

PRODUÇÃO DE UM CONCRETO FIBROSO FLUIDO ECOEFICIENTE CONSIDERANDO A INFLUÊNCIA DO FATOR DE FORMA E TEOR VOLUMÉTRICO DAS FIBRAS DE AÇO

Monique Coutinho Nunes, Universidade Federal de Alagoas, E-mail: niquenunes@gmail.com
Emanuella Bezerra da Silva, Universidade Federal de Alagoas, E-mail: emanuellabezerra@gmail.com
D'Angellis Tarcísio da Silva Oliveira, Universidade Federal de Alagoas, E-mail: dangellis2006@hotmail.com
Aline da Silva Ramos Barboza, Universidade Federal de Alagoas, E-mail: aline@lccv.ufal.br

Resumo: A cada dia, novas tecnologias surgem no mercado na tentativa de sanar as limitações que o concreto convencional apresenta. A adição de fibras de aço apontam para uma melhoria na ductilidade e tenacidade do concreto, tendo maior efeito no estado de pós-fissuração, no qual as mesmas interceptam a progressão das fissuras, evitando assim uma ruptura brusca. Entretanto, no estado fresco tal adição provoca uma redução na trabalhabilidade da mistura, e, por isso, geralmente são incorporados aditivos superplastificantes nos concretos reforçados com fibras, que, dependendo do seu teor, podem deixar o concreto com uma consistência fluida, atendendo ou não a requisitos de autoadensabilidade. Para garantir a coesão de um concreto fluido, é necessário que haja um maior teor de finos na mistura. Nesse estudo, atentando-se ao conceito da ecoeficiência, propõe-se a adição do resíduo do beneficiamento de mármore e granito, agregando um valor ambiental ao concreto. O teor volumétrico e as características geométricas das fibras tem um efeito significativo nas propriedades do concreto, e merecem, portanto, uma análise criteriosa de suas influências. Dentro deste contexto, este estudo visa à produção de um concreto fibroso fluido com propriedades adequadas nos estados fresco e endurecido, levando em consideração a influência do teor volumétrico e do fator de forma das fibras, para uma futura aplicação em pavimentos e placas pré-moldadas. São utilizadas fibras do tipo AI (ABNT, 2007) com fatores de forma 33 e 80, variando-se os teores adicionados ao redor do volume crítico calculado. Após o desenvolvimento, confirmou-se a grande influência dos fatores analisados, e obteve-se traços de concreto com desempenhos satisfatórios e potencial para as aplicações propostas.

Palavras-chave: concreto reforçado com fibras de aço, fator de forma, teor de fibras, resíduo de mármore e granito.

PRODUCTION OF AN ECO-EFFICIENT FLUID FIBROUS CONCRETE CONSIDERING THE INFLUENCE OF FORM FACTOR AND VOLUMETRIC CONTENT OF STEEL FIBERS

Abstract: New technologies arise in the market in an attempt to remedy the limitations that conventional concrete presents. The addition of steel fibers leads to an improvement in ductility and tenacity of the concrete, having a greater effect on the post-cracking state, in which they intercept the progression of the cracks, thus avoiding a sudden rupture. However, in the fresh state, the referred additions causes a reduction in the mixture workability, and that's why superplasticizer additives are usually incorporated in fiber reinforced concretes, which, depending on its content, may give the concrete a fluid consistency, fulfilling or not the requirements of self compatibility. To ensure the cohesion of a fluid mixture, there must be higher fines content in it. In this study, paying attention to the concept of eco-efficiency, the addition of the residue from the processing of marble and granite is proposed, adding an environmental value to the concrete. The volumetric content and geometric characteristics of the fibers has a significant effect on the properties of concrete, and therefore deserve careful analysis of their influences. Into this context, this study aims to produce an fibrous fluid concrete with adequate properties in fresh and hardened states, taking into account the influence of the fibers content and form factor for a future application in pavements and precast plaques. Fibers used were of the type AI (ABNT, 2007) with form factors 33 and 80, varying the added contents around the critical volume calculated. After development, the strong influence of the factors analyzed was confirmed and concrete mixtures with satisfactory performances and with potential applications for the proposals were obtained.

