

# Evaluating the applicability of rheometry in steel fiber reinforced self-compacting concretes

## *Avaliação da aplicabilidade de reometria para concretos autoadensáveis com fibra de aço*

R. S. ALFERES FILHO <sup>a</sup>  
alferes.ricardo@gmail.com

F. K. MOTEZUKI <sup>a</sup>  
fmote@usp.br

R. C. O. ROMANO <sup>a</sup>  
rcorjau@gmail.com

R. G. PILEGGI <sup>a</sup>  
rafael.pileggi@gmail.com

A. D. FIGUEIREDO <sup>a</sup>  
antonio.figueiredo@usp.br

### Abstract

The use of self-compacting concrete in civil construction industry presents various advantages, since the material shows adequate workability during fresh state. When fiber reinforcement is used, there are changes in its behavior that require attention. This study aimed to evaluate the applicability of rheological tests and the correlation between its results and those obtained with regular tests used to control SCCs. In that sense, different mixtures of SCC with different steel fiber contents were produced in order to be analyzed in the experimental program described. Rotational rheology tests and slump flow and L-box tests were performed. The results showed that slump flow test did not present good correlations with rheological parameters. On the other hand, this test was able to point out the risk of segregation of the mixtures with higher fiber contents. A good correlation was obtained between the L-box test results and rheological parameters. The L-box was also able to show loss in the passing ability of SCC related to the rise of plastic viscosity and yield stress. These tests also presented a good correlation with the rheological parameters when lower fiber contents were used. Although the rheometry test was unable to evaluate these problems, this kind of test gave more objective and reliable data on variations in rheological parameters related to the increase of fiber content, and proved to be a more reliable test to this kind of application, especially when applied together with the conventional tests.

**Keywords:** self-compacting concrete, steel fibers, I box, slump flow, rheology.

### Resumo

O uso de concreto autoadensável na construção civil apresenta várias vantagens, desde que o material apresente trabalhabilidade adequada no estado fresco. Quando é utilizado o reforço com fibras, há alterações nas propriedades no estado fresco, que nem sempre são detectadas com a utilização de ensaios convencionais normalizados. Este estudo buscou avaliar o potencial de aplicação de ensaios reológicos e a relação com os ensaios comumente utilizados para aceitação de CAAs. Com essa finalidade, foram elaboradas misturas de CAA com fibras de aço em diferentes teores e realizaram-se ensaios de reometria rotacional, espalhamento e Caixa L. Os resultados mostraram que o ensaio de espalhamento não apresentou boa correlação com os parâmetros reológicos medidos, mas permitiu detectar o risco de segregação dos concretos com maior teor de fibras. O ensaio de caixa L obteve boa correlação com os valores obtidos no reômetro, demonstrando perda na habilidade passante em função do aumento da viscosidade plástica e tensão de escoamento, especialmente para baixos teores de fibras, mas apresentou bloqueio entre barras para grandes quantidades de fibras. O ensaio de reometria forneceu dados mais objetivos sobre variação nos parâmetros reológicos, apontando um comportamento pseudoplástico do concreto utilizado no trabalho. Ficou claro o aumento da viscosidade com o aumento do teor de fibras como uso da reometria, fornecendo informações confiáveis mesmo para maiores teores de fibras. Isto comprova que a reometria é um ensaio bastante adequado para este tipo de aplicação.

**Palavras-chave:** concreto autoadensável, fibras de aço, caixa I, espalhamento, reologia.

<sup>a</sup> Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Civil, Escola Politécnica, São Paulo, SP, Brasil.

### 1. Introdução

A utilização do concreto autoadensável (CAA) traz alterações importantes no processo de moldagem do concreto ao alterar seu comportamento no estado fresco. Uma vez que o CAA dispensa o uso de vibração, acaba por facilitar a moldagem de peças com maior densidade de armadura ou com geometrias mais complexas [1]. Foi apontado por Aydin [2] que esta tecnologia ainda possibilita um uso mais eficiente do reforço com fibras, pois, ao melhorar sua fluidez, viabiliza a incorporação de um maior volume de fibras no concreto fresco com a manutenção da sua trabalhabilidade. Isto é uma grande vantagem quando se busca maior resistência pós-fisuração e ganho da tenacidade do concreto, assegurando a redução da densidade de armaduras ou até a sua substituição completa para determinadas aplicações [3]. No entanto, há dúvidas quanto à capacidade do CAA manter suas condições de trabalhabilidade constantes com a adição de fibras. Isto porque, como foi apontado por alguns trabalhos, a presença das fibras resulta em alterações na consistência dos materiais cimentícios [4, 5]. O impacto dessas inserções em pasta de cimento foi avaliado por

Martinie *et al* [5] que concluíram que o aumento do teor de fibras leva ao aumento da tensão de escoamento em pastas. Os autores afirmam ainda que os resultados podem ser extrapolados para situações com argamassas e concretos. No entanto, vale ressaltar que fibras com distintas geometrias afetam de maneira diferente o concreto. Ou seja, já foi demonstrado que quanto maior for o fator de forma da fibra, maior impacto ela trará para a trabalhabilidade do material [6].

Ensaio como caixa L, espalhamento e funil V, são comumente utilizados para a caracterização desse tipo de suspensão devido à praticidade das técnicas, porém somente resultam em informações pontuais sobre as características no estado fresco. Além disso, os resultados não são expressos em parâmetros físicos [7, 8], e há estudos que apontam que estes ensaios não são apropriados para o reforço de concreto com fibras [4]. Entretanto, eles têm sido utilizados como base de análise da trabalhabilidade de CAA reforçado com fibras em vários trabalhos experimentais [4, 9-13]. Com a utilização de reometria rotacional, por outro lado, as características dos CAAs reforçados com fibra são avaliadas em diferentes condições de solitação podendo servir como critério físico

