XIII SBTA
Simpósio Brasileiro de Tecnologia das ARGAMASSAS
11-13 | JUNHO | 2019 | GOIÂNIA | GO

DISTRIBUIÇÃO DE PRESSÃO EM ARGAMASSAS DURANTE O SQUEEZE FLOW NA CONFIGURAÇÃO DE VOLUME CONSTANTE

Tema: Métodos de ensaio.
Grupo: 2

FRANCO A. GRANDES[1], VICTOR K. SAKANO[2], ANDRESSA C. A. REGO[3], FABIO A. CARDOSO[4], RAFAEL G. PILEGGI[5]

[1] LME/PCC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/EPUSP – franco.grandes@lme.pcc.usp.br;
[2] LME/PCC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/EPUSP – victor.sakano@lme.pcc.usp.br;
[3] LME/PCC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/EPUSP – fabio.cardoso@lme.pcc.usp.br;
[4] LME/PCC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/EPUSP;
[5] Prof. Dr., LME/PCC – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo/EPUSP – rafael.pileggi@lme.pcc.usp.br

RESUMO

O método *squeeze flow* já é empregado na caracterização reológica de argamassas. Trabalhos anteriores incorporaram mapeamento de pressão ao ensaio para obter novas informações. O ensaio pode ter diversas configurações, resultando em condições distintas. Neste trabalho, argamassas de revestimento são analisadas através do método proposto, pela primeira vez na configuração de volume constante. A técnica permitiu a avaliação de comportamentos diversos entre as composições. Além da distribuição, foi possível observar a evolução da área da amostra e redução do volume. A separação de fases tem importante papel, e fluxos mais homogêneos geraram menor redução do volume ao final do ensaio.

Palavras-chave: Distribuição de pressão, *squeeze flow*, volume constante, argamassas de revestimento, separação de fases.

PRESSURE DISTRIBUTION IN MORTARS UNDER SQUEEZE FLOW IN CONSTANT VOLUME CONFIGURATION

ABSTRACT

Squeeze flow is already employed in the rheological characterization of mortars. Previous work has added pressure mapping to the test to obtain new information. The test may be performed in several configurations, resulting in different conditions. In this work, rendering mortars are analyzed using the proposed method, for the first time in constant volume configuration. The technique allowed for the evaluation of different behaviors. Besides pressure distribution, it was possible to observe the evolution of sample area and volume reduction. Phase separation plays an important role, and more homogeneous flows led to smaller volume reduction at the end of tests.

Key-words: Pressure distribution, squeeze flow, constant volume, rendering mortars, phase separation.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a percepção sobre a relevância da caracterização reológica de argamassas é crescente. Ela fornece informações sobre o comportamento do material no estado fresco, e também ajuda a explicar consequências microestruturais observadas no estado endurecido. Técnicas simplificadas que possuem baixa capacidade de diferenciação e resultam em análises superficiais vêm perdendo espaço. O *squeeze flow* é um método de ensaio tradicionalmente empregado em diversas áreas[1], e que ampliou as possibilidades de análise de argamassas[2,3], levando inclusive à criação de uma norma nacional de padronização do teste em argamassas de assentamento e revestimento[4]. É atrativo por ser de aplicação relativamente simples, e por se aproximar das condições de aplicação e processamento comumente encontradas para materiais cimentícios. O ensaio consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre placas paralelas com velocidade de deslocamento controlada, tendo como resposta a força necessária para manter o movimento.

Trabalhos anteriores incorporaram uma técnica de mapeamento dinâmico da pressão ao ensaio como alternativa para obter novas informações sobre o fluxo e os fenômenos de menor escala[5,6], especialmente relevantes em argamassas por se tratarem de suspensões concentradas multifásicas heterogêneas. A complementação mostrou grande potencial, trazendo maiores evidências sobre a ocorrência de separação de fases, além de novas informações sobre os regimes de fluxo e condições de contorno nas interfaces. O *squeeze flow*, no entanto, é versátil e pode ser realizado em diversas configurações, resultando em condições de ensaio distintas e, consequentemente, novas informações. Uma alteração que pode ser realizada se dá na relação entre a placa solicitante e a amostra: quando ambas têm o mesmo diâmetro, a configuração é denominada “área constante”, e durante o ensaio o material escoa para fora da placa; este método é mais comum na literatura. Por outro lado, caso a amostra seja menor do que a placa, dá-se o nome de “volume constante”; a área da amostra se altera durante o ensaio, porém há maior controle sobre as condições de contorno na borda da amostra[7].

