



## O PROCESSO DE COLAGEM DE BARBOTINA SOB PRESSÃO , SOB A ÓTICA DA TEORIA GERAL DE FILTRAÇÃO

**Antonio Cesar Galhardi**

**Antonio Celso Fonseca de Arruda**

Universidade Estadual de Campinas, Departamento de Engenharia de Materiais

Cx. Postal 6122, Campinas, SP, Brasil

***Resumo.** Este estudo descreve uma simulação do processo de colagem de barbotina sob pressão, utilizando-se da teoria geral de filtração como mecanismo regente da cinética do processo. Foram analisadas as variáveis: Temperatura da Barbotina, Pressão de Trabalho e Permeabilidade do Meio Filtrante (espumas de PMMA); além de avaliações sobre o destacamento da peça cerâmica e da impregnação dos poros por partículas sólidas da barbotina, que em conjunto com as propriedades mecânicas fornecem subsídios para a estimativa da vida útil dos moldes. O estudo comprova o grande potencial do processo, com velocidades de formação de espessura da parede da peça cerâmica, mais de dez vezes superior ao processo convencional. Descreve ainda relevantes considerações a respeito da densidade à cru dos artigos cerâmicos, e sua importância no controle da densidade e microestrutura de cerâmicas especiais.*

***Palavras-Chave:** Processos cerâmicos, Tecnologia cerâmica, Colagem de barbotina sob pressão.*

### 1. INTRODUÇÃO

Assim como em outras categorias mercadológicas em diversos setores industriais, a indústria cerâmica em geral tem apresentado nos últimos anos uma extraordinária modificação, devido ao desenvolvimento de tecnologia básica, associada à exigência de maiores níveis de bem estar, e conseqüentemente do aumento da demanda.

O processo de colagem de barbotina, geralmente utilizado para a obtenção de produtos com geometria complexa, é apontado por Labrozzi (1994), como tendo início na Inglaterra no final do século XIX, e difundindo-se por todo o mundo, com o advento da primeira guerra mundial. A pesquisa a respeito de condições de trabalho mais acessíveis forçou o aparecimento de uma mecanização progressiva, utilizando-se contra-pesos e pistões pneumáticos para as operações de abertura e fechamento dos moldes. A contínua ampliação dos conhecimentos cerâmicos, aliada à introdução da eletrônica; após sucessivas inovações, o processo tornou-se totalmente automatizado.

Alguns produtores dedicaram-se ainda a pesquisar soluções que permitissem a produção contínua, em menores espaços. O aspecto mais relevante e também o mais complexo, resultante dessas pesquisas foi a conclusão de que “o molde deveria permitir diversas utilizações no mesmo dia, e apresentar uma vida útil razoável”.

Diversos materiais têm sido utilizados na obtenção dos moldes. Introduziu-se a pressurização, inicialmente na ordem de  $2,0 \text{ kgf/cm}^2$ , e que foi gradativamente aumentando em função dos avanços obtidos no desenvolvimento de novos materiais e processos de fabricação. Na Figura 1, pode-se observar um fluxograma representativo do processo de colagem de barbotina sob pressão.