Figura 1 - Fluxograma do programa experimental

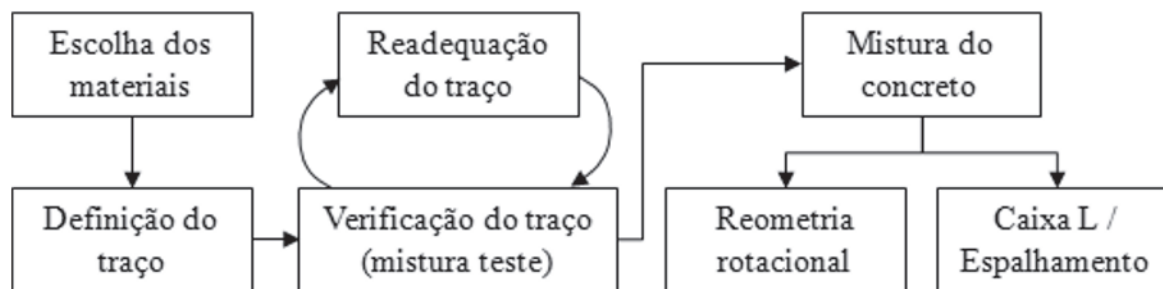
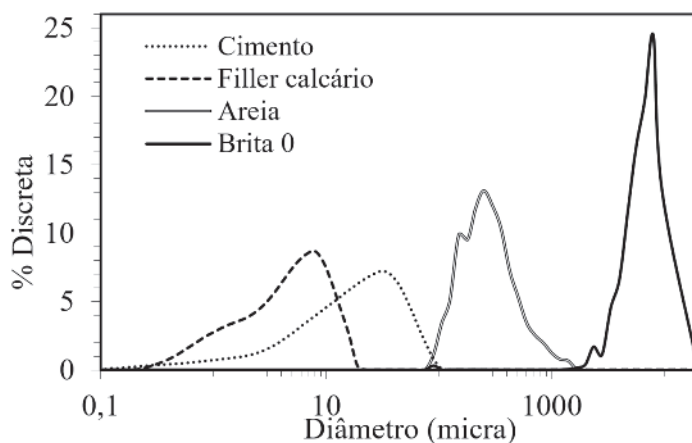


Figura 2 - Distribuição granulométrica dos materiais e ilustração da fibra



**Tabela 1 – Proporções das matérias primas utilizadas no concreto**

Matéria-prima	Traço em massa	Consumo (kg/m <sup>3</sup> )	ASE (m <sup>2</sup> /g)	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )
Cimento	1,0	522	1,2	2,96
Filler calcário	0,12	63	3,6	2,69
Areia rosa	2,0	1044	0,6	2,40
Brita 0	1,2	626	0,1	2,60

para compreensão dos resultados obtidos pelos ensaios mono-ponto [14]. Desta forma, este trabalho experimental foi realizado com o objetivo de avaliar o potencial de aplicação da reometria rotacional planetária na avaliação da trabalhabilidade de CAA reforçado com fibras de aço e correlacionar seus resultados com os obtidos em ensaios convencionais aplicados aos CAAs.

## 2. Programa experimental

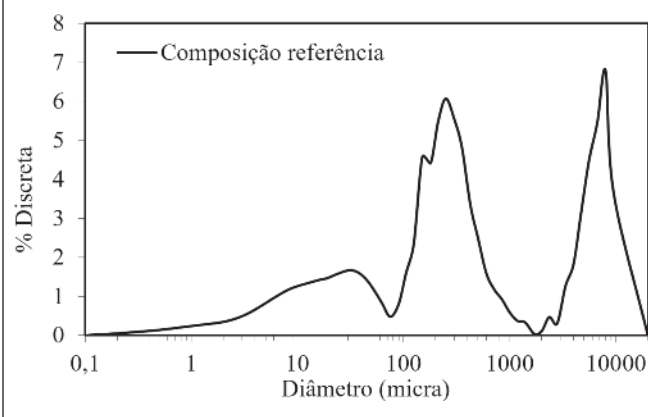
Para atender aos objetivos deste estudo, foi selecionada uma única fibra de aço, variando-se então o teor aplicado da mesma. Isto possibilitou tornar evidentes as alterações no comportamento do concreto fresco influenciado pelo teor de fibra. Os teores foram mantidos abaixo de 120 kg/m<sup>3</sup>. Outros estudos abordaram a influência de distintas fibras no comportamento reológico do concreto. O trabalho foi então desenvolvido segundo o planejamento apresentado na Figura [1].

As diferentes misturas produzidas para este estudo foram misturadas em betoneira convencional como detalhado adiante. Após a mistura, o material foi destinado aos ensaios convencionais e de reometria rotacional que foram executados simultaneamente. Estes ensaios estão mais bem descritos no item 3. Adotou-se a realização simultânea dos ensaios para assegurar que não houvesse influência pela perda do efeito do aditivo superplastificante ou da reação de hidratação do cimento nas propriedades no estado fresco.

### 2.1 Materiais

Os concretos autoadensáveis foram formulados com brita 0, areia rosa, cimento Portland composto (CP II F 32, Votoran) e filler calcário (Profine 1, Provale), com distribuições granulométricas, determinadas por análise dinâmica de imagem em um equipamento Qicpic (Sympatec), conforme ilustrado na Figura [2].

Foram utilizadas fibras de aço com comprimento de 30 mm e fator de forma 47,6 com ganchos nas pontas (Figura [2]). Optou-se por fibras curtas seguindo-se a recomendação empírica tradicional para o comprimento mínimo de fibra, que deve ser maior ou igual ao dobro do diâmetro máximo do agregado graúdo ( $L_{\text{fibra}} \geq 2\phi_{\text{máx}}$ )

**Figura 3 – Distribuição granulométrica da composição**

que, neste estudo, foi de 9,5mm, visando torná-la mais eficiente para o reforço [15].

Além das matérias-primas descritas, foi utilizado também um teor fixo de aditivo superplastificante de alto desempenho à base de policarboxilato de sódio, Grace ADVA 585. Este aditivo é normalmente aplicado para estabilização das partículas mais finas e redução da quantidade de água de amassamento.

### 2.2 Composição do concreto

A formulação base dos concretos utilizados neste trabalho é apresentada na Tabela [1], desenvolvida a partir de composições encontradas em literatura para o mesmo tipo de concreto, com teores semelhantes de fibra [13, 16]. Não foi utilizado, portanto, um método convencional de dosagem.

