

ANÁLISE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE VIGAS DE MATERIAIS COMPÓSITOS

¹Andressa Baena da Cruz ; ² Cássia Silveira de Assis

¹Aluna de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUNIMT);

² Professora Doutora da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. O uso de fibras no concreto para a melhoria de algumas de suas propriedades, como seu desempenho pós-fissuração e diminuição da retração plástica (fibras de polipropileno) e no reforço estrutural de pavimentos industriais (fibras de aço), por exemplo, é de muito interesse. Mas no Brasil este tema ainda não é suficientemente difundido. No trabalho foi determinado o traço para um concreto de referência, e nele foram adicionadas fibras de aço e de polipropileno, separadamente, dispersas na pasta. O desempenho de cada traço foi analisado por meio de ensaios de resistência à compressão e de módulo de elasticidade além do cálculo das deformações máximas de um modelo de viga bi apoiada.

1. Introdução

O concreto reforçado com fibras (CRF) é um material compósito constituído pela matriz cimentícia, que tem função aglomerante, e pelas fibras, responsáveis pelo reforço do concreto. Isso é possível pois as fibras garantem que o concreto, um material frágil se comporte como um material pseudo-dúctil devido a transferência de tensões (TOJAL, 2011). Portanto, a aderência entre as fibras e a matriz é essencial. E, essa pseudo-ductilidade e aderência foram avaliadas experimentalmente nessa pesquisa.

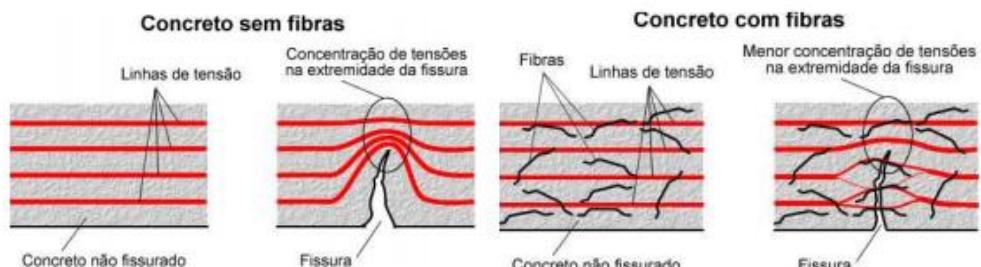


Figura 1: Observa-se a transferência de tensões através de uma fissura proporcionada pelas fibras. (Fonte: TOJAL, 2011)

A incorporação das fibras no concreto influencia nas seguintes propriedades: tenacidade, controle da fissuração, resistência ao impacto e a fadiga, trabalhabilidade e durabilidade, dependendo do tipo de fibra. As grandezas seguintes, relativas a fibra, são diretamente proporcionais: fator de forma, reforço pós-fissuração, capacidade resistente, dificuldade de trabalhabilidade da fibra na pasta e resistência mecânica. Por essas inúmeras vantagens e aplicações da incorporação de fibras no concreto é que mais estudos devem ser feitos em relação a isso afim de proporcionar maior interesse das empresas do ramo da construção e também, afim de impulsionar a elaboração de normas em relação ao uso de fibras no concreto, o que é muito escasso ainda em nosso país.

Existem vários tipos de fibras utilizadas no CRF, são elas: fibras de carbono (para reforço estrutural), de aço (utilizada em pavimentos industriais, reforço estrutural, concreto projetado e pré-moldado (FIGUEIREDO, 2011)), de polipropileno (utilizada em estruturas resistentes ao fogo, como túneis, por exemplo, e em pavimentos industriais), de vidro (utilizada para estabilização de solos e reforço de paredes em áreas sujeitas a abalos sísmicos), ópticas (para concreto translúcido), sintéticas, entre outras. Vale observar que as fibras de aço e de

polipropileno proporcionam significativa transferência de tensões na matriz cimentícia, afirmação esta que será comprovada nessa pesquisa. O uso de tipos diferentes de fibras em conjunto é possível e viável de acordo com o desempenho requerido pela estrutura. Por exemplo, em pavimentos industriais pode-se usar fibras de aço e de polipropileno, estas para reforço do concreto nas microfissuras e aquelas nas macrofissuras. A combinação de armadura e fibras também é utilizada.

