

CAPÍTULO 5

ESTUDO DOS COMPÓSITOS

Este capítulo descreve os procedimentos utilizados para, por meio de dosagem experimental, definir o traço inicial de dois diferentes concretos, o primeiro com 100 % de brita 1 e o segundo com 50 % de britas 1 e 2, respectivamente. Aos dois diferentes concretos foram acrescentadas fibras de aço, nas taxas de 40 e 60 kg/m³ (aproximadamente 0,5 e 0,75 % por volume), dando origem a quatro compósitos distintos. As características de trabalhabilidade e resistência dos compósitos foram estudadas com o objetivo de escolher aquele de melhor desempenho, de modo a investigar o comportamento estrutural dos dormentes com este compósito. A tenacidade dos compósitos é analisada e comparada segundo os critérios da ASTM C 1018, JSCE - SF 4 e a proposição de BANTHIA & TROTTIER.

5.1 MATERIAIS UTILIZADOS

Descrevem-se a seguir as características dos materiais utilizados nos estudos.

5.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o de alta resistência inicial CP V ARI PLUS da empresa Ciminas S.A. A massa específica real do cimento, segundo o fabricante, é de 3,10 kg/dm³ (NBR 6474/84).

5.1.2 Aditivo Superplastificante

Foi utilizado o aditivo superplastificante RX 3000 da empresa Reax Indústria e Comércio Ltda, com densidade de 1,16 kg/dm³, recebido em doação.

5.1.3 Agregados

As características físicas dos agregados estão mostradas na Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Características físicas dos agregados.

Característica	Norma	AREIA	BRITA 1	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

O agregado miúdo foi adquirido na cidade de São Carlos e a sua granulometria, conforme a NBR 7217/87, está mostrada na Tabela 5.2; de acordo com a norma NBR 7211/83, a areia foi classificada como fina e pertencente à zona 2. Os agregados graúdos eram de origem basáltica; a análise granulométrica das britas 1 e 2 estão apresentadas nas Tabelas 5.3 e 5.4.

Tabela 5.2 - Análise Granulométrica do Agregado Miúdo (NBR 7217/87).

Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% retida acumulada
--------------	---------------------	----------	--------------------

4,8	3,72	1	1
2,4	6,00	1	2
1,2	31,84	6	8
0,6	134,36	27	35
0,3	201,38	40	75
0,15	122,70	25	100
Fundo	-	-	

Tabela 5.3 - Análise Granulométrica da brita 1 (NBR 7217/87).

Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% retida acumulada
25,0	0	0	0
19,0	0	0	0
12,5	1175	24	24
9,5	1955	39	63
4,8	1870	37	100
2,4			100
1,2			100
0,6			100
0,3			100
0,15			100
Fundo	-	-	-

Tabela 5.4 - Análise Granulométrica da brita 2 (NBR 7217/87).

Peneira (mm)	Material retido (g)	% retida	% retida acumulada
25,0	0		0
19,0	37		37
12,5	61		98
9,5	2		100
4,8			100
2,4			100
1,2			100
0,6			100
0,3			100
0,15			100
Fundo	-	-	-

5.2 DEFINIÇÃO DO TRAÇO DOS CONCRETOS

No início dos estudos para a determinação do traço dos concretos, vislumbrou-se dois diferentes processos para a sua determinação. O primeiro processo consistiria de, a partir de um traço pré-definido por outros estudos, adaptá-lo às necessidades da pesquisa. No segundo processo, o traço do concreto seria determinado por meio de um método experimental. Este último processo foi o escolhido por ter a vantagem de tornar possível escolher todas as características que o concreto deveria possuir, tais como: o teor de argamassa, o abatimento, a resistência à compressão, o fator água/cimento etc.

Com a dosagem experimental que foi realizada, procurou-se determinar o traço de dois diferentes concretos, um com o agregado graúdo consistindo de brita 1 apenas e o outro com britas 1 e 2, com 50 % para cada brita. Os concretos deveriam apresentar as seguintes características: abatimento em torno de 60 mm, resistência média de dosagem à compressão aos 28 dias igual a 55 MPa e um teor de argamassa pouco acima daquele considerado como ideal, além do fator água/cimento menor ou igual a 0,45.

O método de dosagem escolhido foi o descrito em HELENE & TERZIAN (1993). Neste método, o teor de argamassa considerado ideal é determinado com o acréscimo de cimento, areia e água numa mistura inicial de traço 1:5,0. Em seguida, três misturas são realizadas nas proporções de 1:3,5, 1:5,0 e 1:6,5, mantendo-se o teor de argamassa considerado ideal na mistura inicial e o mesmo abatimento.

A Tabela 5.5 mostra as características básicas para o estudo da dosagem.

Tabela 5.5 - Características básicas do concreto.

ITENS	DEFINIÇÕES
f_{ck} (projeto) MPa	50
Elemento estrutural em que o concreto será aplicado	dormente
Espaçamento entre as barras de aço (mm)	30
Dimensão máxima característica do agregado graúdo adotado (mm)	19 e 25
Abatimento adotado (mm)	60
Cimento; marca, tipo e classe	CP V ARI Plus Ciminias
Relação água/cimento (em função da durabilidade da estrutura)	0,45
Desvio-padrão da dosagem (MPa)	3,0
Resistência de dosagem (MPa)	55
Relação água/cimento (em função da resistência de dosagem)	-
Aditivo; marca, tipo e proporção	Reax 3000
Idade de ruptura dos corpos-de-prova (dias)	3, 7, 15 e 28
Estimativa de perda de argamassa no sistema de transporte e lançamento do concreto (%)	0

O estudo iniciou com a determinação do teor ideal de argamassa para os dois concretos. Partiu-se de um teor de argamassa igual a 45 %, para o traço 1:1,70:3,30:0,50

(1:5,0). As misturas foram realizadas em betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 150 litros. A Tabela 5.6 para o concreto com brita 1 sem brita 2 e a Tabela 5.7 para o concreto com britas 1 e 2 mostram os acréscimos de cimento, areia e água que foram feitos às misturas iniciais.

Tabela 5.6 - Concreto com brita 1 sem brita 2. Determinação do teor ideal de argamassa para o traço 1:5,0.

Teor de argamassa	Traço Unitário	AREIA		CIMENTO		ÁGUA	
		Massa total (kg)	Acrésc. (kg)	Massa total (kg)	Acrésc. (kg)	Massa total (kg)	Acrésc. (kg)
45	1:1,70:3,3	15,45	3,57	9,09	0,71	4,55	0,60
49	1:1,94:3,0	19,02	2,00	9,80	0,40	5,15	0,30
51	1:2,06:2,9	21,02	2,17	10,20	0,44	5,45	0,40
53	1:2,18:2,8	23,19	2,36	10,64	0,47	5,85	0,25
55	1:2,30:2,7	25,55	2,59	11,11	0,52	6,10	0,30
57	1:2,42:2,5	28,14	2,84	11,63	0,57	6,40	0,325
59	1:2,54:2,4	30,98	-	12,20	-	6,725	-

Para o concreto sem brita 2, os teores de argamassa de 55 e 57 % foram considerados como os teores ideais; no entanto preferiu-se adotar um teor um pouco acima (59 %), a fim de propiciar uma melhor trabalhabilidade quando ao concreto fossem acrescentadas as fibras de aço. O concreto com teor de argamassa de 59 % resultou num abatimento de 55 mm e a relação água/cimento igual a 0,55.