Keywords: steel fiber reinforced concrete, form factor, fiber content, residue of marble and granite.

1. INTRODUÇÃO

A rápida propagação de microfissuras sob tensão aplicada é a responsável pela baixa resistência à tração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 2008). A partir do momento em que se abre uma fissura, ele rompe abruptamente, caracterizando o comportamento tipicamente frágil do material. No concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), as fibras funcionam como uma ponte de transferência de tensões na matriz do concreto, diminuindo o acúmulo de tensões na extremidade das fissuras (FIGUEIREDO, 2000) aumentando sua ductilidade.

Na resistência à compressão, a adição de fibras pouco influencia, não sendo a melhoria dessa propriedade o objetivo da adição. A tenacidade é uma das principais propriedades melhoradas com a adição de fibras, o que significa um aumento da capacidade do concreto de não romper imediatamente depois da primeira fissuração, resistindo a cargas consideráveis após a deformação. A resistência à tração apresenta uma melhoria bem menor, mais ainda assim significativa. A trabalhabilidade, em contrapartida, é reduzida pela adição das fibras (MACCAFERRI, 2008).

As propriedades no estado endurecido do CRFA dependem principalmente das características das fibras como fator de forma e teor incorporado, e da orientação e distribuição das mesmas. Além disso, estas dependem da interface fibra-matriz (MACCAFERRI, 2008).

O teor das fibras tem influência direta na capacidade de reforço que elas apresentam, pois quanto maior o teor de fibras incorporado, maior será a capacidade de reforço pós-fissuração do compósito. O teor de fibras, porém, não pode ser aumentado indefinidamente, pois o excesso de fibras prejudica as propriedades no estado fresco do concreto. Daí, surge o conceito do volume crítico de fibras, volume esse que, depois da ruptura da matriz, mantém no concreto a mesma capacidade portante. Segundo Bentur e Mindess (1990), quanto maior o teor de fibras, maior a carga que o material tem capacidade de suportar, porém, ao passar do volume crítico, a grande quantidade de fibras presentes no compósito prejudica o comportamento pós-fissuração do material devido aos problemas de adensamento do concreto.

O fator de forma das fibras foi definido pela NBR-15530 (ABNT, 2007) como a relação entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra, e também tem forte influência nas propriedades do CRFA. O melhor desempenho no estado endurecido ocorre com a adição de fibras de maior fator de forma, pois essas melhoram a aderência fibra-matriz (CHANH-2005 apud GÓIS, 2010) devido a um aumento no comprimento de ancoragem, propiciando ao mesmo uma maior resistência ao arrancamento. Por outro lado, um maior fator de forma afeta negativamente a trabalhabilidade da mistura fresca, pois ao adicionar fibras, adicionam-se áreas de superfície que absorvem água, diminuindo a água disponível para promover a fluidez. Por esse motivo, na maioria das vezes, a adição de fibras vem acompanhada do uso de aditivos superplastificantes. Figueiredo (2011) define o comprimento crítico (l_c) de uma fibra como aquele que, quando da ocorrência de uma fissuração perpendicular à fibra e posicionada na região média do seu comprimento, proporciona uma tensão no seu centro igual à sua tensão de ruptura. A partir do comprimento crítico, toda a capacidade da fibra já foi utilizada, parando de conferir melhoria na capacidade portante do compósito.

A redução da trabalhabilidade comentada devido à adição de fibras, a melhora na resistência do CRFA com o uso de superplastificantes, e a recomendação de uso de agregados graúdos menores que 19 mm (ACI, 1993) também para o CRFA, fazem o concreto com alto grau de fluidez parecer uma boa opção de associação. O objetivo desta pesquisa é produzir

um concreto fibroso fluido com boas propriedades nos estados fresco e endurecido, para aplicações viáveis em pavimentos e placas pré-moldadas.

