

# Influence of the addition sequence of PVA-fibers and water on mixing and rheological behavior of mortars

## *Influência da sequência de adição de fibras e da água no comportamento de mistura e reológico de argamassas com fibras de PVA*

M. S. DE FRANÇA<sup>a</sup>  
marylinda.de.franca@lme.pcc.usp.br

F. A. CARDOSO<sup>a</sup>  
fabio.cardoso@lme.pcc.usp.br

R. G. PILEGGI<sup>a</sup>  
rafael.pileggi@lme.pcc.usp.br

### Abstract

The mixing process of fiber-containing cementitious suspensions is a crucial factor to obtaining a good dispersion of fibers and guarantee adequate mechanical performance of the hardened products. The addition of fibers into the suspension causes reduction of the fluidity of the system due to factors inherent to the fibers, the matrix and their interaction. During mixing, these interactions make dispersion and homogenization processes more difficult due to the formation of fibers - particles agglomerates. Conventional techniques to assess workability of mortars are inadequate to evaluate the rheological behavior of fiber-reinforced systems, in which parameters like viscosity and yield stress are not completely taken into account. Therefore, this work employs rotational rheometry to evaluate the influence of fiber and water addition sequences on mixing and rheological behavior of mortars containing Polyvinyl Alcohol (PVA) fibers. Constant test parameters were: mixing time of 317s; impeller velocity 126.5 rpm; water flow 128g/s. A constant mix design was used with a water content of 16%wt, and a 0.2%vol of fibers were added to the reference composition. Four mixing sequences were studied: S1 and S2 are based on the addition of fibers at different stages of the mixing process; while in S3 and S4 not only the fibers are added at different stages, but also the water addition is performed in two steps (25% first and 75% latter). Results showed that it is possible to optimize the mixing step of fiber-containing systems by changing the moment of fiber addition into the mixture. The introduction of fibers after mixing the dry mortar with water, when it already had achieved its fluidity point, demanded a lower mixing effort and produced a more flowable material.

**Keywords:** mixing sequence, rheology, PVA fibers.

### Resumo

O processo de mistura de suspensões cimentícias contendo fibras é uma etapa crucial para que se obtenha uma boa distribuição das fibras, garantindo os benefícios que as mesmas podem trazer ao desempenho mecânico. A introdução das fibras na suspensão tende a provocar redução na fluidez. Isso ocorre devido a uma série de fatores inerentes às fibras, à matriz e, à interação entre elas. Durante a mistura, essas interações tornam a dispersão e homogeneização mais difícil devido à formação de aglomerados de partículas e fibras. Técnicas convencionais de avaliação da trabalhabilidade são insuficientes para avaliar o comportamento reológico de sistemas reforçados com fibras porque parâmetros como viscosidade e tensão de escoamento não são considerados em sua totalidade. Assim, este trabalho propõe utilizar técnicas de reometria rotacional, para avaliar a influência da sequência de adição da fibra e da água na mistura e no comportamento reológico de argamassas. O tempo de mistura é mantido fixo em 317s, a velocidade do equipamento é 126,5rpm e a taxa de adição de água 128g/s para todas as sequências. Uma mesma composição granulométrica foi usada fixando o teor de água em 16% e o de fibra em 0,2%. Quatro sequências de mistura foram estudadas: S1 e S2 são baseadas na adição das fibras em diferentes estágios do processo de mistura, enquanto na S3 e S4, não só as fibras são adicionadas em diferentes estágios, mas também a água é adicionada em duas etapas (primeiro 25% e depois 75%). Os resultados indicaram que é possível otimizar o preparo de sistemas com fibras de PVA modificando etapas simples do processo como o momento de introduzir as fibras. Entre as sequências avaliadas concluiu-se que introduzir as fibras após a homogeneização prévia dos materiais, no ponto de fluidez, tende a produzir sistemas mais fluidos e com menor esforço para mistura.

**Palavras-chave:** sequência de mistura, reologia, fibras de PVA.

<sup>a</sup> LME-PCC-POLI/USP – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP – Brasil.

## 1. Introdução

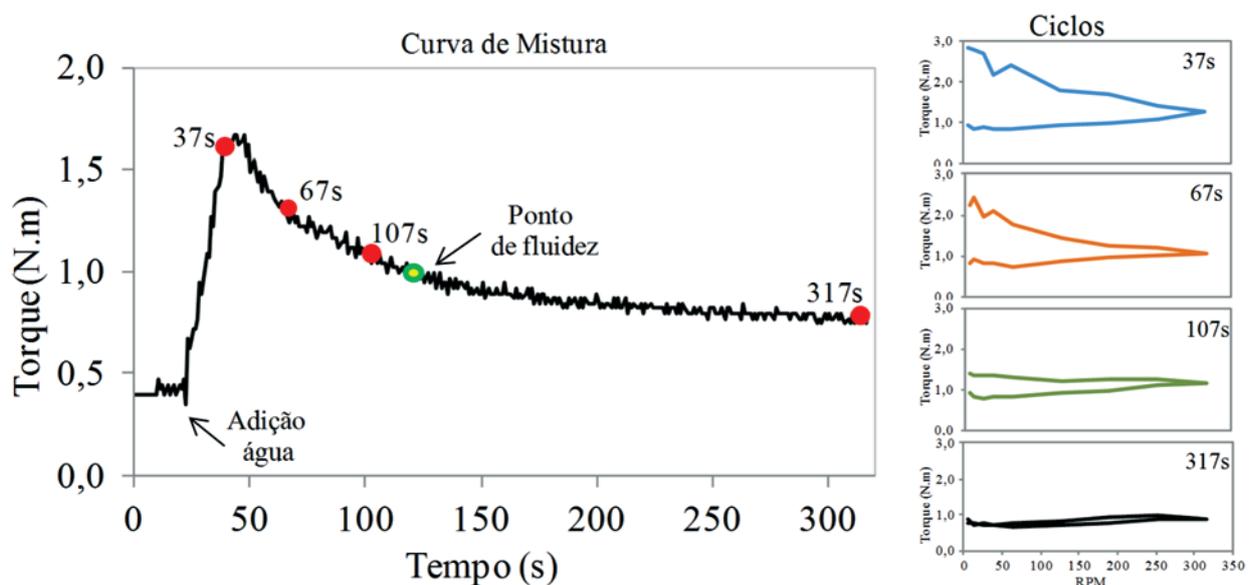
A mistura é a principal etapa de preparo de suspensões cimentícias uma vez que a adequada homogeneização e dispersão dos constituintes possibilitam que o sistema alcance todo seu potencial de desempenho no estado fresco e endurecido. O comportamento reológico do sistema, a capacidade de retenção de água, a estabilidade quanto à separação de fases são características que determinam as condições iniciais favoráveis ao desenvolvimento microestrutural adequado que terá impacto nas propriedades no estado endurecido.

