

***Squeeze-flow* aplicado a argamassas de revestimento: Manual de utilização**

Fábio A. Cardoso, Rafael G. Pileggi, Vanderley M. John

Departamento de Engenharia de Construção Civil
Escola Politécnica – Universidade de São Paulo

RESUMO

A reometria por *squeeze-flow* consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas. O método é simples e versátil, sendo capaz de avaliar com precisão materiais em ampla faixa de consistência e em velocidades e grau de deformação variáveis. Adicionalmente, a mudança geométrica inerente ao ensaio, que simula fenômenos de restrição similares aos que ocorrem durante as etapas da aplicação das argamassas, faz que a técnica seja particularmente interessante para a avaliação reológica desses materiais. O presente texto consiste em um manual de utilização da reometria por *squeeze-flow* aplicado a argamassas, apresentando os principais fundamentos teóricos, descrevendo as características dos equipamentos, os procedimentos de ensaio e de análise de resultados necessários para a utilização do método. O texto foca principalmente a caracterização de argamassas de revestimento, contudo, as adaptações nas ferramentas e procedimentos para a avaliação de outros tipos de materiais de construção são também descritos. Desenhos técnicos detalham as ferramentas e os acessórios relacionados à técnica.

1. INTRODUÇÃO

Os principais requisitos de desempenho dos revestimentos estão relacionados a propriedades finais no estado endurecido, como a resistência de aderência, o módulo elástico e a permeabilidade, parâmetros importantes para promover maior durabilidade das edificações. As argamassas são aplicadas no estado fluido e, apesar de ser uma etapa curta e intermediária do processo, o comportamento destas no estado fresco é de

fundamental importância para possibilitar uma aplicação produtiva e isenta de defeitos. A adequação das características reológicas das argamassas às diversas solicitações envolvidas na aplicação permite a obtenção das máximas propriedades finais do revestimento, que são determinadas pelas características da formulação (composição química, granulometria, teor de água, aditivos e adições, etc.).

Em contraste à complexidade dos comportamentos reológicos que as argamassas podem apresentar por serem materiais multifásicos e reativos, estas são tradicionalmente caracterizadas por ensaios como a mesa de consistência, o “*dropping-ball*” e os testes de penetração. Estes métodos avaliam a consistência do material de acordo com o conceito de trabalhabilidade, havendo níveis de consistência pré-estabelecidos que, por norma, permitem a aplicação. Apesar dos referidos ensaios serem de baixo custo e de fácil execução, são insuficientes para efetuar uma avaliação da natureza reológica das argamassas, visto que são ensaios que não dissociam a contribuição da tensão de escoamento e da viscosidade na resistência ao fluxo e, ainda, são denominados monopontos, avaliando o comportamento das mesmas em apenas uma taxa de solicitação. [1]

Geralmente, através de uma abordagem simplificada, as argamassas são consideradas fluidos de Bingham, ou seja, materiais que apresentam uma tensão mínima para iniciar o escoamento (tensão de escoamento) e em fluxo têm uma relação linear entre tensão e taxa de cisalhamento. Conseqüentemente, são necessárias no mínimo duas medidas em diferentes taxas de cisalhamento para caracterizar um fluido de Bingham.

Considerando duas argamassas, A e B, como fluidos de Bingham, conforme ilustrado na Figura 1, observa-se que A apresenta tensão de escoamento maior e viscosidade plástica (inclinação da reta tensão *vs.* taxa de cisalhamento) menor do que o material B. Após iniciado o fluxo, em taxas de cisalhamento menores do que x , a argamassa A é mais consistente do que B, isto é, requer maior tensão de cisalhamento. Entretanto, para taxas maiores do que x ocorre uma inversão de comportamento, sendo que a argamassa A flui mais facilmente do que a argamassa B. Sendo assim, a avaliação das argamassas por ensaios do tipo monoponto é limitada [1], podendo acarretar em

decisões equivocadas quanto a parâmetros de formulação e aplicabilidade dos materiais, especialmente se a avaliação for efetuada em taxa muito diferente da solicitação real a qual o material é submetido na prática.

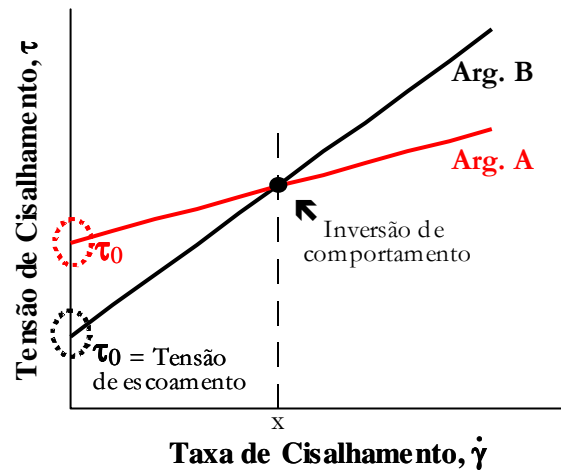


Figura 1 – Ilustração esquemática de duas argamassas distintas com comportamento de fluidos de Bingham [1].

Para superar tais limitações dos ensaios monoponto a utilização de técnicas de reometria faz-se necessária para a avaliação do comportamento reológico das argamassas. Os reômetros rotacionais avaliam o comportamento das argamassas em diferentes taxas de cisalhamento, geralmente controlando a taxa e registrando a tensão de cisalhamento resultante [2]. Entretanto, as limitações nos níveis de torque máximo (tensão de cisalhamento), que restringem a faixa de consistência que os poucos equipamentos disponíveis no mercado internacional são capazes de medir, aliadas ao alto custo desses produtos, fazem que os reômetros rotacionais para argamassas sejam utilizados de maneira discreta apenas em laboratórios de universidades e centros de pesquisa.

Neste contexto o *squeeze-flow*, o qual consiste em comprimir uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, surge como uma técnica promissora para a avaliação do comportamento reológico de argamassas e outros materiais de construção. Além de ser capaz de avaliar materiais com qualquer nível de consistência, a técnica é especialmente interessante para caracterização de argamassas, pois a mudança geométrica inerente ao ensaio simula condições do processamento desses materiais como nas etapas

de espalhamento, nivelamento e acabamento. Essa particular característica do *squeeze-flow* amplia seu potencial de utilização também para a previsão do comportamento reológico de concretos, visto que estes são compostos por argamassa e agregados graúdos e, durante o processamento no estado fresco, a argamassa presente é constantemente comprimida e cisalhada entre os agregados.

2. SQUEEZE-FLOW

2.1 Descrição

A reometria por *squeeze-flow* consiste na compressão de uma amostra cilíndrica entre duas placas paralelas, como demonstrado na Figura 2. Assim como na reometria rotacional o ensaio pode ser realizado com controle por força ou por deslocamento. No primeiro caso uma determinada força é aplicada ao material e a deformação resultante é registrada, enquanto no segundo caso o material é submetido a um deslocamento efetuado com velocidade constante e a força é medida [3].

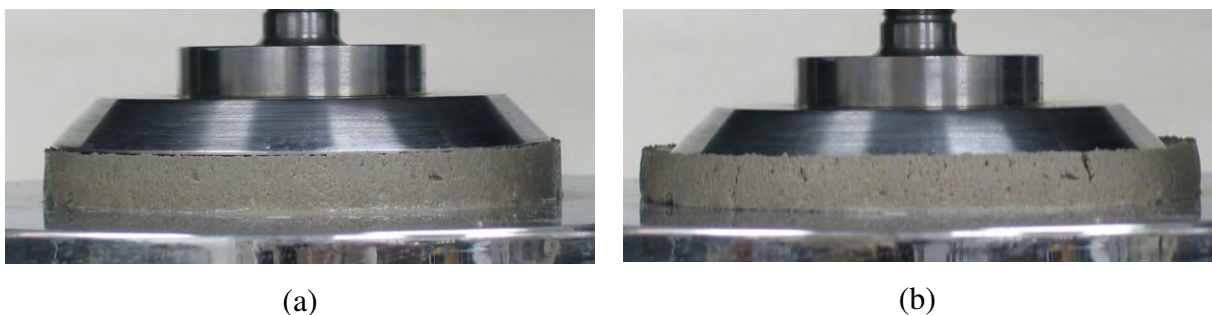


Figura 2 – Geometria utilizada nos ensaios de *squeeze-flow* em argamassas de revestimento. Dimensões da amostra de argamassa: (a) altura inicial = 10 mm; diâmetro inicial = 101 mm; (b) altura final = 7,5 mm.

A configuração experimental (Figura 2) adotada para execução do ensaio de *squeeze-flow* em argamassas consiste em aplicar a compressão através de uma placa superior (punção) cujo diâmetro é igual ao diâmetro inicial da amostra, sobre uma placa inferior (base) com diâmetro pelo menos duas vezes maior. Neste caso a área do material sendo solicitada permanece constante e o material se espalha para fora da área de atuação das placas [3-8]. Existem outras configurações experimentais que são também utilizadas, como: (1) os diâmetros da amostra e das placas inferior e superior

são idênticos, mantendo a área do material sendo submetido constante e fazendo que uma porção de material seja espremida para fora da área das placas e caia ao redor do dispositivo; (2) o diâmetro da amostra é menor do que o diâmetro das placas, mantendo o volume de material sendo testado constante, mas a área de contato entre o material e as placas é variável [3-8].

Entretanto, como aplicação de argamassa, esta deve ser espalhada sobre uma superfície, foi escolhida a configuração de ensaio ilustrada na Figura 2. A área sob carregamento permanece constante, mas a área submetida aos fenômenos de escorregamento e atrito entre a base e a amostra é variável. Esta é, portanto, uma configuração que se assemelha mais com a aplicação prática das argamassas e facilita o cálculo dos níveis de tensão.

