

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.

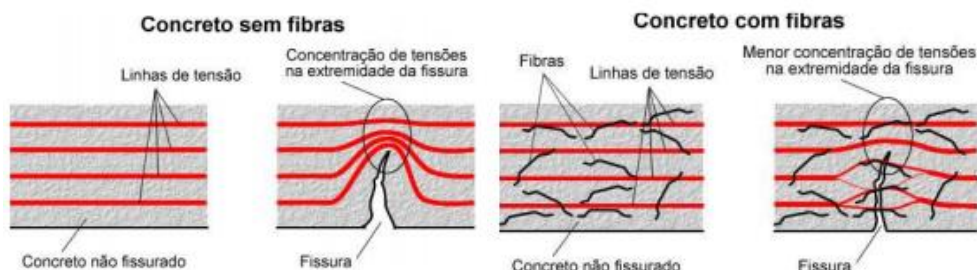


Figura 1: Observa-se a transferência de tensões através de uma fissura proporcionada pelas fibras. (Fonte: TOJAL, 2011)

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 (MGlénium 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 o 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).

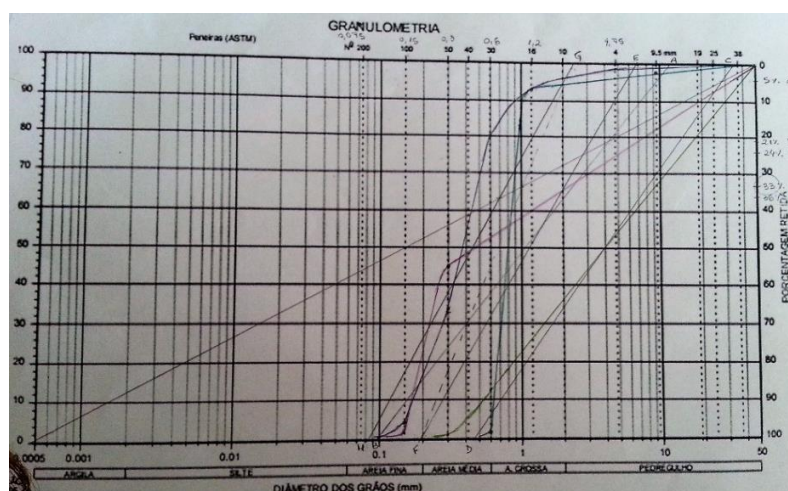


Figura 3: Curvas granulométricas dos quatro agregados miúdos (areia de quartzo 0,425/0,300 mm, 0,850 mm, 1,40 mm e areia de rio) e do agregado graúdo (pedrisco-brita 0). Observa-se a diagonal traçada no gráfico.

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 2,4L, volume este maior do que o volume do CP em questão (1,57 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 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 (tf)		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)	Tensão (MPa)	
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 em 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 do 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 ($E = 25$ 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, Wlastermiller 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.