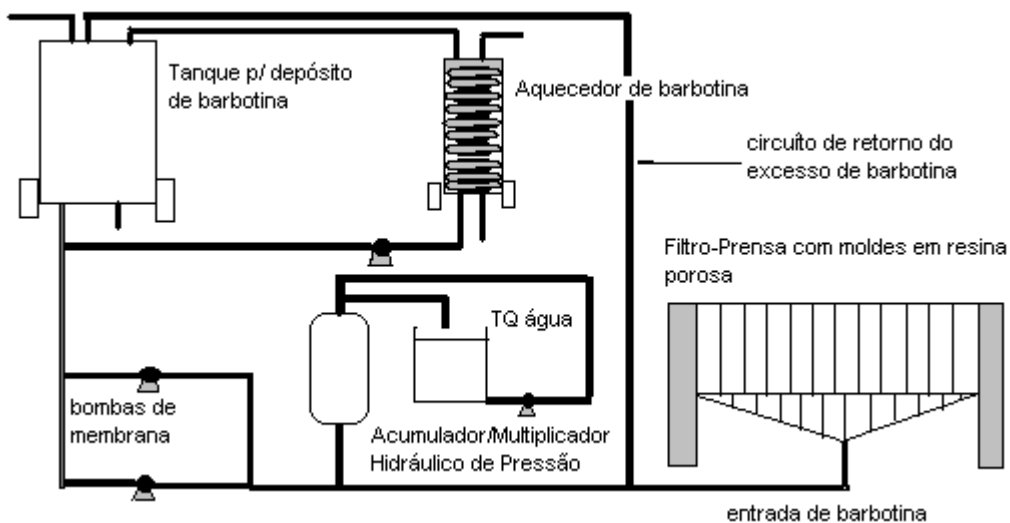


FIGURA 1 - Fluxograma Esquemático do Processo .

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

O processo de colagem de barbotina sob pressão, substituindo o método convencional, apresentado pela Netzsch Co. (1995), pressupõe a existência de um molde ou cavidade porosa, especialmente designada para conformar o artigo cerâmico; e que fechado atua como um filtro, retendo as partículas sólidas da barbotina e permitindo a passagem da água (filtrado). O tempo de deposição das partículas e conseqüentemente a formação da parede da peça cerâmica é inversamente proporcional à permeabilidade do molde e à pressão aplicada. A vida útil dos moldes, uma vez que apresentem propriedades mecânicas satisfatórias, vai estar intimamente

relacionada ao grau de entupimento dos poros, e portanto a distribuição de tamanho de poros é um fator preponderante de controle.

Segundo Kraus (1993), a idéia de acelerar o processo já preencheu a pauta de inúmeras pessoas dedicadas ao desenvolvimento tecnológico; mas devido às insuficientes propriedades de resistência mecânica e permeabilidade homogênea dos moldes, tem-se deparado com um fracasso seguido de outro. Os moldes já foram construídos com diferentes materiais: concreto, metal sinterizado, gesso, gesso sintético, e diferentes materiais poliméricos. Entretanto a chave do sucesso baseia-se em atender os seguintes requisitos: propriedades mecânicas satisfatórias; formato, tamanho e distribuição homogênea de poros; fácil manufatura e reprodutibilidade; resistência à abrasão preservando a precisão dimensional após diversas utilizações.

As pressões de trabalho apontadas por Kraus (1993), nos diversos tipos de equipamentos utilizados para a fabricação por colagem de barbotina sob pressão, situam-se geralmente entre 10 e 15 kgf/cm<sup>2</sup>. Pressões superiores provocam maior empacotamento das partículas na parede recém formada, o que pode reduzir a respectiva permeabilidade, além de elevar consideravelmente o custo dos equipamentos.

Estudos de Grazzini e Wilkinson (1992), demonstram em escala laboratorial, a importância da colagem de barbotina na obtenção de artigos de cerâmica técnica, com objetivos específicos de aumentar a densidade a cru, e conseqüentemente a densidade queimada.

Além de acelerar a formação de parede, as pressões aplicadas durante o enchimento e drenagem do molde, permitem trabalhar com barbotinas floculadas, reduzindo significativamente a segregação de partículas e obtendo-se desta maneira peças cerâmicas com menores gradientes de densidade e aptas a serem submetidas a ciclos rápidos de secagem. O efeito da pressão além de combater a segregação de partículas, permitindo a obtenção de microestruturas homogêneas, mesmo com uma grande diferença entre os tamanhos de partículas, é apontado por Berger *et al* (1990) como solução efetiva na eliminação de defeitos de formação (furos de ar), que dificilmente são combatidos eficazmente no processo convencional.