Para garantir a coesão do concreto fluido, é necessário que sejam incorporados mais finos na mistura. Desse modo, e com vista na sustentabilidade da indústria da construção, incorporou-se ao concreto estudado o resíduo do beneficiamento do mármore e granito, que seriam descartados por uma indústria local. Esse procedimento incorpora ao concreto produzido o conceito de ecoeficiência, pois incentiva a reciclabilidade de um material que seria descartado. O Conselho Empresarial para o Desenvolvimento Sustentável (BCSD PORTUGAL) trata a ecoeficiência como um conceito que visa acrescentar mais valor a um produto, utilizando menos materiais e energia, e provocando um menor impacto ambiental. Ou seja, a ecoeficiência é uma filosofia que encoraja as pessoas e empresas a procurar melhorias ambientais que potenciem, paralelamente, benefícios econômicos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi realizado um estudo detalhado para a definição da matriz “ótima” para a adição das fibras. Começou-se com análises na fase pasta, em seguida na fase argamassa, e, por fim, utilizou-se o método de Gomes (2009) para a definição do esqueleto granular e dosagem final do concreto. Vale ressaltar que o método de Gomes (2009) foi desenvolvido para concreto autoadensável sem fibras, sendo o mesmo adaptado para o concreto aqui estudado. Os materiais utilizados foram:

- a) Cimentos: CII Z-32 e CII F-32;
- b) Agregados: brita 0 e areia natural quartzosa, caracterizados na Tabela 1;

Tabela 1- Caracterização dos agregados.

Agregados		
	MIÚDO	GRAÚDO
Massa específica (g/cm ³)	2,61	2,71
Massa unitária – estado solto (g/cm ³)	1,48	1,46
Massa unitária – estado compactado	-	-
Absorção (%)	0,64	0,8
Índices granulométricos		
Diâmetro característico máximo (mm)	2,40	12,5
Graduação granulométrica	Média	
Módulo de finura	2,42	-

- c) Água do sistema de abastecimento da UFAL (CASAL);
- d) Resíduo do beneficiamento de mármore e granito (RBMG), com as características expostas na Tabela 2 e Figura 1, apresentadas por Lisboa (2004), peneirado nas peneiras com abertura de malha de 0,6 e 0,3mm;

Tabela 2- Características do resíduo (Lisboa, 2004).

Características do RBMG		
Abertura da peneira	# 0,6 mm	# 0,3 mm
Massa específica (g/cm ³)	2,812	2,685
Material retido na peneira (%)	0,74	0,558
Granulometria a Laser – Diâmetros (µm) - % passante		
3	10,29	24,08
32	61,36	82,97
45	70,80	91,77
63	78,79	94,78
88	85,46	97,56
100	87,45	98,06
150	92,94	99,15

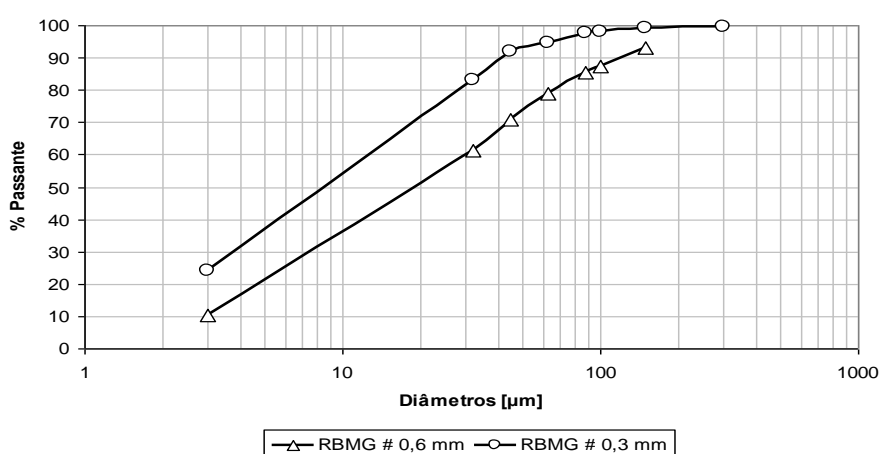


Figura 1- Curva granulométrica do resíduo.

- e) Aditivo Superplastificante de última geração Glenium 51, com base em uma cadeia de éter carboxílico, caracterizado na Tabela 3, retirada do manual do fabricante.

Tabela 3- Propriedades do superplastificante.

