

Influência do procedimento de mistura em laboratório nas propriedades de argamassas

Influence of laboratory mixing procedure on the properties of mortars

Marylinda Santos de França
Fábio Alonso Cardoso
Rafael Giuliano Pileggi

Resumo

A mistura dos materiais sólidos com a água é uma das etapas mais importantes no preparo das argamassas. A condução do procedimento que é adotado interferirá nas propriedades no estado fresco, assim como no endurecido. A Norma ABNT NBR 13276:2005 indica que os materiais sólidos sejam introduzidos no líquido já disposto no recipiente. Essa ordem de introdução dos materiais é o inverso do que ocorre na prática e pode resultar na falta de homogeneidade da mistura. Estudos anteriores observaram que adicionar o líquido aos materiais sólidos de forma fracionada melhora as propriedades reológicas dos sistemas. Assim, utilizando uma argamassadeira de laboratório e uma mesma formulação, foram estudados distintos procedimentos de mistura em que a água é adicionada no material sólido em etapas. Esses procedimentos foram confrontados com o indicado pela ABNT NBR 13276:2005, e o comportamento reológico (squeeze-flow e ciclos de cisalhamento) e as propriedades no estado endurecido (resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico) foram avaliados. Verificou-se que a adição do líquido ao material sólido em etapas distintas conduz a sistemas mais fluidos e com melhor desempenho no estado endurecido.

Palavras-chave: Procedimento de mistura. Argamassa. Reologia.

Abstract

The mixing of solid materials with water is one of the most important steps in the preparation of mortars. The mixing procedure interferes with both fresh and hardened properties. The ABNT NBR 13276:2005 indicates that the solids should be added to the liquid in the mixer container. This order of introduction of materials is the reverse of what occurs in practice and it may result in the lack of homogeneity of the mix. Previous studies have found that adding the liquid to solid material in steps improves the rheological properties of the systems. Thus, using a laboratory mixer and the same mortar formula, various mixing procedures in which water is added to the solid material in steps were investigated. These procedures were compared with that described by ABNT NBR 13276:2005, and rheological behavior (squeeze-flow and shear cycles) and mechanical properties (splitting tensile strength and dynamic modulus of elasticity) were evaluated. The results showed that the addition of liquid to solid material in different stages resulted in more fluid systems and improved performance in the hardened state.

Keywords: *Mixing procedure. Mortar. Rheology.*

Marylinda Santos de França
Departamento de Engenharia de
Construção Civil, Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
Av. Prof. Almeida Prado, n. 83, Trav.
2
São Paulo - SP - Brasil
CEP 05508-010
Tel.: (11) 3091-5382
E-mail: marylinda@usp.br

Fábio Alonso Cardoso
Departamento de Engenharia de
Construção Civil, Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-5248
E-mail: fabio.cardoso@lme.pcc.usp.br

Rafael Giuliano Pileggi
Departamento de Engenharia de
Construção Civil, Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
Tel.: (11) 3091-5442
E-mail: rafael.pileggi@poli.usp.br

Recebido em 30/06/12
Aceito em 03/05/13

Introdução

No uso de argamassas para seus mais variados fins, a mistura dos constituintes sólidos com a água é uma etapa fundamental, que, junto com as características da formulação, definirá as propriedades no estado fresco e as condições de desempenho no estado endurecido.

A NBR 13276 (ABNT, 2005a) define as condições de preparo de argamassas em laboratório, sendo o procedimento adotado pelos laboratórios para desenvolvimento e controle de qualidade dos produtos. A norma atual indica que os materiais sólidos sejam introduzidos na água inicialmente disposta no recipiente. Essa sequência de introdução dos materiais não condiz com o que de fato acontece em situações práticas de obra, em que, comumente, a água é adicionada às matérias-primas sólidas no equipamento de mistura.

Estudos anteriores observaram que diferenças na sequência de mistura alteram o perfil reológico dos sistemas. Em concretos refratários, através da reometria rotacional, foi verificado que o método de adição da água influenciou no comportamento reológico e constatou-se que introduzir a água em duas etapas foi mais eficiente na homogeneização do sistema que em uma única etapa (PILEGGI; STUDART; PANDOLFELLI, 2001). Em argamassas, o efeito da adição fracionada do líquido no sistema foi avaliado via *squeeze-flow*, demonstrando que esse procedimento foi mais eficaz que a adição direta, resultando em produtos mais fluidos, com comportamento reológico mais

reprodutível (ANTUNES; JOHN; PILEGGI, 2005; CARDOSO *et al.*, 2007).

No estado endurecido, métodos de mistura de concreto em duas etapas de adição de água foram comparados com o método convencional e foi observado um aumento da resistência à compressão utilizando-se o novo método (REJEB, 1996; TAMIMI, 1994). Na área de compósitos cimentícios, a sequência de mistura também foi investigada e constatou-se que o ajuste na ordem de introdução dos materiais contribuiu para melhorar as propriedades mecânicas no estado endurecido (ZHOU *et al.*, 2012).

De maneira geral, os trabalhos acima mencionados basearam-se em um procedimento específico para avaliar diferentes sistemas utilizando basicamente uma única técnica de caracterização, cuja avaliação fora realizada ora no estado fresco ora no endurecido.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo investigar a influência de diferentes procedimentos de mistura em laboratório no comportamento reológico de uma composição de argamassa por meio das técnicas *squeeze-flow* e reometria rotacional e nas propriedades do estado endurecido.

Programa experimental

Na Figura 1 pode-se visualizar o planejamento experimental deste estudo.