Na mesma tabela, são ilustrados também a área superficial específica (ASE), quantificada em um equipamento Belsorp Max (Bel Japan) e a densidade real de cada material, determinada em

**Tabela 2 – Teores de fibras utilizados nas misturas**

Mistura		1	2	3	4
Teor de fibra	(kg/m <sup>3</sup> )	0	20	80	120
	(% vol)	0,00%	0,25%	1,02%	1,53%

Figura 4 – Caixa L após realização do ensaio



um picnômetro de gás He (Quantachrome MVP 5DC).

A distribuição granulométrica resultante na composição é ilustrada na Figura [3] e a relação água/cimento de 0,4 foi mantida constante para todas as misturas.

A Tabela [2] fornece os valores de consumo de fibras em  $\text{kg/m}^3$  e os correspondentes teores de fibras em volume utilizados no experimento. A escolha dos valores buscou contemplar uma faixa ampla de variação, para que fosse mais evidente a mudança no comportamento, em função do aumento da quantidade de fibras.

### 2.3 Mistura dos concretos

A mistura dos concretos foi realizada em betoneira convencional de eixo inclinado com capacidade de 120 l, o procedimento adotado foi o mesmo para todas as misturas para evitar qualquer influência de variáveis intervenientes originadas na produção das misturas e seguiu a sequência abaixo:

1. Umedeceu-se a betoneira;
2. Colocaram-se os agregados graúdos;
3. Adicionou-se 50% da água e ligou-se a betoneira por 1 minuto;
4. Colocou-se o agregado miúdo e misturou-se por mais 1 minuto;
5. Adicionaram-se os finos, cimento e filler, e misturou-se por mais 1 minuto;
6. O restante da água e o aditivo foram adicionados na sequência;
7. Durante os 5 minutos seguintes, as fibras foram colocadas aos poucos, visando evitar a formação de embolamentos.

Após a completa mistura, o concreto foi separado em partes para a utilização nos ensaios de caixa-L, espalhamento e reometria rotacional, realizados concomitantemente, conforme apontado no item 2.

## 3. Métodos de ensaio

### 3.1 Caixa-L

O ensaio de Caixa L busca avaliar a habilidade passante do concreto autoadensável, que é a capacidade de fluir entre espaços estreitos e barras da armadura e manter a capacidade de adensamento sem apresentar separação de fases, causada pelo bloqueio de seus materiais [17]. A manutenção das barras durante ocorreu pela intenção de avaliar uma condição de trabalhabilidade particularmente importante para elementos estruturais em que se empregue sistema híbrido de reforço, ou seja, o uso conjunto de fibras

Figura 5 – Medição do diâmetro de espalhamento



e barras de aço. Esta alternativa técnica vem sendo empregada em uma série de aplicações [18-20] com o objetivo de otimizar o comportamento mecânico do concreto. No entanto, também é interessante avaliar a ação combinada de fibras e barras em termos de trabalhabilidade.

Na realização deste ensaio, foi feito o preenchimento da coluna prismática com 600 mm de altura, com aproximadamente 12 litros de concreto. Após 60 segundos de repouso, foi aberta a comporta que libera a passagem do concreto, restringida por três barras metálicas com diâmetros de 12 mm espaçadas a cada 40 mm. A lateral da caixa permite observar o comportamento do concreto no fluxo pelo equipamento, conforme ilustrado na Figura [4].

O resultado deste ensaio consiste em uma relação entre a espessura da camada de concreto atingida na extremidade do vão e aquela obtida na sua parte inicial, junto às barras. Quanto maior o valor, maior terá sido a habilidade passante apresentada pelo concreto. Os valores considerados aceitáveis para concreto autoadensável situam-se entre 0,8 e 1 [17].

### 3.2 Espalhamento

O ensaio de espalhamento, ou *slump flow*, apresenta semelhanças com o ensaio de abatimento do cone de Abrams, e é utilizado para avaliar a capacidade de fluidez do concreto não confinado, sob ação do peso próprio [21].

Para este estudo, foi realizado o preenchimento do cone invertido com a intenção de tornar o fluxo inicial de saída mais orientado e restritivo. Assim, embora esta posição difira da sugerida por algumas normas e haja a indicação de que há pouca influência oriunda da orientação do cone [22], optou-se pela condição mais crítica de avaliação. Com a retirada do cone e o espalhamento do concreto, mediram-se os diâmetros em dois eixos perpendiculares entre si, conforme mostrado na Figura [5]. Não há consenso na literatura

técnica acerca dos limites de espalhamento. Para este trabalho, foram considerados os valores de EFNARC [17], que variam de 650 a 800 mm, limites semelhantes aos considerados por Akcay e Tasdemir [23].

Embora o resultado do espalhamento seja expresso apenas pelo diâmetro medido, este ensaio permite analisar visualmente a ocorrência de segregação de materiais ou exsudação da água do concreto em fluxo livre. Contudo, este é um indicativo qualitativo e, portanto, não quantificável para a aceitação ou não de um concreto [17], mas pode ajudar na avaliação da adequação das misturas utilizadas.

### 3.3 Reometria rotacional

Para o ensaio de reometria, foi utilizado um reômetro tipo planetário construído na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, ilustrado na Figura [6a]. O ensaio consiste no cisalhamento de um volume de aproximadamente 18 litros de material, utilizando-se uma cuba metálica e hélices adaptadas para o ensaio em concreto, especialmente projetadas para diminuição da segregação.

Durante os primeiros 80 segundos do ensaio, o material foi re-homogeneizado, para evitar que o teste fosse realizado com material sedimentado, visto que a mistura foi realizada na betoneira e o concreto foi deslocado até o equipamento. Em seguida, foi aplicado um ciclo de cisalhamento, variando-se a velocidade de rotação de 50 a 1000 rpm e retornando a 50 rpm. Em cada pátamar adotado a velocidade foi mantida por 7 segundos, conforme procedimento ilustrado na Figura [6b].