Como já citado, suas aplicações são inúmeras, porém, no Brasil o uso de fibras no concreto é restrito quando comparado a países da Europa. Recentemente, fibras de vidro foram utilizadas para a estabilização do solo na Linha Lilás do metrô de São Paulo.

Nessa pesquisa será estudado o comportamento de um tipo de fibras de aço e um de macrofibra de polipropileno dispersas na pasta, separadamente, em relação a transferência de tensões, módulo de elasticidade, resistência à compressão, à tração e deformação máxima num modelo de viga isostática biapoiada.

2. Objetivo:

Os objetivos são: determinar o traço e as propriedades (resistência à compressão e módulo de elasticidade e resistência à tração) de um concreto referência (CS – concreto sem fibras) e compará-las com as de concretos com a adição de fibras, dispersas, de aço (CRFA) e macrofibras de polipropileno (CRFP), separadamente. Também serão calculadas e comparadas as deformações máximas numa viga isostática biapoiada, com os três tipos de concreto em análise.

3. Material e Métodos:

3.1.: Caracterização dos Materiais:

Primeiramente foram definidos os materiais a serem utilizados e as dosagens das duas fibras de acordo com os intervalos de dosagens propostos pelos fabricantes. Os materiais são: cimento CPV-ARI-RS, areia de rio, areias de quartzo de três granulometrias diferentes (com diâmetro aproximado dos grãos: 0,425/0,3, 0,85, 1,4 mm), brita 0, sílica ativa (um tipo de adição mineral) (3% da massa de cimento) e aditivo superplastificante (MGlenium 51 MS, na dosagem de 0,8% da massa de cimento).

Foram feitos ensaios de massa unitária, massa específica (segundo as normas NBR NM 23, para o cimento e NBR 9776 para os agregados), módulo de finura (NBR-7211), e ensaio de peneiramento (NBR 7217) para os agregados (figura 2), o qual foi necessário para a determinação do traço do concreto referência (CS) – sem fibras-, que será abordado posteriormente.



Figura 2: À esquerda tem-se o ensaio de massa específica da areia de rio e da brita 0, e, em seguida, o peneirador mecânico e a brita 0 submetida ao ensaio de peneiramento.

3.2.: Caracterização das fibras:

De acordo com os fabricantes de cada uma das fibras tem-se as seguintes características e propriedades das fibras de aço e de polipropileno utilizadas (Quadro 1):

Quadro 1: Características e propriedades das fibras em análise, de acordo com os fabricantes e com a norma 15530:2007 para a fibra de aço.

Características e Propriedades	Fibra de Aço	Macrofibra de Polipropileno
Matéria-prima	Aço	Copolímero de polipropileno virgem
Absorção de água	zero	zero
Densidade específica (g/cm^3)	7,84	0,91
Comprimento (mm)	30	54,0
Diâmetro (mm)	1,0	0,48
Fator de forma	40	112
Resistência à tração (MPa)	1000	660 a 760
Módulo de elasticidade (GPa)	190 - 210	5,0
Dosagem (kg/m^3)	25,0 a 30,0	3,0 a 8,0

É importante observar que as fibras de aço em questão atendem à norma NBR 15530 – “Fibras de aço para concreto - Especificação”.

3.3.: Determinação do traço do concreto:

Para determinar o traço ideal do concreto referência foi utilizado o método de Rothfuchs (Wlastermiler, 1997). Os métodos mais utilizados para determinar o traço do concreto são o do IPT e o do IBRACON, mas não foi possível a utilização destes pois nenhum traço inicial e/ou f_{ck} do concreto (definido em projeto) eram conhecidos.