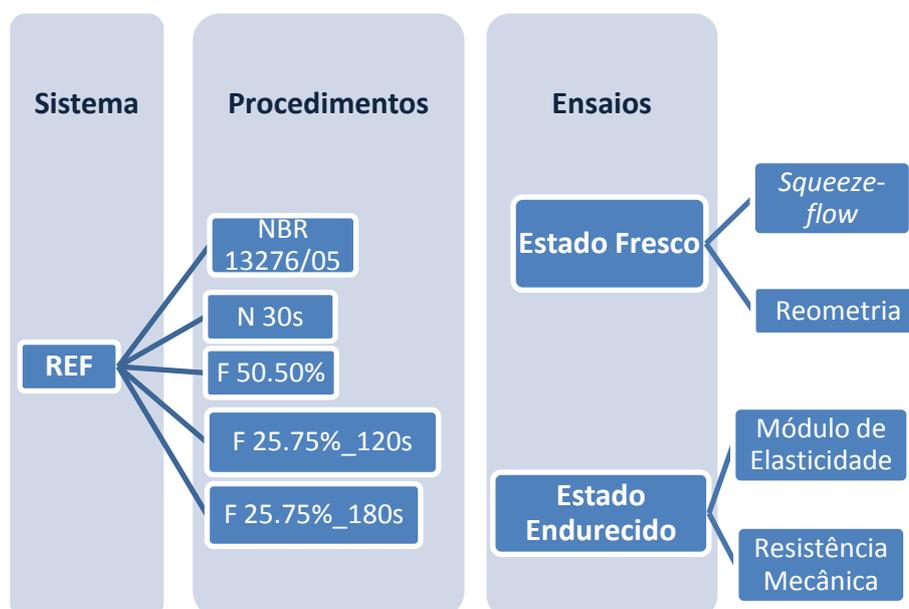


Figura 1 - Estratégia de execução dos experimentos

Materiais

Neste estudo foi utilizada uma argamassa dosada em laboratório denominada REF, constituída das seguintes matérias-primas, com proporção em volume: cimento CP II - F32 (14,5%), cal hidratada CHIII (4,5%), *filler* calcário (12,3%) e agregado miúdo de areia britada (68,7%). Cabe frisar que o foco é comparar procedimentos, e não composições. Ressalta-se, contudo, que essa argamassa é constituída de dois ligantes e contém uma fração carbonática, diferenciando-se um pouco das argamassas usuais. A distribuição granulométrica acumulada do sistema segue disposta na Figura 2, e a caracterização dos constituintes, na Tabela 1. A relação água/materiais sólidos foi mantida fixa e igual a 0,16.

Procedimentos de mistura

Amostras de 2.500 g do sistema descrito acima foram preparadas. Os materiais foram misturados na batedeira planetária de massas Hobart modelo N50, capacidade de 5 litros, comumente utilizada em laboratórios (Figura 3), com rotação em torno do eixo de 139 rpm e movimento de translação de 62 rpm aproximadamente, na velocidade baixa (velocidade 1).

Os procedimentos de mistura propostos para melhor entender o comportamento de mistura em diferentes condições (sequência de colocação dos materiais, tempo de mistura e forma de adição de água) e compará-los com o descrito na NBR 13276 (ABNT, 2005a) seguem descritos abaixo.

(a) NBR 13276: Procedimento de referência segundo a norma (NBR 13276 (ABNT, 2005a)). Consiste em pesar a massa de água de acordo com as indicações. Colocar a água no recipiente do misturador (argamassadeira de bancada). Em seguida, introduzir o material seco de modo contínuo, dentro de um período de 30 s. Acionar o misturador na velocidade baixa, misturar por 30 s e desligar o equipamento. Retirar a pá de mistura e revolver o material da superfície interna do

recipiente e da pá, efetuar essa tarefa e recolocar a pá em um intervalo de 60 s. Por fim, ligar o equipamento e misturar por mais 30 s, totalizando 60 s de mistura;

(b) N 30s: Procedimento idêntico ao da Norma (item a), exceto por considerar apenas os primeiros 30 s de mistura;

(c) F 50.50%: Propõe-se a introdução do líquido em duas etapas. Primeiro, o material seco é colocado no recipiente do misturador. Em seguida, metade da quantidade de água é adicionada à argamassa numa vazão média de 7,7 g/s, com o misturador na velocidade baixa. Após 60 s de mistura, realiza-se uma pausa para revolver o material das paredes do recipiente e da pá, e mistura-se por mais 60 s, adicionando a outra metade restante de água. Nesse procedimento o tempo de mistura é igual a 120 s;

(d) F 25.75%_120s: Consiste em introduzir todo o material seco no recipiente de mistura. Adicionar a massa de água inicial (25%) no material seco, numa vazão média de 7,7 g/s (ou em até 15 s) com misturador na velocidade baixa, misturando por 60 s. Pausa para revolver o material das paredes do recipiente de mistura e da pá. Mistura-se por mais 60 s adicionando o restante da água (75%) na mesma vazão média de 7,7 g/s (ou em até 35 s). Tempo total de mistura igual a 120 s; e

(e) F 25.75%_180s: Procedimento de mistura semelhante ao descrito no item d, exceto no que se refere ao tempo de mistura, que na segunda etapa é igual a 120 s, totalizando 180 s de mistura.

Caracterização no estado fresco

Teor de ar incorporado

No estado fresco, o teor de ar incorporado foi obtido imediatamente após a mistura, seguindo o estabelecido na NBR 13278 (ABNT, 2005b). Por ser um método de análise que utiliza uma variação na massa como sinal analítico, pode ser tratado como um método gravimétrico de mensuração do teor de ar incorporado.

Tabela 1 - Caracterização da argamassa REF anidra

Constituintes	AS (m ² /g)	ρ (g/cm ³)	% volume
Filler	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

Nota: Legenda:

ρ - densidade;

AS - área de superfície específica; e

%V - % em volume.

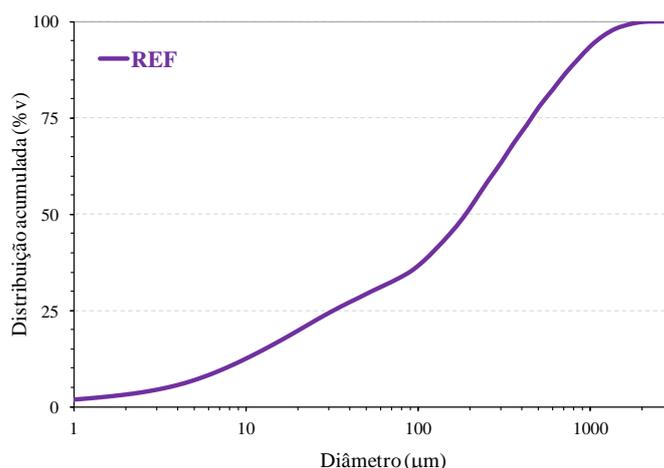


Figura 2 - Distribuição granulométrica acumulada do sistema REF



Figura 3 - Misturador planetário de bancada Hobart indicando a geometria de mistura e a cuba

Squeeze-flow

O método *squeeze-flow* consiste em medir a força necessária para comprimir uma amostra (geralmente cilíndrica) entre duas placas paralelas com velocidade controlada (ENGMANN; SERVAIS; BURBIDGE, 2005).