Tabela 5.7 - Concreto com britas 1 e 2 - Determinação do teor ideal de argamassa para o traço 1:5,0.

Teor de argamassa	Traço Unitário	AREIA		CIMENTO		ÁGUA	
		Massa total (kg)	Acrésc. (kg)	Massa total (kg)	Acrésc. (kg)	Massa total (kg)	Acrésc. (kg)
45	1:1,70:3,30	15,45	3,57	9,09	0,71	4,55	0,30
49	1:1,94:3,06	19,02	2,00	9,80	0,40	4,85	0,35
51	1:2,06:2,94	21,02	2,17	10,20	0,44	5,20	0,30
53	1:2,18:2,82	23,19	2,36	10,64	0,47	5,50	0,335
55	1:2,30:2,70	25,55	-	11,11	-	5,835	-

Para o concreto com britas 1 e 2, o teor de argamassa de 51 % foi considerado como o teor ideal; no entanto preferiu-se adotar um teor um pouco acima (55 %), a fim de

propiciar uma melhor trabalhabilidade quando ao concreto fossem acrescentadas as fibras de aço. O concreto com teor de argamassa de 55 % resultou num abatimento de 55 mm e a relação água/cimento igual a 0,525.

Após determinados os teores ideais de argamassa para os dois diferentes concretos, foram feitas várias outras misturas com o objetivo de traçar os diagramas de dosagem, mostrados nas fig. 5.5 e 5.6.

Mantendo-se o teor de argamassa de 59 % para o concreto com brita 1 sem brita 2 e 55 % para o concreto com britas 1 e 2, para cada concreto foram feitas outras três misturas experimentais (rica, média e pobre). As misturas foram feitas em betoneira de eixo inclinado e seguiam sempre o mesmo procedimento. Antes da primeira mistura, era feita a imprimadura da betoneira, conforme indicação de HELENE & TERZIAN (1993). A seqüência de mistura dos materiais foi a seguinte: primeiro eram misturados por cerca de 30 seg a brita 1 e parte da água já com o aditivo, a seguir era acrescentado o cimento e nova mistura por um minuto, então a areia era acrescentada, misturando-se por mais cinco minutos.

Para cada uma das três misturas de cada concreto, foram moldados cinco corpos-de-prova cilíndricos de dimensões 15 x 30 cm. Estes eram preenchidos até a metade e então adensados em mesa vibratória por alguns segundos. Em seguida, após o molde estar totalmente preenchido, nova vibração era aplicada.

Como o abatimento desejado foi relativamente baixo (60 ± 10 mm) adotou-se um consumo de aditivo superplastificante de apenas 0,6 % da massa do cimento. Após a mistura inicial o abatimento era verificado e, se necessário, novas quantidades de água eram acrescentadas até a obtenção do abatimento desejado.

Os resultados obtidos estão mostrados na Tabela 5.8 para o concreto com brita 1 sem brita 2 e na Tabela 5.9 para o concreto com britas 1 e 2.

A correlação entre a resistência à compressão (f_c) e a relação água/cimento, para os dois concretos, estão mostradas nas fig. 5.1 e 5.2. As fig. 5.3 e 5.4 mostram a evolução da resistência à compressão com a idade.

Tabela 5.8 - Misturas experimentais. Concreto com brita 1 sem brita 2.

Traço em massa	1:m 1:a:p ₁ :p ₂	1:3,5 1:1,66:1,84	1:5,0 1:2,54:2,46	1:6,5 1:3,43:3,07
Teor de argamassa (%)		59	59	59
Agregado graúdo 1 (kg)		32,20	31,98	33,77
Agregado graúdo 2 (kg)		-	-	-
Agregado miúdo (kg)		29,05	33,02	37,73
Cimento (kg)		17,5	13,0	11,0
Água (kg)		7,0	6,965	8,47
Aditivo (0,6 %) (g)		122	90	77
Relação água/cimento		0,41	0,54	0,78
Consumo por m ³ de concreto	Cimento (kg)	498,3	371,2	286,7
	Água (l)	199,32	198,88	220,76
Abatimento tr. de cone (mm)		75	60	55
Nº de corpos-de-prova		6 a 10	1 a 5	11 a 15
Resistência à compressão axial à idade (MPa)	1 d (1cp)	36,91	22,13	14,62
	7 d (1cp)	48,66	37,01	27,99
	15 d (1cp)	47,88	38,24	29,90
	28 d (2cp)	54,42	41,33	31,33

Tabela 5.9 - Misturas Experimentais. Concreto com britas 1 e 2.

Traço em massa	1:m 1:a:p ₁ :p ₂	1:3,5 1:1,48:1,01:1,01	1:5,0 1:2,30:1,35:1,35	1:6,5 1:3,13:1,69:1,6
Teor de argamassa (%)		55	55	55
Agregado graúdo 1 (kg)		17,675	17,55	18,535
Agregado graúdo 2 (kg)		17,675	17,55	18,535
Agregado miúdo (kg)		25,90	29,90	34,43
Cimento (kg)		17,5	13,0	11,0
Água (kg)		6,67	6,39	7,61
Aditivo (0,6 %) (g)		122	90	77
Relação água/cimento		0,39	0,50	0,70
Consumo por m ³ de concreto	Cimento (kg)	505,5	379,0	294,8
	Água (l)	192,67	186,29	203,95
Abatimento tr. de cone (mm)		63	70	65
Nº de corpos-de-prova		6 a 10	1 a 5	11 a 15
Resistência à compressão axial à idade (MPa)	3 d (1cp)	47,58	29,32	24,81
	7 d (1cp)	51,21	40,09	33,01
	15 d (1cp)	45,33	42,95	35,34
	28 d (2cp)	57,33	48,63	39,94