O método utilizado consiste basicamente em traçar as curvas granulométricas, em papel monolog (Figura 3), dos agregados graúdos e miúdos, a qual foi possível ser traçada a partir do ensaio de peneiramento destes, como já citado acima. Depois, traça-se uma reta na diagonal no gráfico da ordenada 0 do eixo da porcentagem que passa até a ordenada 100 do eixo da porcentagem retida. No cruzamento de cada curva granulométrica com essa reta diagonal tem-se a porcentagem ideal de cada agregado (Quadro 2).

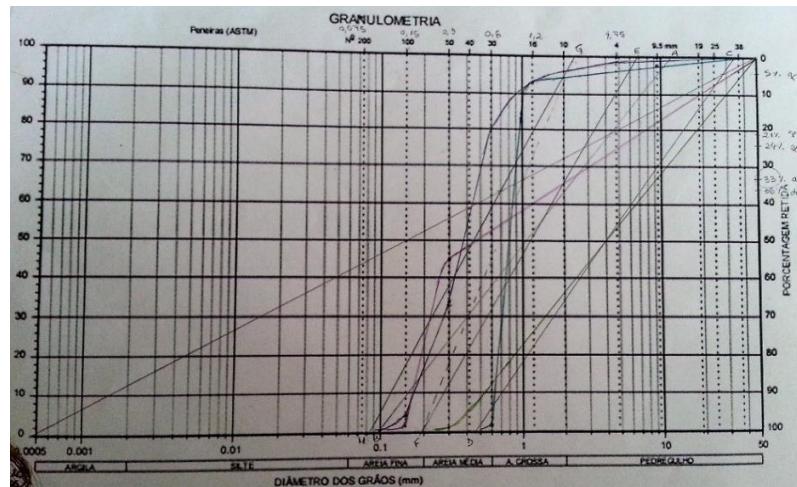


Figura 3: Curvas granulométricas dos quatro agregados miúdos (areia de quartzo 0,425/0,300 mm, 0,850 mm, 1,40 mm e areia de rio) e do agregado graúdo (pedrisco-bruta 0). Observa-se a diagonal traçada no gráfico.

Quadro 2: Porcentagem ideal dos agregados determinada pelo método de Rothfuchs.

Agregado	% ideal no traço (dada pelo Método de Rothfuchs)
Areia de quartzo 0,425/0,300mm	21 %
Areia de quartzo 0,850mm	5%
Areia de quartzo 1,4mm	24%
Areia média (de rio)	37%
Brita 0 (pedrisco)	13%

A relação $m = a + p$ é usada para determinar o traço do concreto, onde m representa a soma dos agregados miúdos (a) e graúdos (p). Deve-se impor três valores para m , sabendo que quanto maior seu valor, maior será a quantidade de água necessária para a hidratação do cimento, chamada de fator água/cimento (a/c) e, portanto, menor a resistência desse concreto. Adota-se um valor de m intermediário e dois valores, um acima e um abaixo (chamados de traço rico e pobre, respectivamente (Helene e Terzian, 1992)), desse valor intermediário. Então, adotou-se $m = 2, 3$ e 4 , obtendo, assim, três traços. Dessa forma, têm-se os traços iniciais, ou seja, as proporções de cada agregado para 1 kg de cimento e o traço, então, é escrito na forma $1:a_1:a_2:a_3:a_4:p:a/c$, onde os agregados miúdos (a) são escritos em ordem crescente de tamanho dos grãos, uma vez que há mais de um agregado miúdo.

Porém, é necessário saber quanto de cimento será consumido para as proporções de agregados determinadas e fator a/c adotado, para isso usa-se a seguinte expressão de consumo de cimento: $C = \frac{1000 \cdot \rho_c}{1+a+p+x}$

Onde: ρ_c = densidade do cimento: $2,4 \text{ g/cm}^3$, aproximadamente.

a e p = proporções de agregado miúdo e graúdo, respectivamente, determinadas no traço inicial.

x = fator água/cimento (a/c) adotado.