Os principais fatores que determinam a viabilidade econômica do processo de colagem de barbotina sob pressão são: a redução da frequência e quantidade de troca de moldes; a eliminação de equipamentos e espaço físico para o acondicionamento dos moldes (secadores); a possibilidade de se trabalhar em três turnos; a maior flexibilidade de produção; o baixo tempo de “set up”; a possibilidade de se produzir diferentes tipos de peças num mesmo equipamento; a uniformidade de espessura das paredes da peça conformada; a homogênea distribuição da umidade residual, permitindo ciclos mais rápidos de secagem; a estabilidade dimensional dos produtos após inúmeras utilizações do mesmo molde; a maior densificação e resistência mecânica do corpo cerâmico cru; a facilidade de manuseio e transporte das peças recém fabricadas; a imediata reutilização da barbotina de retorno; a fácil integração entre a produção automatizada e as linhas de transporte; a redução significativa da carga horária de trabalho de acabamento; a longa vida útil dos moldes; o curto período de treinamento do operador; as melhores condições do ambiente de trabalho; a redução da poluição ambiental pela eliminação da poeira de acabamento das peças e pela não deposição na natureza de grandes quantidades de moldes de gesso já utilizados.

Diversas teorias sobre o mecanismo de formação de parede têm sido apresentadas; o que torna quase impossível citá-las. No entanto Kostic e Gasic (1992), destacam duas correntes distintas: Formação de Parede por Difusão, cuja comprovação experimental é bastante difícil, o

gradiente de umidade observado nos moldes de gesso parece estar relacionado mais ao tamanho de poros do que ao processo de difusão, a teoria e a comprovação experimental parecem estar relacionadas apenas à distribuição de umidade no corpo cerâmico cru; Formação de Parede por Filtração, baseia-se na lei de Darcy, e é também apresentado por Frassek e Hennike (1989), onde assumem as seguintes hipóteses:

- i) a filtração é unidirecional, ou seja não ocorre sedimentação simultaneamente;
- ii) a reologia da barbotina não varia durante a filtração;
- iii) a permeabilidade da parede permanece constante, ou seja a estrutura do corpo formado é incompressível;
- iv) não existe diferença significativa se a pressão é devido à capilaridade dos poros, vácuo ou pressão externa aplicada à barbotina.

A equação de Darcy apresenta-se como:

$$V = \frac{l}{A} \frac{dv}{dt} = \frac{k}{\eta} \frac{dP}{dx} \quad (1)$$

onde:  $V$  é a velocidade superficial de escoamento (cm/s);  $A$  é a área de filtração (cm<sup>2</sup>);  $v$  é o volume do líquido filtrado (cm<sup>3</sup>);  $k$  é o fator de permeabilidade (cm<sup>2</sup>);  $\eta$  é a viscosidade do filtrado (mPas);  $P$  é a diferença de pressão (Pa);  $x$  é a espessura da parede (cm), e  $dP/dx$  é o gradiente de pressão ao longo da espessura  $x$ .

Na prática a velocidade superficial de escoamento pode ser convertida em espessura da parede considerando-se que os poros da estrutura da parede formada estão preenchidos pelo filtrado, e a permeabilidade do molde é muito maior que a da parede da peça formada, de maneira que possa ser negligenciada a perda de pressão nas paredes do molde. Assim, a nova expressão apresentada por Kostic e Gasic (1992), torna-se:

$$x = \sqrt{\frac{2kPt c}{\eta (1-n-c)}} \quad (2)$$

onde:  $x$  é a espessura da parede (cm),  $t$  é o tempo (s),  $k$  é a permeabilidade do corpo cerâmico (cm<sup>2</sup>),  $n$  é a porosidade do corpo cerâmico (%),  $c$  é a concentração de sólidos na barbotina (%),  $\eta$  é a viscosidade do filtrado (mPas),  $P$  é a pressão (Pa).