Quando o líquido (água) entra em contato com as partículas sólidas ocorre a formação de aglomerados, que aumenta o esforço necessário para a mistura até que se atinja o ponto de coesão máxima, onde os esforços na mistura são mais acentuados e há competição entre as forças de formação dos aglomerados e quebra deles pelo cisalhamento da mistura. Os aglomerados são destruídos pela energia de impacto e cisalhamento fornecidos pelo equipamento de mistura, favorecendo assim a dispersão das partículas finas e agregados presentes no sistema, bem como a homogeneização destes constituintes entre si e com a água [1–6]. Os esforços que ocorrem durante o processo de mistura podem ser avaliados em reômetros capazes de monitorar os elevados níveis de torque geralmente associados ao processo de mistura de suspensões concentradas (argamassas e concretos) [1–4], ou mesmo por equipamentos equipados adequadamente para quantificar o consumo de energia [5–7], permitindo identificar o momento em que o material pode ser considerado como fluido [2,8], ou seja, o ponto de fluidez. Esse ponto pode ser avaliado na curva de mistura demonstrada na Figura 1, sendo o momento no qual os níveis de torque tendem a se estabilizar e a curva da primeira derivada tende à zero assintoticamente [2].

O monitoramento dos estágios de mistura pode ser acompanhado através de curvas que relacionam o torque com o tempo e, os ciclos de cisalhamento fornecem informações sobre o efeito da mistura no comportamento reológico, Figura 1 [9]. Em cada ponto identificado na curva de mistura, Figura 1, foi avaliado o perfil reológico pelo ciclo de cisalhamento que consiste em impor ao material, diferentes rotações, primeiro acelerando depois desacelerando. Observa-se que quanto menor o tempo de mistura maior a área entre as curvas de aceleração e desaceleração (histerese), indicando que o sistema ainda estava instável, e a mistura foi incompleta necessitando da energia adicional imposta pelos ciclos para continuar a homogeneização e dispersão dos aglomerados. Com o aumento do tempo, essa área vai diminuindo até estabilizar ou ser mínima indicando que a mistura forneceu energia suficiente para a dispersão e homogeneização das unidades móveis e o material encontra-se estável (em relação à mistura) nas condições avaliadas [9].

As fibras geralmente são incorporadas nos sistemas cimentícios com intuito de melhorar sua capacidade de reforço [10], contribuir na melhoria das propriedades dinâmicas [11,12], na resistência à fissuração por retração e resistência pós-fissuração [13] entre outros. O reforço depende das características das fibras (natureza, propriedades mecânicas, geometria), da interação delas com a matriz e, também, da dispersão das mesmas no material. Uma distribuição pobre promove pouco ou nenhum reforço, podendo até gerar defeitos em algumas regiões do composto quando há alta concentração das mesmas [14]. Existem vários tipos de fibras usadas em matrizes cimentícias: naturais, metálicas, vítreas, poliméricas e de produtos recicláveis [15]. São classificadas em função da matéria prima com a qual são produzidas, podendo ser orgânicas ou inorgânicas e, caracterizadas geometricamente pelo comprimento, pela forma e pelo diâmetro. Podem ser classificadas

**Figura 1 – Curva de mistura torque vs. tempo e perfil reológico da composição de referência obtido em diferentes tempos de mistura (adaptado (9))**



ainda entre macrofibras (diâmetro superior a 0,3mm e comprimento variando entre 30 e 60 mm) e microfibras (diâmetro da ordem de 10 a 30  $\mu\text{m}$  e comprimento entre 3 e 18mm) [16]. Em geral as microfibras são usadas para reduzir fissuras por retração e as macrofibras para objetivos estruturais [17]. Microfibras em comparação com as macrofibras tem uma vantagem no processo de fissuração porque uma maior pressão expansiva pra iniciar ou propagar a fissura é requerida devido ao seu pequeno diâmetro [18]. A introdução de fibras em matrizes cimentícias tende a provocar uma perda ou redução na fluidez do sistema. Essa perda de fluidez é associada a uma série de fatores: tipo, teor, fator de forma, distribuição, orientação, geometria, tratamento superficial e as interações fibra – fibra, fibra – parede do recipiente de mistura, fibra – matriz. Todos esses fatores tornam o comportamento reológico de suspensões com fibras bastante complexo [19,20].

Durante a mistura, essas interações relacionadas às fibras tornam o processo de dispersão e homogeneização mais difícil devido à formação de aglomerados de fibras e partículas-fibras. Na tentativa de minimizar essas perturbações da interação fibra partícula e ter uma mistura mais eficiente que consiga dispersar e homogeneizar as unidades móveis do sistema, alguns autores sugerem seus métodos e sequências de mistura para a produção do compósito. Em argamassas com fibras de polipropileno – PP – observou-se que a ordem de introdução dos materiais e o tempo de mistura são parâmetros importantes na homogeneidade da argamassa obtida [21]. Outros autores [22], indicaram a mistura das fibras com o líquido previamente à introdução dos demais materiais e concluíram que a dispersão das fibras afeta a tenacidade do compósito. Avaliou-se também a adição das fibras com os materiais secos no início da mistura e esse procedimento promoveu uma melhor dispersão da areia e das fibras [23]. Para concretos refratários com fibras de PP, os autores investigaram duas formas de processamento: (i) adição das fibras no material seco e (ii) adição após a mistura do concreto [4]. O estudo [4] concluiu que o método de adição das fibras gera diferentes níveis de cisalhamento e níveis distintos de dano à fibra. O dano é menor para fibras mais curtas e quando são adicionadas após homogeneização prévia do concreto [4]. Outra investigação também mostrou melhor resultado quando as fibras foram misturadas no estágio final do processamento, após a mistura prévia de todos os materiais com a água [18]. Compósitos cimentícios reforçados com fibras de PVA obtidos por esse método de mistura apresentaram uma distribuição mais homogênea das fibras no sistema e conseqüentemente melhorou as propriedades mecânicas além de ter diminuído a retração por secagem [24].