Essa expressão acima resulta na quantidade de cimento consumida em 1 m^3 , ou seja, em 1000 L de acordo com o traço inicial (determinado pelo método descrito acima).

É importante observar que o fator a/c é obtido experimentalmente, portanto, nos três traços obtidos a partir do método em questão e dos valores de m , foi adotado para cada traço um valor de a/c , considerando que quanto menor ele for, maior a resistência do concreto com ele produzido, porém é necessária uma quantidade mínima de água para a hidratação do cimento.

Considerando o volume do corpo-de-prova cilíndrico de concreto (CP) que será produzido, calculou-se, a partir do consumo de cimento e das proporções já determinadas, o traço, a quantidade dos materiais necessária para produzir tal quantidade. A tabela 3 apresenta os 3 traços determinados e suas características.

Vale observar que o traço para CP's com dimensões $10 \times 20 \text{ cm}$ foi calculado para $2,4 \text{ L}$, volume este maior do que o volume do CP em questão ($1,57 \text{ L}$), devido a grande quantidade de materiais finos presentes neste concreto em análise. Esse volume de concreto necessário para moldar o CP $10 \times 20 \text{ cm}$ foi descoberto experimentalmente.

3.4.: Determinação das Resistências à compressão, à tração e módulo de elasticidade:

Obtido o concreto de referência (CS), foram moldados também CP's com fibras de aço (CRFA) e com as macrofibras de polipropileno (CRFP) nas respectivas dosagens: $27,5$ e $6,0 \text{ kg/m}^3$ em relação a massa de concreto.

Esses 3 tipos de concreto produzidos (CS, CRFA e CRFP) foram submetidos a ensaios de compressão (segundo a norma NBR-5739) e módulo de elasticidade (NBR-8522) (figura 4). E o CS e CRFA foram submetidos a ensaio de resistência à tração por compressão diametral (NBR-7222) (figura 4), afim de comprovar o aumento da resistência à tração do concreto com

a adição de fibras de aço. A resistência à tração do CRFP não foi determinada pois já é sabido que as fibras de polipropileno não têm efeito quanto a essa propriedade do concreto.



Figura 4: À esquerda, ensaio para determinar o módulo de elasticidade e resistência à compressão e, à direita, ensaio de resistência à tração por compressão diametral.

3.5.: Sílica ativa no dispersor:

A adição mineral utilizada, a sílica ativa, foi submetida a 10 minutos de agitação no dispersor com parte da água do fator a/c, pois quando a sílica ativa é colocada na matriz cimentícia sem essa agitação seus grãos se agrupam, impedindo que mais vazios do concreto sejam preenchidos, que é a função da adição mineral.

3.6.: O concreto:

O concreto foi produzido numa argamassadeira com capacidade para 2 L, e os materiais constituintes foram colocados na seguinte ordem: cimento, sílica ativa (já misturada com a água no agitador), o aditivo, o restante do fator a/c e misturou-se por 3 minutos, aproximadamente. Depois, os agregados foram acrescentados, misturando-os por mais 2 minutos. E por fim, manualmente, as fibras foram adicionadas na mistura.

4. Resultados:

4.1.: Traço do concreto:

Quadro 3: Resultados da resistência à compressão de CP's com a proporção de agregados (m) diferentes, com ou sem aditivo e sem fibras.