Os resultados obtidos foram compilados em um gráfico de torque em função da rotação aplicada. O torque de escoamento e a viscosidade plástica foram obtidos a partir do modelo reológico de *Bingham*, aplicado na etapa de desaceleração da rotação, ou seja, após a imposição da maior condição de cisalhamento e

**Figura 6 – Reômetro utilizado para o ensaio nos concretos (a) e programação utilizada para os testes (b); as setas indicam os períodos de aceleração e desaceleração da rotação**

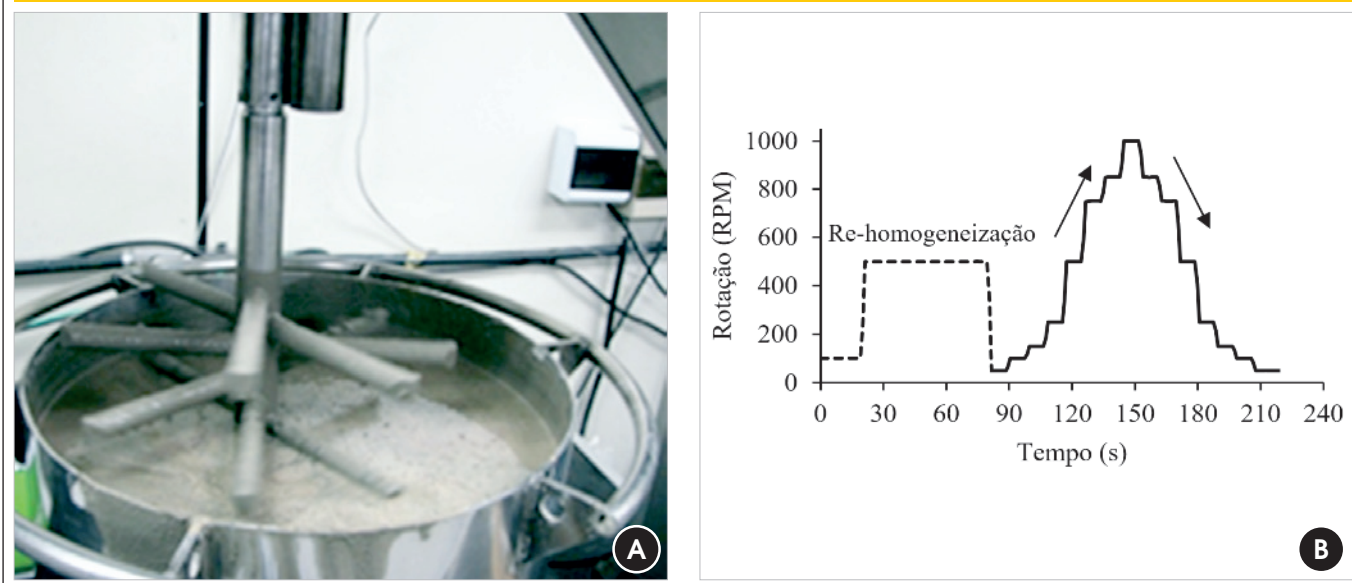


Tabela 3 – Resultados dos ensaios normalizados

Teor de fibra (kg/m <sup>3</sup> )	0 (Ref)	20	80	120	Limites (EFNARC)	
					Mín	Máx
Caixa - L (h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )	1,0	1,0	0,74	0	0,8	1,0
Espalhamento (mm)	785	795	775	780	650	800

melhor dispersão das partículas. Os parâmetros foram então determinados através da inserção de uma linha de tendência linear para estes pontos sendo o coeficiente angular da reta um parâmetro para a avaliação da viscosidade e a interseção com o eixo das ordenadas um parâmetro de avaliação da tensão de escoamento.

## 4. Resultados e discussões

### 4.1 Ensaios monoponto (Caixa L e espalhamento)

Os resultados obtidos para os ensaios de caixa-L e espalhamento são apresentados na Tabela [3] em função do teor de fibra utilizado. Como parâmetro de avaliação foi adotado o critério de aceitação proposto pela EFNARC [17].

No caso dos resultados do ensaio de Caixa-L, à medida que se aumentou o teor de fibra, diminuiu a relação entre as alturas, ou seja, aumentou a diferença entre a altura de concreto no início e no final do canal. Isto comprova que as fibras dificultam a mobilidade do CAA. Assim, somente os concretos de referência e com 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra de aço apresentaram resultados dentro dos limites recomendados segundo EFNARC [17]. Dessa forma, apenas estes concretos poderiam ser considerados como autoadensáveis por este critério.

Para o teor de 80 kg/m<sup>3</sup>, obteve-se a relação  $h_2/h_1$  de 0,74, inferior

ao limite mínimo recomendado para aplicação como autoadensável [17]. Foi constatado bloqueio parcial do material provocado pelas barras metálicas (Figura [7a]), resultando em heterogeneidade na distribuição das fibras pelo concreto fresco.

Para o teor de 120 kg/m<sup>3</sup> (Figura [7b]) o impacto da presença das barras foi ainda maior e não houve fluxo considerável, observando-se a quase totalidade de material retido nas barras, com uma pequena quantidade de pasta ao longo do canal e com altura desprezível. O resultado, portanto, foi quantificado como uma relação  $h_2/h_1$  igual à zero.

Estas observações são importantes pelo fato de não ser possível avaliar a capacidade passante do material em ensaios reológicos que utilizam sistemas planetários como o utilizado neste estudo. Assim, acaba-se por demonstrar que o material não é aplicável para teores muito altos. Resultado semelhante foi obtido no estudo de Dhonde, Mo e Hsu [24].