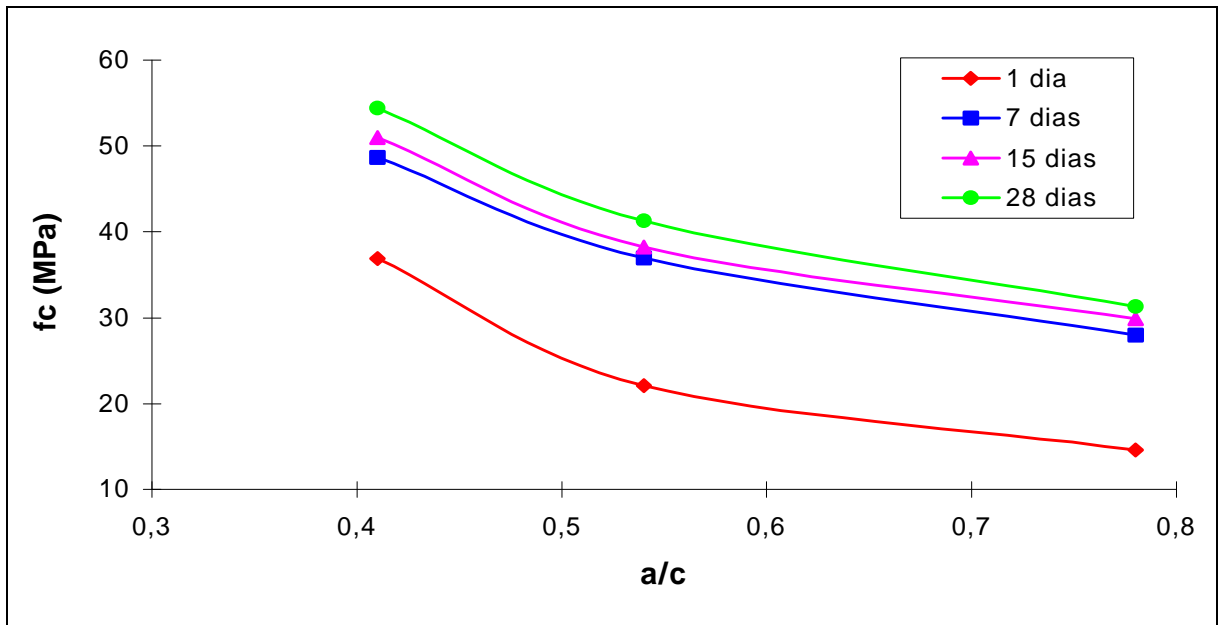


Fig. 5.1 - Concreto com brita 1 sem brita 2. Evolução da resistência à compressão com a idade em função da relação a/c .

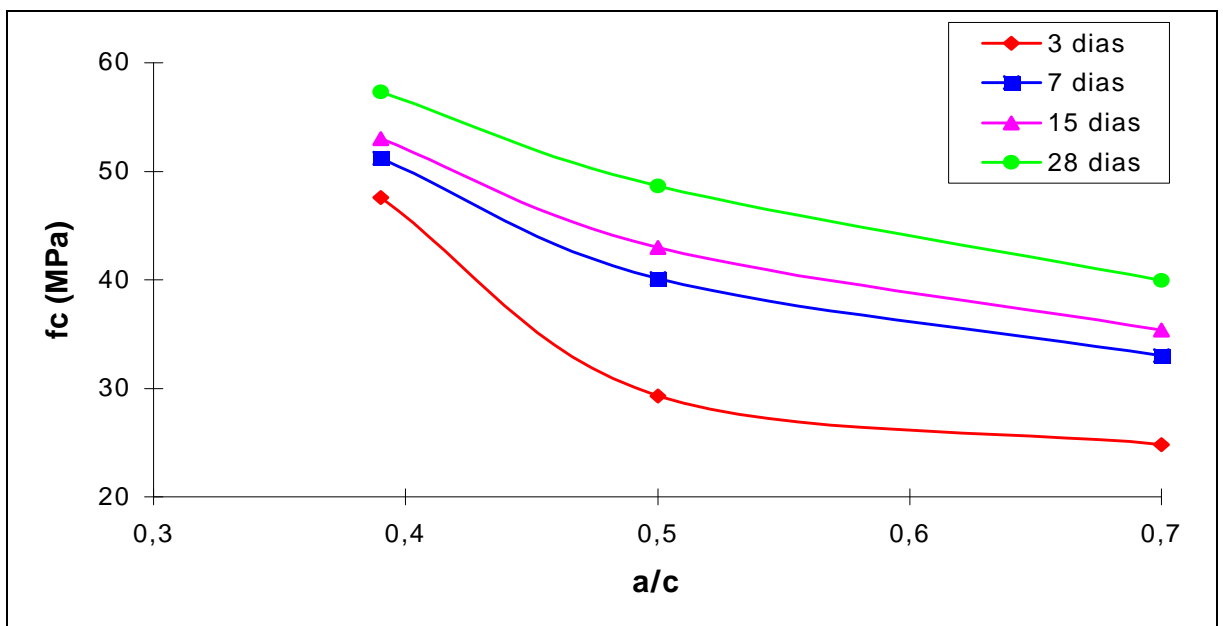


Fig. 5.2 - Concreto com britas 1 e 2. Evolução da resistência à compressão com a idade em função da relação a/c .

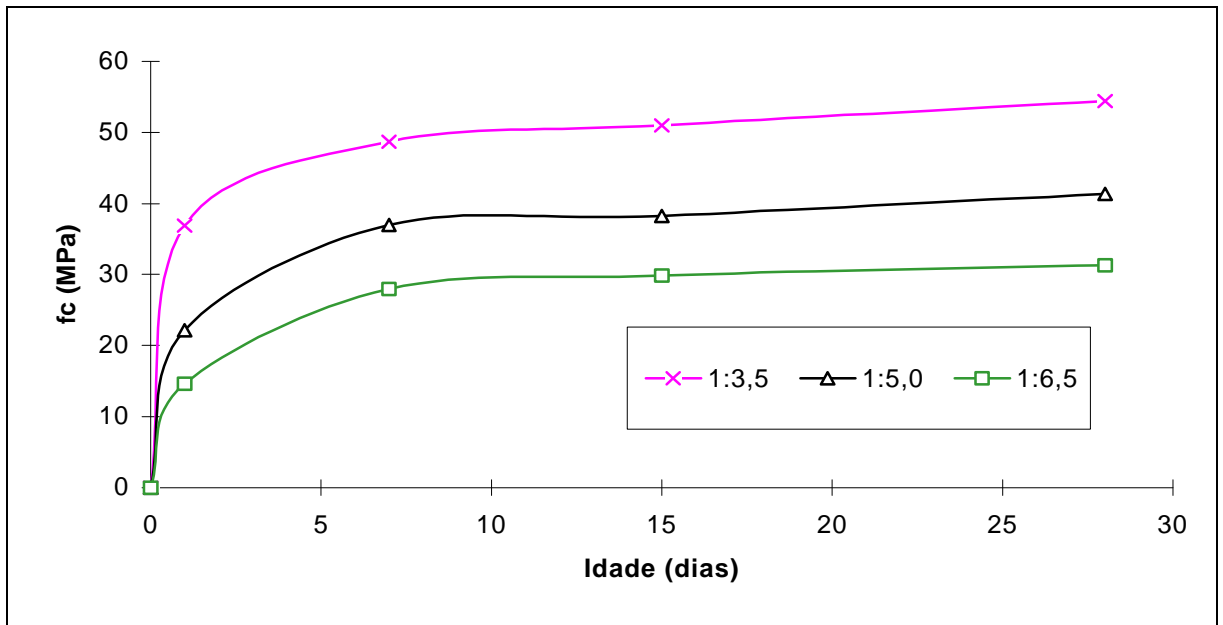


Fig. 5.3 - Concreto com brita 1 sem brita 2. Evolução da resistência à compressão com a idade.