Pela Eq.(2) relaciona-se a espessura da torta à  $t^{1/2}$ , que é a mesma relação que se obteria assumindo-se que o mecanismo predominante fosse o de difusão; evidentemente  $x$  é proporcional à pressão aplicada, inversamente proporcional à viscosidade (ou para o caso em estudo à temperatura da água), diretamente proporcional à permeabilidade da parede formada, e que qualquer acréscimo no teor de sólidos da barbotina culminará em maior espessura de parede.

Das hipóteses assumidas, Kostic e Gasik (1992) afirmam que: a de que a torta é incompressível, é na prática a mais difícil de se obter. Na realidade o corpo é compressível devido à existência de certa quantidade de umidade remanescente que permite o rearranjo das

partículas da torta para posições de melhor empacotamento, ou maior densidade, em função da pressão aplicada.

Simplificando o tratamento matemático possível, obtém-se algumas relações que contribuem para o melhor entendimento do problema. Assumindo-se um longo período de tempo para formação da parede, pode-se supor condições de regime estacionário e :

$$\frac{x_{p1}^2}{x_{p2}^2} = cte . \frac{P_1}{P_2} \quad (3)$$

onde  $x_{p1}$  é a espessura da torta na pressão  $P_1$  e  $x_{p2}$  é a espessura da torta na pressão  $P_2$ .

Com relação ao efeito da viscosidade do filtrado (água), pressupõe-se que seja uma função da temperatura; portanto em um ensaio onde a concentração de sólidos da barbotina e a pressão de trabalho forem mantidos constantes, e tomando-se intervalos de tempos regulares para medida da espessura da torta em função da temperatura da barbotina deve-se encontrar a seguinte relação:

$$\frac{x_{t1}^2}{x_{t2}^2} = cte . \frac{\eta_{t2}}{\eta_{t1}} \quad (4)$$

onde  $x_{t1}$  é a espessura da torta na temperatura de ensaio  $T_1$ , e  $x_{t2}$  é a espessura da torta na temperatura  $T_2$ , e  $\eta_{t1}$  e  $\eta_{t2}$  são respectivamente as viscosidades do filtrado nas temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ .

De Frassek e Henniche (1989), obtém-se que a permeabilidade  $k$  da torta é uma função da pressão e da permeabilidade inicial, que tende à permeabilidade do molde quando o tempo de filtração tende à zero. Com essas relações obtém-se :

$$\frac{x_A^2}{x_B^2} = cte . \frac{k_{0A}}{k_{0B}} \quad (5)$$

onde  $x_A$  e  $x_B$  são respectivamente as espessuras das paredes obtidas em determinado intervalo de tempo, em moldes com diferentes permeabilidades  $k_{0A}$  e  $k_{0B}$ .

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para averiguação do processo de colagem de barbotina sob pressão e da aplicação da teoria geral de filtração, construiu-se um dispositivo hermético e adequado para ensaios de simulação, em diferentes condições de temperatura e pressão, utilizando-se de uma barbotina típica para a produção de louças sanitárias.

Elegeram-se diferentes composições de espumas rígidas de PMMA, cujas características mais importantes encontram-se na Tabela 1 e que foram submetidas a 100 ciclos sucessivos de 6 min à pressão de 12 bar e temperatura de barbotina de 25 °C. O objetivo consistiu em avaliar qualitativamente a “torta” obtida a cada ciclo, nos aspectos de : reprodutibilidade dos resultados, destacamento da “torta, redução da velocidade de formação de parede com o decorrer dos ensaios. Quantitativamente avaliou-se o grau de entupimento dos poros, pelo teor de impregnação de amostras de espuma , analisadas pela perda ao fogo a 1000 °C, a cada 10 ciclos de simulação de colagem.