Neste trabalho, diferentes argamassas de revestimento são analisadas através do método *pressure mapped squeeze flow*[6] (PMSF), pela primeira vez na configuração de volume constante. Três argamassas são analisadas, sendo duas preparadas em laboratório, uma com e outra sem aditivo modificador de viscosidade, além de uma argamassa industrializada.

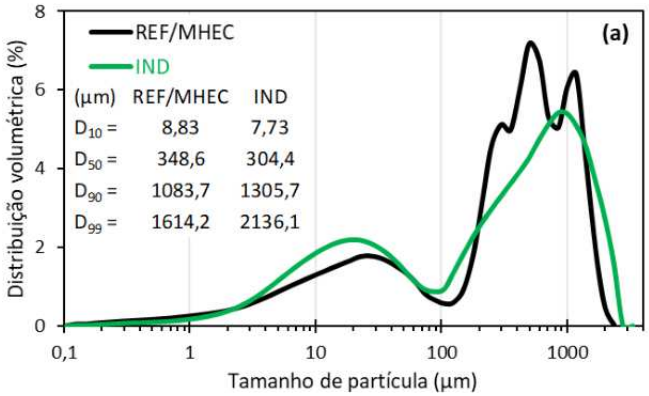
2. MÉTODOS

2.1. Materiais

Duas das argamassas foram formuladas e preparadas em laboratório. A de referência (REF) foi dosada em volume com: 70% de uma mistura de areias normalizadas (IPT); 15% de fíler calcário; e 15% de cimento CPII-F (Votorantim). Também foi analisada a mesma composição com um aditivo retentor de água (Tylose 100012P6), composto por metil hidroxietil celulose

(MHEC), dosado em 0,05% em massa. As argamassas de laboratório são as mesmas utilizadas em trabalhos anteriores com a técnica PMSF na configuração de área constante[5,6]. Além dessas, foi analisada uma argamassa de revestimento industrializada (IND), disponível no mercado brasileiro. A composição não é conhecida, mas o material seco foi caracterizado. A Figura 1 apresenta as características das formulações anidras e no estado fresco.

Figura 1 - (a) Distribuição granulométrica das formulações incluindo percentis (10, 50, 90 e 99); (b) teor de água de mistura, densidade aparente e distribuição de fases no estado fresco



(b)

Argamassa	REF	MHEC	IND
Água de mistura (%m)	15,5%	15,5%	15,2%
Dens. (g/cm³)	2,11	2,02	1,70
Ar (%vol)	4,5	8,4	25,2
Água (%vol)	28,3	27,1	22,4
Finos (%vol)	20,2	19,3	17,4
Areia (%vol)	47,0	45,1	35,0

Fonte: Elaborado pelos autores

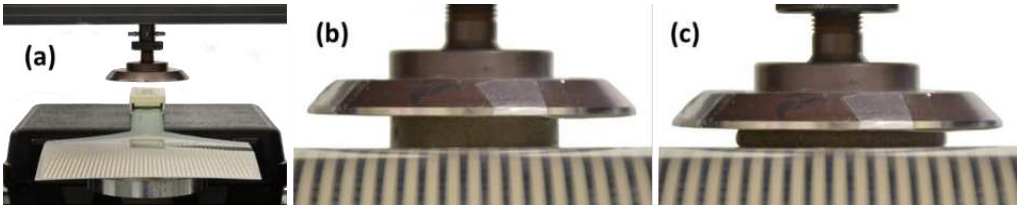
2.2. Squeeze flow

O teste foi realizado em uma máquina universal de ensaios (Instron 5569) com célula de carga de 1 kN e controle de deslocamento. Placas em aço inox de 101 mm (superior) e 200 mm (inferior) de diâmetro foram empregadas. A configuração utilizada foi de volume constante, com diâmetro inicial da amostra de 50,5 mm e altura de 10 mm. Foram realizados ensaios com velocidades de deslocamento de 0,1 e 3 mm/s, até deslocamento máximo de 7,5 mm ou carga máxima de 1000 N. O procedimento é baseado no padronizado pela NBR 15839[4], com exceção do tamanho inicial da amostra, para gerar a configuração de volume constante.