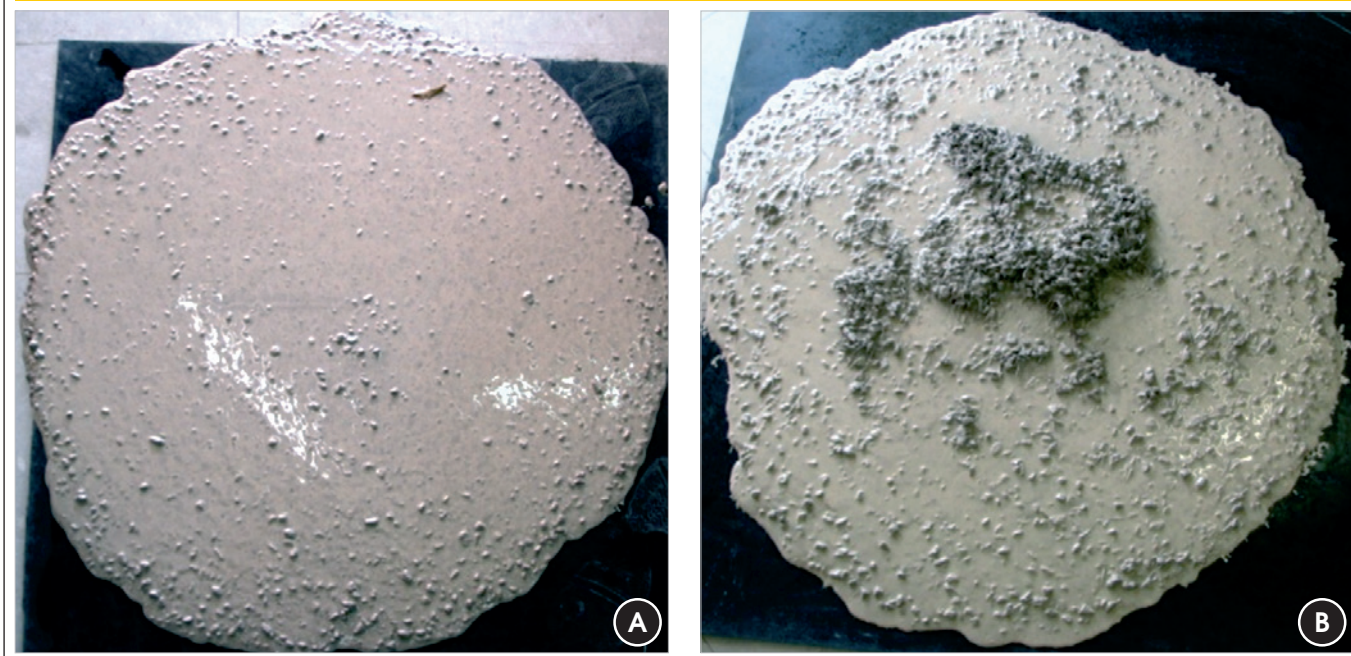
Todavia, foi mantida a configuração conforme indica a EFNARC [17], semelhante à dos concretos com menor teor de fibras, para critérios de comparação do método, mas cabe apontar a possibilidade de execução deste ensaio sem a utilização de barras, quando se busca avaliar a fibra como reforço único.

A partir dos ensaios de espalhamento, diferente do que fora observado nos resultados da caixa L, todos os concretos avaliados estariam dentro da faixa recomendada para autoadensáveis [17],

Figura 7 – Resultado após ensaio da Caixa L para os teores de fibras de 80 kg/m<sup>3</sup> (a) e 120 kg/m<sup>3</sup> (b)



**Figura 8 – Espalhamento do concreto de referência (esq.) e do com fibras (120 kg/m<sup>3</sup>) (dir.)**



se fosse levado em consideração somente o diâmetro de espalhamento. Os resultados convergem com o trabalho de Akcay e Tasdemir [23] no qual os diâmetros obtidos não apresentaram grandes variações, mesmo com grande quantidade de fibras.

No entanto, foi notável a segregação no concreto com maior teor de fibras, em comparação ao concreto de referência, conforme visto na Figura [8], com a ocorrência de aglomeração na porção central durante o espalhamento, devido ao travamento das fibras entre si, criando uma barreira para o escoamento dos agregados graúdos.

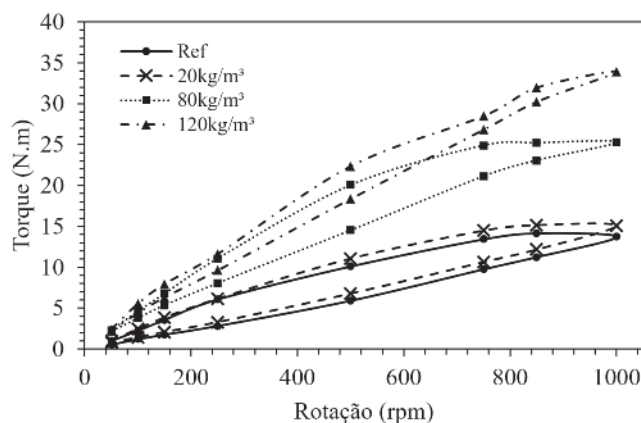
Com isso, foi observada considerável separação de fases e fluxo dos materiais mais finos (e parte dos mais grossos) para as bordas, similar ao que fora observado por Grünewald e Walraven [25]. Embora seja descrito em norma técnica, o critério para a definição da segregação durante o ensaio de espalhamento é muito subjetivo e depende do bom senso dos responsáveis durante a interpretação do resultado do ensaio, mesmo sendo um critério para a aceitação para o CAA. No caso dos concretos com 120 kg/m<sup>3</sup> de fibra esse fenômeno foi muito nítido, mas nos demais casos essa observação não ficou muito evidente. Logo, devido às restrições normativas, tal concreto não deveria ser tratado na classe de autoadensável.

A partir destes resultados, é possível ilustrar as limitações no ensaio de espalhamento, pois o parâmetro de medida pode ser afetado por fatores como a aglomeração de fibras, fato que, embora possa ser visualizado, não é quantificado. Além disso, os valores medidos não foram influenciados significativamente pelo teor de fibra, mostrando que o ensaio é incapaz de avaliar o efeito da mesma na mobilidade do compósito. Dessa forma, apesar de poder avaliar o potencial risco de segregação do material, o que foi impossível para este ensaio de reometria, o ensaio de espalhamento passa a ter um caráter mais qualitativo que quantitativo para a avaliação do CRF.

