

ANÁLISE REOLÓGICA DE MASSA CERÂMICA PARA O PROCESSO DE PROTOTIPAGEM USANDO VISCOSÍMETRO COPO FORD ADAPTADO À MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAIOS

N.L.S.O.B. LUZ¹, L. BERTOLETI¹, J. A. CERRI² e M.S. de ARAUJO¹

¹ Departamento Acadêmico de Mecânica / UTFPR, Avenida Sete de Setembro, 3165,
CEP 80.230-901 - Curitiba - PR - Brasil

e-mail: araujo@utfpr.edu.br

² Departamento de Construção Civil / UTFPR, Curitiba, Brasil

RESUMO

A massa comercial de faiança ajustada para prototipagem não é auto escoante, e portanto, impossível de avaliar a reologia utilizando somente o viscosímetro Copo Ford, tampouco o viscosímetro de cilindros concêntricos, pois não reproduz os esforços verticais do tubo capilar da prototipadora. Propõe-se utilizar um viscosímetro Copo Ford (orifício Nº 2), acoplado a uma máquina universal de ensaios EMIC com célula de carga de 500 N e realizar ensaios a velocidades de deslocamento de 10, 20, 50 e 100 mm/min. O atrito gerado entre o pistão e a parede do viscosímetro Copo Ford foi considerado desprezível. No início do ensaio, na etapa linear das curvas de força versus deslocamento, houve uma sobreposição das curvas a diferentes velocidades de deslocamento, devido à resistência à compressão do material. Numa segunda etapa, na qual se calculou força de escoamento, observou-se aumento significativo desta com o aumento da velocidade de deslocamento do êmbolo.

Palavras-chaves: massa cerâmica, prototipagem, análise reológica, copo Ford

INTRODUÇÃO

No desenvolvimento de massas cerâmicas para o processo de colagem sob pressão feito por Weng *et al.* ^(1,2) do nosso grupo de pesquisa, foi constatada a possibilidade de uso de massa comercial modificada com amido também para o processo de prototipagem. Entretanto, as análises feitas por meio de viscosímetro de cilindros concêntricos não reproduzem os esforços verticais em tubo capilar observados durante a prototipagem, visto que o diâmetro de abertura da saída da máquina de prototipagem é de 0,4 mm. Como a massa desenvolvida não escoava sob o próprio peso, também não é possível usar o viscosímetro Copo Ford. No presente trabalho é proposto o uso de um viscosímetro Copo Ford adaptado e acoplado a uma máquina de universal ensaios, de modo a determinar a correlação força *versus*

deslocamento de uma barbotina comercial com comportamento não-Newtoniano para prototipagem de peças cerâmicas.

O princípio de funcionamento de Copo Ford é similar ao do viscosímetro capilar e fundamentado pela equação de Poiseuille. Essa equação permite supor um escoamento quasi-permanente durante o esvaziamento do reservatório e desprezar os efeitos da aceleração devido ao desenvolvimento do perfil hidrodinâmico no orifício (comprimento do capilar / diâmetro do capilar = 2, tal como apresentado na Figura 1 pelo Departamento de Energia ⁽³⁾).