2.2 Aplicação

O método é consagrado na caracterização dos mais diversos tipos de pastas incluindo alimentos, cosméticos, materiais cerâmicos, polímeros, compósitos, além de pastas de cimento, pastas de gesso, argamassas de extrusão, colantes e de revestimento [3-17].

2.3 Justificativa

A vasta gama de aplicação da técnica deve-se ao fato desta não apresentar alguns dos problemas mais comuns dos ensaios reológicos, como a perda de contato entre material e o elemento cisalhante (especialmente para materiais com características plásticas como as argamassas) e o entupimento de capilares. Além de o método ser simples, rápido e de fácil execução, é capaz de avaliar com precisão materiais com qualquer nível de consistência e, até mesmo formulações com a presença de fibras.

O *squeeze-flow* é especialmente interessante para avaliação de argamassas devido a mudança geométrica inerente ao ensaio que simula fenômenos de restrição que ocorrem durante etapas da aplicação. O método permite ainda a variação da taxa de sollicitação e também da magnitude das deformações, uma versatilidade bastante importante para permitir a simulação de diferentes situações práticas. No lançamento contra o substrato, por exemplo, a argamassa é sollicitada em altas taxas de cisalhamento e grandes

deformações, enquanto as etapas de desempenho e acabamento podem submetê-la a deformações e taxas de cisalhamento bastante variáveis.

Outro aspecto relevante refere-se ao potencial da ampla utilização da técnica, visto que esta dispensa o uso de reômetros especializados, pois pode ser facilmente implementada em equipamentos do tipo máquina universal de ensaios (prensas). Tais equipamentos são comumente utilizados em universidades, centros de pesquisa e desenvolvimento e, também, em laboratórios das indústrias destinados ao controle de qualidade.

3. EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS

- Máquina universal de ensaios – equipamento com controle de deslocamento e, preferencialmente, com células de carga disponíveis que sejam capazes de medir ampla faixa de carga com precisão (sugestão de 0 a 5000N ou 500kg). Deve ser verificado o nivelamento da máquina e, também, o paralelismo entre a travessa móvel e a base do equipamento, conforme indicado na Figura 3.

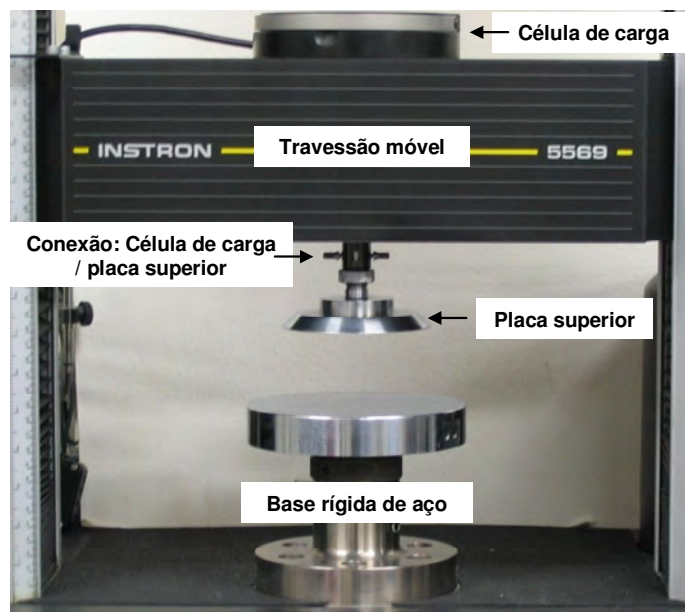
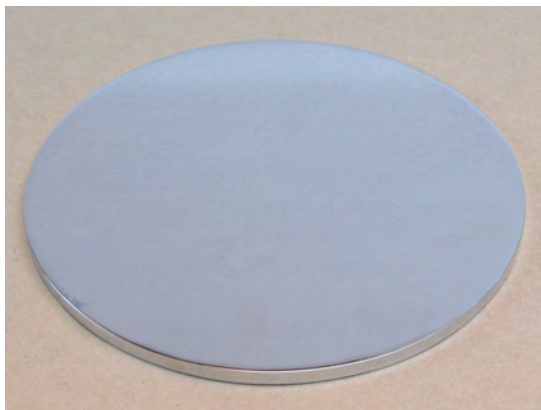
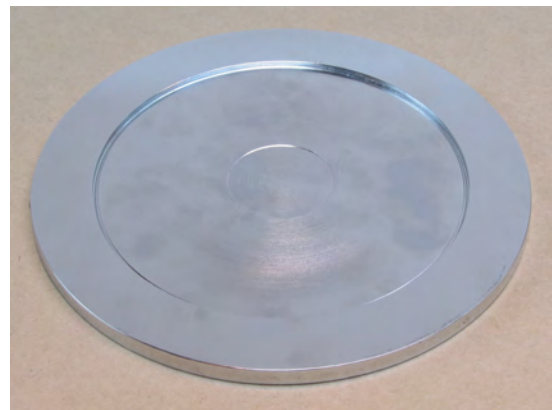


Figura 3 – Máquina universal de ensaios marca INSTRON (modelo 5569, capacidade 50kN, célula de carga utilizada 1000N).

- Base – base de aço robusta devidamente fixada e nivelada com o equipamento (Figura 3).
- Placa inferior – pratos de aço com 20cm de diâmetro e superfície cromada (Figura 4a). Geometria adequada na face inferior (Figura 4b) para encaixe na base.



(a)



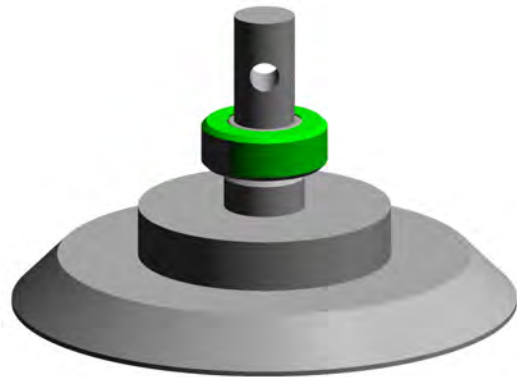
(b)

Figura 4 – Placa inferior. (a) Face superior; (b) Face inferior.

- Placa superior – punção em aço inox com 101mm de diâmetro e com encaixe adequado para ser fixado na célula de carga (Figura 5). A ferramenta ilustrada na Figura 5 tem encaixe para célula de carga de 1000N da INSTRON. O dispositivo de encaixe da ferramenta deve ser feito de acordo com a célula de carga a ser utilizada.



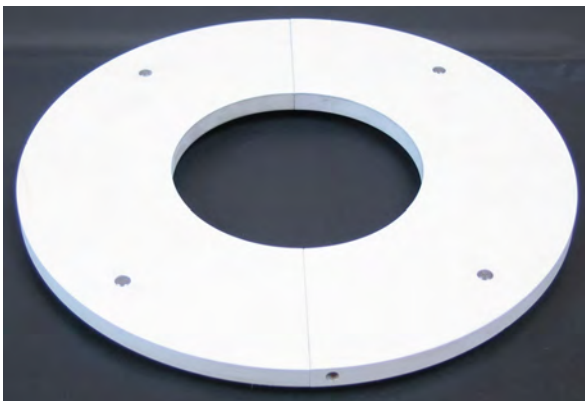
(a)



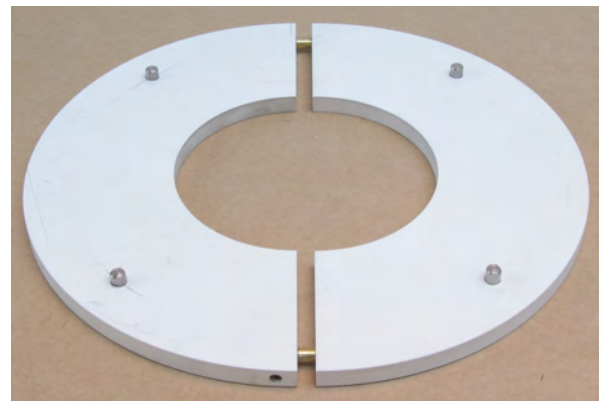
(b)

Figura 5 – Placa superior com 101mm de diâmetro (punção). (a) Foto, (b) Ilustração esquemática.

- Gabaritos – acessórios plásticos para auxiliar na moldagem garantindo a centralização da amostra na placa inferior (Figura 6).



(a)



(b)

Figura 6 – Gabaritos para auxiliar na moldagem e garantir a centralização da amostra. (a) Face superior; (b) Face inferior com destaque para os pinos que se apóiam nas bordas do prato e garantem a centralização sobre o mesmo.

- Moldes – anéis de plástico com controle de dimensões e paralelismo (101mm de diâmetro interno e 10mm de altura), Figura 7.

- Espátula – espátula metálica ou plástica para preencher o molde e razar a amostra. A espátula deve ser maior do que o diâmetro da amostra para garantir o nivelamento durante o razamento.