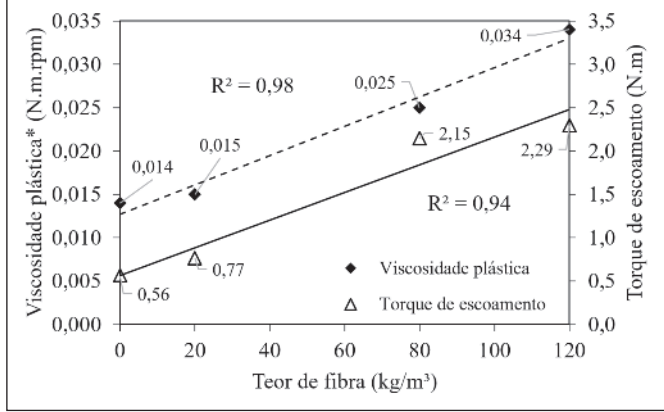
Independente do teste que foi utilizado até aqui, os ensaios mono-ponto avaliam o concreto somente em uma única solicitação, na qual o material flui somente em função da ação da gravidade, reduzindo seus resultados a um número que deve estar dentro de uma faixa de valores. Esta forma de avaliação, embora muito utilizada para a qualificação dos concretos, não possibilita a análise de variações no comportamento sob condições distintas de cisalhamento.

Além disso, os resultados dos ensaios de espalhamento e caixa L podem ser influenciados por fatores como a velocidade de

**Figura 9 – Perfis de cisalhamento dos concretos em função da velocidade de rotação**



**Figura 10 - Viscosidade plástica e torque de escoamento dos concretos em função do teor de fibras**



execução [26]. Isto os torna extremamente dependentes da qualidade do técnico encarregado de sua execução, o que não acontece com o ensaio de reometria. Dessa forma, pode-se afirmar também que o desenvolvimento dos concretos através destes ensaios seja baseado no empirismo e na experiência dos profissionais que o utilizam.

**4.2 Ensaio de reometria**

No ensaio de reometria rotacional é possível a obtenção de resultados mais completos e não pontuais, como os apresentados até agora. Com a aplicação de distintas velocidades de rotação, há a resposta do material em diferentes solicitações, na forma de torque de cisalhamento, conforme ilustrado na Figura [9].

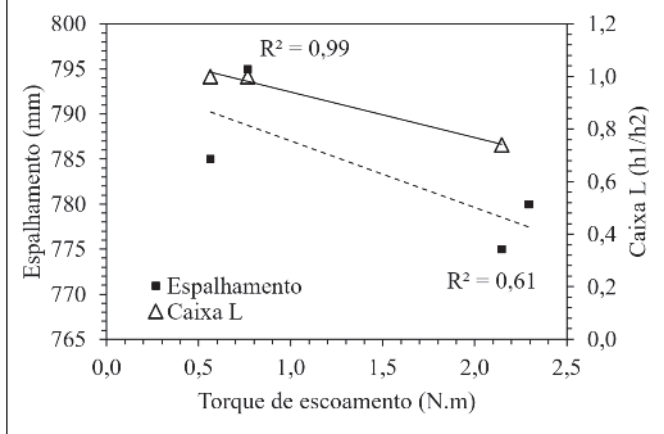
Todos os concretos apresentam comportamento reológico de materiais pseudoplásticos, e perfil de tixotropia positiva (área de histerese positiva).

A utilização de 20 kg/m³ de fibra não apresentou impacto significativo no perfil de cisalhamento, mas com teores maiores ou iguais a 80 kg/m³ a influência foi muito clara. O aumento no torque de cisalhamento foi proporcional ao aumento no teor de fibras, devido ao aumento na frequência de contato entre as partículas e alteração das linhas de fluxo.

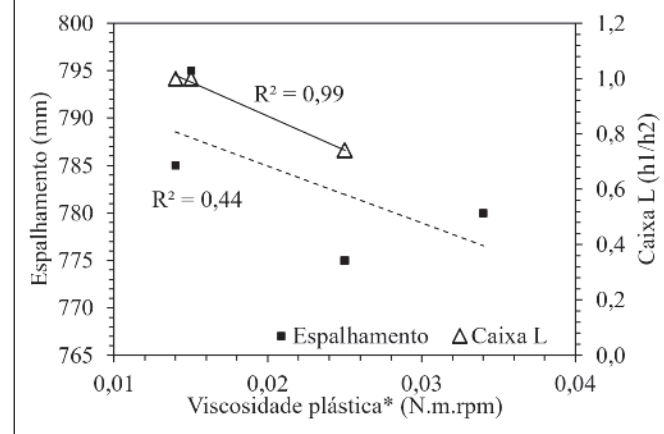
Os resultados são apresentados na Figura [10] e apontam para uma tendência de crescimento da viscosidade plástica diretamente proporcional com o aumento do teor de fibra. É importante ressaltar que a viscosidade apresentada não está de acordo com o sistema internacional de medidas, por isso, é definida neste tipo de ensaio como uma relação entre o torque de cisalhamento e a rotação.

Kuder *et al.* [14] afirmam que, com pouca adição do reforço, prevalece o efeito de quebra estrutural do material sólido. A partir do momento em que se atinge um volume crítico de fibras, predomina-se o efeito de intertravamento mecânico. Essas informações podem servir para explicar o ocorrido durante o ensaio de espalhamento, onde houve aglomeração de fibras no interior da suspensão e espalhamento da fase mais fina para as bordas do concreto. No entanto, de acordo com as medidas deste ensaio, todos os concretos eram similares e estavam em conformidade com a referida norma técnica. Por isso, a associação de métodos e utilização de ensaios que permitem a obtenção de respostas mais completas são alternativas para o desenvolvimento mais coerente e correto das formulações dos concretos e previsão das propriedades no estado fresco. Isto fica especialmente claro neste experimento pelo fato do ensaio de reometria ter sido incapaz de indicar os riscos de problemas com a capacidade passante e possibilidade de ocorrência de segregação que os outros ensaios foram capazes de demonstrar. Assim, não houve nenhum sinal de segregação durante o ensaio do reômetro, tornando-o capaz de quantificar o efeito da adição das fibras em todos os teores utilizados. Isto mostra a eficiência do equipamento

**Figura 11 - Correlação entre o torque de escoamento, obtido a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante**



**Figura 12 - Correlação entre a viscosidade plástica, obtida a partir de reometria rotacional, e o espalhamento e a habilidade passante**





utilizado que garante a manutenção da homogeneidade do concreto reforçado com fibras durante todo o ensaio. Isto é especialmente eficaz quando se analisa as condições de mistura do material. Por outro lado, a capacidade passante ainda não é parametrizável diretamente por um ensaio de reometria.