Com o intuito de melhor compreender o efeito da temperatura da barbotina (viscosidade do filtrado) na cinética do processo de colagem sob pressão utilizou-se a espuma B6, na forma de disco com 1 cm de espessura e 6 cm de diâmetro, utilizado como filtro, retendo as partículas sólidas da barbotina e formando uma torta pelo empacotamento das mesmas. Tomou -se o devido cuidado de utilizar um corpo de prova novo para cada ensaio, ou seja: um corpo de prova para cada temperatura da barbotina, e três tempos de colagem (4 , 6 e 8 min.); portanto cada corpo de prova foi submetido a um total de 3 ciclos. As temperaturas foram eleitas considerando-se dois aspectos: temperaturas elevadas podem provocar a evaporação da água durante o ensaio e a concentração de sólidos não seria mantida constante; nas temperaturas escolhidas deve haver uma diferença significativa na viscosidade do filtrado (água). Foram eleitas as temperaturas de 30, 40 e 50 °C.

Tabela 1. Principais características de espumas de PMMA [Galhardi (1998)].

Espuma	Porosidade (%)	Permeabilidade (cm <sup>2</sup> )	Tamanho médio de poros ( μm)
A1	22,4	0,75	96
A6	25,7	4,86	109
A12	43,6	29,84	155
B1	20,3	0,51	62
B6	24,1	2,11	75
B12	40,6	9,11	97
C1	23,1	0,36	37
C6	25,2	2,14	40
C12	31,6	7,50	56

Os resultados foram analisados em uma curva de espessura da tortas; medidas a cada ensaio em diversas posições em função da raiz quadrada do tempo de formação de parede, após: drenagem do excesso de barbotina; 2 min de secagem no próprio dispositivo; destacamento com ar comprimido a uma pressão de 3,5 kgf/cm<sup>2</sup> em sentido contrário à torta; e secas a 110 °C por 24 horas.

Da mesma maneira a espuma B6 foi utilizada para ensaio, com barbotina à temperatura constante de 40 ° C e pressões de 6, 9, 12 e 15 kgf/cm<sup>2</sup>, em três diferentes tempos de colagem (4, 6 e 8 min.) totalizando 4 ciclos para cada corpo de prova. As medições de espessura da torta receberam igual tratamento do ítem anterior.

Para a análise do efeito das diferentes composições de espumas de PMMA, com suas diferentes características de permeabilidade, e seu comportamento quanto ao ensaio de colagem de barbotina sob pressão, utilizou-se as espumas A6, B6 e C6. Cada amostra de cada composição foi submetida a três ciclos em três diferentes tempos de processo, (4, 6 e 8 min.), com pressão constante de  $12 \text{ kgf/cm}^2$  e temperatura da barbotina de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os resultados foram obtidos e analisados de maneira idêntica aos dos itens anteriores, acrescentando-se porém as medições de umidade da torta para análise do efeito da permeabilidade e porosidade das espumas na permeabilidade e porosidade das tortas.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos ensaios do grau de impregnação das espumas, por partículas de barbotina podem ser visualizados na Fig.2. Observou-se também que as amostras das espumas A1, A6, A12 e B12 apresentaram valores acumulativos a cada 10 ciclos de ensaio, estabilizando-se somente próximo aos 100 ciclos. Outra informação de aspecto relevante é a facilidade de destacamento da torta, descrita da melhor para a pior na seguinte ordem: C1, C6, B1, C12, B6, B12, A1, A6, A12; e que coincide com a ordem crescente do tamanho médio de poros.