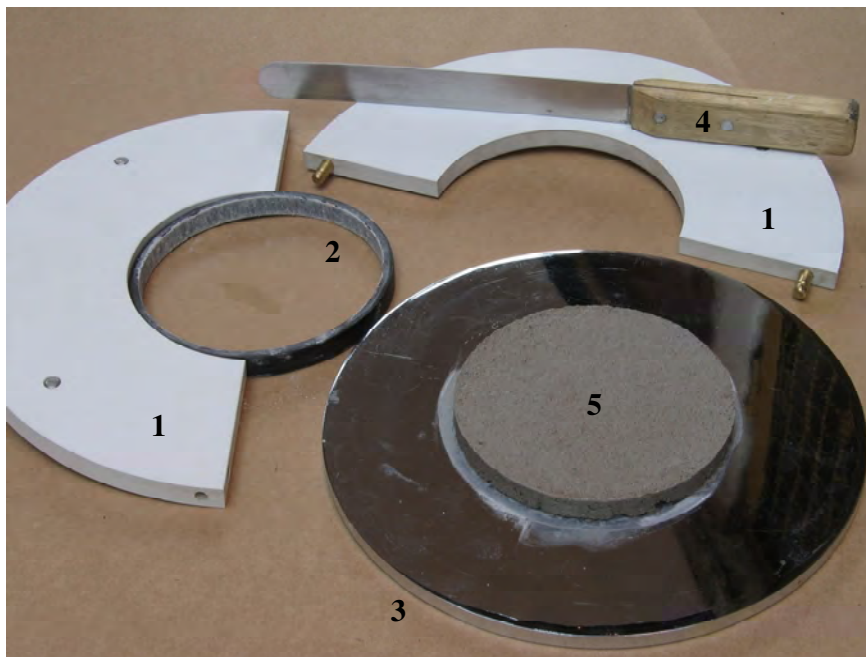


Figura 7 – Conjunto de ferramentas necessárias para moldagem das amostras para o ensaio de *squeeze-flow*. (1) Gabarito; (2) Anel para moldagem; (3) Prato ou placa inferior; (4) Espátula; (5) Amostra moldada.

4. DEFINIÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO

4.1 Geometria

A versatilidade do método de *squeeze-flow* permite que argamassas diferentes ou seus materiais constituintes sejam avaliados da maneira mais adequada, de acordo com as características do produto (argamassa) ou da pasta (ligante e água). Para cada tipo de material ou de concentração pode-se escolher ou adaptar uma condição de ensaio que seja mais apropriada em termos de facilidade de execução, requisitos básicos do ensaio ou simulação da aplicação.

A configuração geométrica indicada para a avaliação de argamassas de revestimento consiste em amostra com **10mm de altura e 101mm de diâmetro**, conforme ilustrado na Figura 2.

Entretanto, o teste pode ser realizado com outras dimensões para atender determinadas situações. Dependendo das dimensões das maiores unidades constituintes, neste caso os agregados, é indicado o aumento da altura da amostra, minimizando questões de efeitos geométricos de parede. Por outro lado, a utilização desta configuração com diâmetro menor (50.8mm) pode ser necessária para se obter níveis de cargas compatíveis com o equipamento disponível e com a faixa de precisão ótima da célula de carga. Além disso, a redução do diâmetro da amostra pode ser necessária visando uma logística factível em relação à quantidade de material utilizado e praticidade na preparação. Cabe ressaltar que como as solicitações geradas na amostra dependem da geometria de ensaio, é recomendável que não sejam realizadas comparações diretas entre amostras ensaiadas com geometrias distintas.

4.2 Programa

O método permite a variação da velocidade de deslocamento e também do nível de deformação imposta. Recomenda-se a utilização de **velocidade de deslocamento igual a 0,1mm/s**, por ser uma velocidade da ordem em que os fenômenos em situações práticas ocorrem e, também, por ser facilmente realizada pela grande maioria dos equipamentos do tipo máquina universal de ensaios. Velocidades mais baixas além de não refletirem a processos realizados na prática, levam a uma situação muito favorável à separação de fases. Velocidades acima de 0,1mm/s, na faixa entre 1 e 3 mm/s, são interessantes para avaliar o material sob uma condição diferente de solicitação e possível de ocorrência na prática. A limitação nesse caso fica por conta da capacidade do equipamento utilizado.

A deformação imposta deve ser a maior possível, para que o comportamento do material seja avaliado desde pequenas até grandes deformações. No caso de argamassas de revestimento, que geralmente possuem grãos com diâmetro máximo de aproximadamente 1,2mm, moldadas com 10mm de altura recomenda-se uma **deformação de 9mm**. Nesta situação a amostra será submetida a uma compressão até a

dimensão aproximada dos agregados, restando no final do ensaio praticamente apenas uma camada de agregados. No caso da utilização de amostras com 15 ou 20mm de altura, a deformação máxima imposta deve ser aumentada.

A taxa de aquisição de dados recomendada durante o ensaio é de aproximadamente 5 a 10 medidas por segundo. Deve-se usar taxas maiores para ensaios com velocidades maiores. Entretanto, a taxa utilizada vai depender da capacidade de aquisição do equipamento utilizado.

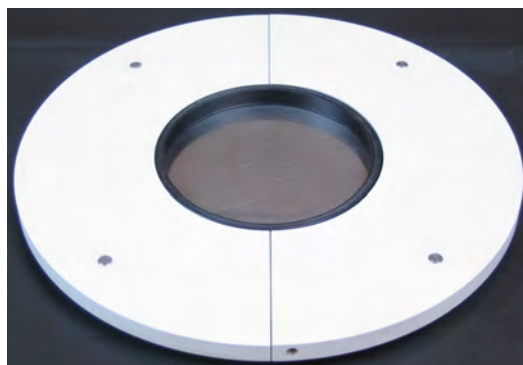
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1 Mistura

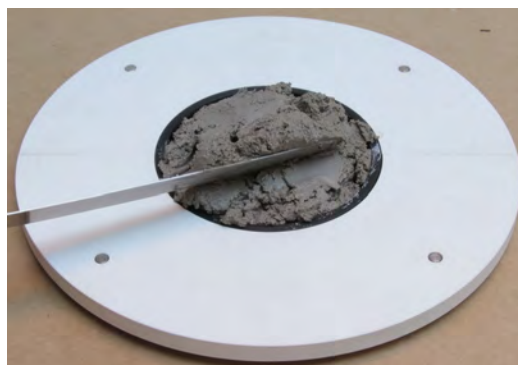
O procedimento para execução do ensaio começa na mistura da argamassa que deve ser feita de maneira a fornecer energia suficiente para desaglomeração das partículas e homogeneização da massa. Uma mistura ineficiente ou não reprodutível leva a resultados de *squeeze-flow* com maiores níveis de carga e com desvio muito grande nas repetições de uma mesma batelada e entre bateladas diferentes, conforme demonstrado na literatura [14,16]. A indicação para a mistura é tal que a simples mudança no método de adição de água favorece um processo mais eficiente [14,16].

5.2 Moldagem

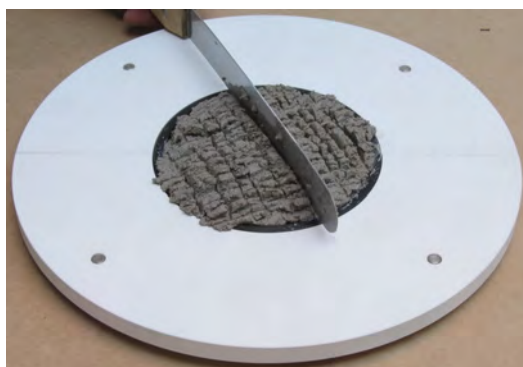
Imediatamente após a mistura moldar a amostra de argamassa sobre a placa inferior totalmente limpa (isenta de poeira, gordura ou umidade) utilizando o molde (anel de plástico) e o gabarito (Figura 8a). Utilizando a espátula despejar um volume excessivo de material dentro do molde (Figura 8b), acomodar a massa gentilmente para promover preenchimento uniforme (Figura 8c), visando evitar a compactação do material. Razar / nivelar a superfície com a espátula para garantir um bom acabamento superficial (Figuras 8d e 8e), pois a placa superior deve tocar perfeitamente o material antes do início do ensaio. Retirar uma das metades do gabarito (a outra permanece para garantir a centralização da amostra, Figura 8f) e em seguida retira o anel de plástico cuidadosamente para não alterar a geometria da amostra (Figuras 8g e 8h).



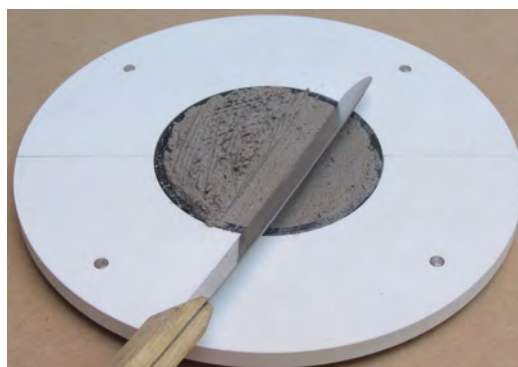
(a)



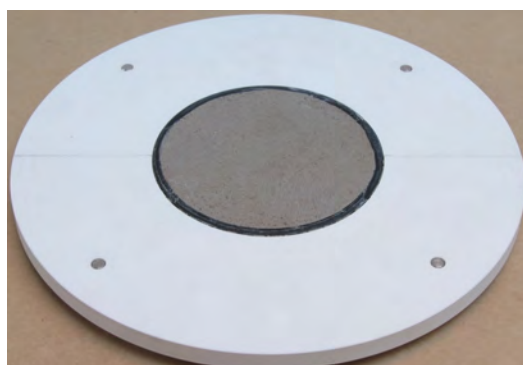
(b)



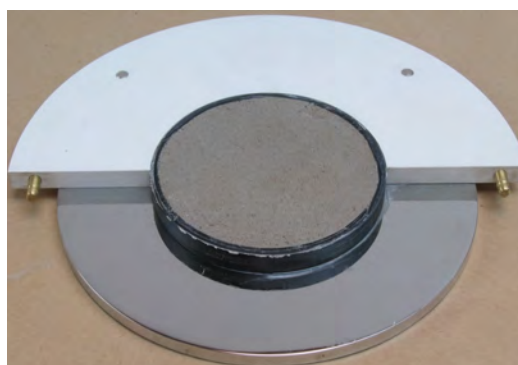
(c)



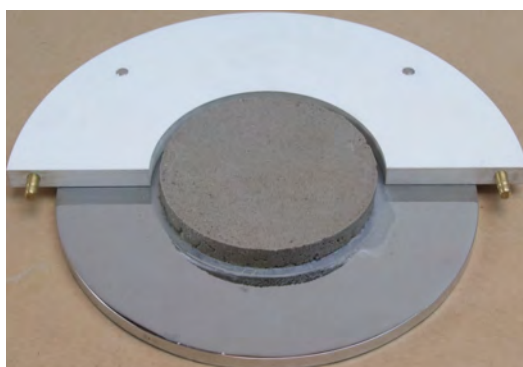
(d)



(e)



(f)



(g)



(h)

Figura 8 – (a) Conjunto (placa inferior + gabarito + molde) pronto para ser utilizado; (b) preenchimento do molde com quantidade excessiva de argamassa; (c) acomodamento da

argamassa; (d) nivelamento da amostra através de razeamento com a espátula; (e) amostra nivelada; (f) retirada da metade do gabarito; (g) retirada do molde; (h) amostra centralizada pronta para ser ensaiada.