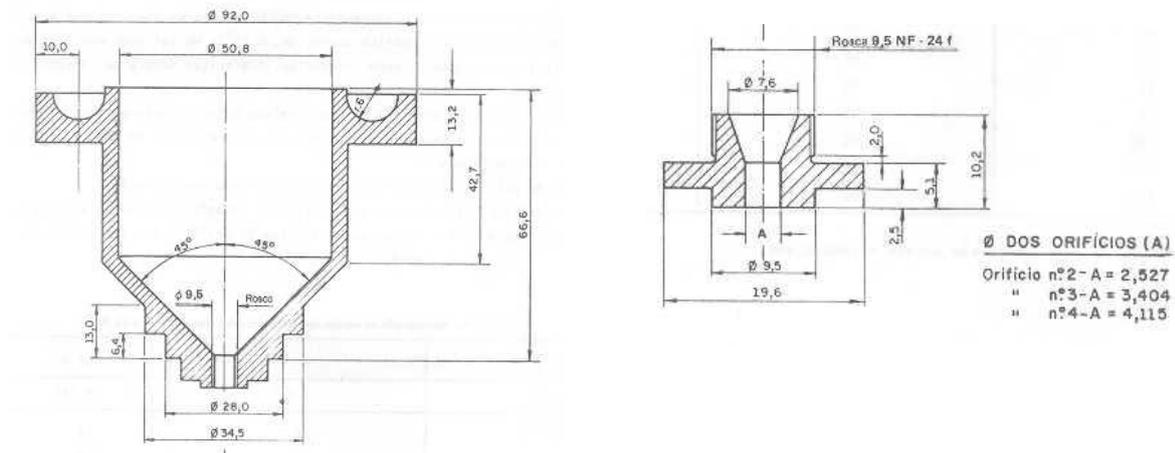


Figura 1: Representação esquemática do Copo Ford ⁽³⁾

A determinação de viscosidade cinemática usando o Copo Ford é feita segundo a Equação A, em que: ν = viscosidade cinemática; t = tempo; C = constante; h_0 = altura inicial do copo e, h_f = altura final do copo.

$$\nu \cong \frac{t}{C \cdot \ln(h_f/h_0)} \quad (A)$$

Como a Equação A é uma aproximação, para garantir a precisão o fabricante propõe a Equação B, a qual por meio das constantes corrige os seguintes parâmetros: perdas do escoamento no copo, efeitos de aceleração desprezados, conicidade da base do copo e, o intervalo de tempo medido para o esgotamento total do copo (até a interrupção do jato contínuo e surgimento da primeira gota no orifício).

$$\nu = A\Delta t + B \quad (B)$$

As constantes A e B são definidas para cada diâmetro de orifício usado e são fornecidas pelo fabricante. Um projeto detalhado de um reômetro capilar de pressão variável é apresentado na dissertação de Formaggio. Assumiu-se como condição de contorno que a tensão é igual a zero no centro do cilindro e máxima na parede do mesmo.

Segundo Formaggio ⁽⁴⁾, na Equação C, F = força aplicada pela máquina universal de ensaios de modo a manter o deslocamento do êmbolo ou pistão constante; F_0 = coeficiente linear da reta de F versus L para todos os valores de velocidade de deslocamento do pistão; π = constante; d = diâmetro do capilar; D = diâmetro do reservatório e, L = comprimento do capilar.

$$\tau = \frac{d(F - F_0)}{\pi D^2 L} \quad (C),$$

É possível calcular a taxa de cisalhamento pela Equação (D), em que: $\dot{\gamma}$ = taxa de cisalhamento; v_p = velocidade do pistão ou de deslocamento do cabeçote da máquina de ensaio; D = diâmetro do reservatório; d = diâmetro do capilar.

$$\dot{\gamma} = \frac{8 \cdot v_p}{d^3} D^2 \quad (D),$$

MATERIAIS E MÉTODOS

De modo a determinar as curvas de força versus deslocamento para massas cerâmicas de alta viscosidade modificadas, foi necessário projetar e fabricar um êmbolo que encaixasse perfeitamente ao Copo Ford com o mínimo de folga

Como o Copo Ford é feito de metal, o material escolhido para ser usado como êmbolo foi o Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular, para que o mesmo não provocasse ranhuras na parede interna de metal. Sobre a superfície do êmbolo foram feitas ranhuras, para facilitar a saída do ar. Na parte superior do êmbolo foi torneado uma rosca para o acoplamento do mesmo à célula de carga em uma máquina universal de ensaios (EMIC, modelo DL 10000).

A célula de carga foi de 500 N e o deslocamento máximo do êmbolo de 10 mm. As velocidades de deslocamento do cabeçote da máquina de ensaio foram de: 10, 20, 50, e 100 mm/min.

O êmbolo foi acoplado à célula de carga da máquina universal de ensaios por meio da rosca, tal como pode ser visto na Figura 2.