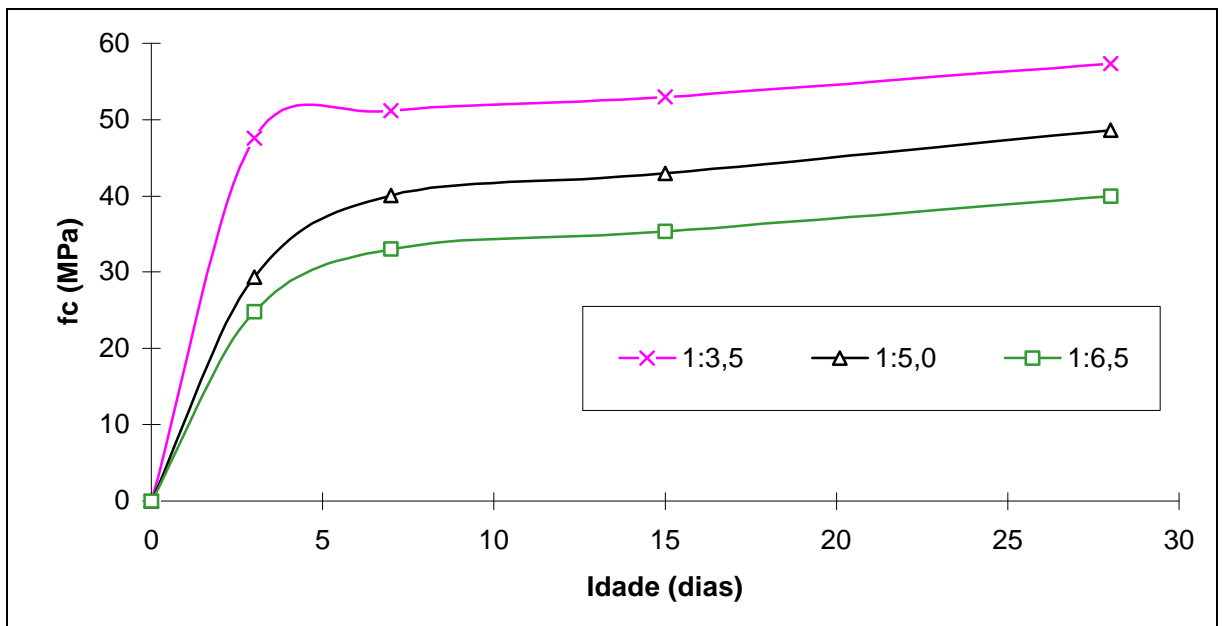


Fig. 5.4 - Concreto com britas 1 e 2. Evolução da resistência à compressão com a idade.

As fig. 5.5 e 5.6 apresentam o diagrama de dosagem para os dois diferentes concretos, onde m representa a relação agregados secos/cimento em massa e C o consumo de cimento por metro cúbico de concreto. O valor de m pode ser entendido como a soma dos agregados graúdos e miúdos, para uma unidade de cimento:

$$m = a + p \tag{5.1}$$

onde:

a = relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg);

p = relação agregados graúdos secos/cimento em massa (kg/kg).

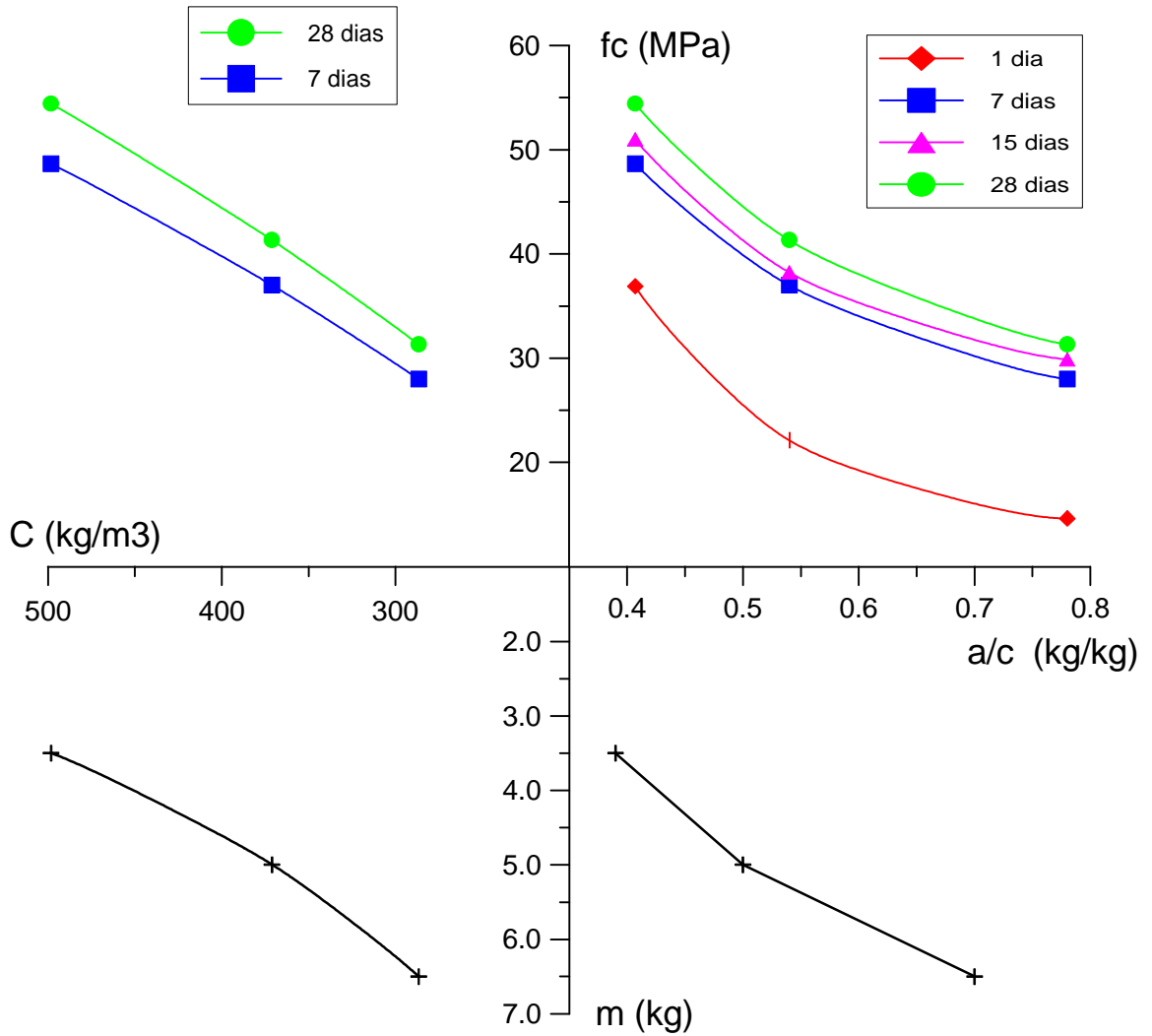


Fig. 5.5 - Diagrama de dosagem do concreto com brita 1 sem brita 2.