5.3 Colocação da amostra

Transportar cuidadosamente a placa inferior com a amostra centralizada para a máquina universal de ensaios e acoplar a placa sobre a base. Garantir a limpeza e secagem da placa superior. Descer a placa superior até que esta se aproxime da amostra. Efetuar o encosto da placa superior na amostra gentilmente (Figura 2a), sempre monitorando os valores de carga para evitar compactação do material antes do início efetivo do ensaio. Após zerar a carga e o deslocamento o ensaio está pronto para ser iniciado.

5.4 Cuidados no procedimento experimental

O método de squeeze-flow apresenta elevada sensibilidade e repetibilidade, entretanto as possíveis variações estão relacionadas com falhas no procedimento experimental. As falhas mais comuns ocorrem durante a moldagem das amostras e o encosto antes do início do ensaio. Durante a moldagem deve-se procurar obter uma superfície lisa e plana, evitando a compactação da amostra, Figura 9. A desmoldagem deve ser realizada com cuidado para não ocorrer descentralização da amostra durante a retirada do molde e do gabarito.

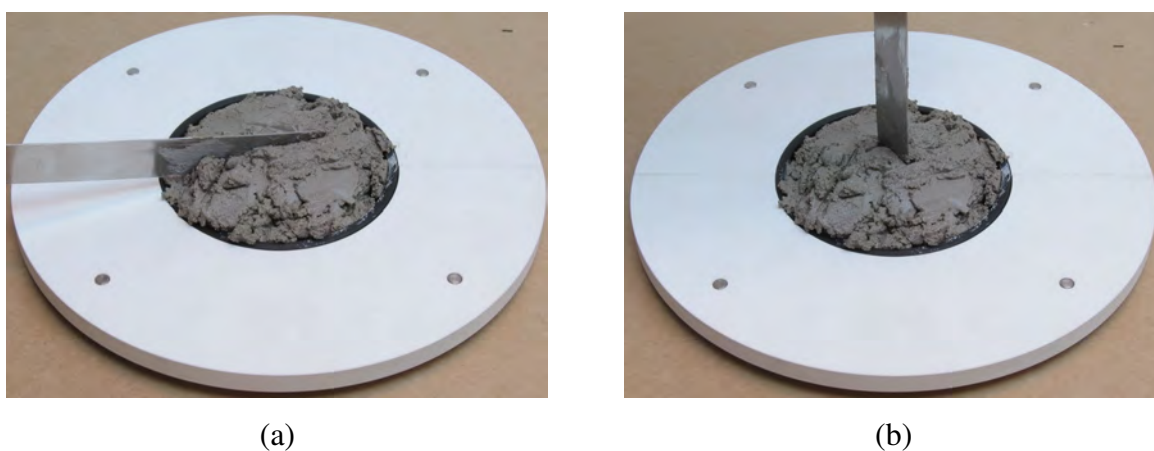


Figura 9 – Situações não recomendáveis na moldagem das amostras.

No caso de argamassas pouco fluidas, a moldagem deve ser ainda mais cuidadosa, em pequenas porções espalhando uniformemente a massa na área do molde visando o completo preenchimento do mesmo. As falhas de moldagem devido ao não preenchimento uniforme de molde são ilustradas na Figura 10.

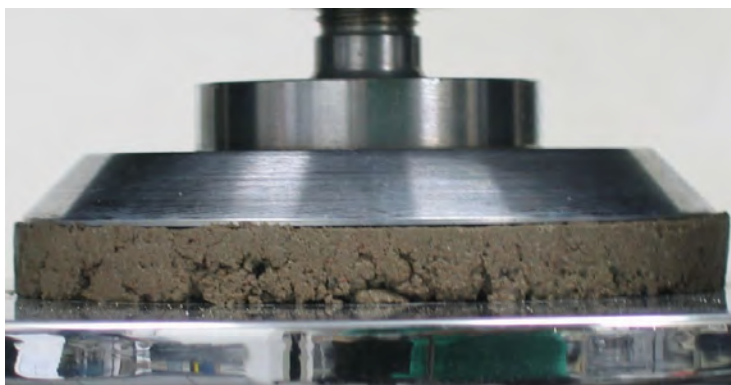


Figura 10 – Falhas de moldagem de uma argamassa pouco fluida.

5.5 Registro de imagens

É importante registrar imagens antes e depois da realização do teste conforme ilustrado pela Figura 2, pois a análise visual da amostra fornece informações sobre o comportamento do material quanto a segregação de fases, ruptura por deformação plástica, extensão e forma de espalhamento e possíveis falhas experimentais. As fotos devem ser realizadas com auxílio de tripé para fixação da máquina fotográfica próximo ao local de ensaio, de preferência mantendo constantes a posição e o grau de aumento.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

6.1 Observação experimental

Após iniciado os testes de *squeeze-flow* o operador deve observar o ensaio verificando e registrando a ocorrência dos seguintes fenômenos:

- separação de fases (exsudação);
- fluxo descontínuo do material;

- emissão de sons (geralmente causada pelo atrito entre agregados e/ou agregados e a placa).

No final do teste, após a retirada da amostra do equipamento, o operador pode ainda verificar qualitativamente a intensidade de separação de fases através de uma avaliação táctil da argamassa ensaiada. Isto porque quando a pasta flui com velocidade muito diferente dos agregados, esta migra radialmente fazendo que o centro da amostra fique com uma concentração de agregados maior e compactados. Portanto, a diferença entre a consistência do centro e a das regiões periféricas da amostra é um indicativo da separação entre a pasta e os agregados ocorrida no teste.

6.2 Tratamento de dados

Os resultados dos testes de *squeeze-flow* são expressos de maneira simples e direta, como gráficos de carga *vs.* deslocamento ou tensão *vs.* deslocamento. No caso da escolha dos gráficos de tensão, basta dividir as cargas de compressão registradas pela área da placa superior (punção).

Entretanto, algumas argamassas têm um comportamento particular durante os ensaios, resultando em gráficos com variações de carga como demonstrado na Figura 11. Para os ensaios realizados com os parâmetros sugeridos neste manual para avaliação de argamassas de revestimento (dimensões da amostra: 10mm de altura, 101mm de diâmetro; velocidade de ensaio 0,1mm/s) é comum a ocorrência destas variações de carga em função do fluxo descontínuo do material.

No teste de *squeeze-flow* a argamassa é comprimida e, como resposta, deforma-se radialmente. Neste processo algumas argamassas, geralmente com níveis de consistência intermediários, fluem e depois param, sendo que quando param de fluir a carga sobe e quando voltam a escoar a carga cai. Este fenômeno está relacionado ao atrito entre as placas e a argamassa e, também, aos mecanismos internos de deformação e fluxo do material. Quando o atrito entre as placas e a argamassa é maior do que o atrito interno da argamassa, esta sofre cisalhamento interno para acomodar a redução da altura, porém sem espalhamento radial significativo. Por outro lado, quando o atrito interno é maior do que o atrito entre a massa e as placas, a argamassa espalha-se

radialmente em extensão significativa, sendo facilmente perceptível ao observador. A ocorrência repetitiva desses fenômenos resulta na oscilação de carga exemplificada na Figura 11 para uma argamassa de revestimento industrializada.

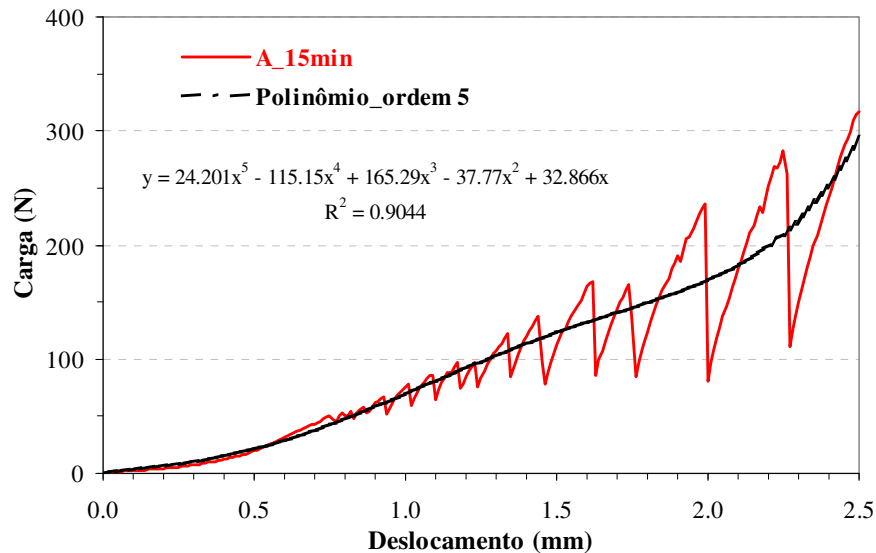


Figura 11 – Exemplo de ajuste matemático de uma curva experimental de *squeeze-flow* que apresenta oscilação na carga causada pelo fluxo descontínuo de uma argamassa de revestimento industrializada testada 15 minutos após a mistura.