Propriedades	
Densidade (g/cm ³)	1,067 – 1,107
Teor de sólidos (%)	28,5 – 31,5
Aspecto	Líquido
Viscosidade (cps)	< 150
Cor	Branco Turvo
pH	5 -7

- f) Fibras de aço curtas do tipo A I de acordo com a NBR 15530 (ABNT, 2007), de comprimentos iguais a 25mm e 60mm, ambas com diâmetro = 0,75mm (fatores de forma 33 e 80, respectivamente). Sua densidade específica é de 7,8g/cm³ e sua resistência à tração em torno de 1100 MPa.

Inicialmente, foram produzidas pastas de cimento, com o objetivo de definir o melhor cimento a ser utilizado e observar a influência da granulometria do resíduo. Foram utilizadas as duas granulometrias de RBMG (0,6 e 0,3mm), e os dois tipos de cimento (CPII-F32 e CPII-Z32). Com essas, foram realizados os ensaios de cone de Marsh, para obter o teor de saturação do superplastificante, e ensaios para a determinação da tensão de escoamento e viscosidade com um viscosímetro. A diferença entre as pastas foi pouco significativa, e as que

apresentaram melhores resultados foram as com CII-F com resíduo 0,3mm e a CII-Z com resíduo 0,6mm. Este estudo pode ser encontrado em Nunes *et al*, 2011.

Em seguida, na produção das argamassas, somente foi utilizado o cimento CII-F, por ter dado bons resultados reológicos no estudo anterior com o resíduo mais fino, e ter fíler em sua composição, fatores favoráveis à produção de um concreto mais coeso de acordo com a literatura. As duas granulometrias do resíduo foram testadas, e foi encontrado o teor de saturação do superplastificante, que é o teor em que o incremento de superplastificante necessário para se conferir uma fluidez significativa na mistura. O espalhamento também foi determinado, de modo que foi possível avaliar a fluidez e a resistência à segregação. Como resultado, chegou-se a um teor ótimo de superplastificante de 0,4% para as duas granulometrias, e foi observado que a variação da granulometria do resíduo pouco influenciou nas propriedades da mistura, provavelmente por ambos serem suficientemente finos. Esse estudo pode ser encontrado de forma detalhada em Silva *et al*, 2011. Para dar continuidade ao estudo, na produção do concreto, optou-se por escolher a granulometria mais fina (0,3mm), novamente considerando os benefícios que os finos trazem para a autoadensabilidade, de acordo com a literatura, e adotou-se um valor 0,5% de superplastificante, considerando que o agregado graúdo e as fibras serão adicionados, fato que aumenta o teor necessário.

Seguindo o método de Gomes (2009), definiu-se o esqueleto granular para a produção do concreto. A brita e a areia foram misturadas em um recipiente de volume conhecido, variando-se a relação entre elas, e pesadas, de forma a encontrar a relação que apresentasse maior massa unitária. A combinação ótima encontrada foi de 50% de brita e 50% de areia.

Conhecidas tais porcentagens, as relações a/c = 0,5 e r/c = 0,5 (as mesmas usadas na argamassa, baseadas nos trabalhos de Lisboa (2004), e Góis (2010)), a relação sp/c adotada (0,5%), o teor de sólidos do superplastificante, e as massas específicas de cada material, foi possível definir a dosagem do concreto através do mesmo procedimento adotado por Lisboa (2004). A dosagem do concreto encontra-se na Tabela 4.

Tabela 4- Dosagem do concreto em massa (Kg)

DOSAGEM (KG)	
Cimento	19,61
Areia	39,2
Brita	39,75
RBMG	9,8
Superplastificante	0,3155
Água Inicial	7,652
Água Restante	1,913
Água de Absorção Areia	0,2352
Água Absorção Brita	0,75

O teor de fibras foi determinado utilizando-se o conceito de volume crítico, o qual depois da ruptura da matriz mantém no concreto a mesma capacidade portante. O cálculo foi feito com a equação 3, proposta por Bentur e Mindess (1990), onde: σ_{mu} é a resistência última da matriz à tração direta na ausência de fibras; τ_{fu} é a máxima tensão tangencial de atrito, e l/d é o fator de forma das fibras.

$$V_{f(crit)} = 2 \frac{\sigma_{mu}}{\tau_{fu}} \frac{1}{l/d}$$

Equação 1- Volume crítico das fibras

Segundo Pasa (2007), pode-se adotar os seguintes valores de referência: $\sigma_{mu} = 3\text{MPa}$ e $\tau_{fu} = 7\text{MPa}$. Substituindo na equação 3, temos $V_{crit} = 2,5\%$ para as fibras curtas, e $V_{crit} = 1,1\%$ para as fibras longas, em relação ao volume total de concreto.

