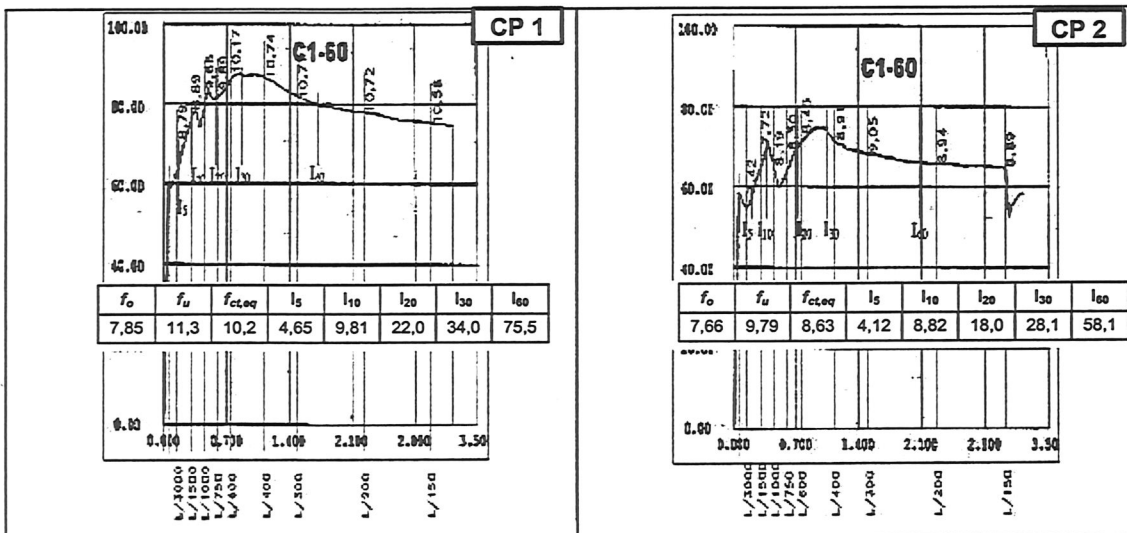
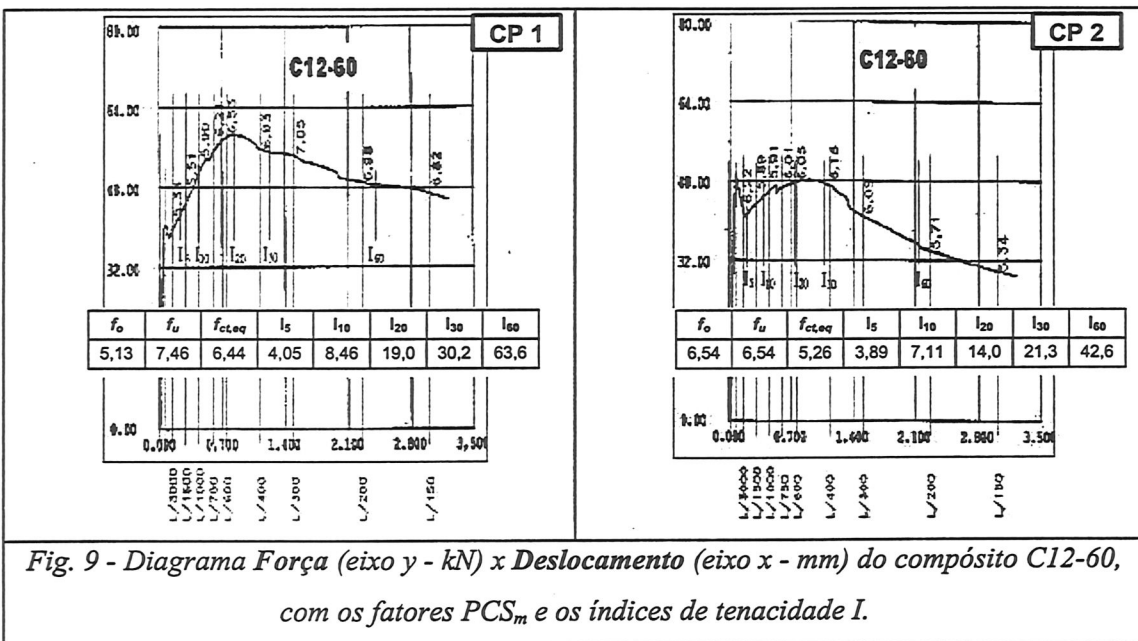
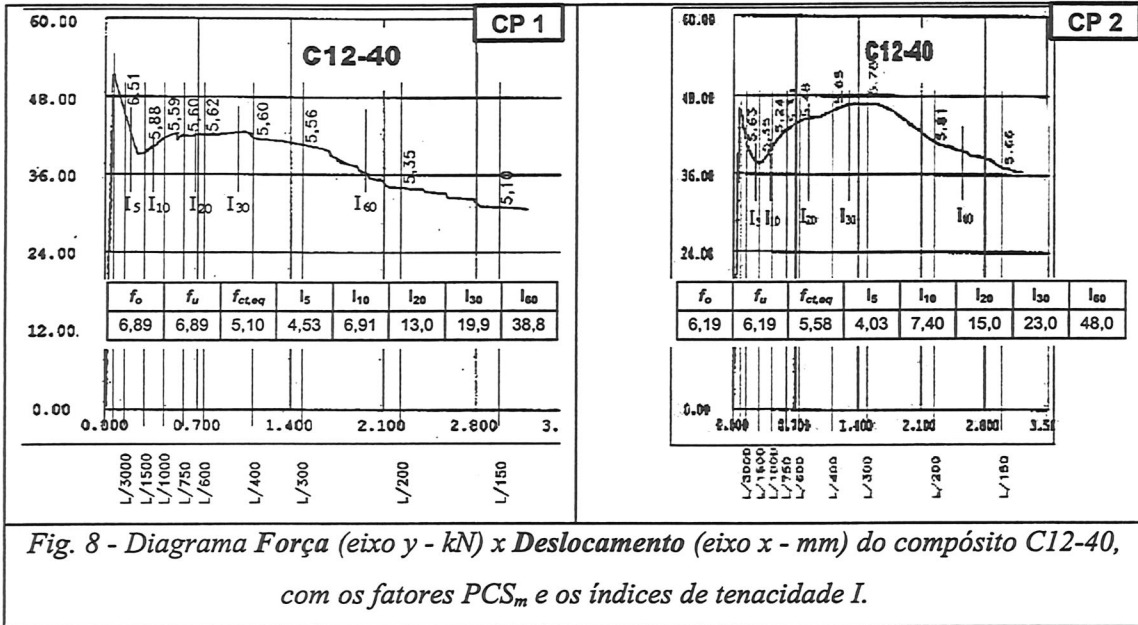


Fig. 7 - Diagrama Força (eixo y - kN) x Deslocamento (eixo x - mm) do compósito C1-60, com os fatores PCS_m e os índices de tenacidade I.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (1989). Committee 544. *Measurement of Properties of Fiber Reinforced Concrete* (ACI 544.2R-89). Detroit. 11p.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (1994). *Standard test method for flexural toughness and first crack strength of fiber reinforced concrete*. ASTM C 1018. Book of ASTM Standards, Part 04.02, Philadelphia, 8p.
- BACCIN, A.G.C. (1998). *Fundamentos do concreto de alto desempenho e sua aplicação no projeto de pilares*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- BANTHIA, N. ; TROTTIER, J. F. (1995). *Test methodes for flexural toughness characterization of fiber reinforced concrete: some concerns and a proposition*. ACI Materials Journal, v.92, nº 1, Detroit, USA, Jan/Feb, p.48-57.
- BASTOS, P.S.S. (1999). *Análise experimental de dormentes de concreto protendido reforçados com fibras de aço*. São Carlos, 256p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- FIGUEIREDO, A. D. (1997). *Parâmetros de controle e dosagem do concreto projetado com fibras de aço*. São Paulo, 342p. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- HELENE, P. ; TERZIAN, P. (1995). *Manual de dosagem e controle do concreto*. São Paulo, ed. Pini, 349p.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1984). *Method of making specimens for strength and flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*. JSCE - SF 2. Concrete Library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, nº 3, June, p.49-55.
- JAPAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (1984). *Method of tests for flexural toughness of steel fiber reinforced concrete*. JSCE - SF 4. Concrete Library of JSCE, Part III-2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete, nº 3, June, p.58-61.