A ocorrência destas oscilações por si só já é uma informação que o teste fornece sobre o comportamento do material sendo avaliado. As oscilações sugerem a ocorrência de altos níveis de cisalhamento interno no material. Entretanto, para facilitar a utilização dos dados visando à comparação com outros resultados e à observação do perfil médio da curva, é necessário o tratamento dos dados a fim de se obter uma curva isenta de oscilações.

A suavização da curva pode ser realizada em *software* do tipo Microsoft Office Excel ou similar, através da adição de uma linha de tendência do tipo polinomial com intersecção igual a zero. A curva de suavização escolhida deve ser a que melhor se ajuste a curva experimental, sendo que no exemplo da Figura 11 a função polinomial escolhida foi de grau 5. Cabe ressaltar que o R^2 da função é um parâmetro que quantifica o ajuste desta com a curva experimental, sendo que quanto maior seu valor melhor o ajuste. No entanto, em algumas situações a curva de suavização com maior valor de R^2 pode não ser adequada se representar um comportamento que não tenha um

sentido físico. Por exemplo, se a curva ajustada indica carga nula (para valores de deslocamento maiores do que zero) ou valores de carga negativos (o que neste caso indicaria equivocadamente tração na amostra).

6.3 Interpretação dos resultados

O perfil típico obtido de um ensaio de *squeeze-flow* com controle por deslocamento expresso na forma de carga vs. deslocamento apresenta 3 regiões bem definidas [4,8], conforme demonstrado na Figura 12.

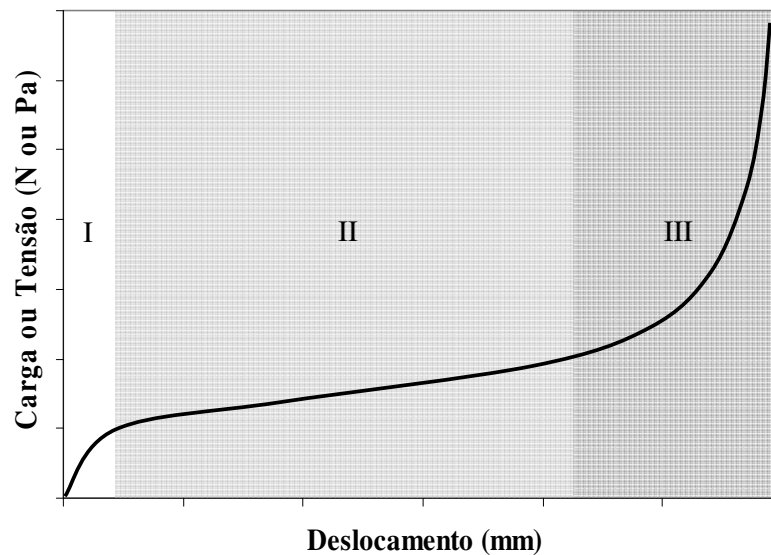


Figura 12 – Perfil típico de carga vs. deslocamento de um ensaio de *squeeze-flow* realizado com deslocamento controlado. Estágio I: pequeno deslocamento - deformação elástica; estágio II: deslocamento intermediário - deformação plástica e/ou fluxo viscoso; estágio III: grande deslocamento - enrijecimento por deformação (*strain hardening*).

No primeiro estágio, em pequenas deformações, o material comporta-se como um sólido, apresentando deformação elástica linear e está relacionado à tensão de escoamento do material e, em termos práticos, com a máxima espessura de camada que pode ser aplicada.

No estágio seguinte (II), em deslocamentos intermediários, a compressão resulta em deformação radial alongacional e de cisalhamento superando as forças que mantinham o material sob comportamento elástico e, assim, o mesmo flui por

deformação plástica e/ou viscosa dependendo das suas características. Nesta etapa o material é capaz de sofrer grandes deformações sem aumento significativo da força necessária para o deslocamento, que é um comportamento que favorece a produtividade na aplicação de argamassas.

Já no terceiro estágio, em grandes deformações, ocorre um aumento expressivo (exponencial) da carga necessária para prosseguir a deformação do material. A aproximação das partículas ou de outros constituintes de um sistema submetido a grandes deformações gera forças restritivas ao fluxo devido à maior interação por embricamento ou entrelaçamento (no caso de fibras) das unidades móveis. Consequentemente, as forças de atrito são predominantes nessa situação. No caso de das argamassas, ainda existe uma grande tendência à separação de fases, devido a sua natureza multifásica, principalmente em condições de grandes deslocamentos e baixas velocidades [3,13]. Este terceiro estágio é caracterizado por um comportamento em que procedimentos de aplicação e acabamento do material tendem a ser dificultados, devido às altas cargas envolvidas.

É importante ressaltar que a faixa de deslocamento e a intensidade dos estágios variam de acordo com a composição dos materiais (teores de água e de ar, dimensões mínima e máxima das partículas, presença de aditivos) e também com a configuração de ensaio utilizada.

Parâmetros a serem avaliados nos resultados de *squeeze-flow*:

- nível de carga (tensão);
- perfil da curva em função do deslocamento;
- identificação de estágios de comportamento (ilustrados na Figura 12);
- ocorrência de oscilação nas curvas.

Portanto, a análise uma curva carga ou tensão vs. deslocamento possibilita a compreensão do comportamento reológico da argamassa em diferentes situações durante sua aplicação, partindo de uma condição estacionária representando o material

em repouso, até um elevado nível de deformação, cisalhamento e restrição geométrica durante a aplicação.

7. EXEMPLOS APLICADOS A ARGAMASSAS DE REVESTIMENTO

Os exemplos mostrados a seguir demonstram o potencial de utilização da técnica na avaliação do comportamento reológico de argamassas de revestimento.

7.1 Influência do teor de água e tempo de consolidação

A Figura 13 ilustra a influência do teor de água e do tempo de consolidação de no comportamento reológico de uma argamassa avaliado por *squeeze-flow*. Foram utilizados dois teores de água, 13%, teor baixo para essa composição, foi utilizado para simular uma argamassa “seca” como para aplicações de contra-piso, e 15% que é o teor usual para aplicação desse material como revestimento. As amostras de 50,8 de diâmetro e 10mm de altura foram ensaiadas 15 e 60 minutos após a mistura com velocidade de 0,1mm/s e deslocamento máximo de 2,5mm [15].

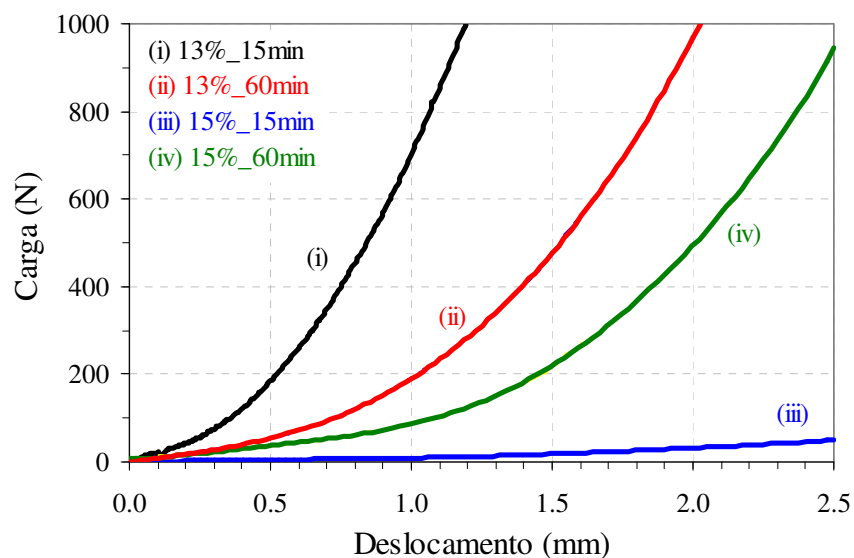


Figura 13 – Influência do teor de água e tempo de consolidação no comportamento reológico de uma argamassa de revestimento [15].

A argamassa com 13% de água passa direto de um comportamento elástico (estágio I) para o enrijecimento por deformação (estágio III) devido ao elevado atrito

entre os agregados [15]. No período de 60 minutos ocorre uma redução das cargas necessárias para deformação do material decorrentes de seu rompimento, pois o aumento da viscosidade da pasta e redução da sua capacidade plástica em manter a coesão.

O aumento do teor de água para 15% inverteu o comportamento da composição, tornando-se menos viscosa e facilitando o escorregamento relativo dos agregados. As curvas apresentaram níveis de carga menores e, para 15 minutos, comportamento de deformação plástica. Em maiores deformações o enrijecimento típico do terceiro estágio é bem menos intenso do que o observado para a composição com 13% de água. O efeito da consolidação é comprovado com o aumento das cargas e mudança de perfil após 60 minutos. Neste caso a quantidade e as características da pasta foram adequadas para manter a coesão do material.

7.2 Influência da velocidade de deslocamento

Amostras da formulação exemplificada acima com 13 e 15% de água foram ensaiadas em velocidades de deslocamento do punção variando de 0,01 até 1mm/s, conforme demonstrado na Figura 14. As amostras com 13% de água necessitaram de maiores cargas para se deformarem quando solicitadas em maiores velocidades. Isto porque a pasta presente está em quantidade insuficiente e apresenta elevada viscosidade não sendo capaz de manter os agregados afastados e lubrificados, gerando altos níveis de atrito e um comportamento do tipo dilatante.

