

Tema: Materiais cerâmicos, compósitos e poliméricos

## INFLUÊNCIA DO CICLO DE RESFRIAMENTO NOS ASPECTOS DIMENSIONAIS DE DISCOS CERÂMICOS NO PROCESSO DE INJEÇÃO EM BAIXA PRESSÃO\*

Eduardo Thomazi<sup>1</sup>  
Carlos Alberto Costa<sup>2</sup>

### Resumo

Este trabalho apresenta o estudo da influência do ciclo de resfriamento em discos cerâmicos produzidos pelo processo de moldagem por injeção em baixa pressão (MIBP). Foram injetados discos utilizando uma suspensão cerâmica com 86% em peso de Alumina ( $Al_2O_3$ ) e 14% em peso de veículo orgânico e com dimensões de  $\varnothing 80 \times 3$  mm. Três condições de resfriamento foram utilizadas para a fabricação dos discos cerâmicos: baixa taxa de resfriamento, alta taxa de resfriamento (ambos acionados após a injeção da suspensão cerâmica) e resfriamento contínuo durante todo o ciclo de injeção. Para avaliação foram considerados aspectos dimensionais (contração) e geométricos (planicidade e circularidade). Os resultados mostraram que a condição com baixa taxa de resfriamento obteve maior contração dimensional, maior desvio de planicidade, enquanto a alta taxa de resfriamento obteve uma contração intermediária e menor desvio de planicidade. Utilizando resfriamento contínuo as amostras apresentaram baixa contração devido a maior compactação da suspensão cerâmica na moldagem.

**Palavras-chave:** Moldagem por injeção de cerâmicas; Alumina; Taxa de resfriamento.

### CYCLE COOLING INFLUENCE ON DIMENSIONAL ASPECTS OF CERAMIC DISC IN LOW-PRESSURE INJECTION MOLDING

#### Abstract

This paper presents a study related to the influence of injection mold cooling cycle on ceramic discs produced by low-pressure injection molding (LPIM) process. Discs of  $\varnothing 80 \times 3$  mm and ceramic material with 86 wt% alumina ( $Al_2O_3$ ) and 14 wt% organic vehicle were produced with three cooling conditions: low cooling rate, high cooling rate (both cooled just after the material injection phase) and continuous cooling during the injection cycle. Dimensional (shrinkage) and geometric (flatness and roundness) properties were analyzed in this experiment. Results showed that condition with low cooling rate obtained higher shrinkage and major flatness deviation, while the high cooling rate obtained an intermediate shrinkage and lower flatness deviation. Continuous cooling resulted samples with small shrinkage due to higher compression molding of ceramic suspension.

**Keywords:** Injection molding ceramics; Alumina; Cooling rate.

<sup>1</sup> *Tecnólogo em Automatização Industrial, M.Sc. Engenharia Mecânica, Professor, CETEC, Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, Brasil.*

<sup>2</sup> *Graduado e Mestre em Engenharia Mecânica. Doutor em Engenharia de Manufatura. Prof. Adjunto da Área de Engenharia Mecânica, CCET, Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, RS, Brasil.*

\* *Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.*

## 1 INTRODUÇÃO

Em países como EUA, Reino Unido, Japão e Alemanha o desafio do mercado de cerâmicas avançadas é fazer com que esses materiais sejam rentáveis em aplicações que exijam confiabilidade em altas temperaturas, entre outras propriedades exclusivas das cerâmicas avançadas. Um dos principais desafios do setor são os processos de fabricação, principalmente no que tange a confiabilidade de obtenção das peças finais [1].