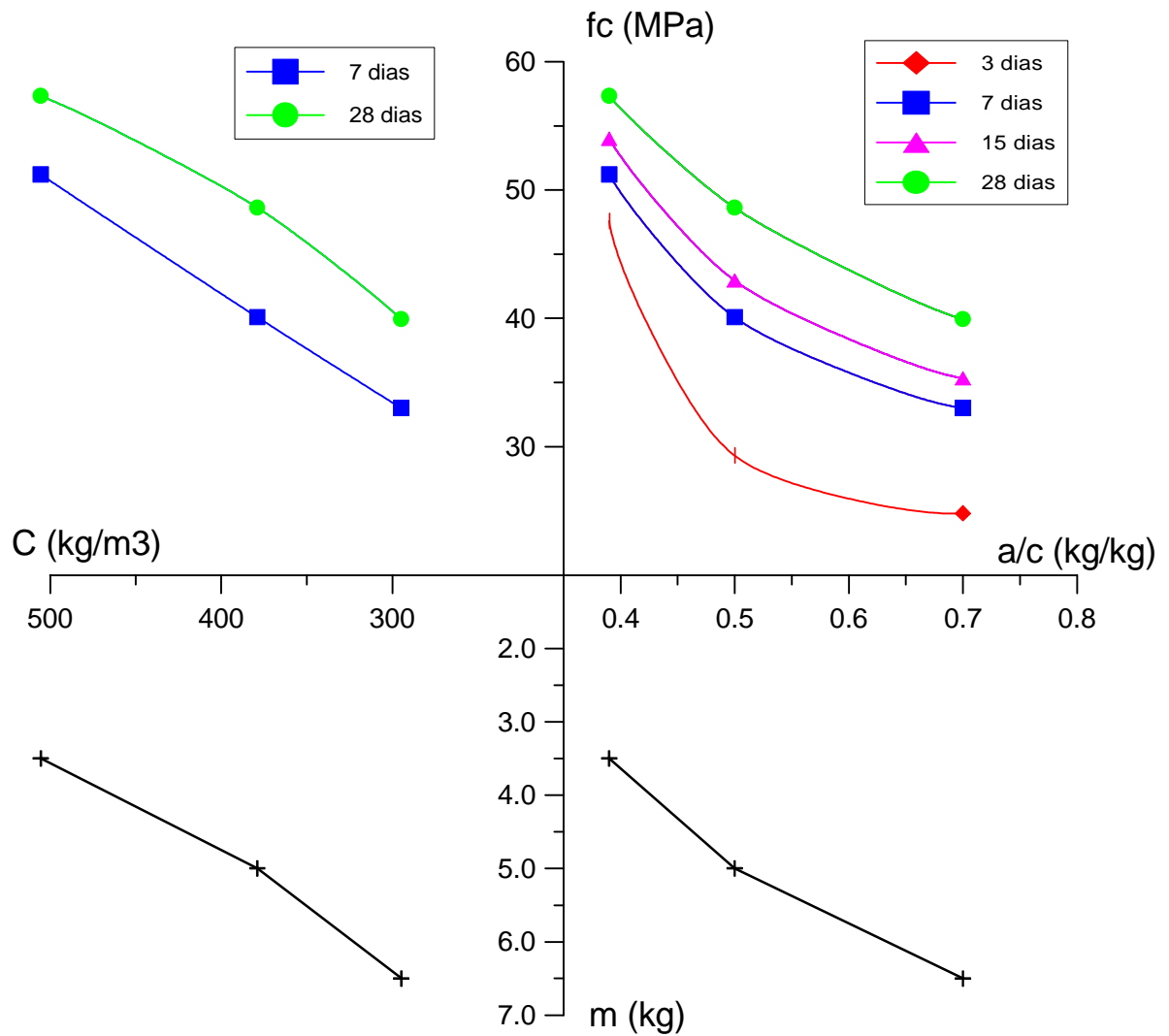


Fig. 5.6 - Diagrama de dosagem do concreto com britas 1 e 2.

É importante ressaltar que os diagramas mostrados nas fig. 5.5 e 5.6 são de concretos com abatimento em torno de 60 mm, com 0,6 % de aditivo superplastificante e teor de argamassa de 55 % (para o concreto com brita 1 sem brita 2) e 59 % (para o concreto com britas 1 e 2) e cimento ARI.

Do estudo realizado, para uma resistência característica à compressão (f_{ck}) de 50 MPa, definiram-se os traços em massa, indicados a seguir.

a) Concreto com brita 1 sem brita 2

1:1,66:1,84:0,40:0,6 % SP

A quantidade dos materiais, em kg por metro cúbico de concreto, resultou:

cimento = 500,0
areia = 830,0
brita 1 = 920,0
água = 197,2
aditivo = 3,48

b) Concreto com britas 1 e 2

1:1,48:1,01:1,01:0,40:0,6 % SP

A quantidade dos materiais, em kg por metro cúbico de concreto resultou:

cimento = 502,9
areia = 744,3
brita 1 = 507,9
brita 2 = 507,9
água = 198,4
aditivo = 3,50

Após a obtenção do traço dos dois diferentes concretos, o estudo prosseguiu com a incorporação de fibras de aço, com o objetivo de definir qual dos dois concretos seria aplicado no dormente objeto dos ensaios estáticos e dinâmicos.

Na seqüência do estudo, aos dois concretos foram adicionadas fibras de aço com o propósito de determinar a trabalhabilidade (em ensaios de abatimento do tronco de cone e tronco de cone invertido), o módulo de deformação longitudinal, a tenacidade e as resistências mecânicas (compressão, tração por compressão diametral e tração na flexão).

5.3 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO FRESCO

As fibras de aço foram incorporadas aos concretos em dois diferentes teores: 40 e 60 kg por metro cúbico de concreto (aproximadamente 0,5 e 0,75 % por volume). A fibra de aço aplicada foi a DRAMIX RC 80/60 BN. Essa fibra apresenta o comprimento de 60 mm e o diâmetro de 0,8 mm, o que resulta na razão de aspecto ou fator de forma de 75. A tensão de escoamento é de 1200 MPa. Entre tantos outros tipos e modelos, a fibra RC 80/60 BN foi escolhida por suas excelentes qualidades, por resultar compósitos com

expressivos resultados de tenacidade e resistência mecânica, conforme pesquisa realizada por PINTO JR. (1997).

A mistura dos compósitos foi feita em betoneira de eixo inclinado e a forma de mistura seguiu a mesma seqüência descrita no item 5.2, com o detalhe de que as fibras eram o último material colocado na betoneira. Após isso, o concreto era misturado por cinco minutos; nenhum problema foi observado e os compósitos apresentaram-se bem homogêneos.

A relação a/c dos compósitos foi mantida igual à dos concretos de controle, 0,40. No entanto, como é conhecido que as fibras de aço acarretam uma importante diminuição na mobilidade dos concretos, a quantidade de aditivo superplastificante foi significativamente aumentada, passando de 0,6 % para 1,5 % da massa de cimento.

As medidas tomadas dos compósitos no estado fresco foram a de abatimento do tronco de cone (NBR 7223/92) e abatimento do tronco de cone invertido (ASTM C 995), com a altura de queda do concreto de 75 mm (altura da base do cone ao piso).

Nas tabelas e comentários seguintes, a notação C1-0 indica o concreto de controle com brita 1 e as notações 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, a notação C12-0 indica o concreto de controle com britas 1 e 2 e as notações C12-40 e C12-60 indicam os compósitos com britas 1 e 2 e os teores de fibra de 40 e 60 kg/m³, respectivamente. A Tabela 5.10 mostra os resultados dos ensaios realizados para medir a consistência dos compósitos.