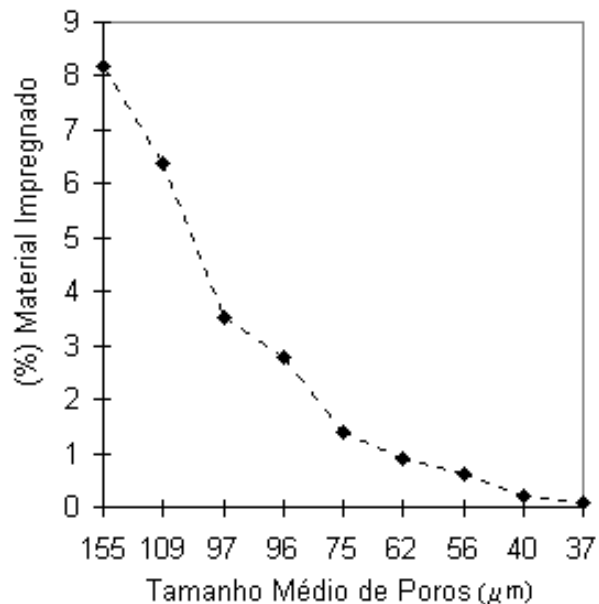
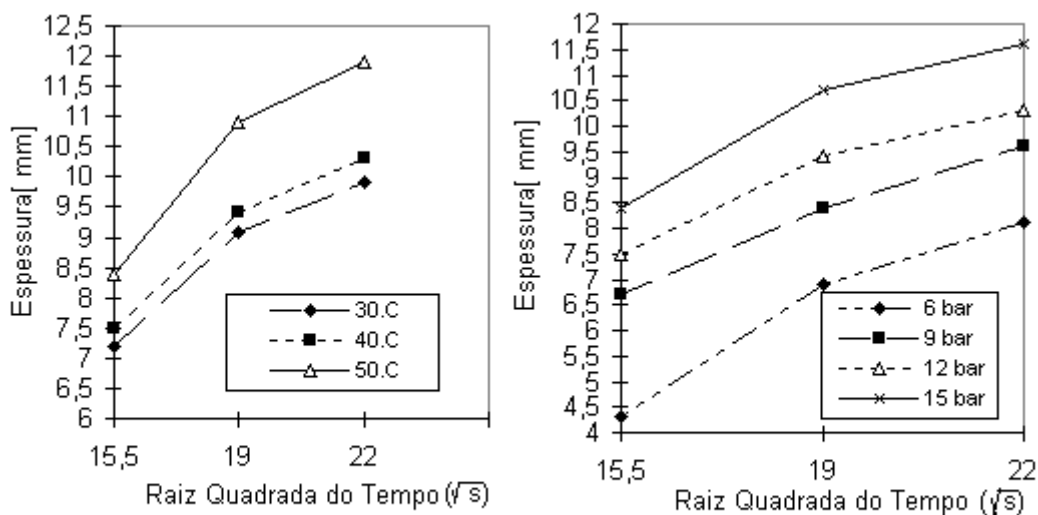


FIGURA . 2 - Quantidade de material impregnado em função do tamanho de poros.

Utilizando-se da Eq.(4) e da Fig.3(a) observa-se a correlação entre a viscosidade do filtrado (temperatura da água) e a velocidade de filtração. Para a temperatura de  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , além das relações previstas pela Eq.(4), os resultados obtidos indicam a possibilidade de que a temperatura esteja influenciando a velocidade de filtração também pelo aumento da permeabilidade da espuma. O mesmo efeito poderia causar uma deformação plástica indesejável nos moldes; portanto é prudente adotar-se temperaturas de barbotina inferiores, preservando-se a vida útil dos mesmos .