Figura 2. Sistema célula de carga, êmbolo e Copo Ford

A massa cerâmica utilizada foi formulada a partir de uma massa comercial de faiança, modificada com amido a partir de uma suspensão com 65% de sólidos e disperso com 0,7% de silicato de sódio a 33 de concentração. A massa cerâmica foi geleificada pela adição de NaOH ao amido.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema foi testado sem massa de modo a verificar se o atrito gerado pela movimentação do êmbolo na parede do reservatório, similar ao estudo realizado por FRAIHA *et al*⁽⁵⁾. O registro da força *versus* deslocamento, com o reservatório vazio, pode ser visto na Figura 3. Com base neste gráfico, na mesma escala dos resultados obtidos, é possível considerar este erro desprezível.

A massa cerâmica no interior do recipiente atravessa três regiões de escoamento: a de entrada, a viscosimétrica e a de saída. Na primeira são desenvolvidas muitas tensões devido ao afunilamento do fluxo que vem do reservatório devido a redução concêntrica, com escoamento do tipo alongacional; na segunda ocorre um escoamento sob pressão plenamente desenvolvido e, na terceira

ocorre uma mudança nas velocidades relativas das camadas do fluxo devido a alteração da geometria.

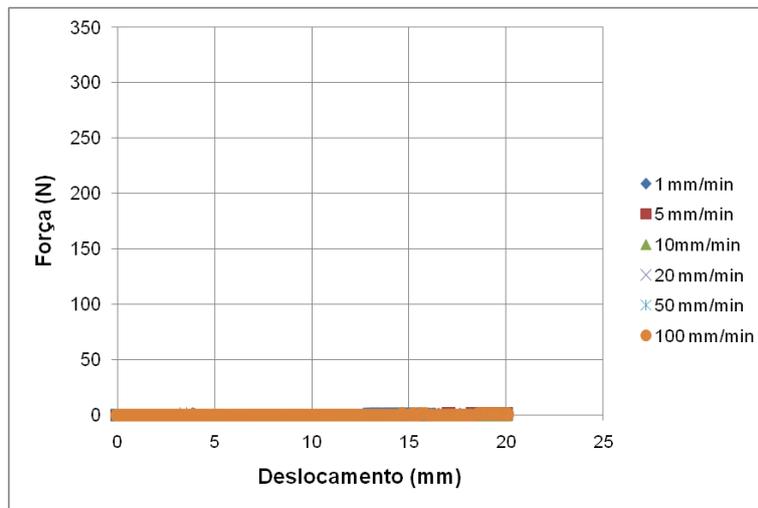


Figura 3. Curvas de força *versus* deslocamento do êmbolo no reservatório vazio, a velocidades de 1, 5, 10, 20, 50 e 100 mm/min

No ensaio com massa cerâmica, apenas as velocidades de 10 a 100 mm/min puderam ser medidas usando a célula de carga de 500N, para velocidades menores seria necessário uma célula de 50 N. Cada velocidade de deslocamento do êmbolo gerou uma curva de força *versus* deslocamento, observada na Figura 4.

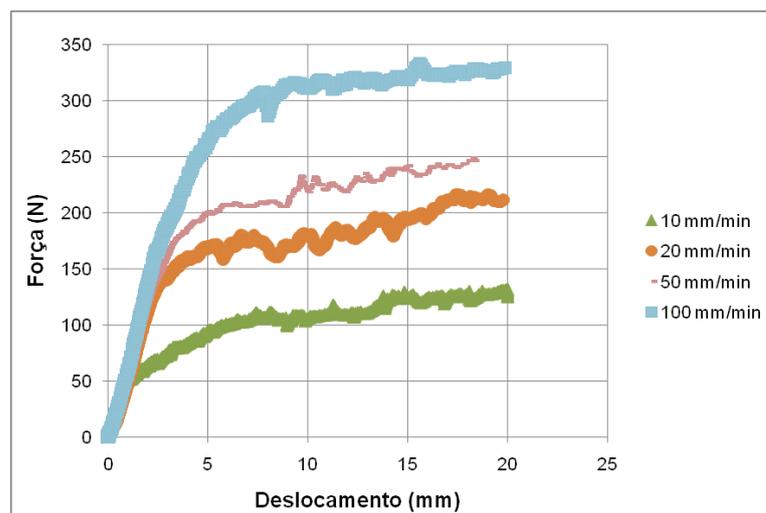


Figura 4. Curvas de força *versus* deslocamento da mesma massa cerâmica a velocidades de deslocamento do êmbolo de 10, 20, 50 e 100 mm/min