As amostras de argamassa fresca foram moldadas com diâmetro de 101 mm e altura de 10 mm, segundo o recomendado pela NBR 15839 (ABNT, 2010). Utilizou-se uma máquina universal de ensaios INSTRON (modelo 3345) com controle de deslocamento e célula de carga de 5.000 N. Os ensaios de *squeeze-flow* foram realizados 15 min após a mistura, com velocidade de deslocamento de 0,1 mm/s.

Para avaliar a repetibilidade do método em função do procedimento de mistura, foram realizadas três

repetições dos experimentos, obtendo-se, assim, três curvas *squeeze-flow* para cada procedimento de mistura estudado, sendo cada curva referente a uma batelada diferente.

Na análise e interpretação dos resultados, a Figura 4 mostra o perfil típico esquemático (carga vs. deslocamento) obtido de um ensaio *squeeze-flow* com controle por deslocamento. Não necessariamente todos os ensaios *squeeze-flow* satisfarão ao perfil disposto na Figura 4, porque o tipo de formulação da argamassa influenciará na configuração da curva.

Reometria rotacional

Utilizou-se o reômetro do tipo planetário desenvolvido na Poli-USP para a obtenção dos ciclos de cisalhamento.

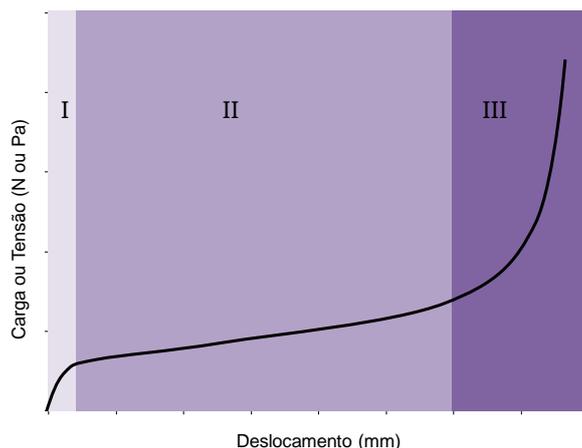


Figura 4 - Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de *squeeze-flow*. Estágio I: pequeno deslocamento - deformação elástica; estágio II: deslocamento intermediário - deformação plástica e/ou fluxo viscoso; estágio III: grande deslocamento - enrijecimento por deformação (*strain hardening*)

Fonte: Cardoso (2009).

Na avaliação da reometria através dos ciclos do cisalhamento, o sistema foi misturado na Hobart (Figura 3) e em seguida introduzido no reômetro (Figura 5a). O ciclo de cisalhamento consiste em impor ao material diferentes velocidades de rotação, que variam de 6,3 rpm a 316,3 rpm, primeiro acelerando, depois desacelerando, segundo a Figura 5b. Para a confecção das curvas torque vs. rotação (Figura 5c) são escolhidos valores representativos de torque em cada patamar.

Os ciclos de cisalhamento possibilitam a obtenção dos resultados de área de histerese (diferença de torque entre aceleração e desaceleração), além de fornecerem energia adicional àquela fornecida durante a mistura para a quebra de eventuais aglomerados presentes (OLIVEIRA *et al.*, 2003). O efeito do cisalhamento não só orienta as partículas na suspensão como também quebra as ligações fracas entre as partículas aglomeradas (FERNÁNDEZ-ALTABLE; CASANOVA, 2006).

Dessa forma, a área de histerese indica o estado de dispersão e o nível e perfil da curva de torque em função da rotação, que representa o comportamento reológico do material (PILEGGI; STUDART; PANDOLFELLI, 2001).

Propriedades no estado endurecido

Moldagem e cura

A moldagem dos corpos de prova (10 espécies para cada procedimento de mistura avaliado) foi realizada em duas camadas, sendo cada uma submetida a 20 golpes com o soquete de adensamento invertido. Em seguida, a superfície foi nivelada com a espátula, e os corpos de prova

(altura x diâmetro = 60 mm x 50 mm) foram depositados em recipientes fechados, de forma a garantir cura úmida por 28 dias (23 °C +/- 2 °C).

Módulo de elasticidade dinâmico

A avaliação do módulo de elasticidade dinâmico dos corpos de prova foi obtida com base na NBR 15630 (ABNT, 2008). Utilizou-se o equipamento de ultrassom PUNDIT, que possui transdutores de 20 mm de diâmetro e frequência de 200 kHz. A medida do tempo (μ s) em que a onda percorre a extensão longitudinal do corpo de prova foi realizada com os transdutores posicionados na região central do corpo de prova.

Resistência à tração por compressão diametral

Os corpos de prova foram avaliados à tração por compressão diametral, seguindo procedimento semelhante ao descrito na NBR 7222 (ABNT, 1994), aos 28 dias, utilizando para tanto uma prensa universal de ensaios marca INSTRON (modelo 5569 e célula de carga de 50 KN) e taxa de aplicação de carga de 3.927 N/min.

É importante ressaltar que os corpos de prova foram ensaiados úmidos, uma vez que não foi realizada secagem prévia deles.

Análise estatística

A análise de variância ANOVA foi aplicada no tratamento estatístico dos dados no estado endurecido. Utilizou-se o programa de análise estatística MINITAB, versão 16.