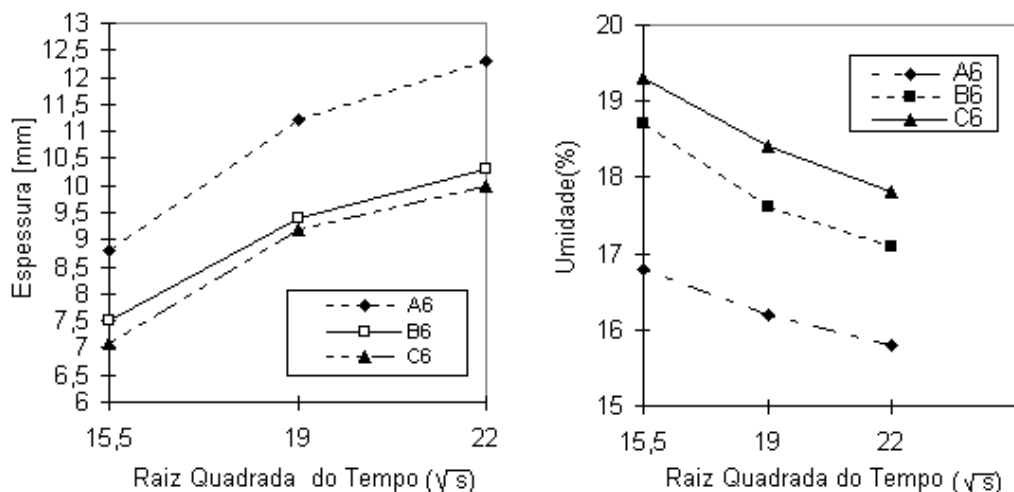
Da Eq.(3) e Fig.3(b), observa-se uma boa concordância entre os valores experimentais e os previstos teoricamente, onde: a velocidade de formação de espessura da torta é diretamente proporcional às pressões aplicadas. A correlação entre ambos é muito boa para pressões de 9, 12 e 15 kgf/cm<sup>2</sup>. Para a pressão de 6 kgf/cm<sup>2</sup>, a ligeira discrepância observada entre o comportamento experimental e o teórico sugere que para pressões dessa ordem possam ser relevantes outros mecanismos como: a reações de superfície entre as partículas, os eletrólitos e a água, ou comportamentos reológicos específicos.



(a)

(b)

FIGURA 3. (a) - Efeito da temperatura da barbotina na velocidade de filtração, amostra B6 e à pressão de 12 bar ; (b) - Efeito da pressão na velocidade de filtração., amostra B6, 40°C.



(a)

(b)

FIGURA 4.(a) - Efeito da permeabilidade das espumas na velocidade de filtração; (b) - Efeito da permeabilidade das espumas na umidade residual da torta.



Da Fig. 4(a) e Eq.(5) observa-se a correlação entre a permeabilidade do meio filtrante e a velocidade de filtração. Os superiores resultados de permeabilidade e taxa de filtração, obtidos para a espuma A6, não são tão animadores se relembradas as demais características, principalmente a impregnação dos poros com partículas da barbotina.

A Fig. 4(b) mostra o efeito das características do meio filtrante (permeabilidade), no teor de umidade residual das tortas. Uma vez que as propriedades dos materiais cerâmicos como: microestrutura, densidade, retração e deformação são influenciadas por características do processamento, é plausível supor que as características das espumas também possam influenciar as propriedades dos materiais cerâmicos

## 5. CONCLUSÕES

Os ensaios de simulação do processo de Colagem de Barbotina sob Pressão, foram bastante conclusivos para a adoção do modelo de filtração, como representante da cinética do processo e para a escolha de composições de espumas que apresentem as melhores características de velocidade de filtração. Além disto as variáveis de: temperatura da barbotina, pressão de trabalho e composição das espumas tiveram seus comportamentos analisados, frente à teoria de filtração; apresentando boa concordância. Os ensaios evidenciam o grande potencial do processo, obtendo-se velocidades de formação de espessura de parede da peça cerâmica, em torno de 10 vezes superior ao processo convencional.

Constatou-se que o tamanho médio de poros das espumas atua principalmente em dois aspectos: propicia o melhor ou pior destacamento da peça cerâmica; e define a vida útil dos moldes, pela quantidade de poros que são impregnados por partículas sólidas da barbotina. Por outro lado a permeabilidade da espuma, a pressão de trabalho e a viscosidade do filtrado são os principais determinantes da velocidade de filtragem; mesmo a partir do momento em que a permeabilidade da parede formada e a sua compressibilidade reduzem a velocidade de filtragem.