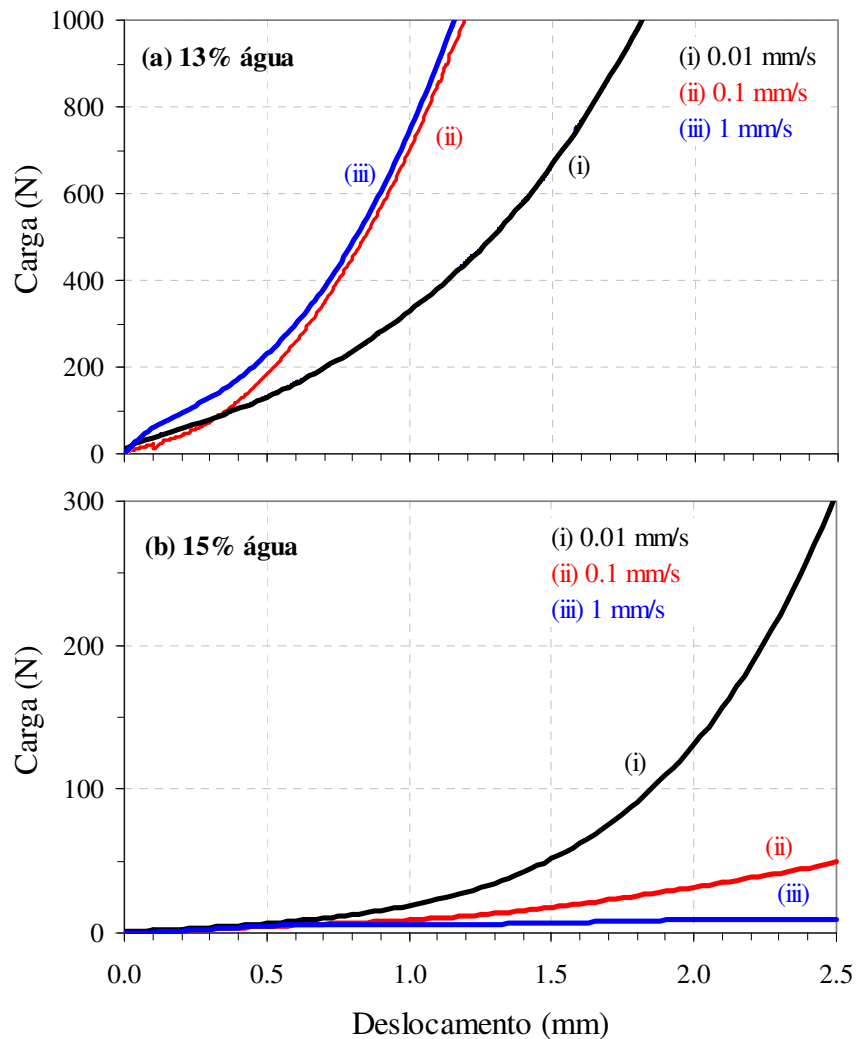


Figura 14 – Influência da velocidade de deslocamento do punção no comportamento reológico. (a) argamassa de revestimento com 13% de água. (b) 15% de água. As amostras foram ensaiadas 15 minutos após a mistura com velocidades de 0,01, 0,1 e 1 mm/s. Diâmetro 50,8mm. Altura 10mm [15].

Já as amostras com 15% de água apresentaram comportamento oposto, sendo deformadas mais facilmente em maiores taxas. Neste caso quanto menor a velocidade maior a tendência à segregação, pois a pasta mais fluida tem tempo suficiente para migrar radialmente através da estrutura tridimensional formada pelos agregados, desta forma a concentração de sólidos na região central é elevada e as cargas resultantes também. Quando solicitadas em altas velocidades a pasta não tem tempo para migrar grandes distâncias e o sistema comporta-se como um fluido homogêneo, necessitando

menores cargas para ser deformado. O comportamento é similar a pseudoplástico, mas como ocorre separação de fases esta afirmação deve ser feita com ressalvas.

7.3 Avaliação de produtos diferentes

A Figura 15 exemplifica a utilização do método para a comparação do comportamento reológico de diferentes produtos de revestimento. A argamassas D, que tinha aspecto bastante seco, apresentou carga acima de 1000N em deslocamento menor do que 1,5mm, ou seja, comportamento caracterizado pelo enrijecimento por deformação (estágio III). O produto E comportou-se plasticamente até 1mm de deslocamento, a partir deste deslocamento a ocorre a inversão que caracteriza o terceiro estágio, com aumento expressivo das cargas. As argamassas H e I apresentaram cargas intermediárias se comparadas aos outros produtos exemplificados, entretanto o perfil das curvas é diferente. O produto H necessita de cargas maiores para ser deformado em baixos deslocamentos, porém a carga não aumenta expressivamente para deslocamentos maiores e o perfil da curva não indica tendência de inversão. Já a argamassa I teve comportamento oposto, sendo que em pequenos deslocamentos fluiu facilmente, mas para deslocamentos maiores que 1,8mm apresentou maior resistência ao fluxo do que a argamassa H. A argamassa F é caracterizada pelo elevado teor de ar, resultando em níveis de carga muito baixos e com comportamento plástico, conforme avaliado pelo *squeeze-flow*.

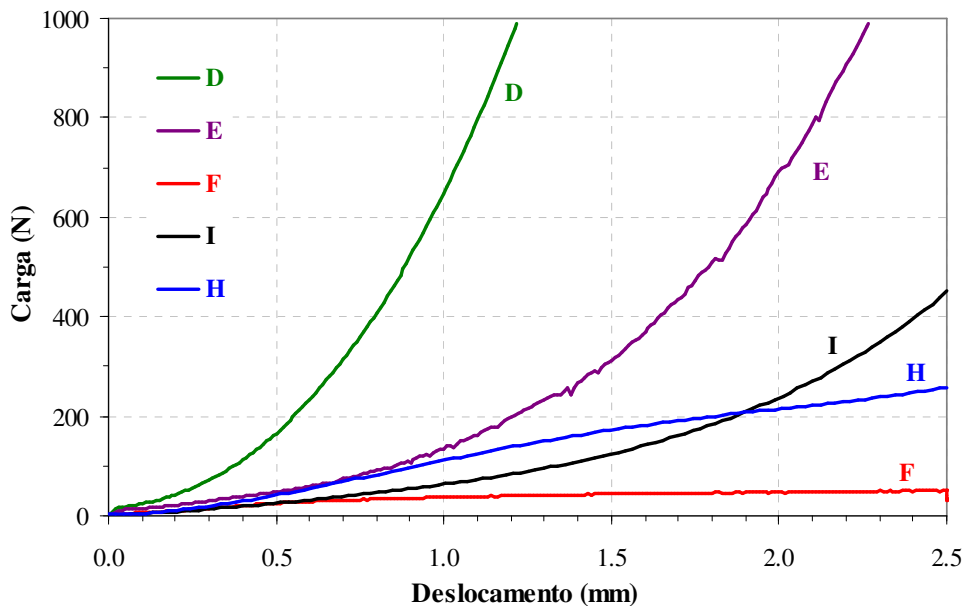


Figura 15 – Avaliação reológica de diferentes argamassas de revestimento industrializadas do mercado nacional. As amostras foram ensaiadas 60 minutos após a mistura com velocidade de deslocamento de 0,1mm/s. Dimensões: diâmetro = 101mm, altura = 10mm [17].

7.4 Testes com grandes deslocamentos

No intuito de simular alguma situação prática onde elevada restrição geométrica está envolvida, os testes de squeeze-flow com grandes deslocamentos são indicados. O ensaio é conduzido exatamente da mesma forma, mas o deslocamento máximo pode ser de até 9mm (para amostra com 10mm de altura). O comportamento de duas argamassas diferentes sob grandes deformações é demonstrado na Figura 16. Observa-se que a Arg. 1 requer baixas cargas até 7mm de deslocamento, a partir deste valor a interação entre os agregados torna-se muito intensa e eleva expressivamente as cargas necessárias para prosseguir a deformação. A Arg.2 apresenta-se mais consistente, com cargas mais elevadas e inversão de comportamento plástico para enrijecimento por deformação em deslocamento menor (5,5mm). São demonstradas as curvas bruta e suavizada dos resultados da Arg.2, pois nos dados brutos observa-se intensa oscilação das cargas, indicando um fluxo descontínuo.

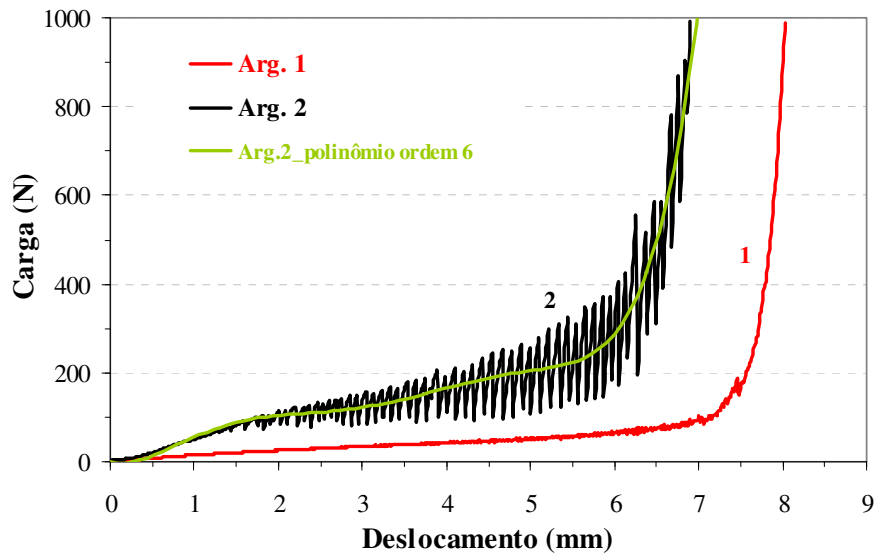


Figura 16 – Exemplo de duas argamassas de revestimento submetidas ao ensaio de *squeeze-flow* com grandes deformações. Dimensões da amostra: diâmetro = 101mm, altura = 10mm. Velocidade de deslocamento = 0,1mm/s. Resultados não publicados.