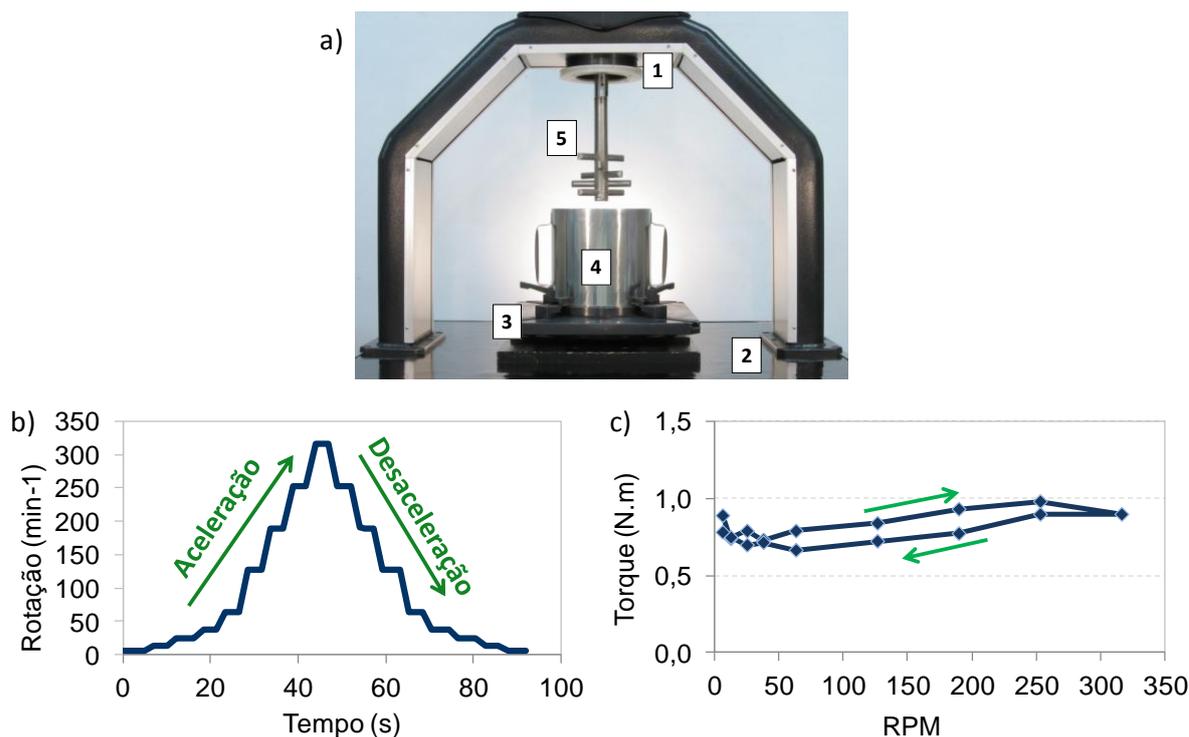


Figura 5 - (a) Reômetro com destaque para seus componentes: 1) dispositivo rotacional; 2) base e console; 3) elevador; 4) recipiente de ensaio; 5) geometria de mistura; (b) Programa de rotações do teste de ciclo de cisalhamento; e (c) Curva obtida em cada ciclo

Na análise de variância ANOVA, parte-se da hipótese de que não há diferença significativa entre as médias – hipótese nula (h_0), ou seja, quaisquer diferenças observadas são devidas meramente a flutuações das amostras da mesma população (SPIEGEL, 1977). Se $P > 0,05$, a hipótese nula é verdadeira, as médias são iguais. Se $P < 0,05$, a hipótese nula é rejeitada, há diferença significativa entre as médias, ao nível de confiança de 95%.

Na análise estatística foi considerada a população de dez corpos de prova em cada condição avaliada. A comparação dos procedimentos foi realizada aplicando-se o teste de comparações múltiplas teste de Tukey (95% de confiança). O teste baseia-se na diferença mínima significativa (Δ). É feito comparando a diferença entre as várias médias em pares ao valor (Δ) (KUTNER *et al.*, 2004). Foi utilizado o MINITAB no tratamento dos dados. O software lista os valores médios dos procedimentos analisados verticalmente em ordem decrescente. Os procedimentos listados pela

mesma letra (a, b, c, etc.) não são diferentes significativamente. Se não compartilham a mesma letra, são diferentes significativamente (MENDENHALL; SINCICH, 1995).

Resultados e discussão

Na Tabela 2 estão dispostos os valores médios obtidos de teor de ar para o sistema REF. Conforme os dados apresentados (Tabela 2), o teor de ar não variou muito entre os diferentes procedimentos no sistema de referência (REF).

Assim, os procedimentos propostos neste estudo foram avaliados por meio de duas técnicas de caracterização indireta, uma por *squeeze-flow* e a outra por meio dos ciclos de cisalhamento.

Squeeze-flow

Os resultados, para o sistema REF, obtidos com essa técnica podem ser observados na Figura 6.

Tabela 2 - Teor de ar incorporado obtido após a mistura, antes dos experimentos realizados no estado fresco e antes da moldagem dos corpos de prova, para o sistema REF

Procedimentos	Teor de ar incorporado (%)	
	Estado Fresco	Moldagem
NBR 13276 (ABNT, 2005a)	2,8	3,5
N 30s	3,5	4,0
F 50.50%	3,2	2,7
F 25.75%_120s	3,3	3,7
F 25.75%_180s	3,6	2,9