Foi produzido um concreto sem fibras para servir de referência, e duas análises foram feitas para levar em conta a influência do fator de forma e do teor das fibras separadamente. No primeiro caso, foram produzidos 4 concretos, utilizando os 2 teores encontrados (1,1 e 2,5%) e variando-se o fator de forma (M33 e M80). No segundo caso, foram produzidos 3 concretos com as fibras curtas (FF=33), variando-se o teor de fibras em 2% (M-2), o volume crítico 2,5% (M-2,5) e 3% (M-3). A dosagem em massa das fibras para os teores utilizados encontra-se na Tabela 5. A introdução desses valores caracteriza-se como uma adição de fibras, considerando o volume total de concreto, e não uma substituição.

Tabela 5- Dosagem das fibras em massa (Kg)

Teor das fibras (%)	Massa (kg)
1,1	1,3
2	2,4
2,5	3,0
3	3,6

Os concretos foram produzidos na betoneira da seguinte forma:

1. Misturou-se brita, areia e suas águas de absorção por 30 segundos.
2. Colocou-se o cimento e o RBMG e misturou-se por mais 30seg.
3. 80% da água foi adicionada e misturada por 1,5min.
4. Adicionou-se o superplastificante e o restante da água e misturou-se por 2min.
5. Nos concretos fibrosos, as fibras foram adicionadas aos poucos durante essa última etapa.

Com todos os traços foram feitos os ensaios de espalhamento, funil V e caixa L, de acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010), com o objetivo de verificar se o concreto possuía características autoadensáveis e analisar a influência das fibras no estado fresco, embora o desenvolvimento objetive-se apenas um concreto fibroso fluido. Foram moldados também corpos de prova para os ensaios de resistência mecânica - tração por compressão diametral e compressão simples, com rompimento aos 7 dias.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os ensaios realizados com o concreto de referência, sem fibras, apresentaram os resultados mostrados na Tabela 6. A última linha refere-se aos limites prescritos na NBR 15823 (ABNT, 2010), para que o concreto seja considerado autoadensável.

Tabela 6- Resultados do concreto de referência (MR)

MR	Espalhamento (SF)				Funil V	Caixa-L			Compressão 7dias (MPa)				Tração 7dias (MPa)			
	D1(cm)	D2(cm)	Dfinal	T50(s)	Tv (s)	H1(cm)	H2(cm)	H2/H1	CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média
	89	91	90	0,75	5,67	9	8,9	0,99	25,3	23,0	22,7	23,7	2,5	2,4	2,2	2,4
CAA			55<D<85		T<25			>0,8								

As células em verde indicam que os valores estão dentro dos limites preconizados, ao contrário das vermelhas. Ressalta-se entretanto que esses limites se referem a um concreto autoadensável. Nota-se que o concreto sem fibras apresentou-se demasiadamente fluido, de acordo com o comportamento esperado, já que o teor de superplastificante adicionado foi dosado considerando a diminuição de fluidez que as fibras causam na mistura.

Os resultados dos concretos fibrosos foram divididos para a análise da influência do fator de forma e do teor das fibras.

3.1. Influência do Fator de forma

Os ensaios realizados com os concretos em que o fator de forma foi variado apresentaram os resultados expostos na Tabela 7.

Tabela 7- Resultado dos ensaios nos concretos com variação do fator de forma.