2.3. Monitoramento da distribuição de pressão interfacial

A distribuição de pressão na interface entre a argamassa e a placa foi aferida através de um sistema de mapeamento dinâmico de pressão (I-Scan, Tekscan), com um sensor fino e flexível (Flexiforce 5210, pressão máxima de 29 psi; resolução de 3,4 elementos/cm²) que consiste em uma malha de elementos piezoresistivos formados pelas interseções de eletrodos condutores lineares posicionados em duas direções perpendiculares; uma unidade eletrônica faz a aquisição e transferência dos dados a um computador. Este sensor é posicionado sobre a placa inferior da prensa utilizada para o ensaio de *squeeze flow*. Entre a amostra e o sensor é utilizada uma folha de transparência que serve como proteção ao sensor, enquanto na placa superior um filme plástico é colocado, tornando a interface similar à inferior. O procedimento experimental é ilustrado pela Figura 2.

Figura 2 - (a) Sensor posicionado na máquina universal; (b) início; e (c) final de ensaio.



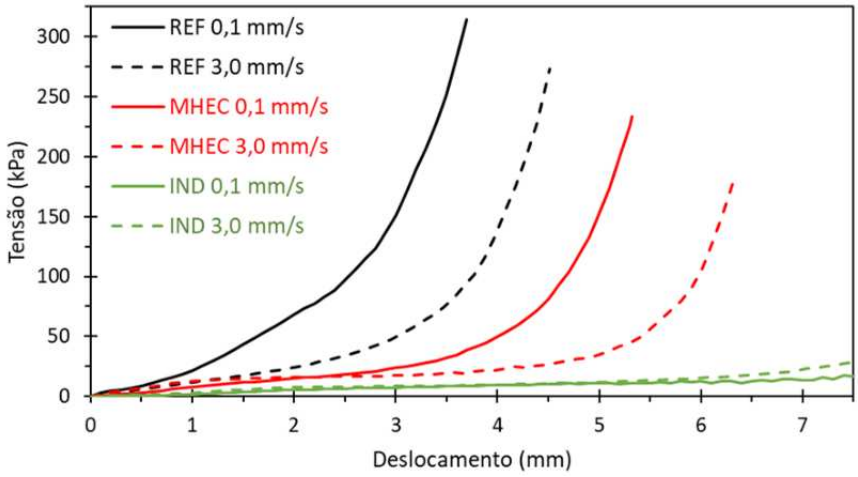
Fonte: Elaborado pelos autores

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. *Squeeze flow*

A Figura 3 mostra as curvas de *squeeze flow* das argamassas analisadas em duas velocidades de deslocamento. Como a área das amostras é variável durante os ensaios, os resultados são mostrados em tensão, sendo que a área utilizada foi determinada considerando a altura relativa a cada deslocamento e o volume constante.

Figura 3 - Curvas de *squeeze flow* das argamassas analisadas



Fonte: Elaborado pelos autores

A análise macroscópica do *squeeze flow* de suspensões é tipicamente dividida em até 3 estágios. Em pequenas deformações o material comporta-se como um sólido elástico. Depois o material pode sofrer grandes deformações sem aumento expressivo da carga, por fluxo viscoso ou deformação plástica. O último estágio é o de enrijecimento por deformação (*strain hardening*), caracterizado pelo rápido aumento da carga[8]. Para as argamassas de laboratório, a transição entre os estágios não é muito clara. Isso deve-se majoritariamente à ocorrência de separação de fases, que faz com que o enrijecimento por deformação seja antecipado. Especialmente para a argamassa REF as tensões mostram crescimento elevado já em deformações iniciais. A diferença entre as duas velocidades de deslocamento se dá pois em

maiores taxas de deformação há favorecimento aos fenômenos de arraste e menor influência da percolação da matriz por entre as partículas[2,9]. Com isso, a intensidade da separação de fases é reduzida, aumentando o espalhamento da argamassa.