Tabela 5.10 - Medidas da consistência dos compósitos.

Concreto	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

A adição das fibras de aço resultou numa grande diminuição do abatimento. No entanto, todos os compósitos mantiveram uma boa trabalhabilidade quando vibrados, além de apresentarem 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), conforme mostram as medidas de abatimento e

tempo de fluxo no tronco de cone invertido. O tempo de fluxo no tronco de cone invertido do compósito C1-60 (35 seg) superou o tempo de 30 seg, considerado pelo ACI 544 - 2R (1989) como o tempo máximo para aplicações práticas; porém, o compósito apresentou ótimas características de trabalhabilidade.

5.4 CARACTERÍSTICAS DOS COMPÓSITOS NO ESTADO ENDURECIDO

De cada uma das seis distintas misturas com os teores de fibra de 0, 40 e 60 kg/m³, como descritas no item anterior, 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 procedimentos de mistura e moldagem dos corpos-de-prova foram sempre os mesmos. 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 japonesa JSCE - SF 2 (1984), em um nível apenas, e adensadas em mesa vibratória por um minuto e vinte segundos.

Foram realizados ensaios de compressão axial nas idades de 3, 7 e 28 dias, com dois corpos-de-prova por idade (NBR 5739/80). Os ensaios de compressão diametral (NBR 7222/82) e de módulo de deformação longitudinal foram feitos aos 28 dias, com dois corpos-de-prova por ensaio. Os ensaios para determinação da tração na flexão foram executados segundo a metodologia da norma JSCE - SF 4 (1984), cujos resultados mostrados na Tabela 5.11 representam a média dos valores obtidos no ensaio de quatro vigas prismáticas.

5.4.1 Resistências Mecânicas

A Tabela 5.11 mostra o módulo de deformação longitudinal e as resistências médias à compressão, à tração por compressão diametral e à tração por flexão (também chamada módulo de ruptura), alcançadas pelos dois concretos de controle (C1-0 e C12-0) e os quatro compósitos (C1-40, C1-60, C12-40 e C12-60).

A fig. 5.7 mostra a evolução da resistência à compressão com a idade e o pequeno ganho de resistência proporcionado pelas fibras. Aos 28 dias, o compósito com brita 1 e 40 kg/m³ de fibras (C1-40) praticamente não apresentou ganho de resistência sobre o concreto de controle (C1-0), porém, o compósito com 60 kg/m³ (C1-60) apresentou um pequeno ganho, mas nada significativo. No concreto com britas 1 e 2, o compósito com 40 kg/m³ de fibras (C12-40) apresentou o melhor resultado e um ganho de 10 % sobre o concreto de controle (C12-0). Considerando a média das seis misturas, a resistência aos 3

e 7 dias em relação aos 28 dias foi de 74 e 83 %, respectivamente. Porém, como foram ensaiados poucos corpos-de-prova, os resultados encontrados são apenas indicativos.

Tabela 5.11 - Resistências mecânicas dos compósitos.

Concreto	Resistência à compressão à idade (MPa)			Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	Módulo de ruptura (MPa)	Módulo de deformação longitudinal (MPa)
	3 dias	7 dias	28 dias			
C1-0	45,29	47,50	58,61	4,33	7,24	39850
C1-40	46,08	51,45	58,96	4,23	7,31	38584
C1-60	46,28	53,50	60,06	5,55	9,41	41918
C12-0	39,84	43,82	57,37	3,93	5,87	37727
C12-40	45,25	51,05	62,98	4,99	6,34	45272
C12-60	43,20	49,77	59,91	5,26	7,60	48506

O módulo de deformação longitudinal foi determinado por intermédio da deformação medida por dois extensômetros, colados em duas posições opostas da superfície vertical dos corpos-de-prova cilíndricos (15 x 30 cm). Em cada mistura os módulos foram determinados com o ensaio de dois corpos-de-prova. Os resultados foram muito diferentes, mostrando que apenas dois corpos-de-prova são insuficientes para a correta determinação do módulo. Na Tabela 5.11 estão mostrados os maiores valores obtidos para os módulos.

A fig. 5.8 mostra a evolução da resistência à tração por compressão diametral em função do teor de fibras. No teor de 60 kg/m³, o compósito C1-60 mostrou ser superior ao compósito C12-60, embora com uma diferença praticamente desprezível. 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. 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 dos valores medidos.

A fig. 5.9 mostra a evolução da resistência máxima à tração na flexão (módulo de ruptura) em função do teor de fibras. Neste caso os compósitos com brita 1 mostraram ser significativamente superiores aos 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) apresenta a equação $0,94\sqrt{f'_c}$ de Carrasquillo para a estimativa do módulo de ruptura. 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 no caso do concreto com britas 1 e 2 (C12-0).

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 o compósito C1-60 a equação teria que ser $1,23\sqrt{f'_c}$ (em MPa) ou $14,8\sqrt{f'_c}$ (em psi).

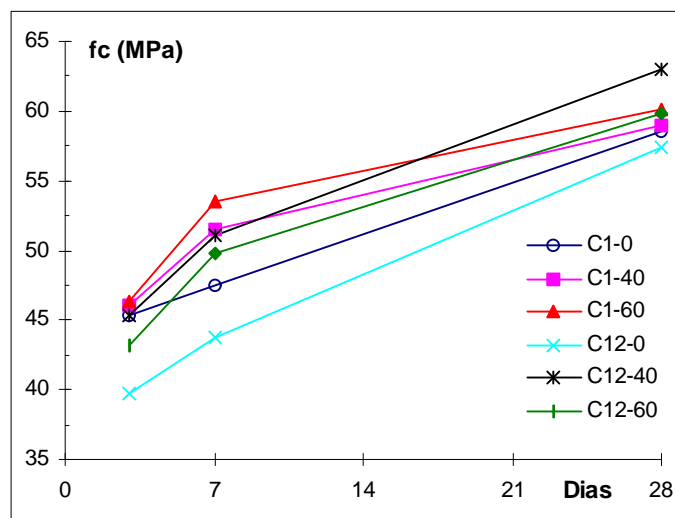


Fig. 5.7 - Evolução da resistência à compressão com a idade.

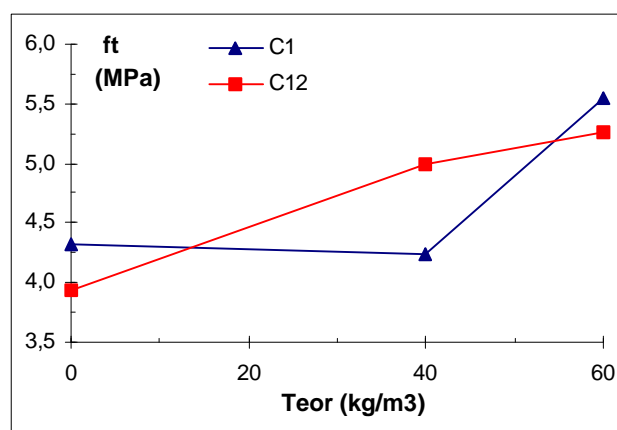


Fig. 5.8 - Evolução da resistência à tração por compressão diametral em função do teor de fibras de aço.