O processo de Moldagem por Injeção de Pós (MIP) (*Powder Injection Molding – PIM*) tem a vantagem de moldar peças através de injeção utilizando metais ou cerâmicas em pó como matéria-prima. Para isso, combina-se um ligante e um dispersante (veículo orgânico) para que a mistura tenha fluidez suficiente para a peça ser moldada. Depois de conformado, o veículo orgânico é extraído através de tratamentos térmicos e, em seguida a peça é sinterizada. Tal processo possui algumas vantagens como baixo custo de produção, possibilidade de moldar formas complexas, tolerâncias dimensionais finas, e aplicabilidade para diversos materiais [2-4]. O MIP pode ser classificado de duas formas: moldagem por injeção em alta pressão (MIAP) para pressões acima de 50MPa, e em baixa pressão (MIBP) para pressões de 0,1 a 1 MPa [5].

No caso do MIAP o maior peso molecular dos polímeros dificulta sua remoção em peças espessas, tornando o processo de remoção do ligante (*debinding*) extremamente lento. Já no MIBP a utilização de ceras como principal componente do veículo orgânico (ex.: a parafina) propicia cadeias mais curtas e confere maior isotropia a mistura [6]. Ainda como vantagens do processo de MIBP pode-se citar: a possibilidade de moldagem utilizando baixas temperaturas (entre 60 e 100°C), permitir a utilização de um equipamento mais simples e de baixo custo que utiliza ar comprimido para injeção e possibilitar a confecção de moldes utilizando materiais macios e de fácil usinagem (como termoplásticos, alumínio e latão) [5-7].

Estudos tem sido realizados sobre o processo MIBP principalmente no que se refere a composição do material e sua influência na peça final. Contudo, poucos estudos discutem mais precisamente a influência das etapas do processo de injeção em si. Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar a influência do ciclo de resfriamento do molde nas propriedades dimensionais de peças cerâmicas injetadas pelo processo de baixa pressão. Para isso foi definido: 1) um experimento com três condições de injeção; 2) desenvolvido um molde de injeção para obter uniformidade nas amostras injetadas; 3) definido um método para analisar as propriedades dimensionais (contração), geométricas (planicidade e circularidade) das amostras entre as etapas do processo de fabricação, i. e. nas peças a verde, após a remoção do veículo orgânico (Leito de pó e pré-sinterização) e após a sinterização.

Processo de injeção de cerâmicas em baixa pressão:

No processo MIBP, a matéria-prima à base de pó cerâmico é misturada com um veículo orgânico formado por pelo menos um ligante e um dispersante [5]. A matéria-prima tem papel primordial no processo MIBP [8]. Esta mistura é aquecida no tanque da máquina a uma temperatura na qual o veículo orgânico apresenta uma viscosidade baixa o suficiente para permitir o fluxo quando a pressão através de ar comprimido for aplicada. O material viscoso é forçado através de um orifício que conduz à cavidade do molde, e isto ajuda o material a ser compactado e a remover a porosidade. As composições à base de cera podem ser injetadas a uma temperatura (60 a 100°C) e pressão relativamente baixa (entre 300 kPa e 1 MPa) [7]. Quando a suspensão cerâmica é resfriada no molde ela solidifica, resultando na formação de

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

um corpo a verde. Após a extração do componente de dentro do molde, ele passa pelas etapas de remoção do veículo orgânico, e em seguida o componente é sinterizado para atingir o formato e as propriedades desejadas [9]. Dentro desse contexto, o processo MIBP (Figura 1) pode ser dividido em quatro etapas distintas: a) Seleção e preparação da matéria-prima; b) Mistura, injeção e extração; c) Remoção do veículo orgânico; d) Sinterização [9,10].