Os ensaios com a argamassa MHEC apresentam comportamento similar, porém atingem maiores deformações. Isso deve-se ao principal efeito do aditivo, de aumento da viscosidade da fase líquida, que torna o fluxo mais homogêneo, reduzindo a separação de fases. Mesmo assim, o enrijecimento ocorreu enquanto a altura da amostra ainda era significativamente maior do que o diâmetro máximo de partícula na formulação, o que indica ocorrência de segregação[3]. O patamar do segundo estágio ainda é relativamente curto, mesmo para o ensaio a 3,0 mm/s. Esses resultados são condizentes com o que foi visto anteriormente para as mesmas argamassas em configuração de área constante[5], sendo extensivamente discutidos em outro trabalho[6].

A argamassa IND, por outro lado, apresenta comportamento bem diferente, com deformação plástica ao longo de todo o ensaio. Os ensaios em diferentes velocidades seguem com valores de tensão parecidos até aproximadamente 5 mm de deslocamento, quando a curva de 3,0 mm/s passa a apresentar tensões ligeiramente maiores do que a de 0,1 mm/s. Esse é uma resposta viscosa do fluido, e também evidencia a pequena influência da separação de fases. De fato, não há grandes indícios de enrijecimento por deformação até os 7.5 mm de deslocamento para os dois ensaios. O resultado, indicando facilidade de aplicação, segue o esperado para uma argamassa de revestimento industrializada para aplicação manual.

3.2. Mapeamento de pressão

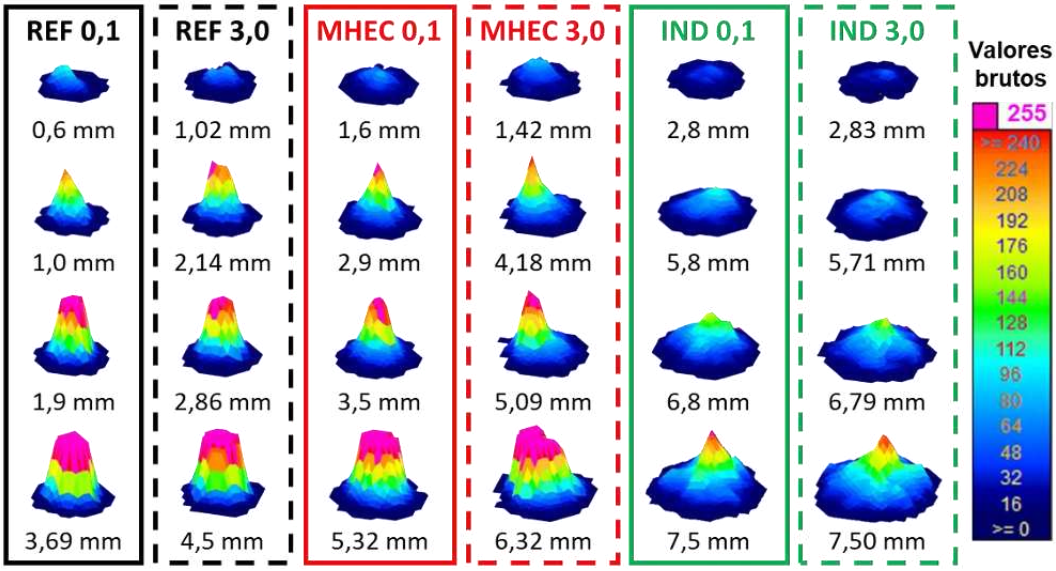
Imagens da distribuição de pressão em deslocamentos selecionados para as três argamassas analisadas nas duas velocidades de deslocamento são apresentadas na Figura 4. A apresentação em 3D possibilita a visualização da intensidade da pressão em cada ponto da amostra, seguindo ainda a escala de cores da unidade arbitrária "*raw*" do equipamento. As partes rosas correspondem à saturação do sensor para o ajuste de sensibilidade utilizado.

Os comportamentos de *squeeze flow* analisados na seção 3.1 são facilmente identificados nas imagens destacadas na Figura 4. A argamassa REF ensaiada a 0,1 mm/s mostra um aumento de pressão notavelmente mais cedo do que os outros ensaios: em 1 mm de deslocamento há um pico atingindo valores próximos a 200 *raw*. O início deste pico já é detectado em 0,6 mm de deslocamento, inclusive. Após a formação deste pico, se desenvolve o *strain hardening*; na distribuição de pressão, o que ocorre é que o pico cresce em área da amostra afetada e em intensidade. Para o ensaio em 3,0 mm/s da mesma argamassa, o fenômeno é equivalente, o que mudam são os deslocamentos.