Todas as curvas apresentaram no início uma relação proporcional linear, que se sobrepuseram, indicando que, independente da velocidade, ocorreu uma compactação do material. A distância percorrida pelo material nesta região é de até 5 mm, que é aproximadamente o comprimento do capilar no interior do orifício e 25% da distância total percorrida pelo êmbolo no reservatório. Somente então o escoamento entra em regime estacionário, característico da região viscosimétrica. A força na qual o material atinge este tipo de escoamento aumenta à medida que aumenta a velocidade do deslocamento do êmbolo, indicando que há um aumento no turbilhonamento na região de entrada e conseqüente incremento na quantidade de choques entre as partículas da massa.

A razão entre o comprimento e o diâmetro do capilar para o menor orifício do Copo Ford, que foi o utilizado, é aproximadamente igual a 2. Este valor é menor do que o usado em reômetro capilar por FRAIHA *et al.* ⁽⁵⁾, que era igual a 5,58; menor que o utilizado por MORITA *et al.* ⁽⁶⁾, os quais testaram valores iguais a 10, 20 e 30, e também menor que os usados por FORMAGGIO ⁽⁴⁾, que variou este valor de 61,3 a 183,8. Em virtude da região na qual a força se manteve praticamente constante corresponder a 75% do total do deslocamento, a análise foi considerada adequada para medida reológica, pois permite calcular a força para manter o escoamento constante do material a uma determinada velocidade de deslocamento. Assim, considera-se que o escoamento é laminar e em regime permanente no capilar do orifício do viscosímetro Copo Ford, sendo a velocidade igual a zero na parede do orifício e máxima no centro do mesmo, o que permite o uso das Equações C e D.

O valor de F_0 da Equação C representa as perdas devido a: queda de pressão no reservatório, efeito de entrada e saída do fluido no capilar, variação de energia cinética do fluido e a força de atrito entre o pistão e o cilindro. Para calculá-lo é necessário fazer ensaios com capilares de diferentes comprimentos e construir um gráfico de força versus comprimento de capilar. Para determinado o valor de F_0 bastaria extrapolar a reta para o comprimento igual à zero. Como apenas um orifício do viscosímetro Copo Ford foi testado, não foi possível calcular as perdas devido à entrada e à saída do fluido, nem calcular a tensão de cisalhamento (Equação C) para determinação da viscosidade. Entretanto, o comportamento foi estudado por meio da relação entre a Força média na região viscosimétrica observada no escoamento sob pressão e o deslocamento mostrado na Figura 5. A relação linear

observada indica que o comportamento é de Bingham, no qual é necessária uma tensão inicial para que haja escoamento.

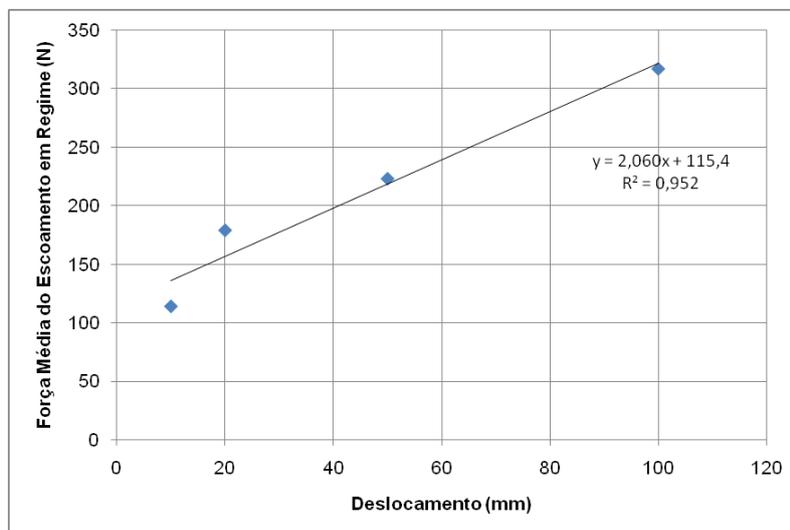


Figura 5. Relação linear entre a força média no escoamento laminar versus deslocamento do pistão a velocidades de 10, 20, 50 e 100 mm/min

Assim, a adaptação do reservatório do Copo Ford para servir como um reômetro por meio de uma máquina de ensaio universal parece viável.