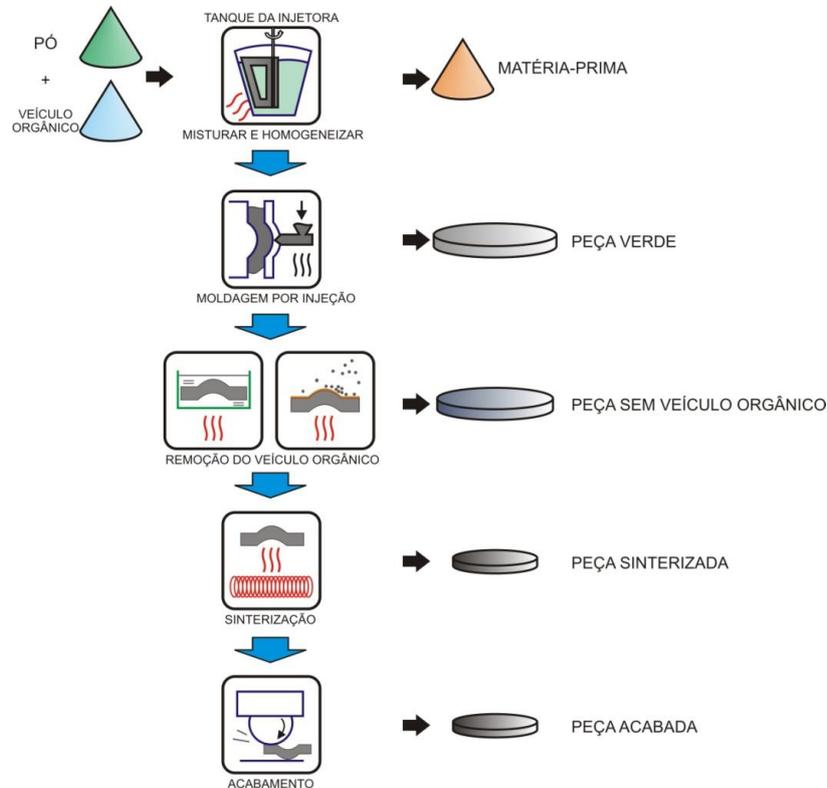


Figura 1. Etapas do processo MIBP [4].

Alguns fatores afetam o processo e devem ser considerados, tais como o projeto do molde, a reologia dos materiais, os parâmetros de injeção, os quais são interligados entre si [7], além das variáveis envolvidas diretamente na injeção, como: temperatura no tanque de mistura, velocidade de injeção, temperatura do molde, pressão de injeção, tempo de injeção, tempo de resfriamento no molde [11]. O controle destas variáveis tem por objetivo, não só produzir peças injetadas livres de defeitos, mas também livres de tensões que possam introduzir distorções em etapas posteriores [11,12].

A diferença entre a temperatura do molde e da matéria-prima também é importante. O resfriamento dos moldes durante o processo necessita ser avaliado de acordo com a forma particular dos componentes cerâmicos e do projeto do molde. Quando a temperatura do molde é bastante elevada e a diferença entre as temperaturas é baixa, o endurecimento ocorre lentamente, provocando deformação do corpo injetado e aumento da porosidade. No entanto, quando a diferença entre as temperaturas é alta (> 50°C), o endurecimento ocorre "camada por camada", gerando uma peça com porosidade mínima e sem deformações. Se a diferença de temperatura entre a matéria-prima e o molde é pequena ocorrendo resfriamento lento da parafina, ocorre a formação de cristais grandes resultando em camadas exteriores com quantidades maiores do que as camadas interiores [6,9].

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Após a injeção, os componentes obtidos sofrem tratamentos térmicos para remover o veículo orgânico e, em seguida, realizar a sinterização, para obter uma peça final com porosidade mínima. Os componentes que apresentam defeitos no estado à verde podem ser devolvidos à injetora, ou seja, essa tecnologia apresenta baixo desperdício, o que é especialmente benéfico para o processamento de materiais caros [7].

Um dos maiores problemas encontrados na extração do veículo orgânico é o tempo relativamente longo, variando de 6 até mais de 40 horas dependendo do processo de remoção escolhido [13].

O processo de sinterização é a etapa final do processamento de componentes cerâmicos e consiste na consolidação térmica do corpo a verde através da redução da porosidade e aumento do tamanho de grão [7,14]. O mais comum na literatura existente é a utilização da temperatura média de 1600°C, com uma taxa de aquecimento de 1°C/min e estabilização de duas horas [6].