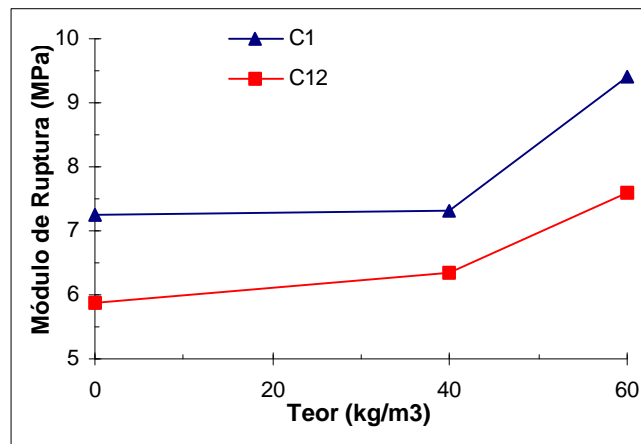


Fig. 5.9 - Evolução do módulo de ruptura em função do teor de fibras de aço.

5.4.2 Tenacidade

Todos os ensaios de flexão das vigas prismáticas, num total de 24 ensaios, foram executados na empresa Alphageos - Geologia, Geotecnia e Comércio Ltda, de São Paulo. A máquina utilizada nos ensaios foi a Sintech 30/G.

A Tabela 5.12 apresenta os resultados (média de quatro corpos-de-prova) obtidos para a resistência à tração na flexão na primeira fissura (f_0), a resistência à tração na flexão máxima 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 e descritos no item 4.9.

Tabela 5.12 - Resistência à tração na flexão e índices de tenacidade segundo a ASTM C 1018.

Concreto	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. 5.10 a 5.15 mostram as curvas **força x deslocamento** obtidas nos ensaios de flexão com deformação controlada dos concretos de controle e dos compósitos. Nos diagramas dos compósitos (fig. 5.12 a 5.15) pode-se observar e comparar a posição e o valor dos vários índices de tenacidade determinados segundo a ASTM C 1018.

A resistência à tração na primeira fissura e a resistência máxima foram calculadas segundo a eq. 4.3. A resistência equivalente foi definida pela eq. 4.2 e para o corpo-de-prova com dimensões 150 x 150 x 500 mm ela assume o valor:

$$f_{ct,eq} = \frac{T_b L}{\delta b h^2} = \frac{T_b 450}{3 \cdot 150 \cdot 150^2} = \frac{T_b}{150^2} \quad (5.3)$$

O fator R_{e3} é definido pela razão $f_{ct,eq} / f_0$. Um fator igual a 100 representa um material elastoplástico perfeito no deslocamento de 3 mm.

Uma análise geral dos valores contidos na Tabela 5.12 permite comprovar duas conclusões importantes. A primeira é que, para um conteúdo de fibras maior, os valores encontrados para as resistências e tenacidade foram também maiores. A segunda é que os compósitos com brita 1, sem brita 2, apresentaram resistência e tenacidade melhores que os compósitos com britas 1 e 2.

Uma comparação entre as resistências de primeira fissura (f_0) e máxima (f_u) mostra que 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 a excelente tenacidade do compósito C1-60, e mais uma vez indicam seu comportamento muito próximo ao elastoplástico perfeito.

Em conseqüência da forma como os índices de tenacidade foram definidos (ver item 4.9.1), 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 1 (fig. 5.13a), 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 3 (fig. 5.15b). Por mais cuidadosa que seja a determinação do ponto de primeira fissura, há sempre um grau de incerteza e subjetividade nesta determinação, o que torna os valores dos índices de tenacidade muito variáveis. Em BANTHIA & TROTTIER (1995) encontra-se ampla discussão a este respeito.

Outro problema enfrentado na análise numérica da tenacidade dos compósitos refere-se à instabilidade pós-pico de força, o que leva a uma superestimativa da tenacidade. No estudo aqui realizado, a área ou energia correspondente à zona de instabilidade não foi subtraída no cálculo dos índices de tenacidade. Em FIGUEIREDO (1997) e em BANTHIA & TROTTIER (1995) encontra-se ampla discussão sobre este assunto. Nas fig. 5.12 a 5.15 verifica-se que nos ensaios dos dois compósitos com fibras de aço no teor de 40 kg/m³, todos os diagramas apresentaram instabilidade após a força máxima. Nos compósitos com fibras no teor de 60 kg/m³, a instabilidade não ocorreu na maior parte dos ensaios ou, quando ocorreu, foi com menor intensidade.

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) 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. 5.12 a 5.15. 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 5.13 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), conforme definidos na eq. 4.4 do item 4.9.3. Os valores constantes da tabela foram determinados através das curvas força x deslocamento dos compósitos (fig. 5.12 a 5.15), com o auxílio de um programa computacional para cálculo de áreas e distâncias em desenhos. Os vários fatores PCS encontram-se indicados nessas figuras, em suas respectivas posições.

Tabela 5.13 - Resistência pós-fissuração (PCS) conforme BANTHIA & TROTTIER (1995).

Con- creto	δ_{pico} (mm)	f_u (MPa)	RESISTÊNCIA PÓS-FISSURAÇÃO (MPa)								
			PCS_{3000}	PCS_{1500}	PCS_{1000}	PCS_{750}	PCS_{600}	PCS_{400}	PCS_{300}	PCS_{200}	PCS_{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, na Tabela 5.13 observa-se que os fatores PCS também indicaram o excelente comportamento elastoplástico perfeito do compósito C1-60.

Todos os fatores PCS_{150} exibiram íntima aproximação com a resistência equivalente ($f_{ct, eq}$) determinada pela norma JSCE - SF 4.

Como se pode ver nas fig. 5.12 a 5.15, os vários fatores PCS mostraram ser bons indicadores da tenacidade dos compósitos.

5.5 CONCLUSÕES PARCIAIS

} a trabalhabilidade de compósitos com fibras de aço longas como a utilizada pode ser obtida com a aplicação de aditivos superplastificantes. Com 1,5 % de superplastificante todos os compósitos estudados apresentaram boas características visuais e de trabalhabilidade. 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;

} 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;

} 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 resistência, com fator R_{e3} de 104 % e aumento de 30 % no módulo de ruptura em relação ao módulo do concreto de controle;

{ 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. 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.