**Tabela 1 – Características das matérias-primas e teor na composição**

Constituintes	Área superficial BET ( $\text{m}^2/\text{g}$ )	Densidade ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )	Volume (%)
Filer	1,23	2,76	12,30
Cimento	1,43	3,10	14,50
Cal CHIII	6,15	2,49	4,50
Areia	0,27	2,79	68,70

**Figura 2 – Fibras de PVA. Foto: Mário Takeashi**



Os diferentes procedimentos de mistura são investigados/adotados na busca de uma melhor homogeneização e dispersão das fibras com o menor dano possível das mesmas, para que as fibras desempenhem sua função adequadamente e as propriedades desejadas do compósito sejam alcançadas. Nesse contexto, o trabalho tem por objetivo utilizar técnicas de reometria rotacional para avaliar a influência de diferentes sequências de mistura no comportamento de mistura e reológico de argamassas reforçadas por fibras de PVA. São propostas quatro sequências de preparo de mistura: (S1, S2) propõem a introdução das fibras em diferentes momentos da mistura; e (S3 e S4) não apenas as fibras são adicionadas em diferentes estágios, mas também a água é adicionada em duas etapas (primeiro 25% e depois 75%).

## 2. Experimental

### 2.1 Materiais

A formulação – R – estudada é composta das seguintes matérias-primas, com proporção em volume: cimento Portland CII F (14,50%), cal CH-III (4,5%), filer calcário (12,3%) e areia de pedra britada (68,7%). As composições foram preparadas em laboratório com dosagem em volume e proporção dos constituintes na Tabela 1. A relação água/materiais sólidos foi mantida fixa e igual a 0,16 para todas as misturas.

Foram utilizadas fibras de PVA de 6mm de comprimento, diâmetro de 16 $\mu\text{m}$  e densidade de 1,3  $\text{g}/\text{cm}^3$ , Figura 2. O teor de fibras em volume com relação à composição foi igual a 0,2% e comparou-se com o teor de referência 0%. As fibras foram dispersas manualmente e com auxílio de injeção de ar comprimido, colocando as fibras em um saco plástico, antes de serem incorporadas ao sistema.

### 2.2 Equipamento

O reômetro rotacional tipo planetário (Figura 3) desenvolvido na Poli-USP é utilizado nos testes. O equipamento é capaz de obter

medições reológicas de materiais pré misturados e principalmente realizar e monitorar o comportamento de mistura devido a sua alta capacidade de torque e por possuir geometria apropriada para avaliar a mistura.

Os testes são executados com velocidade controlada enquanto o sinal elétrico do motor é medido, e então, usando uma constante de calibração, é convertido em valores de torque. A geometria de mistura possui seis lâminas em configuração espiral distando 1mm das paredes e da parte inferior do recipiente de mistura.

### 2.3 Sequências de mistura

São propostas quatro sequências de mistura. As sequências de mistura S1 e S2, focam na introdução das fibras em diferentes momentos durante o processo. Na S1 as fibras são adicionadas no início junto ao material seco e na S2 as fibras são adicionadas no ponto de fluidez, após mistura prévia dos materiais. Nas sequências S3 e S4, não apenas as fibras são adicionadas em diferentes estágios, mas também o líquido é adicionado de forma fracionada em duas etapas. As sequências S3 e S4 foram baseadas em estudos prévios [1,25–27] que apontam o método de adicionar a água fracionada como eficiente na homogeneização do sistema. As sequências de mistura seguem descritas abaixo e na Figura 4.

**Sequência 1 – S1:** As fibras de PVA são dispersas manualmente e com auxílio de ar comprimido em seguida são adicionadas e homogeneizadas no material seco (4kg), dentro do saco plástico, antes do material ser colocado na cuba do reômetro para a caracterização no estado fresco. Os primeiros 20s de mistura, no reômetro, são destinados à homogeneização do material seco, até que toda água seja adicionada numa taxa de 128 g/s. A mistura continua numa velocidade de 126,5rpm até completar 317s.

**Sequência 2 – S2:** Procedimento semelhante à sequência S1, mas a argamassa é misturada sem as fibras, que são adicionadas manualmente por 10s no ponto de fluidez (100s). Este ponto foi determinado analisando a curva de mistura da sequência S1 com a mesma metodologia usada por França [2].

**Sequência 3 – S3:** O material seco é introduzido na cuba do reômetro. Após 20s de homogeneização da mistura seca, adiciona-se 25% da água numa taxa de 128 g/s, misturando 120s com esse teor. Então, adiciona-se a outra parte da água 75% na mesma taxa e a mistura continua por mais 120s. As fibras são colocadas no sistema, manualmente em 10s, nos 60s finais de mistura.

**Sequência 4 – S4:** Coloca-se o material seco na cuba. Após 20s da mistura seca, adiciona-se 25% da água na taxa de 128 g/s e mistura por 120s. Então as fibras são introduzidas manualmente no sistema em 10s e a mistura continua. Em 200s, o restante da água 75% é adicionado na mesma taxa de adição e a mistura continua até 317s.

### 2.4 Monitoramento da mistura

Amostras de 4kg da composição foram preparadas para esse estudo. Os sistemas foram misturados no reômetro rotacional planetário, Figura 3, mantendo a velocidade de mistura constante de 126,5rpm por um tempo de 317s e a água adicionada numa taxa de 128g/s. A variação do torque requerido para manter a geometria de mistura numa velocidade constante foi monitorada durante o processo, desde a mistura do material seco até o fim de cada procedimento (descrito no item 2.3), resultando em curva de mistura exemplificada na Figura 1. O esforço durante a mistura ou o trabalho equivalente é quantificado pela integral da curva torque vs. tempo.

Figura 3 – a) Reômetro rotacional tipo planetário e seus itens 1. Dispositivo rotacional; 2. Base; 3. Elevador; 4. Recipiente de mistura; 5. Geometria de mistura com 6 haeltas dispostas em espiral. b) Detalhe da geometria de ensaio com as especificações das dimensões das aletas e da cuba. Foto: Mário Takeashi