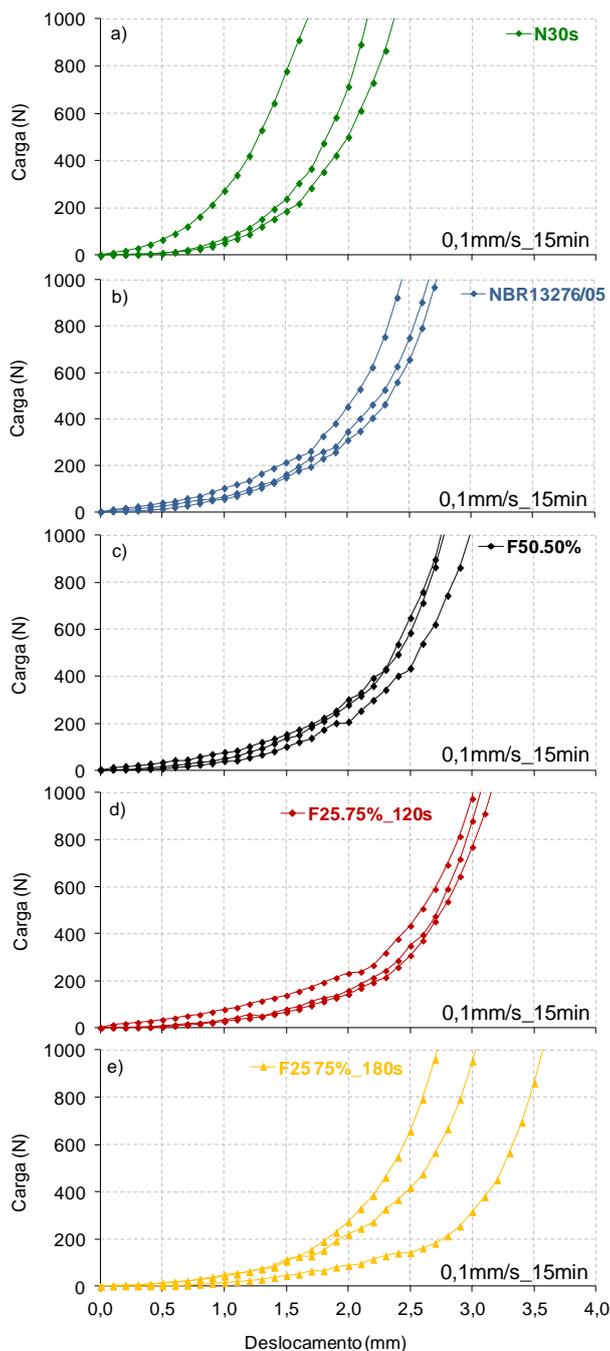


Figura 6 - Avaliação dos procedimentos de mistura via ensaio *squeeze-flow* sistema REF, realizado 15 min após a mistura. Velocidade de compressão de 0,1 mm/s. a) N30s; b) NBR 13276 (ABNT, 2005a); c) F50.50%; d) F25.75%_120s; e) F25.75%_180s

O perfil da curva carga vs. deslocamento (Figura 4) obtida no ensaio *squeeze-flow* compreende três estágios. No primeiro estágio, o material apresenta deformação elástica linear, comportando-se como um sólido, o que, para argamassas, acontece em deformações muito pequenas, na grande maioria das vezes, sendo difícil sua identificação na escala em que são demonstradas as curvas. No segundo estágio (intermediário), o sistema flui por deformação plástica ou fluxo viscoso, sendo caracterizado pelo aumento discreto da força em função da deformação. A ocorrência desse estágio está relacionada ao comportamento de argamassas de fácil aplicação e espalhamento, geralmente obtidas com a presença de aditivos incorporadores de ar e retentor de água. E, por fim, no terceiro estágio, denominado enrijecimento por deformação (*strain hardening*), há um aumento expressivo da carga necessária à deformação do material, o qual está relacionado com a ocorrência de segregação de fases e com o aumento da concentração de sólidos na região central da amostra (CARDOSO, 2009).

Na Figura 6 estão os resultados de *squeeze-flow* obtidos 15 min após a mistura. Nota-se que todas as curvas estão com perfil predominante do terceiro estágio (*strain hardening*) e, conseqüentemente, atingem a carga máxima com pequena deformação. Aquelas que fluem mais em sollicitações de *squeeze-flow* (F50.50%, F25.75%) apresentam um início de deformação plástica ou fluxo viscoso, porém pouco expressivo.

Analisando as curvas de cima para baixo (Figura 6a para Figura 6e) e partindo do procedimento N30s em direção ao F25.75%_180s, nota-se que, à medida que o sistema é mais bem misturado, ele se desloca mais, indicando que os procedimentos foram mais eficazes na dispersão e homogeneização das partículas. Esse maior deslocamento foi atingido apenas se modificando o

processo e aumentando-se o tempo de mistura, uma vez que o teor de água foi mantido constante e a composição utilizada foi a mesma.

Da Figura 6 pode-se dizer ainda que os procedimentos de mistura N 30s e NBR 13276 (ABNT, 2005a) atingiram menores deslocamentos. Isso sugere que esses procedimentos (N 30s e NBR 13276 (ABNT, 2005a) não foram capazes de dispersar as partículas aglomeradas com eficiência, resultando em unidades móveis (aglomerados) maiores, o que dificulta o fluxo da argamassa.

Aqueles procedimentos em que o líquido é introduzido em diferentes frações no material sólido e cujo tempo de mistura fora maior (F 50.50%, F 25.75%_120s e F 25.75%_180s) conduzem a sistemas mais fluidos e dispersos, facilitando, dessa forma, a homogeneização dos constituintes. Entre os procedimentos (F 25.75%_120s e F 25.75%_180s) percebe-se que o procedimento F 25.75%_180s possibilitou um deslocamento maior das curvas antes de atingir a carga máxima, porém houve maior dispersão entre as curvas, como está evidenciado na Figura 7, que mostra os resultados dos valores médios de deslocamento na carga máxima. Observa-se que os procedimentos (F 50.50%, F 25.75%_120s e F 25.75%_180s) resultaram em argamassas mais fluidas em *squeeze-flow* devido à mistura mais eficiente.

Reometria: ciclos de cisalhamento

A avaliação do comportamento de mistura pela reometria consistiu em preparar o sistema, nesse caso o sistema REF, conforme os procedimentos dispostos no plano experimental. Após a mistura na bateadeira planetária (Figura 2), o material foi submetido aos ciclos de cisalhamento no reômetro rotacional.

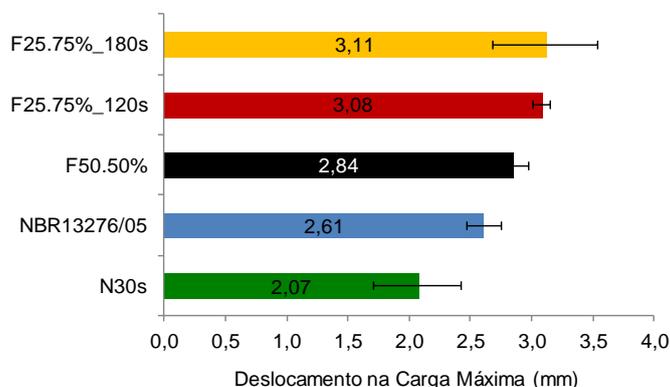


Figura 7 - Deslocamento atingido na carga máxima (valores médios das três curvas com respectivos desvios padrão) para os procedimentos de mistura estudados

Os resultados obtidos com os ciclos de cisalhamento dispostos na Figura 8 confirmam que, quão mais bem misturado estiver o sistema, mais fluido ele estará após seu preparo. Isso é indicado nas curvas dos ciclos de cisalhamento quando estão situados em níveis de torque mais baixo e quando esses níveis entre as curvas de

aceleração e desaceleração são minimizados, diferenciando, assim, os procedimentos quanto a sua eficiência de mistura.