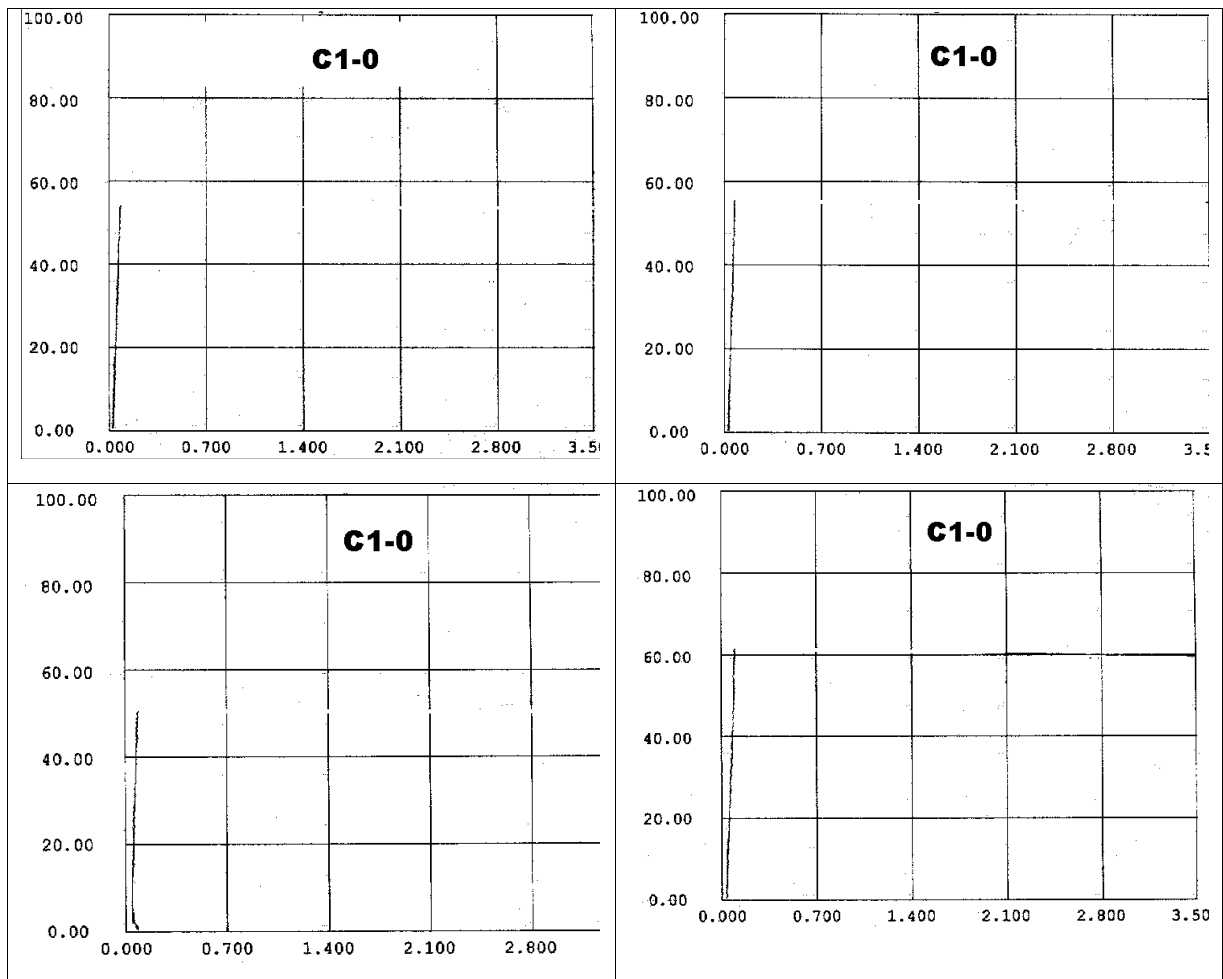


Fig. 5.10 - Diagrama **Força** (eixo y - kN) x **Deslocamento** (eixo x - mm) do concreto de controle C1-0.

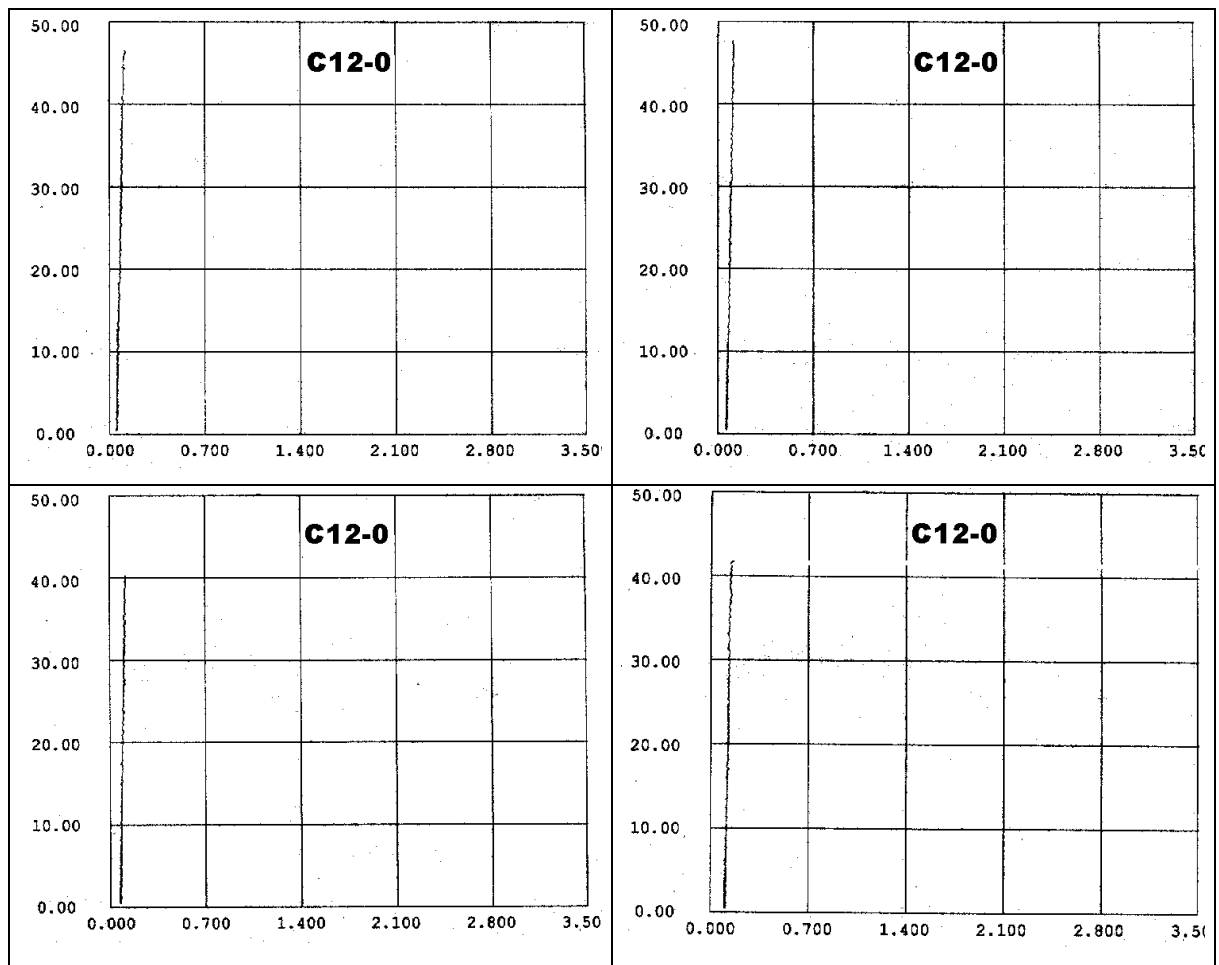


Fig. 5.11 - Diagrama **Força** (eixo y - kN) x **Deslocamento** (eixo x - mm) do concreto de controle C12-0.