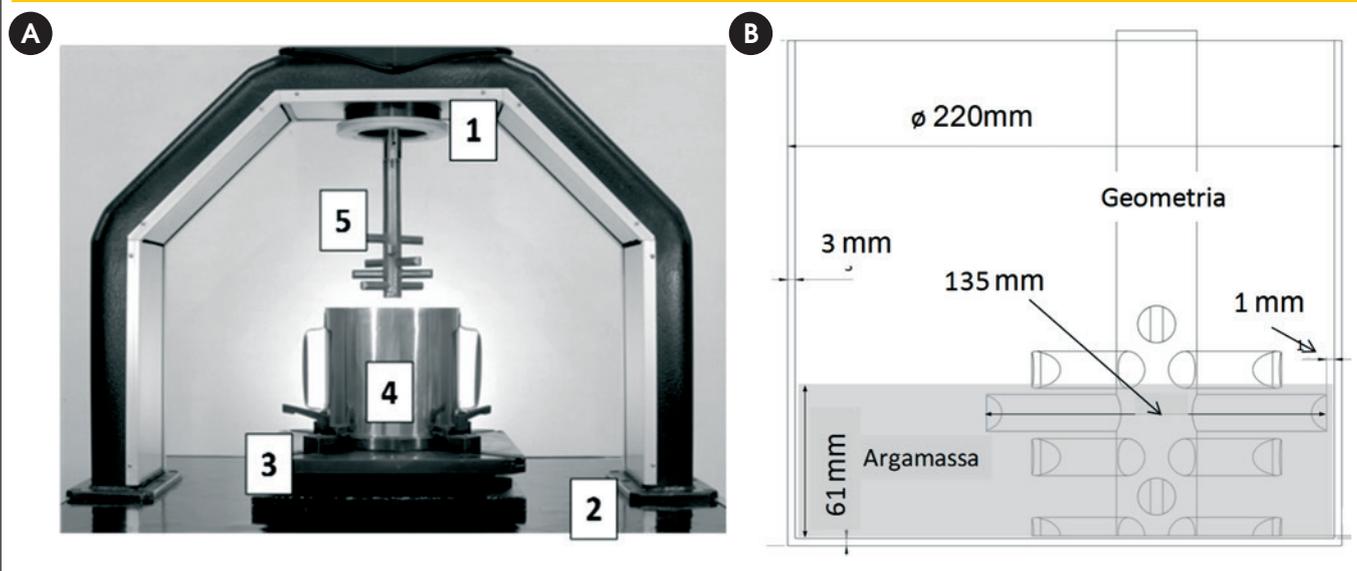


Figura 4 – Quadro resumo das seqüências de mistura

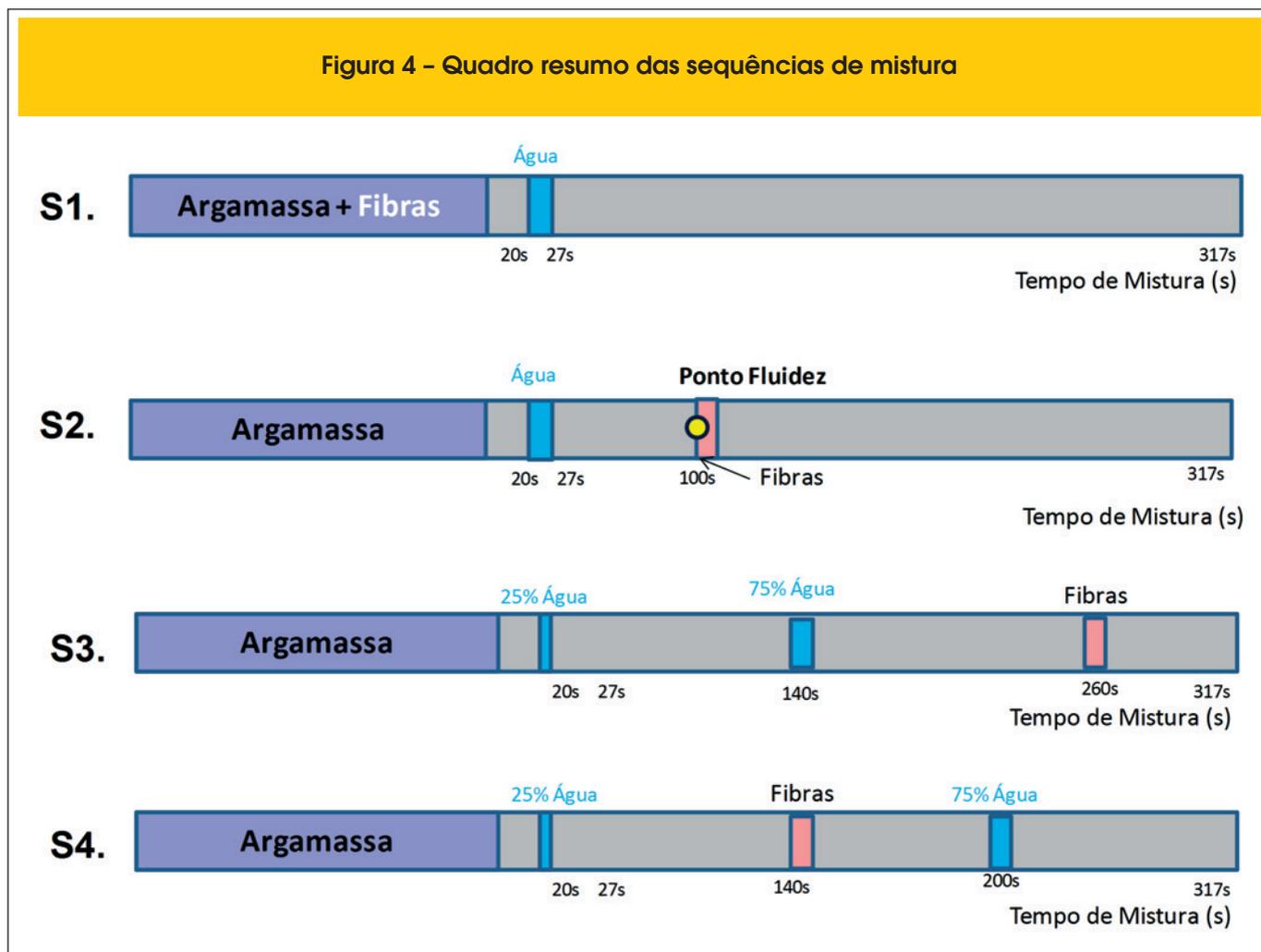
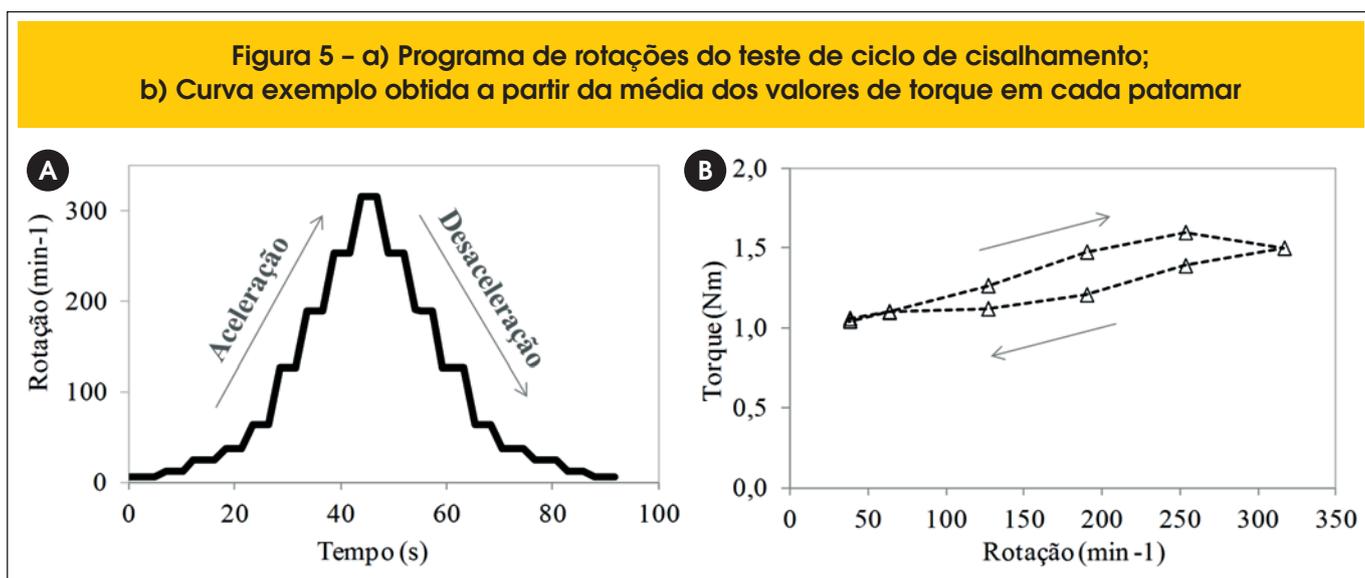