	Espalhamento (SF)				Funil V	Caixa-L			Compressão 7dias (MPa)				Tração 7dias (MPa)			
	D1(cm)	D2(cm)	Dfinal	T50(s)	Tv (s)	H1(cm)	H2(cm)	H2/H1	CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média
M33-1,1	84	83	83,5	0,8	3,68	8	8	1	21,1	18,7	19,6	19,8	2,0	2,2	2,2	2,1
M80-1,1	80	86	83	2,4	4,92	-	-	-	27,8	26,5	26,8	27,0	2,9	2,9	3,2	3,0
M33-2,5	79	73	76	2	19,36	9,2	5,5	0,60	30,8	32,6	31,7	31,7	3,5	2,8	3,1	3,1
M80-2,5	83	79	81	1,3	23	-	-	-	23,7	23,0	27,2	27,0	3,0	3,2	3,2	3,1

Para os concretos com as fibras longas (M80), não foram registrados valores para o ensaio da caixa L porque houve total bloqueio de passagem do concreto pelas armaduras, como mostra a Figura 2.

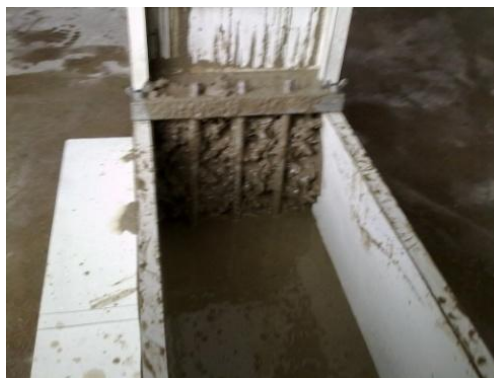


Figura 2- Bloqueio de passagem dos concretos M80 pela caixa L.

Em relação ao concreto de referência, os dois fatores de forma tiveram pouca influência na fluidez quando as fibras foram incorporadas em baixo teor. No teor de 2,5%, a diminuição da fluidez já se apresentou de forma significativa, assim como a presença de segregação. Pode-se observar que o tempo necessário para passar pelo funil V, ao contrário do esperado, chegou a diminuir no concreto de teor 1,1, comparado ao MR. Isso pode ter acontecido pelo aumento do peso próprio do concreto com fibras. Os valores desse ensaio mostram que a variação do fator de forma, quando as fibras são incorporadas em baixos teores, não prejudica a capacidade de passagem através do estreitamento de uma seção. Os ensaios da caixa L mostram uma forte influência das fibras na habilidade de passagem por armaduras do concreto. Enquanto que o concreto de referência apresentou-se praticamente autonivelante, sem bloqueio algum, os concretos fibrosos apresentaram bloqueio quanto

maior o fator de forma. Tal propriedade só não foi prejudicada no M33 com o menor volume de fibras.

De acordo com a NBR 15823 (ABNT, 2010), todos os concretos ensaiados encontram-se na classe de espalhamento SF3 (76 a 85cm), considerados apropriados para estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm). Nesse caso, há uma incompatibilidade com os resultados do ensaio de caixa L, já que os concretos não apresentaram bom comportamento na passagem por armaduras. Isso nos leva a reflexão de que o concreto produzido não é autoadensável e a caixa L pode não ser indicada para a análise de concretos fibrosos, necessitando-se de estudos a respeito.

As resistências à compressão e tração aumentaram nos concretos fibrosos, como era previsto, com exceção do M33-1,1. Isso pode ter acontecido devido a uma possível incorporação de ar, erro comum nos CRFA já que as fibras absorvem água do concreto, ou uma amostra ruim coletada para o corpo de prova. Nota-se que o ganho de resistência à compressão foi maior que o da tração, ao contrário da teoria, provavelmente porque o ensaio realizado foi o de tração por compressão diametral, e não o de tração na flexão, onde as fibras essencialmente atuam.

Numa análise comparativa entre os fatores de forma das fibras, nota-se que com o teor de fibras 1,1%, a fluidez, representada pelo ensaio de espalhamento e funil V, diminuiu um pouco com o aumento do comprimento das fibras, mas não de forma significativa. Com o teor 2,5, os resultados apontaram o M80 como sendo mais fluido que o M33, ao contrário do esperado, se analisado o ensaio de espalhamento. Na verdade, espalhamento foi maior e o T_{50} menor no M80 devido a uma forte desagregação dos materiais componentes do concreto, fazendo com que a pasta se espalhasse totalmente enquanto que os agregados e a fibra ficassem no meio da circunferência, como mostra a Figura 3. Essa segregação do concreto também é notada no ensaio de funil V, em que o tempo aumentou com o fator de forma, devido ao bloqueio no estreitamento da seção provocado pelos agregados.