### 4.3 Análise combinada dos diferentes resultados de ensaios

As informações obtidas pelos métodos de espalhamento e caixa L são muito limitadas e pontuais, avaliando apenas uma condição de cisalhamento aplicada. Por outro lado, os dados de reometria permitem observar claramente o perfil reológico, a alteração na viscosidade plástica e no torque de escoamento dos concretos em função do aumento da quantidade de fibras. Isso não significa que os ensaios pontuais não podem ser utilizados, somente que resultam em informações mais qualitativas e limitadas para os concretos com fibras avaliados. Dessa forma, o uso complementar das distintas metodologias pode conferir uma avaliação mais abrangente e eficaz do comportamento do material.

Na sequência são apresentadas as correlações entre os resultados obtidos nos ensaios monoponto e os resultados de reometria rotacional. Deve ser salientado que o resultado do ensaio da caixa L com o máximo teor de fibra foi retirado das análises conjuntas, visto que a configuração utilizada para o ensaio não foi adequada ao volume de fibras utilizado.

Na Figura [11] é ilustrada a correlação entre o torque de escoamento obtido a partir de reometria rotacional e o espalhamento e a habilidade de adensamento e na Figura [12] é ilustrada a correlação das mesmas variáveis com a viscosidade plástica.

O espalhamento apresentou coeficiente de correlação mais baixo quando avaliado em função dos parâmetros medidos por reometria rotacional, enquanto a caixa L apresentou  $R^2$  mais significativo tanto com a viscosidade quanto com a tensão de escoamento dos concretos.

Conforme já estudado por Damineli *et al.* [7], a partir de análise do perfil reológico de concretos dosados em central através de reometria aplicada em campo, o espalhamento de concretos autoadensáveis tem boa correlação com a tensão de escoamento, porém baixa relação com a resistência do fluido ao fluxo.

No caso deste estudo, os resultados não convergiram com o obtido pelos autores, pois a presença das fibras atuou dificultando o fluxo livre, gerando barreiras para a movimentação conjunta dos materiais.

Isto se deve à configuração dos ensaios, pois o espalhamento avalia apenas o fluxo livre de concreto, enquanto o reômetro avalia o material em situação de confinamento, havendo interação com os bordos e com a hélice, aproximando-se mais das características apresentadas na caixa L.

Desta forma, pode se dizer que a perda da habilidade passante em função do aumento do teor de fibras, medida a partir do ensaio de caixa L, pode ser explicada tanto pelo aumento da tensão de escoamento quanto da viscosidade do concreto, mensuradas a partir do ensaio de reometria rotacional.

A reometria, por sua vez, mostrou-se mais sensível a variações na quantidade de fibras do concreto, detectando alterações inclusive na adição de 20 kg/m<sup>3</sup> de fibra, além de não ter apresentado limitação para a quantidade de 120 kg/m<sup>3</sup> de fibra. Pois, para o ensaio de caixa L, na forma como foi apresentado neste

estudo, há uma quantidade crítica de fibras a partir da qual há limitação em sua aplicação.

Parâmetros como torque de escoamento, área de histerese e viscosidade plástica somente puderam ser quantificados através da reometria, e foram válidos para todos os valores de fibras utilizados, mostrando que há boa aplicabilidade de ensaios reológicos para concretos autoadensáveis reforçados com fibras, no entanto, devido ao fato de o reômetro manter o concreto constantemente em movimento, não houve possibilidade de se avaliar o potencial de segregação do concreto.

## 5. Conclusões

O entendimento da influência da presença de fibras no concreto autoadensável é de grande importância para viabilizar o uso da tecnologia. Os ensaios monoponto comumente utilizados podem apresentar limitações e falta de relações com parâmetros físicos. A reometria rotacional aparece como recurso adicional para esta investigação, avaliando vários níveis de solicitação e oferecendo a possibilidade de relação com os ensaios monoponto para compreensão dos parâmetros reológicos predominantes nestes ensaios. O resultado do espalhamento apresentou pouca variação em função do teor de fibras e classificou todas as misturas como autoadensáveis segundo a norma utilizada. Por isso, não foi observada boa correlação nem com a tensão de escoamento, nem com a viscosidade. No entanto, a análise visual dos resultados permitiu observar a ocorrência de segregação em fluxo livre nos teores de 80 e 120 kg/m<sup>3</sup>, embora esta seja uma avaliação subjetiva.

O ensaio de caixa L, por outro lado, mostrou boa correlação com parâmetros reológicos e detectou perda na habilidade passante com o aumento de fibras, associada ao aumento na viscosidade plástica e na tensão de escoamento. Além disso, foi capaz de demonstrar claramente as dificuldades passantes do composto quando o teor de fibras era elevado, o que não é possível de avaliar com o ensaio de reometria. Isto demonstra claramente que a utilização conjunta dos ensaios pode proporcionar uma avaliação mais abrangente da aplicabilidade do material. Além disso, há também a possibilidade de realização do ensaio sem uso das barras quando não for prevista a necessidade de lançamento em estruturas com reforço híbrido.

O resultado obtido através da reometria possibilitou uma leitura mais abrangente das características do concreto, com variação de parâmetros básicos acordo com a quantidade de fibras e o torque utilizado. Isto permitiu a classificação do comportamento pseudoplástico e de tixotropia positiva, além da quantificação da alteração da viscosidade plástica e torque de escoamento de acordo com a quantidade de fibras. Por outro lado, não foi possível obter informações sobre segregação em fluxo livre e as limitações da capacidade passante do material quando maiores teores de fibras foram utilizados.