Figura 6: Filamento contínuo feito a 10 mm/min

Todavia, o diâmetro do orifício do canal usado em prototipadoras é de 0,4 mm, o que aumenta a razão para 12,75. Sendo assim a tensão e a taxa de

cisalhamento devem aumentar, aumentando o choque entre as partículas. Porém, a velocidade necessária para executar a prototipagem é menor do que as realizadas nesse trabalho, o que deve diminuir um pouco a taxa de cisalhamento. Em testes com a massa, a força foi muito alta e optou-se por aumentar o diâmetro do orifício da prototipadora para 1 mm. Outros ensaios ainda são necessários para melhor caracterizar o fluido, tal como o cálculo do número de Reynolds para confirmar o comportamento laminar. Entretanto com esta adaptação do viscosímetro Copo Ford foi possível determinar a força de trabalho da prototipadora em função da velocidade de produção de filamento, visto que o filamento foi contínuo e resistente ao próprio peso, como observado na Figura 6.

CONCLUSÃO

As considerações para os cálculos de tensão de cisalhamento e taxa de cisalhamento, utilizadas por outros autores para reômetros capilares adaptados em máquinas universal de ensaios, também são válidas para o sistema montado com base no Copo Ford. A razão entre o comprimento e o diâmetro do capilar escolhido para simular as condições de prototipagem também são aceitáveis de acordo com os dados até então obtidos.

AGRADECIMENTOS

A UTFPR pela bolsa de inovação e ao CNPq pelas bolsas DT

REFERÊNCIAS

- (1) WENG, L.Y., ARAUJO, M.S., CERRI, J.A. Comportamento reológico de massa fluida comercial modificada com amido para uso em colagem sob pressão, In: 55º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Porto de Galinhas, PE, 2011. Anais ... São Paulo, ABC, 2011.
- (2) WENG, L.Y., CERRI, J.A., ARAUJO, M.S. Estudo do efeito da geleificação de amido em massa cerâmica comercial, In: 56º Congresso Brasileiro de Cerâmica, Curitiba, PR, 2012, Anais ... São Paulo, ABC, 2011.
- (3) Departamento de Energia, Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP. Determinação da viscosidade: métodos de Stokes e do Copo Ford. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~em712/viscos.doc>. Acesso em 17

jul. 2013.

- (4) FORMAGGIO, G.J. Projeto, construção e ensaio de um viscosímetro capilar. 1982, 97p. Dissertação (Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agricultura) -UNICAMP, Campinas, São Paulo.
- (5) FRAIHA, M., BIAGI, J.D., FERRAZ, A.C.O., SVERZUT, C. Projeto e construção de reômetro capilar para caracterização de alimentos para animais. Ciência Rural, v.40, n.9, p.1998-04, 2010.
- (6) MORITA, A.T., TOMA, M.S., DE PAOLI, M.A. Módulo de reometria capilar e auto-reforçamento de baixo custo. Polímeros: Ciência e Tecnologia, v.15, n.1, p.68-72, 2005.

RHEOLOGICAL ANALYSIS OF CERAMIC MASS DEVELOPED TO PROTOTYPE PROCESS USING CUP FORD VISCOMETER ADAPTED TO AN UNIVERSAL TESTING MACHINE

ABSTRACT

The commercial paste earthenware developed to prototyping doesn't flow on own weight, the cup Ford viscometer can't be used, neither concentric cylinder viscometer, because it does not reproduce the vertical forces of the capillary tube during prototyping. The solution was to use a cup Ford viscometer (hole N° 2), attached to a EMIC universal testing machine with a 500 N load cell and perform tests at displacement speeds of 10, 20, 50 and 100 mm / min. The friction generated between the piston and the cup Ford viscometer wall was considered negligible. In initial linear part of the force versus displacement curves of the test, there was an overlap of the curves at different speeds of displacement due to the compression strength of the material. In a second step, in which flow force is calculated, there was a significant increase of the values with increasing speed of the piston.

Key-words: ceramic mass, prototyping, rheological analysis, cup Ford