A Figura 9 apresenta as curvas do primeiro ciclo de cisalhamento para cada procedimento de mistura estudado.

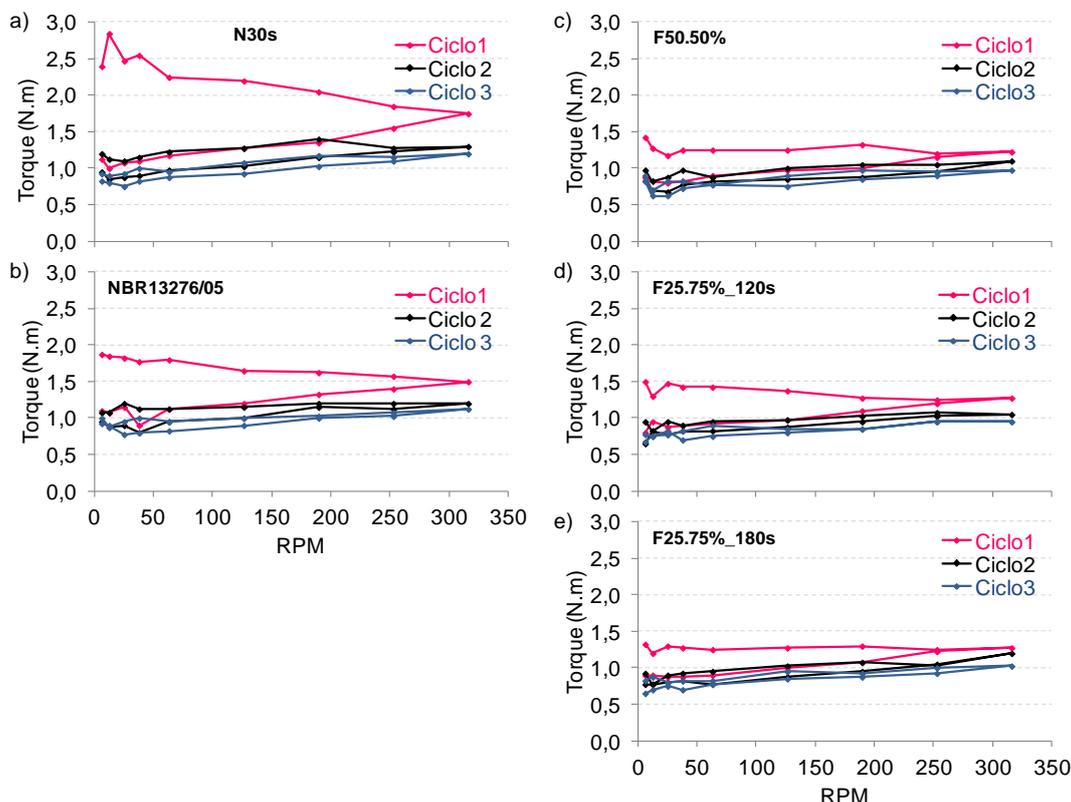


Figura 8 - Ciclos de cisalhamento obtidos no reômetro rotacional do tipo planetário após mistura na bateadeira planetária, obedecendo aos procedimentos de mistura propostos - (a) N30s; (b) NBR13276 (ABNT, 2005a); (c) F50.50%; (d) F25.75%_120s; e) F25.75%_180s

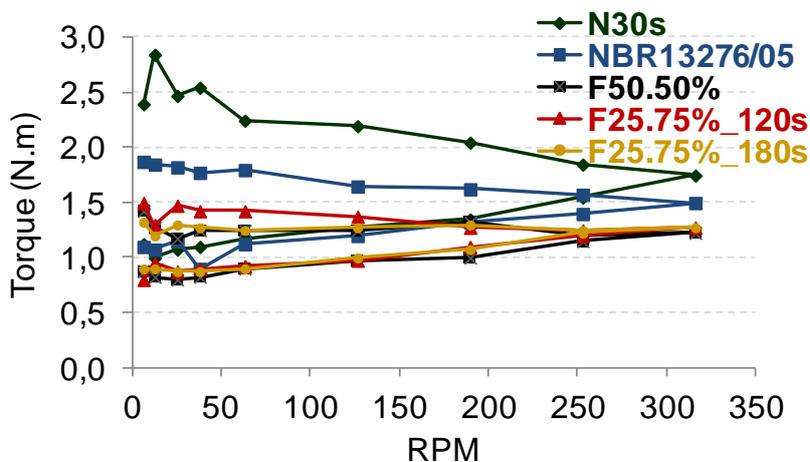


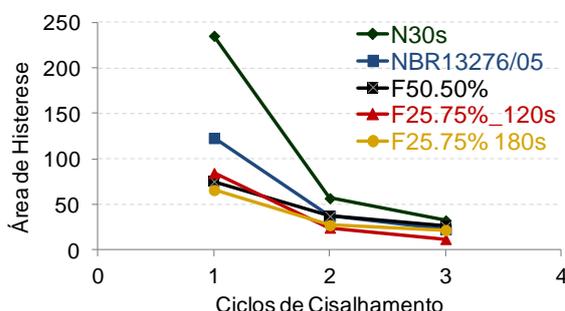
Figura 9 - Ciclos de cisalhamento obtidos no reômetro rotacional do tipo planetário após mistura na bateadeira planetária, obedecendo aos procedimentos de mistura propostos - curvas referentes ao primeiro ciclo de cada procedimento de mistura avaliado

Da Figura 9 constata-se que a curva referente ao procedimento N30s mostra a maior variação entre os trechos de aceleração e desaceleração, além do fato de estar situado em um nível de torque mais elevado, indicando que o sistema não foi suficientemente disperso e homogêneo durante a etapa da mistura. O mesmo é verificado no procedimento NBR13276 (ABNT, 2005a), apenas com uma diminuição do nível de torque no trecho de aceleração.

Por fim, os procedimentos em que a água é adicionada no material sólido de forma fracionada tendem a resultar em sistemas mais fluidos e homogêneos após a mistura, seja pela alteração da sequência de introdução dos materiais ou pelo aumento do tempo de mistura. Desse modo, as diferenças entre os trechos de aceleração e desaceleração são menores, corroborando a hipótese de que simples modificações no procedimento de mistura resultam em sistemas mais estáveis reologicamente.