Figura 3- Ensaio de espalhamento para o concreto M80- 2,5.

No teor 1,1%, as resistências aumentaram ao aumentar-se o fator de forma das fibras, como previsto, devido ao seu maior comprimento de ancoragem. Já no teor 2,5%, o M80 apresentou perda de resistência em relação ao M33. Isso porque, ao não apresentar características autoadensáveis, a concretagem dos corpos de prova não foram bem executadas, apresentando falhas consideráveis, como mostra a

Figura 4.



Figura 4- Corpos de prova do M80- 2,5.

3.2. Influência do teor volumétrico

Os ensaios realizados com os concretos em que o teor de fibras (curtas) adicionado foi variado apresentaram os resultados expostos na Tabela 8

Tabela 8- Resultado dos ensaios nos concretos com variação do teor de fibras.

	Espalhamento (SF)				Funil V	Caixa-L			Compressão 7dias (MPa)				Tração 7dias (MPa)			
	D1(cm)	D2(cm)	Dfinal	T50(s)	Tv (s)	H1(cm)	H2(cm)	H2/H1	CP1	CP2	CP3	Média	CP1	CP2	CP3	Média
M-2,0	74	76	75	1,01	25,31	10	8,5	0,85	24	28,2	27,8	26,7	2,7	2,8	2,7	2,7
M-2,5	79	73	76	2,01	19,36	9,2	5,5	0,60	30,8	32,6	31,7	31,7	3,5	2,8	3,1	3,1
M-3,0	83	80	81,5	1,45	7,55	10,4	8,2	0,8	28,5	29	25	27,5	3	3,3	3,1	3,1

Comparando-se com o concreto de referência, mais uma vez a teoria é confirmada com o aumento da resistência e diminuição da trabalhabilidade com a adição de fibras. Esta tendência também é confirmada para o aumento do teor de fibras até o volume crítico.

O concreto M-3 apresentou-se inconsistente em seus resultados, pois, de acordo com os ensaios realizados, o mesmo apresentou-se mais fluido que os demais concretos fibrosos, e com um escoamento muito rápido do ensaio do funil V. Tal fato pode ter ocorrido porque ocorreu grande segregação na mistura, e a porção coletada para os ensaios foi basicamente de pasta, ficando os agregados e as fibras no fundo da betoneira. A forte ocorrência de segregação e perda de homogeneidade da mistura sugere que o volume crítico de fibras não deve ser ultrapassado, principalmente em concretos fluidos.

Comparando-se o M-2 ao M-2,5, nota-se que o aumento do teor apresentou pouca influência na fluidez das misturas, apresentando resultados semelhantes. O M-2 apresentou-se muito próximo da autoadensabilidade, ficando somente o ensaio do funil V fora do intervalo, por um acréscimo de tempo não significativo. O M-2,5, o qual representa o volume crítico calculado, também apresentou resultados satisfatórios, exceto para o ensaio da caixa L, caracterizando uma dificuldade de passagem por armaduras, e um início de presença de segregação.

Após uma pesquisa aprofundada na literatura, encontraram-se indicações de usos de teores até 2% para a incorporação de fibras em concretos autoadensáveis. Segundo vários autores, e comprovados nos ensaios realizados, o concreto fluido não apresenta uniformidade com elevados teores de fibras, apresentando forte segregação e prejudicando suas propriedades. Por isso, sugere-se que sejam realizados novos ensaios, variando-se os teores em intervalos menores, e somente até o volume crítico de 2,5%. Com isso, objetiva-se obter

uma tendência mais representativa para a avaliação da influência da variação do teor de fibras nas propriedades do concreto e encontrar um valor percentual para a diminuição do valor do volume crítico das fibras, para a incorporação em concretos autoadensáveis

4. CONCLUSÕES

Através das análises dos resultados obtidos, foi possível concluir que o fator de forma e o teor de fibras incorporadas ao concreto fluido tem bastante influência no comportamento do mesmo nos estados fresco e endurecido. Ao aumentar o fator de forma e o teor volumétrico das fibras, a resistência mecânica tende a aumentar, acompanhado, porém, de uma diminuição da trabalhabilidade.