7.5 Influência da mistura

O método de *squeeze-flow* é bastante sensível a variações no material, sendo que a efetividade da mistura no caso de suspensões altamente concentradas, como as argamassas, tem grande influência no comportamento reológico e, conseqüentemente, nos resultados obtidos por *squeeze-flow*.

Na Figura 17 fica evidente a influência das condições de mistura no comportamento reológico de uma argamassa industrializada. As misturas Manual (Figura 17a) e Norma (Figura 17b) resultaram em argamassas mais difíceis de serem deformadas e com baixa repetibilidade, indicando um material mal misturado [16]. A heterogeneidade do sistema fica evidenciada pela evolução aleatória do comportamento reológico observado após 60 minutos (17d, 17e). Na prática, uma argamassa com esse comportamento seria mais difícil de ser aplicada, com significativa variação no comportamento reológico entre bateladas e, provavelmente, com evolução microestrutural bastante heterogênea resultando num revestimento com propriedades diferentes ao longo da fachada.

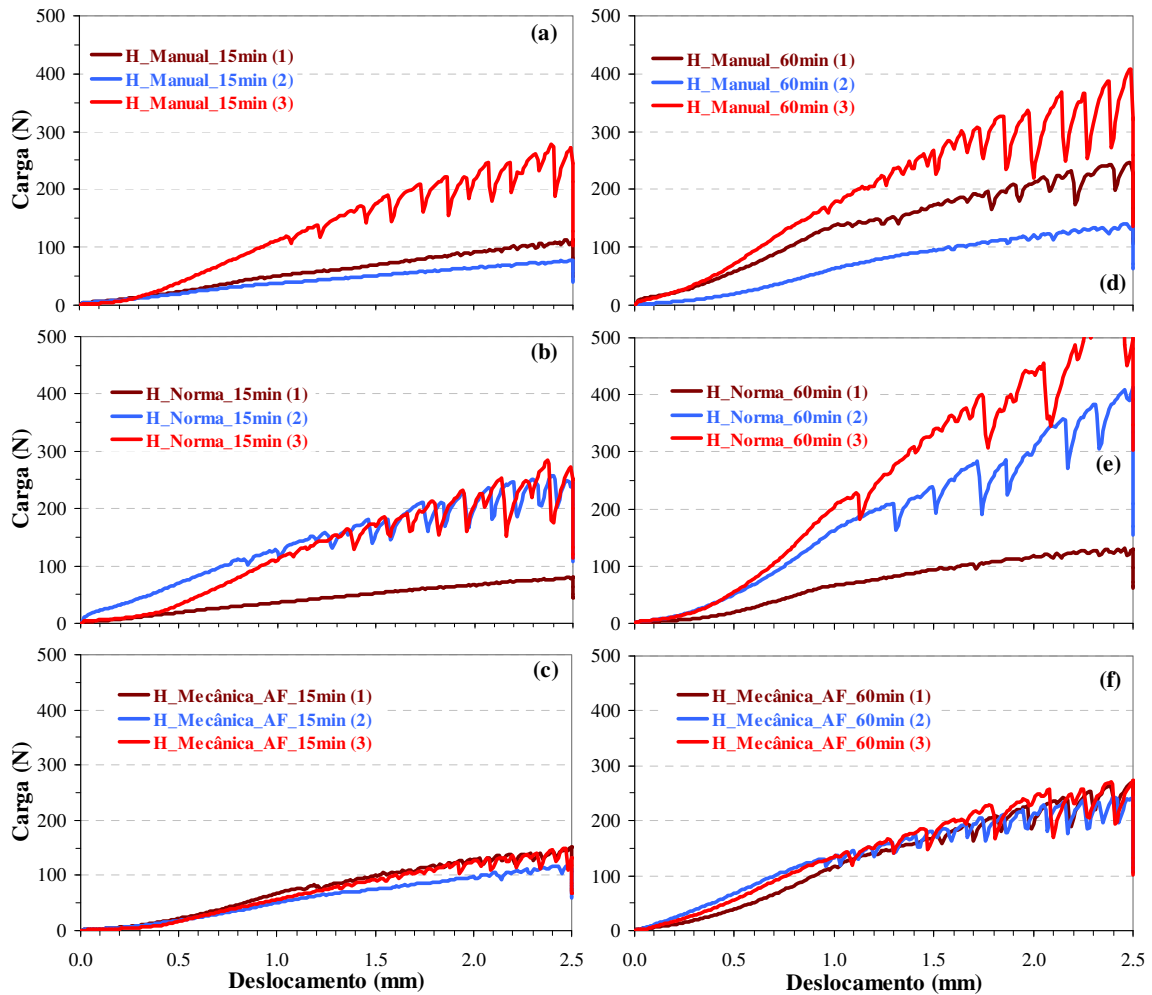


Figura 17 – Resultados de *squeeze-flow* ilustrando a influência do tipo de mistura realizada em laboratório no comportamento reológico de uma argamassa industrializada. (A) e (D) – Manual, mistura manual sem procedimento padronizado; (B) e (E) – Norma, mistura de acordo com a norma NBR 13276; (C) e (F) – Mecânica AF, mistura mecânica em argamassadeira com adição fracionada de água [16]. As amostras foram ensaiadas 15 e 60 minutos após a mistura. Dimensões: diâmetro 101mm, altura 10mm. Velocidade de deslocamento de 0,1mm/s [16].

Entretanto, quando a argamassa foi submetida à mistura com adição de água de forma fracionada, o processo foi capaz de fornecer energia suficiente para desaglomeração e homogeneização da composição [16]. Os resultados de *squeeze-flow* nas Figuras 17C e 17F, demonstram um comportamento reológico constante entre diferentes bateladas, sendo uma argamassa mais fácil de ser espalhada de acordo com os menores níveis de carga se comparada às amostras preparadas com os outros procedimentos de mistura. O comportamento reológico da composição modifica-se

pouco até 60 minutos e a dispersão dos resultados é muito pequena, indicando uma consolidação gradual e homogênea do material [16].

Portanto, o fato do método ser altamente sensível à mistura possibilita sua utilização para avaliar a efetividade de processos de mistura aplicados às argamassas. Por outro lado, a comparação entre o comportamento de diferentes produtos ou a avaliação da influência de mudanças na formulação através do *squeeze-flow* requer cuidados especiais em relação à mistura. Assim, evitando que os efeitos das variáveis investigadas no comportamento reológico não fiquem mascarados por problemas provenientes do processo de mistura, ou ainda, haja uma grande variabilidade entre diferentes bateladas.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Banfill, P.F.G. The rheology of fresh mortar: A review. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis p 121-143, 2005.
- [2] Pileggi, R.G. Ferramentas para o estudo e desenvolvimento de concretos refratários. São Carlos, 2001. 187p Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos.
- [3] Engmann, J., Servais, C., Burbidge, A. S. Squeeze flow theory and applications to rheometry: A review. *Journal of Non-Newtonian Fluids Mechanics* 132 , p. 1-27, 2005.
- [4] Campanella, O. H., Peleg, M. Squeezing flow viscosimetry of peanut butter. *Journal of Food Science* 52 (1), p. 180-184, 1987.
- [5] Steffe, J. F. *Rheological methods in food process engineering*. Freeman Press, USA, 1996.
- [6] Özkan, N., Oysu, C., Briscoe, B. J., Aydin, I. Rheological analysis of ceramic pastes. *Journal of the European Ceramic Society* 19, p. 2883-2891, 1999.
- [7] G.H. Meeten, Yield stress of structured fluids measured by squeeze flow, *Rheologica Acta* 39 (2000)399-408.
- [8] Min, B. H., Erwin, L., Jennings, H. M. Rheological behavior of fresh cement paste as measured by squeeze flow. *Journal of Materials Science* 29, p. 1374-1381, 1994.
- [9] Pileggi, R.G., Betioli, A.M., Cardoso, F.A., John, V.M. Extended rheological characterization of cement pastes: Squeeze flow plus rotational rheometry. In: Anais 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montréal (Canadá), 2007.
- [10] Agopyan, A. K., Cardoso, F. A., Pileggi, R. G., John, V. M., Carbone, C. Análise reológica de pastas para revestimentos à base de gesso por squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis, p 144-157, 2005.

- [11] Costa, M.R.M.M., Cincotto, M.A., Pileggi, R.G. Análise comparativa de argamassas colantes de mercado e o seu comportamento reológico. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis, p 382-394, 2005.
- [12] Póvoas, Y.V. Avaliação da formação de “película” na argamassa colante e sua influência na adesão. São Paulo, 2006. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP.
- [13] Toutou, Z., Roussel, N., Lanos, C. The squeezing test: a tool to identify firm cement-based material’s rheological behaviour and evaluate their extrusion ability. Cement and Concrete Research 35, p. 1891-1899, 2005.
- [14] Antunes, R.P.N., John, V.M., Pileggi, R.G. Influência da seqüência de mistura nas propriedades reológicas de argamassas avaliada por squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis, 2005. p 158-179.
- [15] Cardoso, F.A., Pileggi, R.G., John, V.M. Caracterização reológica de argamassas através do método de squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VI, In: Anais, ANTAC, Florianópolis p 121-143, 2005.
- [16] Cardoso, F.A., Campora, F.L., Pileggi, R.G., John, V.M. Influência do tipo de mistura no comportamento reológico de argamassas avaliado por squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VII, In: Anais, ANTAC, Recife, 2007.
- [17] Cardoso, F.A., Campora, F.L., Pileggi, R.G., John, V.M. Caracterização reológica de argamassas do mercado por squeeze-flow. Simpósio Brasileiro de Tecnologia de Argamassas, VII, In: Anais, ANTAC, Recife, 2007.