Com base nestas informações o experimento trabalha com variáveis relacionadas com a temperatura do molde no momento da injeção e com a variação do método de resfriamento, como pode ser visto na seção 2.4.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Suspensão Cerâmica

A suspensão que foi utilizada neste trabalho foi desenvolvida por J. E. Zorzi [3]. A proporção dos componentes (Tabela 1) viabiliza um bom fluxo da suspensão e está dimensionado na menor proporção aceitável para evitar distorções e formação de bolhas na etapa de remoção do veículo orgânico.

**Tabela 1.** Componentes da suspensão cerâmica

Material	Cód. / Fornecedor	% Peso	% Volume	Ponto de Fusão °C
Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	A-1000SG (Almatis)	86	55	-
Parafina	120 / 125 Petrobras	10,5	33,75	49-52
Parafina microcristalina	170 Petrobras	1,4	4,50	82,4
Cera de carnaúba	Farmaquímica	1,4	4,50	80-87
Ácido oleico	Synth-BR	0,42	1,35	16
Ácido esteárico	Synth-BR	0,28	0,90	73

### 2.2 Geometria Experimental Para Injeção

Como geometria experimental foi utilizado um disco com Ø80,00 mm e espessura de 3,00 mm com injeção central (Figura 2). Para evitar problemas relativos ao projeto do molde, como ar aprisionado na cavidade, bolhas e linhas de emenda, foram definidos mecanismos de escape de ar distribuídos na parte externa da cavidade do disco.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

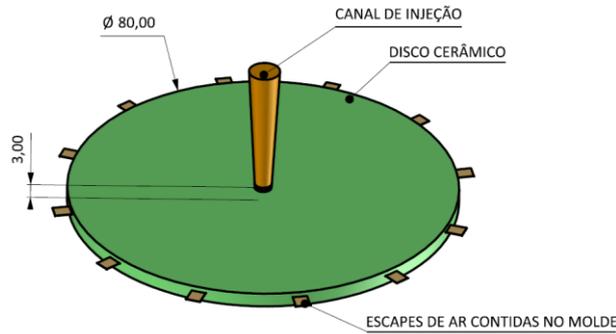


Figura 2. Modelo experimental para injeção

### 2.3 Molde Experimental para Injeção

O molde foi projetado e desenvolvido em alumínio 7075-T6 que atende as especificações de resistência e peso para o processo MIBP. A refrigeração foi usinada entre a montagem das placas porta-cavidades e cavidades para permitir uma boa e uniforme transferência de calor entre elas. As dimensões máximas do molde (Figura 3) montado são de  $\varnothing 175\text{mm} \times 78\text{mm}$  (altura). O orifício de injeção foi dimensionado para a máquina injetora de baixa pressão da marca *Peltsman*, modelo MIGL-33 semi-automática. Para monitorar a temperatura do molde foram utilizados três sensores: termopar 1: monitorar a temperatura do bloco da cavidade; termopar 2: monitorar a região central da cavidade; e termopar 3: monitorar a região da borda da cavidade.