A concentração de pressão observada tem origem no aumento da concentração de sólidos na região central da amostra devido à separação de fases; com o contato entre as partículas surgem forças de atrito, e esqueletos granulares são formados. Por fim, isso leva ao

travamento do fluxo por imbricamento das partículas. Como a amostra é relativamente pequena e o travamento para a REF se dá já no início do ensaio, rapidamente toda a área da amostra encontra-se sob elevadas pressões.

Figura 4 - Evolução da distribuição de pressão durante o *squeeze flow* das argamassas; unidade de medida não calibrada do equipamento, segundo escala de cores à direita



Fonte: Elaborado pelos autores

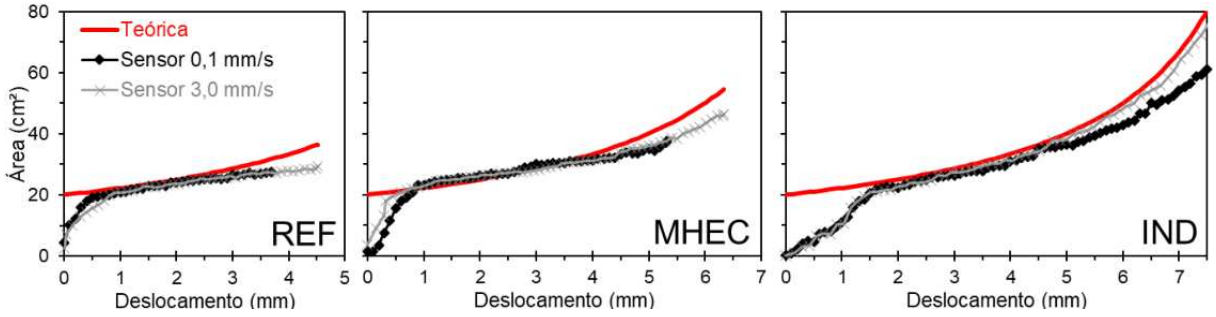
A argamassa MHEC apresentou comportamento similar, porém os picos de pressão foram inicialmente menos intensos. A argamassa já tinha um espalhamento inicial quando eles surgem, e a pressão na parte mais externa demora mais a ser afetada pelo contato entre as partículas no centro. Curiosamente, para o ensaio a 3,0 mm/s, o pico inicial de pressão aparece ligeiramente deslocado do centro, o que é uma possibilidade nas argamassas devido à heterogeneidade de suas partículas e alta concentração.

A evolução da distribuição da pressão na argamassa IND é mais homogênea. Com o andamento do espalhamento, é possível identificar um perfil razoavelmente regular, se aproximando de uma parábola. Isso se dá até deslocamentos bem avançados e para ambas as velocidades de ensaio. Já próximo ao final, em 6,8 mm de deslocamento, há sinais de um início de concentração de pressão, que evolui, ainda sem atingir a saturação do sensor ao final do ensaio (7,5 mm). Nesta última imagem é possível identificar uma pequena diferença entre os dois ensaios, com a pressão mais bem distribuída em 3,0 mm/s do que em 0,1 mm/s, em que a diferença das pressões nas bordas da amostra para as pressões na região central é mais acentuada. É uma evidência de possível separação de fases, mesmo que mais tardia e muito menos intensa do que ocorreu nas outras argamassas, no entanto muito sútil para análises conclusivas.

3.3. Evolução da área da amostra

Considerando o volume da amostra imutável durante o ensaio, é possível determinar a área e o raio em cada instante apenas pela mudança na altura. É interessante, no entanto, verificar o quanto essa hipótese é válida para argamassas. O sensor de pressão fornece também uma medição da área de contato percebida. A Figura 5 apresenta uma comparação entre a área teórica (calculada de acordo com o volume inicial da amostra) e a área medida pelo sensor para cada ensaio realizado.