Figura 5 - a) Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento; b) Curva exemplo obtida a partir da média dos valores de torque em cada patamar



**Tabela 2 – Teor de ar das argamassas preparadas por diferentes seqüências de mistura**

0% fibra	Teor de ar (%)	0,2% fibra	Teor de ar (%)
RS1_0%	5,1	RS1_0.2%	5,6
RS2_0%	5,1	RS2_0.2%	5,8
RS3_0%	4,5	RS3_0.2%	7,8
RS4_0%	5,2	RS4_0.2%	6,5

### 2,5 Caracterização reológica

Os ciclos de cisalhamento são realizados imediatamente após a mistura no mesmo equipamento. O procedimento referente aos ciclos de cisalhamento consiste em impor ao material diferentes velocidades de rotação (6,3; 12,7; 25,3; 38; 63,3; 126,5; 190, 253; e 316 rpm) em patamares de 5 segundos, primeiro acelerando e depois desacelerando Figura 5a. Foi utilizada a média dos valores de torque de cada patamar para a confecção das curvas de torque vs. rotação Figura 5b, consideradas na análise. O comportamento reológico é obtido do ciclo de cisalhamento, assim como, a área de histerese (diferença entre as curvas de aceleração e desaceleração) que são indicativos da condição de estabilidade do material e também da eficiência de mistura de acordo com o procedimento aplicado [27].

Após a caracterização reológica o teor de ar incorporado no estado fresco é avaliado pelo método gravimétrico segundo a norma ABNT NBR 13278 (2005) [28].

## 3. Resultados e discussões

### 3.1 Teor de ar incorporado

A Tabela 2 mostra os resultados de teor de ar nas argamassas depois dos ciclos de cisalhamento. Para a composição de referência

(0% fibra), não é observado influência da seqüência de mistura no teor de ar. As argamassas contendo fibras apresentam valor pouco maior de teor de ar que as composições de referência, especialmente para as seqüências S3 e S4.

### 3.2 Curvas de mistura

A Figura 6 apresenta as curvas de mistura das seqüências avaliadas. Para as seqüências S1 e S2, Figura 6a, com a introdução da água, após 20s de mistura do material seco, ocorre aumento dos níveis de torque até que este atinge o máximo. Correspondendo ao ponto de coesão máxima da mistura. Então os níveis de torque começam a diminuir. O sistema se torna como um fluido e, o nível de torque estabiliza ou tende a se estabilizar assintoticamente.

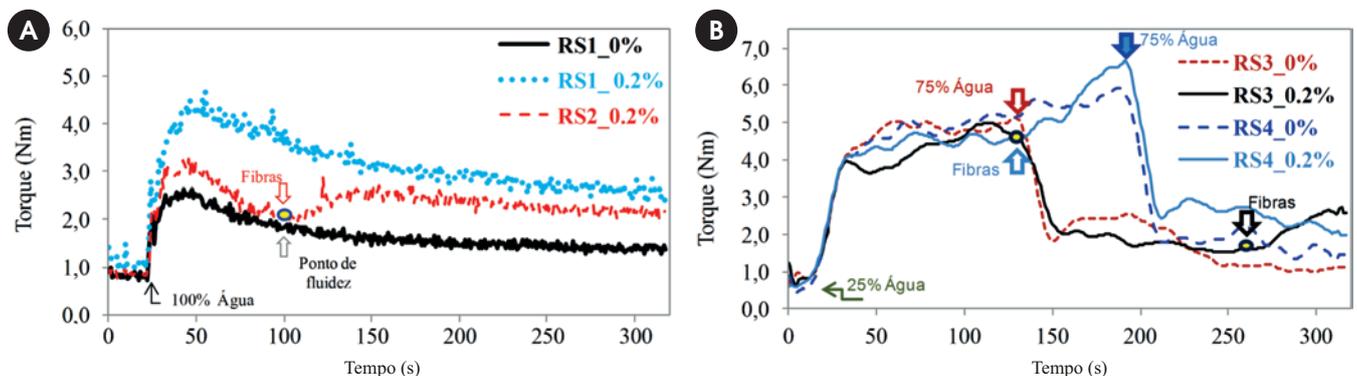
No caso das argamassas com fibras de PVA, uma forte estrutura tende a ser formada, devido ao formato não linear das fibras que são flexíveis, resultando numa maior interação entre as partículas [20]. O que causa elevação nos níveis de torque comparado ao sistema sem fibras. Outra questão é que forças atrativas de van der Waals entre as fibras criam aglomerados difíceis de dispersar na matriz cimentícia reduzindo a fluidez da mistura [29]. Além do intertravamento mecânico (entrelaçamento) entre elas.