Traço com m=	Aditivo (com ou sem)	Dimensões do CP (cm)	Carga média aplicada (<i>tf</i>)		Resistência à compressão média (MPa)	
			3 dias	7 dias	3 dias	7 dias
2	sem	5 x 10	7,74	9,53	38,66	47,60
3	sem	5 x 10	2,70	6,30	13,49	31,47
4	sem	5 x 10	1,30	4,12	6,49	20,58
2	sem	10 x 20	41,87	-----	52,28	-----
2	com	5 x 10	12,81	-----	63,98	-----

A partir dos resultados acima (Quadro 3) o traço escolhido foi para $m = 2$, tendo, assim, de acordo com o método de Rothfuchs aplicado, o traço do concreto referência:

1 : 0,365 : 0,087 : 0,418 : 0,644 : 0,260 : 0,35. Com o aditivo, $a/c = 0,25$.

4.2.: Resistência à compressão:

Quadro 4: Resistência a compressão de CP's 10 x 20 cm sem fibras (CS), com fibras de aço (FA) e com fibras de polipropileno (FP), para o melhor traço determinado ($m=2$).

CP	Dimensões do CP			Ruptura		Tensão média (MPa)	
	Diâmetro (mm)		Diâmetro médio (mm)	Altura (mm)	Carga (kgf)		
FA-1	100,4	98,5	99,45	200,3	59640	75,30	76,05
FA-2	99,6	99,1	99,35	200,4	68080	86,12	
FA-3	100,2	99,0	99,6	199,8	55380	69,71	
FA-4	99,5	99,9	99,7	200,0	56780	71,33	
FA-5	99,0	98,7	98,85	200,5	60880	77,80	
FP-6	100,8	99,5	100,15	200,3	51060	63,57	66,73
FP-7	99,7	99,8	99,75	202,6	52200	65,51	
FP-8	99,1	99,6	99,35	200,8	57920	73,27	
FP-9	99,3	98,5	98,9	198,3	52820	67,43	
FP-10	99,4	98,0	98,7	201,0	49820	63,86	
CS-11	99,2	99,6	99,4	198,0	61760	78,05	75,46
CS-12	100,0	97,7	98,85	198,5	59280	75,75	
CS-13	100,2	100,0	100,1	187,0	60440	75,32	
CS-14	97,5	98,0	97,75	198,6	62960	82,28	
CS-15	99,3	99,1	99,2	199,0	51920	65,88	

4.3.: Módulo de elasticidade:

No Quadro 5, têm-se os resultados das deformações das bases do CP (chamadas de base 1 e 2) a partir da tensão fixa de 0,5 MPa e de 30 % da carga de ruptura de cada tipo de CP, como prescrito na norma NBR-8522. As bases correspondem ao local da lateral do CP em que os elastômeros (sensores que medem a deformação do CP de acordo com a carga aplicada) foram posicionados, como mostra a figura 4.

Quadro 5: Deformações das bases do CP correspondentes a 30% da carga de ruptura destes.

30% carga de ruptura				
CP	kgf	MPa	Base 1 (mm)	Base 2 (mm)
FA-1	17708	22,1	0,0235	0,0085
			0,0710	0,0925
FA-2	17708	22,1	-0,0035	0,0035
			0,0490	0,0670
FA-4	17708	22,1	0,0175	0,0085
			0,0805	0,0745
FP-6	15954	19,9	0,0035	0,0075
			0,0580	0,0700
FP-8	15954	19,9	0,0055	-0,0040
			0,0605	0,0580
FP-10	15954	19,9	-0,0010	0,0060
			0,0550	0,0700
CS-12	18332	22,9	0,0045	0,0025
			0,0690	0,0700
CS-14	18332	22,9	0,0750	0,0000
			0,0960	0,0430
CS-15	18332	22,9	0,0075	0,0020
			0,0750	0,0700

A partir da aplicação da seguinte fórmula em cada uma das bases, têm-se os resultados do módulo de elasticidade (E) de cada um dos três tipos de CP's (Quadro 6):

$$E_{ci} = \frac{\sigma_b - 0,5}{\varepsilon_b - \varepsilon_a}$$

Onde, σ_b é 30% da tensão de ruptura do CP, ε_a e ε_b são a primeira e a segunda deformação, respectivamente, da base 1 ou da base 2 (dependendo de E_{ci} de qual base está sendo calculada).