A análise dos parâmetros envolvidos permitiu definir a espuma C6, que apresenta propriedades mecânicas satisfatórias, pequena impregnação de poros, velocidade de filtragem grande o suficiente para aceleração do processo de conformação, com longa vida útil prevista, e possibilidade de trabalho durante 24 hs/dia sem a saturação do meio poroso.

As diversas composições de espumas apresentadas, os resultados obtidos, e a certeza do domínio das características dos meios porosos, viabilizam também a possibilidade de adequação da espuma às características da barbotina a ser utilizada, buscando-se uma otimização entre a granulometria da barbotina, o tamanho médio dos poros, a permeabilidade, e as propriedades mecânicas das espumas. Tudo isto, sem dúvida, deverá permitir a extensão do processo de colagem de barbotina sob pressão, para outros tipos de materiais cerâmicos, como por exemplo as cerâmicas especiais.

Em suma, os ensaios de simulação do processo de colagem de barbotina sob pressão, foram bastante elucidativos e concordantes com a teoria de filtração, como apontado pela grande maioria dos pesquisadores nesta área. Além disto permitiram analisar os diferentes comportamentos das espumas de PMMA, quanto às características dos meios porosos e a sua aplicação específica na fabricação de moldes.

## REFERÊNCIAS

- BERGER, I.; SEIDEMANN, I.; BAUMGARTEN, A.; **Formation of Casting Pores in Slip Casting Products - Means Prevention.** *DKG*, v 67, No. 6, p. 239 - 244, 1990.
- FRASSEK, L.; HENNICKE, H.W.; **Some Aspects of Pressure Slip Casting with Nonclay Suspensions.** *DKG Symposium "Modern Ceramic Shapes Method"*, Bayreuth, Nov. 1989.
- GALHARDI, A.C.; **Desenvolvimento e Caracterização de Espumas Rígidas com Poros Intercomunicantes de Polimetacrilato de Metila, e sua Aplicação na Indústria Cerâmica.** *Tese de Doutorado*, Faculdade de Engenharia Mecânica, p. 143, Unicamp, SP, Brasil 1998.
- GRAZZINI, H.H.; WILKINSON, D.S.; **Slip Casting under Pressure.** *Ceram. Eng. Sci. Proceeding*, v 13, No. 7 - 8, p. 528 - 535, 1992.
- KOSTIC, B.; GASIC, M.; **Influence of Temperature and Solid Content on Fused Silica Slip-Casting Kinetics.** *Ceramics International*, v 18, p. 65 - 68, 1992 .
- KRAUS, J.; **Pressure Casting in Silicate Ceramics.** *IndusTries Forum*, v 70, No.5, p. 219 - 221, 1993.
- LABROZZI, E.; **Castings from the Beginning up to Present-Day Technology.** *Ceram. Eng. Sci*, v15, p.93 - 97, 1994.
- NETZSCH Co.; **Pressure Casting Advances into Sanitaryware.** *Ceramic Industries International*, v 105, No. 110, p. 18, 1995.

## THE SLIP CASTING UNDER PRESSURE , BY THE POINT OF VIEW OF THE FILTRATION GENERAL THEORY

**Abstract.** *This study describes a simulation of the process of the Slip Casting under Pressure, through the filtration general theory as a mechanism of the kinetic control of the process. The slip temperature, pressure and permeability of polymethylmetacrylate foams were evaluated. Subjective analysis of the separation of the green body to the mold, and the impregnation of the pores with solid particules from the slip were also appointed. These two features, together with the mechanicals properties can provide subsidies to check the time life of the molds. The study shows the great potential of the process with velocities ten times higher than that the traditional process. This study also do an usefull consideration about green density in the ceramic bodies, and its important features on the control of microstructure and fired density of technical ceramic.*

**Key words :** *Ceramic process, Ceramic technologie, Slip casting under pressure.*