Na seqüência S1, as fibras são misturadas no material seco e os esforços para a mistura são mais elevados que em S2. As fibras participam da formação dos aglomerados desde o início da mistura, dificultando a quebra desses e a homogeneização delas no sistema. O dano causado na fibra também pode ser maior na seqüência S1, devido ao maior tempo de exposição das fibras ao cisalhamento da mistura, comparado a seqüência S2, em que as fibras são adicionadas no ponto de fluidez.

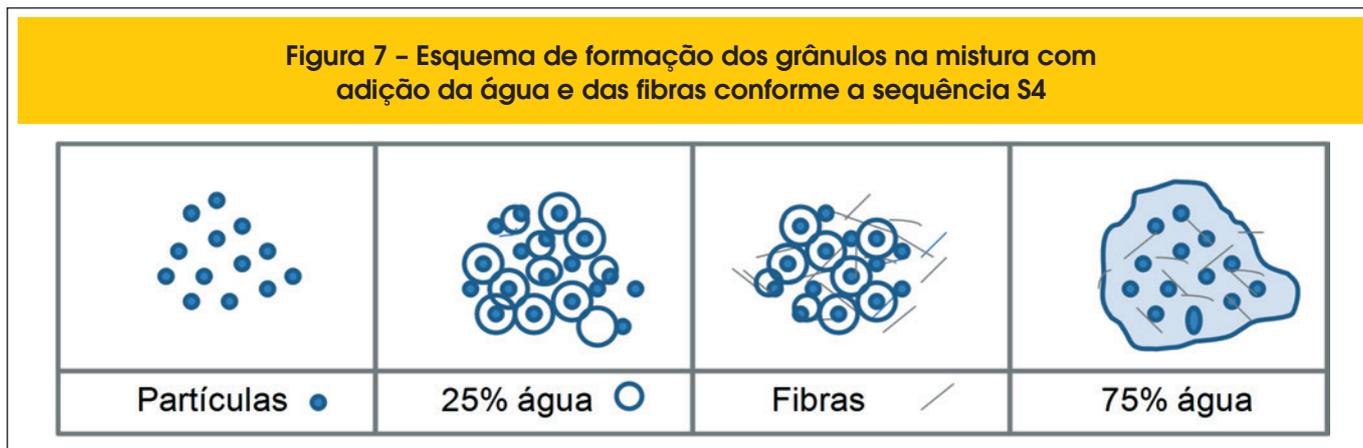
Na seqüência S2, toda água entra no sistema em uma única etapa espalhando-se, saturando o material e atingindo o ponto de coesão em poucos segundos após introdução da água, gerando esforços bem menores na mistura. E, as fibras são adicionadas quando o material está na condição de um fluido. A partir desse ponto as fibras são apenas homogeneizadas na mistura sem gerar grandes esforços, mantendo o nível de torque praticamente constante.

Nas seqüências de mistura S3 e S4 além da introdução das fibras como etapa do processo, a água é fracionada em duas partes

**Figura 6 – Curvas de mistura para as seqüências avaliadas. Sem fibras 0% e com adição de fibras de PVA 0,2%. a) Seqüências S1 e S2. b) Seqüências S3 e S4**



**Figura 7 – Esquema de formação dos grânulos na mistura com adição da água e das fibras conforme a sequência S4**



(25% e 75%) e, por conseguinte, adicionada em momentos distintos, mudando o perfil típico da curva, Figura 6b. Com a introdução de 25% da quantidade de água observa-se o aumento dos níveis de torque e subsequente permanência no platô durante os 120s de mistura com esse teor de água para sequência S3, Figura 6b. Os esforços na mistura são mais acentuados nesse estágio até que seja adicionada a parte restante da água, diminuindo drasticamente esses níveis de torque. Por fim, as fibras são adicionadas, aumentando o torque nos 60s finais de mistura.

Na sequência S4, Figura 6b, os níveis de torque aumentam com a adição da primeira parte da água mantendo o perfil semelhante ao que ocorre na sequência S3. As fibras são adicionadas no momento do platô, após 140s de mistura, o que eleva ainda mais o torque na mistura até o ponto em que toda água é adicionada no sistema, 60s após a adição das fibras, reduzindo os níveis de torque.

O torque final da mistura dos sistemas com fibras é maior tanto na sequência S4 quanto na S3. Observa-se que adicionar as fibras nos 60s finais de mistura, sequência S3, provoca um incremento considerável dos níveis de torque, sugerindo que um tempo maior de mistura com as fibras seria necessário para uma homogeneização mais efetiva delas no sistema.

O processo de adicionar 25% da água promove uma pré-homogeneização dos materiais em um baixo nível de saturação. Elevando o torque até o máximo estado de coesão na mistura ou estado de capilaridade, onde a água cria pontes capilares envolvendo as partículas, formando pequenos grânulos Figura 7. Na sequência S4 as fibras são adicionadas aumentando o nível de coesão na mistura. Na interação fibra partícula, possivelmente, as fibras farão pontes entre os grânulos (partícula + água) aumentando o tamanho deles, pelo aumento da área superficial do conjunto, o que pode justificar os maiores níveis de torque. Quando toda água é adicionada numa quantidade três vezes maior que a inicial, o nível de saturação do sistema aumenta rapidamente desfazendo os grânulos, ou a maioria deles, afastando as partículas e fibras, tornando o sistema mais disperso.

Assim como em S2, na sequência S3 as fibras também são adicionadas quando o material está fluido e toda água presente no sistema, porém como isso ocorre nos 60 segundos finais de mistura, só é possível observar a elevação do torque, talvez seja necessário um tempo adicional para garantir que a mistura estabilizou a um nível de torque constante. Nessa análise os resultados dos ciclos

de cisalhamento podem fornecer um indicativo desse estado final de mistura, como será abordado no decorrer do trabalho.

O esforço para a mistura obtido pela integral da curva torque vs. tempo é apresentado na Tabela 3. As sequências S3 e S4 são responsáveis por maior esforço na mistura nos sistemas sem fibras, pelo fato de a mistura com o teor de água fracionada provocar um alto cisalhamento no sistema durante o período sem toda água, assim elevando os níveis de torque.