Figura 5 - Comparação entre área teórica considerando volume constante e área medida pelo sensor durante os ensaios de *squeeze flow* das argamassas



Fonte: Elaborado pelos autores

Em todos os ensaios inicialmente há uma fase de acomodação: as pressões precisam atingir um determinado nível para serem detectáveis pelo sensor. Por isso, as curvas experimentais demoram um pouco para se aproximar da teórica, sendo que a que mais demorou foi a IND, o que faz sentido pois para essa argamassa as pressões se mantiveram baixas até deslocamentos maiores. Depois dessa fase inicial, há um período em que as áreas medidas têm boa conformidade com os valores calculados, o que indica tanto uma medição adequada quanto um crescimento da área conforme a hipótese de volume constante.

Na parte final da maioria dos ensaios, no entanto, as áreas medidas tornam-se menores do que as calculadas, com exceção do ensaio da IND a 3,0 mm/s. Dois fatores foram identificados como possíveis geradores dessas diferenças. O primeiro é a perda do ar incorporado, que especialmente quando há separação de fases pode ocorrer por colapso das bolhas de ar presentes nas argamassas. Para as argamassas REF e MHEC, contudo, a perda de volume de acordo com a área medida seria maior do que os seus teores de ar. Um segundo fator que poderia explicar isso é que, quando a segregação se dá de forma mais intensa, a borda da amostra passa a ser constituída principalmente por pasta, enquanto o centro apresenta elevada concentração de partículas. Com isso, a pressão no anel externo da amostra pode se tornar novamente tão baixa a ponto de não ser detectada pelo sensor. A influência da separação de fases nos dois fatores é mais uma evidência de que para a argamassa IND a 3,0 mm/s o fluxo seguiu sempre homogêneo, já que a área medida pelo sensor é parecida com a teórica até o final do ensaio.

4. CONCLUSÕES

A técnica de PMSF em volume constante permitiu a avaliação do espalhamento da argamassa e da evolução da distribuição de pressão, com o acompanhamento também da alteração da área da amostra. Foi possível observar que as composições tiveram comportamentos diversos. A argamassa de referência teve rápido enrijecimento por deformação; a incorporação do aditivo modificador de viscosidade reduziu a intensidade da separação de fases, mas não impediu que essa acontecesse. Já a argamassa industrializada apresentou elevada plasticidade. A distribuição de pressão foi diretamente afetada pela intensidade de segregação e pelas características do fluxo. A análise da área medida pelo sensor ajudou a esclarecer mais pontos relativos à separação de fases, e evidenciou outra consequência que é a redução do volume da amostra pela perda de ar incorporado. Fluxos mais homogêneos geraram menor redução do volume ao final do ensaio. A técnica e as análises como um todo demonstraram potencial para maior desenvolvimento em trabalhos futuros.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências de fomento FAPESP e CNPq pelo apoio.

6. REFERÊNCIAS

1. ENGMANN, J.; SERVAIS, C.; BURBIDGE, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. **Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics**, v. 132, n. 1–3, p. 1–27, 15 dez. 2005.

2. CARDOSO, F. A.; JOHN, V. M.; PILEGGI, R. G. Rheological behavior of mortars under different squeezing rates. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 9, p. 748–753, set. 2009.

3. CARDOSO, F. A. et al. Characterisation of rendering mortars by squeeze-flow and rotational rheometry. **Cement and Concrete Research**, v. 57, p. 79–87, mar. 2014.

4. 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.

5. GRANDES, F. A. et al. Técnica para avaliação da distribuição de pressão em argamassas durante o squeeze flow: influência do aditivo retentor de água. Anais do... Anais... In: XII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TECNOLOGIA DAS ARGAMASSAS. São Paulo: 2017

6. GRANDES, F. A. et al. Squeeze flow coupled with dynamic pressure mapping for the rheological evaluation of cement-based mortars. Cement and Concrete Composites, v. 92, p. 18–35, 1 set. 2018.

7. DENN, M. M.; MARRUCCI, G. Squeeze flow between finite plates. Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics, v. 87, n. 2, p. 175–178, 15 nov. 1999.

8. CARDOSO, F. A. **Método de formulação de argamassas de revestimento baseado em distribuição granulométrica e comportamento reológico**. 2009. Tese (Doutorado) — Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

9. SAKANO, V. K. et al. Comportamento reológico em squeeze flow de suspensões concentradas de esferas de vidro em silicones de diferentes viscosidades. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 361–377, mar. 2018.