Área de Histerese dos ciclos de cisalhamento

Os dados de área de histerese correspondente aos ciclos de cisalhamento, realizados após mistura na



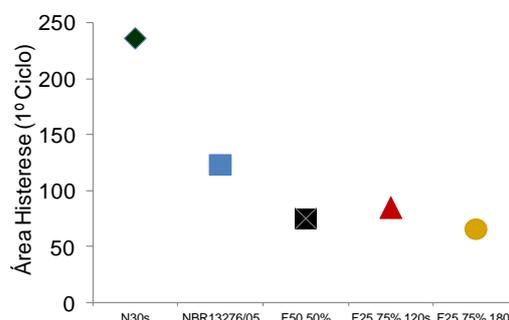
(a) áreas de histerese dos três ciclos efetuados para cada procedimento de mistura estudado

batedeira planetária, seguindo os diferentes procedimentos, são apresentados na Figura 10. Como a área de histerese compreende a área entre os trechos de aceleração e desaceleração, os resultados confirmam a análise descrita acima, com a disposição das curvas das Figuras 8 e 9.

Os procedimentos (N30s e NBR13276 (ABNT, 2005a)) que não favoreceram a dispersão adequada das partículas durante a mistura conduziram a valores de áreas de histerese elevados. Isso é mais evidenciado no primeiro ciclo de cisalhamento, uma vez que a homogeneização e a dispersão das unidades móveis (partículas e aglomerados) continuam durante os ciclos.

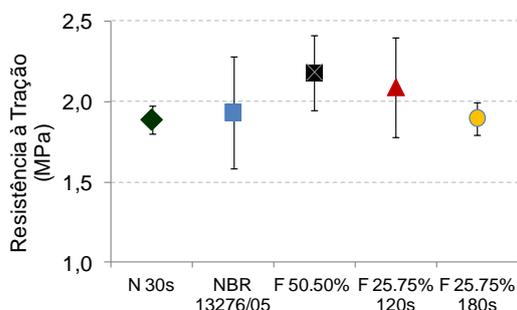
Avaliação das propriedades no estado endurecido

Na Figura 11 encontram-se os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral e de módulo de elasticidade dinâmico aos 28 dias de idade.

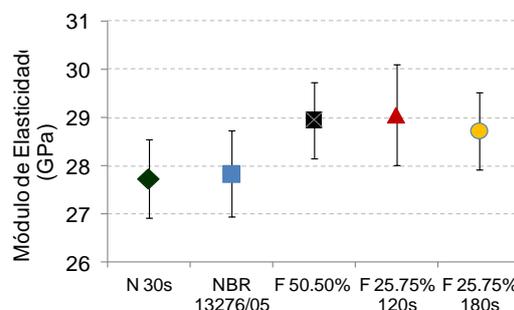


(b) área de histerese do primeiro ciclo de cisalhamento após a mistura

Figura 10 - Análise da área de histerese correspondente aos ciclos de cisalhamento realizados após mistura na bateadeira planetária



(a) resistência à tração por compressão diametral



(b) módulo de elasticidade dinâmico

Figura 11 - Resultados no estado endurecido aos 28 dias de idade - valores médios para 10 espécies de corpos de prova, por procedimento de mistura avaliado - sistema REF

Na resistência à tração por compressão diametral (Figura 11a), observa-se que os valores médios tendem a aumentar nos procedimentos em que a água é introduzida de forma fracionada, exceto para o procedimento F 25.75%_180s.

Os procedimentos de mistura F 50.50% e F 25.75%_120s proporcionaram valores médios de resistência à tração por compressão diametral superiores aos demais procedimentos, que pode estar correlacionado com o comportamento identificado na avaliação do estado fresco. Para a condição F 25.75%_180s, o resultado de resistência à tração por compressão diametral não acompanhou a tendência verificada em F 50.50% e F 25.75%_120s. Esse resultado é intrigante e necessita de uma investigação mais profunda para ser esclarecido.

Em linhas gerais, a Figura 11 sugere que procedimentos de mistura que favorecem uma homogeneização e dispersão mais adequada do sistema no estado fresco conduzem a resultados satisfatórios de desempenho mecânico no estado endurecido. Isso foi mais evidenciado na avaliação do módulo de elasticidade dinâmico.

Na Tabela 3 encontra-se a análise de variância aplicada ao estudo dos procedimentos para o sistema REF, avaliado aos 28 dias.

De acordo com a análise de variância obtida na avaliação da resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade dinâmico para o sistema REF aos 28 dias (Tabela 3), constatou-se que os procedimentos de mistura influenciam significativamente nas propriedades do estado endurecido nas condições avaliadas ($P < 0,05$).

Na análise da comparação entre os procedimentos pelo teste de Tukey (95% de confiança) indicada pela Tabela 4, constatou-se que, com base na propriedade de resistência à tração por compressão

diametral, os procedimentos de misturas não diferem entre si estatisticamente pelo teste de Tukey, a 5% de significância (Tabela 4a), como destacam as médias que estão seguidas pela mesma letra (a).

Quanto ao módulo de elasticidade dinâmico (Tabela 4b), o procedimento F25.75%_120s teve desempenho médio significativo superior aos procedimentos NBR13276 (ABNT, 2005a) e N30s. No entanto, não houve diferença entre os procedimentos F25.75%_120s e F50.50% e o procedimento F25.75%_180s, e entre F25.75%_180s, NBR13276 (ABNT, 2005a) e N30s.

Assim, pode-se afirmar que modificações realizadas no procedimento, referentes às condições de preparo, como sequência de introdução de materiais, forma de adição do líquido e tempo de mistura, propiciam maior fluidez e melhoram o módulo de elasticidade dinâmico, sem necessariamente modificar o teor de água ou ligante. Dessa maneira, uma mistura adequada permitiria reduzir o teor de água para uma mesma trabalhabilidade, quando a tendência comum é colocar mais água quando o desempenho reológico não é atingido.

Considerações finais

Diante do que foi exposto neste trabalho, considera-se que o estudo de procedimentos de mistura que possibilitem sistemas mais fluidos mostra-se válido.

Por meio das diferentes técnicas de caracterização empregadas, constatou-se que introduzir o líquido no material sólido nas condições citadas anteriormente tende a produzir sistemas mais bem homogeneizados, com maior fluidez e melhor desempenho no estado endurecido.