Quadro 6: Resultados de módulo de elasticidade de CP's 10 x 20 cm.

CP	E_{ci} base 1 (GPa)	E_{ci} base 2 (GPa)	E_{ci} médio (GPa)	E_{ci} médio Total (GPa)
FA-1	45,474	25,714	35,594	36,59
FA-2	41,143	34,016	37,579	
FP-6	35,596	31,040	33,318	32,88
FP-8	35,273	31,290	33,281	
CS-12	34,729	33,185	33,957	33,51
CS-15	33,185	32,941	33,063	

4.4.: Ruptura dos CP's:



Figura 5: Em sequência têm-se a comparação da ruptura dos CP's de CRFP, CRFA e CS, submetidos ao ensaio de resistência à compressão.

4.5.: Resistência à tração:

Quadro 6: Resistência à tração por compressão diametral do CS e do CRFA.

Concreto	Carga média aplicada (kgf)	Resistência à tração (MPa)
CS	15440	4,89
CRFA	18410	5,83

4.6.: Deformações no modelo de viga adotado:

O modelo de uma viga biapoiada isostática adotada para calcular suas deformações máximas (que neste caso é no meio do vão) de acordo com os três módulos de elasticidade obtidos do CS, CRFA e CRFP tem carregamento linear constante de 10 kN/m e 5 m de vão.

Quadro 7: Deformação máxima do modelo de viga adotado para os três tipos de concreto.

Concreto	Deformação máxima (mm)
CS	2,28
CRFA	2,08
CRFP	2,32

5. Conclusão:

Conclui-se que o traço determinado tem um bom empacotamento de partículas uma vez que as resistências e o módulo de elasticidade determinados foram altos em relação ao módulo de elasticidade adotado para o concreto convencional ($E = 25 \text{ GPa}$) e a resistência à compressão do cimento CPV-ARI aos 7 dias (34 MPa–NB 1401). Logo, o método de Rothfuchs empregado para a determinação do traço proporciona o empacotamento de partículas. Verificou-se que a resistência de CRFP é menor do que a de CS e CRFA, mas a diferença não foi muito significativa, mas essa pequena diferença entre as resistências à compressão comprova que as fibras não têm efeito nessa propriedade do concreto. O módulo de elasticidade e a deformação da viga em estudo com o CRFA é significativamente maior do que o do CS e o do CRFP, logo, o CRFA permite que as estruturas tenham um estado elástico maior do que o CRFP, comprovando que as fibras de aço tornam o concreto menos frágil, mais dúctil. Observou-se que os 3 tipos de CP's, com aproximadamente a mesma tensão de ruptura à compressão, romperam de forma diferente (como mostra a figura 5), os reforçados com as fibras não

“explodiram” como os sem fibras, o que comprova o efeito das fibras no desempenho pós-fissuração do concreto. O CRFA também teve aumento de 19% da resistência à tração em ao CS.

6. Referências Bibliográficas:

FIGUEIREDO, A.D. Concreto com fibras de aço. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, SP, 2000.

FIGUEIREDO, A.D.. Concreto reforçado com fibras. 2011. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

HELENE, P. Dosagem dos concretos de cimento Portland. Concreto: ensino, pesquisa e realizações. São Paulo: IBRACON, v. 2, p. 439-471, 2005.

ROMANO, R. C. O. et al. Influência da técnica de dispersão nas propriedades de sílica ativa (Influence of the dispersion process in the silica fume properties). Cerâmica, v. 54, p. 456-461, 2008.

SENÇO, Wlastermiler de. Manual de técnicas de pavimentação. v.1, Pini, 1997.

TOJAL, T.L. et al. Contribuição ao estudo da aderência de barras de aço em concreto autoadensável reforçado com fibras metálicas. 2011.