CRÉDITOS

Fotografia: Mario S. Takeashi

Desenhos técnicos: Juarez Hoppe Filho

ANEXO A

DESENHOS TÉCNICOS DAS FERRAMENTAS E ACESSÓRIOS

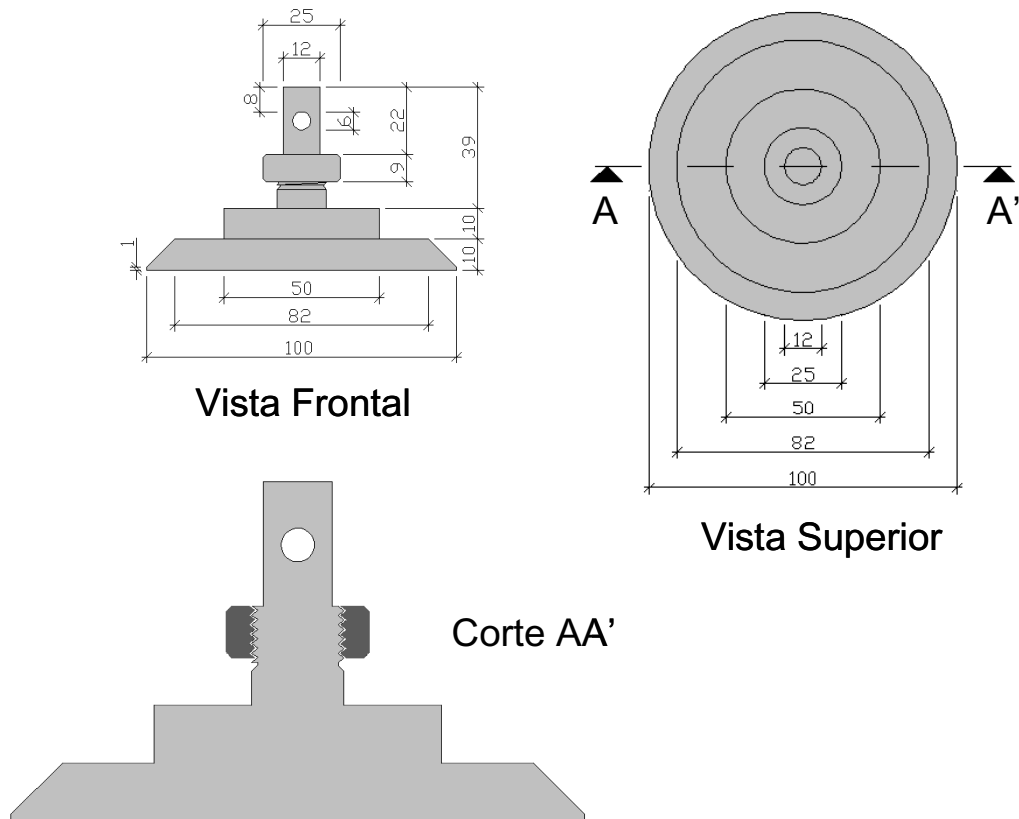


Figura A1 – Desenhos técnicos do punção (placa superior) com 101mm de diâmetro com encaixe para célula de carga de 1000N do equipamento INSTRON. Vista frontal, vista superior e corte transversal AA'. Foto da ferramenta disponível na Figura 5.

A Figura A2 especifica as dimensões da placa inferior para uma base de 20cm de diâmetro. Caso a base a ser utilizada na máquina universal de ensaios seja de outro diâmetro a parte inferior da placa deve ter encaixe apropriado.

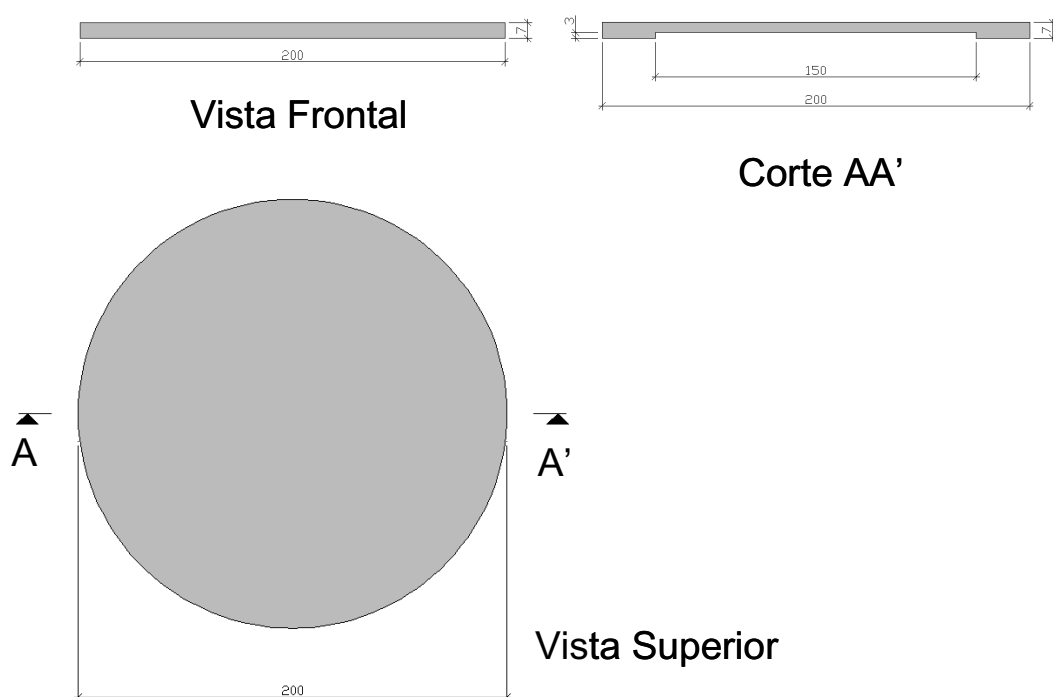


Figura A2 – Desenhos técnicos do prato (placa inferior) com 200mm de diâmetro. utilizado para avaliação de argamassas de revestimento. Vista frontal, vista superior e corte transversal AA'. Ver também Figura 4.

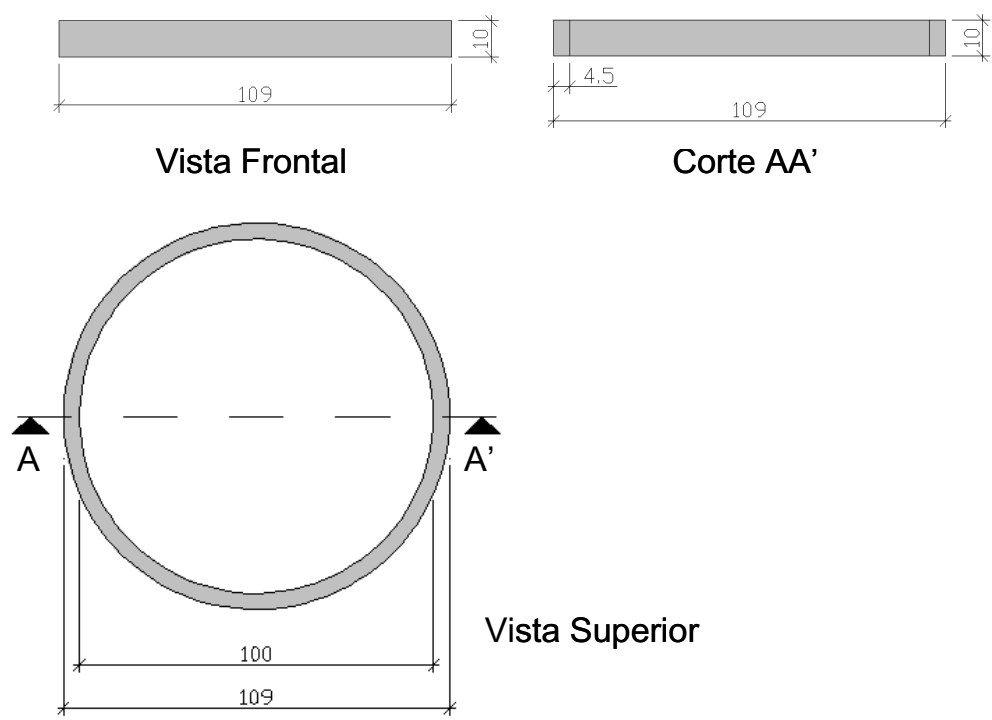
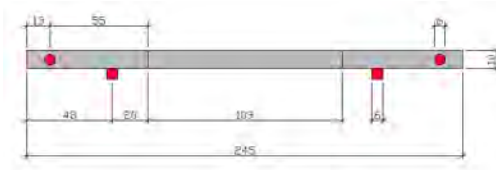
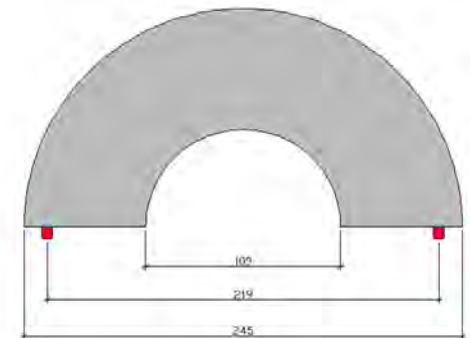


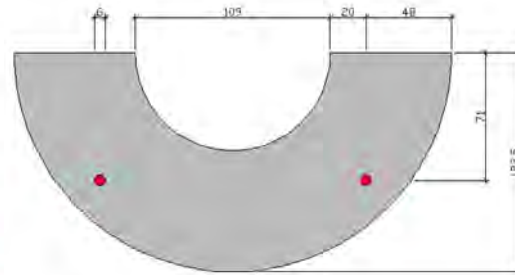
Figura A3 – Desenhos técnicos do molde de 101mm de diâmetro. Vista frontal, vista superior e corte transversal AA'.



Vista Frontal



Vista Superior



Vista Inferior

Figura A4 – Desenhos técnicos do gabarito usado para auxiliar na moldagem e manter a centralização da amostra. Vista frontal, vista superior e vista inferior. Ver também Figura 6.