Quanto maior o comprimento das fibras, menor a fluidez do concreto, principalmente em volumes elevados, mas essa propriedade é mais afetada com o aumento do teor. Em teores elevados, além da diminuição da fluidez, devem haver prejuízos na homogeneidade do concreto. O aumento do fator de forma das fibras provoca principalmente uma forte segregação dos agregados, fator que prejudica a habilidade de passagem do concreto fluido.

Nota-se que os melhores resultados, mais próximos das características do CAA e com boas resistências, foram obtidos com fibras curtas e com adição menor ou igual ao volume crítico. Isso confirma a tendência de utilização de fibras com fatores de forma pequenos para concretos fluidos, e sugere uma nova análise do volume crítico dos concretos reforçados com fibras, quando sua consistência é fluida.

Além disso, os resultados sugerem um estudo da aplicabilidade do ensaio da caixa L para concretos fluidos, já que os resultados não foram satisfatórios mesmo em baixos teores de fibras adicionadas. Os resultados obtidos não significam que o concreto fibroso não possa atender à característica de capacidade de passagem por armaduras, principalmente em estruturas delgadas e com baixas taxas de armadura como é o caso de pavimentos. Outros ensaios precisam ser estudados para tal fim.

A maioria dos concretos produzidos, aqueles com traços intermediários, apresentaram resultados satisfatórios e com potencial para as aplicações propostas. Para a utilização do concreto fibroso fluido ecoeficiente, são necessários estudos de aplicação para que seja analisados tanto o comportamento do concreto no elemento, quanto o custo-benefício de utilizá-lo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE (ACI). *Guide for Specifying, Proportioning, Mixing, Placing, and Finishing Steel Fiber Reinforced Concrete (ACI 544.3R-93)*. In: Manual of concrete Practice. Detroit, Michigan, v. 90. 1993.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15530:2007 Fibras de aço para concreto. Especificação*. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15823:2010 Concreto auto-adensável*. Rio de Janeiro, 2010.

BENTUR, A.; MINDESS, S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. Elsevier Science Publishers Ltd, reprinted by Spon Press, 472pg., 1990.

CONSELHO EMPRESARIAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - BCSD PORTUGAL. Website. Acessado em 24/10/2012. Disponível em: <http://www.bcsdportugal.org/eco-eficiencia/102.htm>

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com Fibras de Aço*. 69 p. Boletim Técnico, Série BT/PCC/260– Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

FIGUEIREDO, A. D. *Concreto com Fibras*. Concreto: Ciência e Tecnologia. G. C. Isaia. 1. Ed. São Paulo. 2v, Cap. 37. IBRACON, 2011.

GÓIS, F.A.P. *Avaliação experimental do comportamento de concreto fluido reforçado com fibras de aço: Influência do fator de forma e da fração volumétrica das fibras nas propriedades mecânicas do concreto*. 142p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2010.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R. *Métodos de dosagem de concreto autoadensável*. Pini, São Paulo, 2009.

LISBÔA, E. M. *Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação de Engenharia da Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MACAFERRI. *Fibras como Elemento Estrutural para Reforço de Concreto - Manual Técnico*. São Paulo, 2008.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*. IBRACON, São Paulo, 2008.

NUNES, M. C.; OLIVEIRA, D. T. DA S.; SILVA, E. B.; BARBOZA, A. S. R. *Comportamento reológico de pastas cimentícias fluidas com adição de resíduo do beneficiamento de mármore e granito em diferentes granulometrias*. In: *II Encontro Regional do IBRACON em Sergipe, Aracaju, 2011*.

PASA, V. S. *Análise do comportamento de estruturas de concreto reforçado com fibras de aço via método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

SILVA, E. B.; OLIVEIRA, D. T. DA S.; NUNES, M. C.; BARBOZA, A. S. R. *Análise experimental da influência da granulometria do resíduo na produção de argamassas fluidas com características auto adensáveis*. In: ENARC 2011 – II Seminário Sobre Resíduos Sólidos na Construção Civil, Maceió, 2011.