Tabela 3 - Análise de variância dos procedimentos de mistura sistema REF, avaliados aos 28 dias de idade

Resistência à tração por compressão diametral – 28 dias				
Fonte	G.L.	F	P	h_0
Procedimento	4	3,01	0,028	Significativo
Erro	45			
Total	49			

Nota: Propriedades avaliadas: resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade dinâmico.

Legenda: G.L. = Grau de Liberdade;

F = F - estatística; e

P = p-valor.

Tabela 4 - Comparação entre os procedimentos de mistura, avaliados aos 28 dias de idade pelo teste de Tukey

(a) Resistência à tração por compressão dimetral			(b) Módulo de elasticidade dinâmico			
Procedimento de mistura	Média	Agrupamento	Procedimento de mistura	Média	Agrupamento	
F 50.50%	2,2	a	F 25.75%_120s	29,1	a	
F 25.75%_120s	2,1	a	F 50.50%	29,0	a	
NBR 13276 (ABNT, 2005a)	1,9	a	F 25.75%_180s	28,7	a b	
F 25.75%_180s	1,9	a	NBR 13276 (ABNT, 2005a)	27,8	b	
N30s	1,9	a	N30s	27,7	b	

Nota: (a) resistência à tração por compressão diametral; e (b) módulo de elasticidade dinâmico. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si pelo teste Tukey a 5%.

Com os resultados de *squeeze-flow*, concluiu-se que, à medida que o sistema é mais bem misturado, ele flui mais facilmente, resultando em maiores deslocamentos antes de atingir a carga máxima. Esse maior deslocamento foi atingido apenas se modificando o processo e aumentando-se o tempo de mistura, uma vez que o teor de água foi mantido constante e a composição utilizada foi a mesma. Os ciclos de cisalhamento também demonstraram maior eficiência de mistura dos procedimentos com adição de água de forma fracionada ao material sólido.

Convém salientar que um processo de mistura adequado permite reduzir o teor de água para uma mesma trabalhabilidade, quando a tendência comum é introduzir mais água para atingir a consistência adequada no sistema, prejudicando o desempenho do material endurecido.

No estado endurecido não foi observada diferença significativa entre os procedimentos quanto à resistência à tração por compressão diametral. Na avaliação do módulo de elasticidade dinâmico, os procedimentos em que a água é adicionada em etapas, F25.75%_120s e F50.50%, são significativamente diferentes do procedimento da NBR 13276 (ABNT, 2005a). Cabe ressaltar que os novos procedimentos de mistura apresentados neste trabalho necessitam ser aplicados em outras formulações com aditivos (incorporador de ar e retentor de água) comumente utilizados em argamassas de revestimento.

Referências

ANTUNES, R.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. **Influência da Sequência de Mistura nas Propriedades Reológicas de Argamassas Avaliadas por Squeeze-Flow.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DE ARGAMASSAS, 1., INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORTARS TECHNOLOGY, 6., Florianópolis, 2005. **Anais...** Florianópolis: ANTAC, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7222:** argamassa e concreto: Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13276:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: preparo da mistura e determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2005a.

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. Rio de Janeiro, 2005b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15630:** argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos: determinação do módulo de elasticidade dinâmico através da propagação de onda ultrassônica. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15839:** argamassa de assentamento e revestimento de paredes e tetos: caracterização reológica pelo método *squeeze-flow*. Rio de Janeiro, 2010.

CARDOSO, F. A. **Método de Formulação de Argamassas de Revestimento Baseado em Distribuição Granulométrica e Comportamento Reológico.** São Paulo, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

CARDOSO, F. A. *et al.* **Influência do Tipo de Mistura no Comportamento Reológico de Argamassas Avaliado Por Squeeze-Flow.** In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS, 7., Recife, 2007. **Anais...** Recife: ANTAC, 2007.

ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze Flow Theory and Applications: a review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 132, n. 1/3, p. 1-27, 2005.

FERNÁNDEZ-ALTABLE, V.; CASANOVA, I. Influence of Mixing Sequence and Superplasticiser Dosage on the Rheological Response of Cement Pastes at Different Temperatures. **Cement and Concrete Research**, v. 36, n. 7, p. 1222-1230, 2006.

KUTNER, M. H. *et al.* **Applied Linear Statistical Models**. New York: McGRAW-HILL, 2004. 1396 p.

MENDENHALL, W.; SINCICH, T. **Statistics For Engineering and the Sciences**. 4TH. Englewood: Prentice Hall International, 1995. 1182 p.

Minitab, versão 16. Disponível em: <<http://www.minitab.com/pt-BR/products/minitab/free-trial.aspx?langType=1046>>. Acesso em: 27 maio 2013.

OLIVEIRA, I. R. *et al.* Dispersão e Comportamento Reológico de Concretos Refratários Ultra-Baixo Teor de Cimento no Sistema Al₂O₃-SiC-SiO₂-C. **Cerâmica**, v. 49, n. 309, p. 17-22, 2003.

PILEGGI, R. G.; STUDART, A. R.; PANDOLFELLI, V. C. How Mixing Affects the Rheology of Refractory Castables: part 1, part 2. **American Ceramic Society Bulletin**, v. 80, n. 6, p. 27-42, 2001.

REJEB, S. K. Improving Compressive Strength of Concrete By a Two-Step Mixing Method. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 4, p. 585-592, 1996.

SPIEGEL, M. R. **Estatística**: resumo da teoria. New York: McGRAW-HILL, 1977. 580 p.

TAMIMI, A. K. The Effects of a New Mixing Technique on the Properties of the Cement Paste-Aggregate Interface. **Cement and Concrete Research**, v. 24, n. 7, p. 1299-1304, 1994.

ZHOU, J. *et al.* Improved Fiber Distribution and Mechanical Properties of Engineered Cementitious Composites by Adjusting the Mixing Sequence. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, p. 342-348, 2012.

Agradecimentos

Os autores agradecem os comentários e sugestões realizados pelos avaliadores do artigo, e ao Mário Takeashi pelas fotos realizadas para o trabalho.

Revista Ambiente Construído
Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído
Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro
Porto Alegre - RS - Brasil
CEP 90035-190
Telefone: +55 (51) 3308-4084
Fax: +55 (51) 3308-4054
www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido
E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br