Sendo assim, pode se dizer que os ensaios monoponto, apesar de apresentarem limitações, são capazes de fornecer informações complementares que auxiliem no conhecimento de algumas propriedades do concreto utilizado, aprofundando a análise de aplicação do material. Por outro lado, por permitir melhor leitura dos parâmetros reológicos independentemente do teor de fibras utilizado, é possível afirmar que ensaios reológicos são aplicáveis e seus resultados são essenciais para a avaliação do concreto autoadensável reforçado com fibras de aço. Por isso, é muito

interessante a utilização conjunta destes ensaios de modo a se obter uma avaliação mais abrangente do material de modo a minimizar os riscos de insucesso na aplicação dos mesmos.

## 6. Agradecimentos

Os autores agradecem a CAPES e a FAPESP pelo apoio financeiro durante a execução do trabalho.

## 7. Referências

- [1] MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: Microstructure, properties and materials.*, New York, 2006, McGraw-Hill, 3 ed. 2006
- [2] AYDIN, A. C. Self compactability of high volume hybrid fiber reinforced concrete. *Construction and Building Materials*, v.21, n.6, 2007, p. 1149–1154.
- [3] GRÜNEWALD, S. Performance-based design of self-compacting fibre reinforced concrete, 2004, 165p Tese (Doutorado) - Delft University of Technology, Netherlands.
- [4] EL-DIEB, A. S.; REDA TAHA, M. M. Flow characteristics and acceptance criteria of fiber-reinforced self-compacted concrete (FR-SCC). *Construction and Building Materials*, v.27, n.1, 2012, p. 585–596.
- [5] MARTINIE, L.; ROSSI, P.; ROUSSEL, N. Rheology of fiber reinforced cementitious materials: classification and prediction. *Cement and Concrete Research*, v.40, n.2, 2010, p. 226–234.
- [6] FIGUEIREDO, A. D; CECCATO, M. R. Workability Analysis of Steel Fiber Reinforced Concrete Using Slump and Ve-Be Test. *Materials Research*, p. 1, 2015.
- [7] DAMINELI, B. L. et al. Análise do perfil reológico de concretos dosados em central através de reometria aplicada em campo. IV Congreso Internacional de Tecnología Del Hormigon. Mar del Plata. IV Congreso Internacional de Tecnología Del Hormigon, 2010.
- [8] ROUSSEL, N. Correlation between Yield Stress and Slump: Comparison between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results. *Materials and Structures*, 2007, p. 501–509.
- [9] ABUKHASHABA, M. I.; MOSTAFA, M. A.; ADAM, I. A. Behavior of self-compacting fiber reinforced concrete containing cement kiln dust. *Alexandria Engineering Journal*, v.53, n.2, 2014, p. 341–354.
- [10] MADANDOUST, R.; RANJBAR, M. M.; YASIN MOUSAVI, S. An investigation on the fresh properties of self-compacted lightweight concrete containing expanded polystyrene. *Construction and Building Materials*, v.25, n.9, 2011, p. 3721–3731.
- [11] MEHDIPOUR, I. et al. Effect of workability characteristics on the hardened performance of FRSCCMs. *Construction and Building Materials*, v.40, 2013, p. 611–621.
- [12] NURUDDIN, M. F.; CHANG, K. Y.; MOHD AZMEE, N. Workability and compressive strength of ductile self-compacting concrete (DSCC) with various cement replacement materials. *Construction and Building Materials*, v.55, 2014, p. 153–157.
- [13] SAHMARAN, M.; YURTSEVEN, A.; OZGUR YAMAN, I. Workability of hybrid fiber reinforced self-compacting concrete. *Building and Environment*, v.40, n.12, 2005, p. 1672–1677.
- [14] KUDER, K. G. et al. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, v.37, n.2, 2007, p. 191–199.
- [15] FIGUEIREDO, A. D. Concreto com fibras. In: *Concreto: Ciência e tecnologia*. 2 ed. São Paulo, 2011, Instituto Brasileiro do Concreto (IBRACON), p. 1327–1365.
- [16] FERRARA, L.; PRISCO, M.; LAMPERTI, M. G. L. Identification of the stress-crack opening behavior of HPFRCC : the role of flow-induced fiber orientation. 2010.
- [17] EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete; specification, production and use. [s.l.: s.n.]. Available in: [www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf](http://www.efnarc.org/pdf/SCCGuidelinesMay2005.pdf).
- [18] FIGUEIREDO, A. D. ; ESCARIZ, R. C. . Drainage concrete pipes with hybrid reinforcement. In: *Second RILEM International Conference on Strain Hardening Cementitious Composites*, 2011, Rio de Janeiro. *Strain Hardening Cementitious Composites (SHCC2-Rio)*. Babneux: RILEM Publications S.A.R.L., 2011. p. 391-398.
- [19] DE LA FUENTE, A. et al. Experiences in Barcelona with the use of fibres in segmental linings. *Tunnelling and Underground Space Technology*, v.27, n.1, 2012, p. 60–71.
- [20] MAKITA, T.; BRÜHWILER, E. Tensile fatigue behaviour of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete combined with steel rebars (R-UHPFRC). *International Journal of Fatigue*, v.59, 2014, p. 145–152.
- [21] MELO, K. A. Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário. 2005, 183p Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.
- [22] FARES, G. Effect of slump cone orientation on the slump flow time (T50) and stability of sustainable self-compacting concrete containing limestone filler. *Construction and Building Materials*, v.77, 2015, p. 145–153.
- [23] AKCAY, B.; TASDEMIR, M. A. Mechanical behaviour and fibre dispersion of hybrid steel fibre reinforced self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, v.28, n.1, 2012, p. 287–293.
- [24] DHONDE, H.; MO, Y.; HSU, T. Passing Ability Tester for Self-Consolidating Concrete. *Journal of ASTM International*, 2006, p. 100330.
- [25] GRÜNEWALD, S.; WALRAVEN, J. C. Parameter-study on the influence of steel fibers and coarse aggregate content on the fresh properties of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Research*, v.31, 2001, p. 1793–1798.
- [26] NGUYEN, T. L. H.; ROUSSEL, N.; COUSSOT, P. Correlation between L-box test and rheological parameters of a homogeneous yield stress fluid. *Cement and Concrete Research*, v.36, n.10, 2006, p. 1789–1796.