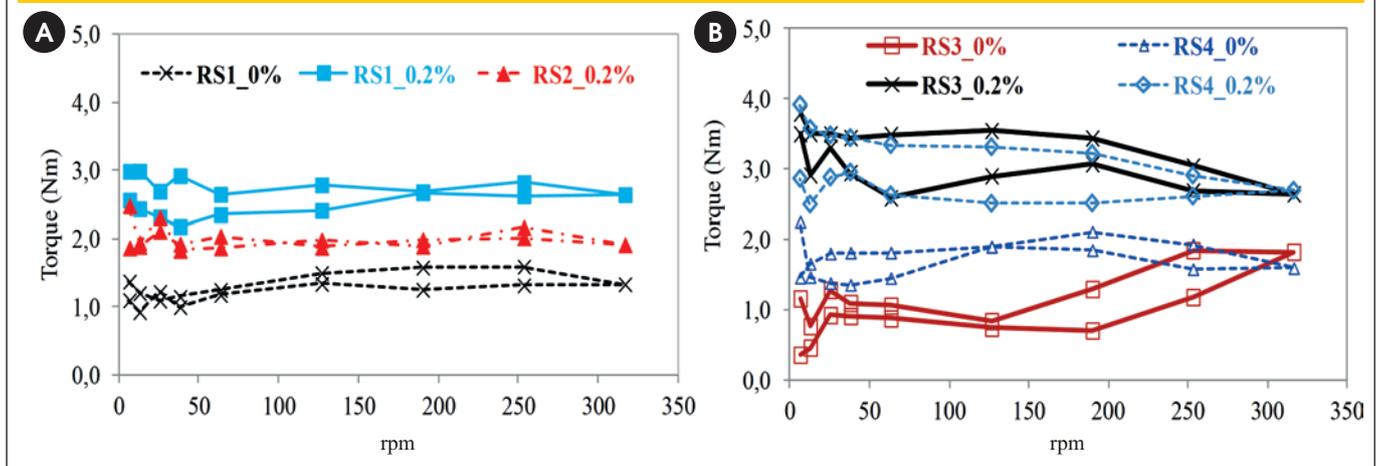
Adicionar as fibras na composição seca antes de colocar água, sequência S1, produz um esforço para mistura menor que a sequência S4, porém não tão eficiente quanto colocar as fibras no ponto de fluidez, sequência S2. Colocar as fibras no sistema após atingir o ponto de fluidez, ou seja, no momento em que o sistema é considerado um fluido, demonstrou ser o processo de mistura mais adequado. Uma vez que a reologia da matriz do compósito, neste caso a argamassa, governa diretamente a dispersão da fibra [30], o esforço para a mistura correspondente à sequência S2 é o menor entre as sequências avaliadas, Tabela 3.

Como observado na Figura 6, mudanças na sequência de adição dos materiais influenciam no comportamento de mistura o que pode indicar uma melhor distribuição das fibras na argamassa. Isso corrobora com os estudos de Zhou et al [24] no qual concluíram que a viscosidade plástica da argamassa antes da adição das fibras necessita ser controlada para obter uma boa distribuição das fibras, e que ajustes na sequência de mistura melhoram essa distribuição.

**Tabela 3 – Trabalho equivalente das misturas considerando a integral da curva torque vs. tempo**

0% fibra	Trabalho equivalente (Nm.rad)	0,2% fibra	Trabalho equivalente (Nm.rad)
RS1_0%	6474	RS1_0.2%	12097
RS2_0%	6474	RS2_0.2%	9075
RS3_0%	11305	RS3_0.2%	11317
RS4_0%	14703	RS4_0.2%	15525

Figura 8 – Resultados de ciclos de cisalhamento. a) Sequências S1 e S2. b) Sequências S3 e S4



### 3.3 Comportamento reológico

A Figura 8a mostra os resultados de ciclo de cisalhamento para as sequências S1 e S2. No sistema sem fibras (RS1\_0%) a curva está situada em um nível de torque mais baixo e sua área de histerese é mínima enquanto que para o sistema com fibras RS1\_0,2%, onde as fibras são adicionadas no início com o material seco, o ciclo está em um nível de torque maior e com área de histerese também maior. Esses resultados estão de acordo com o torque final da curva de mistura Figura 6.

Na sequência S2, as fibras são introduzidas no ponto de fluidez e da mesma forma como ocorre na mistura o ciclo está em um nível de torque intermediário, pouco acima do sistema sem fibras. Esse resultado confirma a hipótese que adicionar as fibras no ponto de fluidez, S2, é mais adequado que colocá-las no início da mistura, para as condições estudadas.

Para as sequências S3 e S4 0%, Figura 8b, o nível de torque das curvas é menor e semelhante ao verificado em RS1\_0%, apenas S4 está situada um pouco acima do nível de torque de S1, mas seguindo o comportamento verificado nas curvas de mistura. Nos sistemas com fibras os ciclos tem uma histerese maior e estão em nível de torque maior que nas sequências S1 e S2.

A partir dos resultados dos ciclos da Figura 8 observou-se que os sistemas sem fibras apresentam menor torque de escoamento. Entre aqueles com fibras, S2\_0,2% apresentou menor torque de escoamento indicando maior capacidade de fluir quando solicitado e S3\_0,2% maior valor. Esses resultados ratificam o que foi encontrado anteriormente nas curvas de mistura e na análise do trabalho equivalente da mistura.

Por fim, numa análise geral das sequências de mistura avaliadas, S2 demonstrou ser a mais apropriada. Uma vez que reduziu o esforço na mistura assim como o torque de escoamento, indicando que para as condições deste estudo introduzir as fibras no ponto de fluidez é o procedimento mais adequado.

## 4. Conclusões

Nesse trabalho, quatro diferentes sequências de adição de água

e fibras de PVA foram avaliadas. O preparo da mistura exerce forte influência no comportamento reológico das suspensões cimentícias reforçadas por fibras. Principalmente com respeito ao momento de introdução das fibras no sistema. Quando as fibras foram adicionadas no início do processo – ainda na composição seca – elas demandaram um esforço de mistura muito maior do que quando elas foram adicionadas depois da mistura inicial do material particulado com a água. O procedimento de introduzir a água de forma fracionada não melhorou o comportamento reológico das argamassas com fibras e gerou um esforço adicional na mistura elevando o trabalho equivalente.

A introdução das fibras no ponto de fluidez – sequência S2 – reduziu significativamente o esforço de mistura e melhorou o comportamento reológico da argamassa quando comparado com as outras sequências de mistura. Assim, esse estudo mostrou que é possível otimizar o preparo de sistemas com fibras de PVA modificando etapas simples do processo como o momento de introduzir a água e as fibras.

## 5. Referências bibliográficas

- [1] Pileggi RG, Studart AR, Pandolfelli VC, Gallo J. How mixing affects the rheology of refractory castables, Part 1. *Am Ceram Soc Bull* 2001;80:27–31.
- [2] França MS de. COMPORTAMENTO DE MISTURA DE SISTEMAS CIMENTÍCIOS MULTIFÁSICOS REATIVOS -Mixing behavior of multiphase cementitious materials. Master's Dissertation. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.
- [3] Cavinato M, Bresciani M, Machin M, Bellazzi G, Canu P, Santomaso A. The development of a novel formulation map for the optimization of high shear wet granulation. *Chem Eng J* 2010;164:350–8. doi:10.1016/j.cej.2010.05.006.
- [4] Domiciano VG, Salomão R, Isaac CS, Pandolfelli VC. Processing conditions and the permeability of polymeric fiber-containing refractory castables. *Cerâmica* 2003;49:251–6.

- doi:10.1590/S0366-69132003000400010.
- [5] Leuenberger H, Puchkov M, Krausbauer E, Betz G. Manufacturing pharmaceutical granules: Is the granulation end-point a myth? *Powder Technol* 2009;189:141–8. doi:10.1016/j.powtec.2008.04.005.
- [6] Cazacliu B, Roquet N. Concrete mixing kinetics by means of power measurement. *Cem Concr Res* 2009;39:182–94. doi:10.1016/j.cemconres.2008.12.005.
- [7] Rondet E, Denavaut M, Mandato S, Duri A, Ruiz T, Cuq B. Power consumption profile analysis during wet agglomeration process: Energy approach of wheat powder agglomeration. *Powder Technol* 2012;229:214–21. doi:10.1016/j.powtec.2012.06.035.
- [8] Cazacliu B, Legrand J. Characterization of the granular-to-fluid state process during mixing by power evolution in a planetary concrete mixer. *Chem Eng Sci* 2008;63:4617–30. doi:10.1016/j.ces.2008.06.001.
- [9] França MS de, Cardoso FA, Pileggi RG. Mixing behavior of mortars evaluated by rotational rheometry. *Ambiente Construído* 2012;12:165–74. doi:10.1590/S1678-86212012000200011.
- [10] BENTUR A, MINDESS S. *Fibre Reinforced Cementitious Composites*. 2nd ed. London and New York: 2007.
- [11] Noushini A, Samali B, Vessalas K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. *Constr Build Mater* 2013;49:374–83. doi:10.1016/j.conbuildmat.2013.08.035.
- [12] Liu J, Sun W, Miao C, Liu J, Li C. Assessment of fiber distribution in steel fiber mortar using image analysis. *J Wuhan Univ Technol-Mater Sci Ed* 2012;27:166–71. doi:10.1007/s11595-012-0429-z.
- [13] Bolander JE, Choi S, Duddukuri SR. Fracture of fiber-reinforced cement composites: Effects of fiber dispersion. *Int J Fract* 2008;154:73–86. doi:10.1007/s10704-008-9269-4.
- [14] Ozyurt N, Mason TO, Shah SP. Correlation of fiber dispersion, rheology and mechanical performance of FRCs. *Cem Concr Compos* 2007;29:70–9. doi:10.1016/j.cemconcomp.2006.08.006.
- [15] Campello E, Pereira MV, Darwish F. The Effect of Short Metallic and Polymeric Fiber on the Fracture Behavior of Cement Mortar. *Procedia Mater Sci* 2014;3:1914–21. doi:10.1016/j.mspro.2014.06.309.
- [16] SALVADOR RP. Análise comparativa de métodos de ensaio para caracterização do comportamento mecânico de concreto reforçado com fibras. *Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana)*. Escola Politécnica, University of São Paulo, 2012.
- [17] Ding Y, Liu S, Zhang Y, Thomas A. The investigation on the workability of fibre cocktail reinforced self-compacting high performance concrete. *Constr Build Mater* 2008;22:1462–70. doi:10.1016/j.conbuildmat.2007.03.034.
- [18] Kim B, Boyd AJ, Lee J-Y. Effect of transport properties of fiber types on steel reinforcement corrosion. *J Compos Mater* 2011;45:949–59. doi:10.1177/0021998310380286.
- [19] GRÜNEWALD S. *Performance – based design of self-compacting fibre reinforced concrete*. These. Delft University of Technology., 2004.
- [20] Keshtkar M, Heuzey MC, Carreau PJ. Rheological behavior of fiber-filled model suspensions: Effect of fiber flexibility. *J Rheol* 2009;53:631. doi:10.1122/1.3103546.
- [21] SILVA R da P. *Argamassas com adição de fibras de polipropileno - Estudo do comportamento reológico e mecânico*. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2006.
- [22] Akkaya Y, Shah S, Ankenman B. Effect of Fiber Dispersion on Multiple Cracking of Cement Composites. *J Eng Mech* 2001;127:311–6. doi:10.1061/(ASCE)0733-9399(2001)127:4(311).
- [23] Kuder KG, Ozyurt N, Mu EB, Shah SP. Rheology of fiber-reinforced cementitious materials. *Cem Concr Res* 2007;37:191–9. doi:10.1016/j.cemconres.2006.10.015.
- [24] Zhou J, Qian S, Ye G, Copuroglu O, van Breugel K, Li VC. Improved fiber distribution and mechanical properties of engineered cementitious composites by adjusting the mixing sequence. *Cem Concr Compos* 2012;34:342–8. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.11.019.
- [25] ANTUNES R. *Influência da Reologia e da Energia de Impacto na Resistência de Aderência de Revestimentos de Argamassa*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2005.
- [26] Cardoso FA. *Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico*. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [27] França MS de, Cardoso FA, Pileggi RG. Influence of laboratory mixing procedure on the properties of mortars. *Ambiente Construído* 2013;13:111–24. doi:10.1590/S1678-86212013000200009.
- [28] Pileggi RG, Studart AR, Pandolfelli VC, Gallo J. How mixing affects the rheology of refractory castables, Part 2. *Am Ceram Soc Bull* 2001;80:38–42.
- [29] ABNT NBR 13278. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 13278: argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado 2005.
- [30] Collins F, Lambert J, Duan WH. The influences of admixtures on the dispersion, workability, and strength of carbon nanotube–OPC paste mixtures. *Cem Concr Compos* 2012;34:201–7. doi:10.1016/j.cemconcomp.2011.09.013.
- [31] Li M, Li VC. Rheology, fiber dispersion, and robust properties of Engineered Cementitious Composites. *Mater Struct* 2013;46:405–20. doi:10.1617/s11527-012-9909-z.