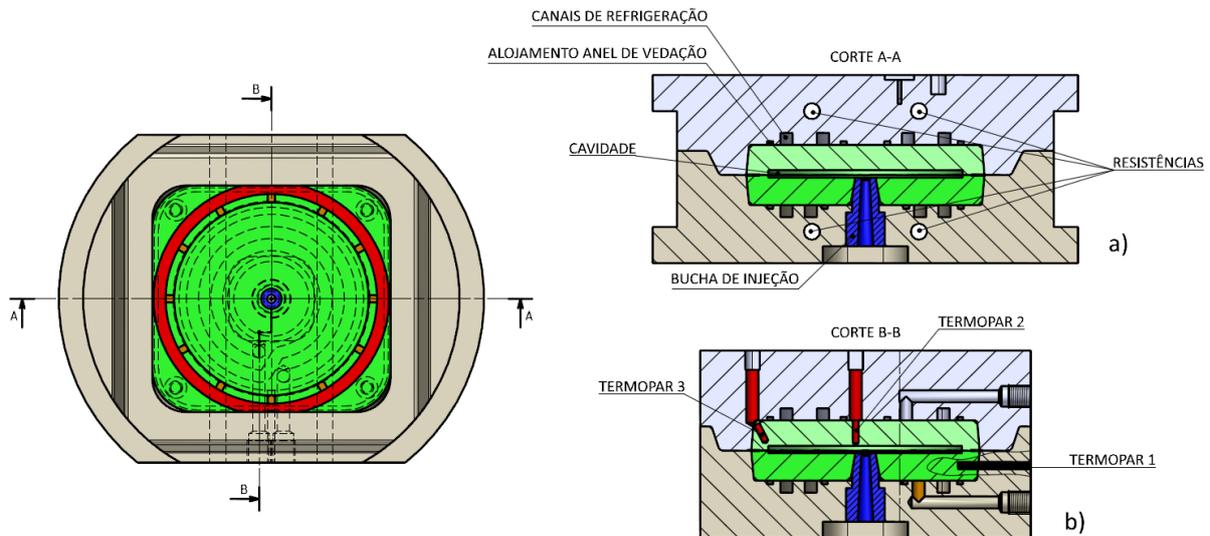


Figura 3. Molde experimental

As superfícies das cavidades do molde foram revestidas com um filme fino de PTFE (Politetrafluoretileno - teflon<sup>®</sup>), para permitir a extração dos discos de maneira mais fácil, evitando aderência da suspensão cerâmica com as cavidades usinadas do molde.

Para o resfriamento do molde experimental (Figura 4) foi utilizado uma bomba de água centrífuga, com pressão de 0,17 MPa e vazão de 3,5 l/min. Com um canal de refrigeração com 5 mm de diâmetro, o sistema alcançou valor superior a 7300 *Reynolds*, resultado acima do recomendado por Menges *et. al.* [15] e Rees [16].

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

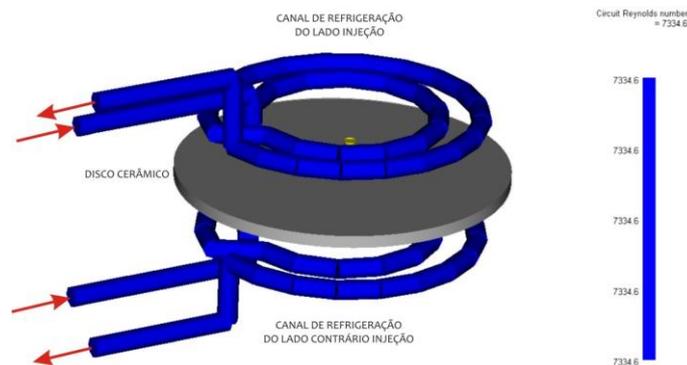


Figura 4. Sistema de refrigeração do molde

## 2.4 Variáveis Experimentais

As variáveis para o experimento realizado estão associadas à temperatura do molde no momento da injeção, à temperatura em que a peça é extraída do molde e o método de resfriamento utilizado para reduzir a temperatura do molde (Tabela 2).

Tabela 2. Condições de injeção das amostras

Condições	Sigla	Temp. do Molde	Sistema de resfriamento	Temp. de extração	Pressão de injeção	Tempo de injeção
Condição 1	C1	45 °C	Taxa lenta acionada após injeção	35 °C	380 kPa	12 s
Condição 2	C2	45 °C	Taxa rápida acionada após injeção	35 °C	380 kPa	12 s
Condição 3	C3	35 °C	Temperatura fixa e contínua aplicada durante todo o processo	35 °C	380 kPa	12 s

Temperaturas superiores a 45°C foram testadas, uma vez que, em trabalhos anteriores [13,17] utilizaram temperaturas de 55 e 58°C, respectivamente. Contudo, acima de 45°C as amostras apresentavam falhas no preenchimento da borda do disco que impossibilitava a medição das mesmas.

A taxa média de resfriamento para a condição C1 foi de 5,36°C/min, e para a condição C2 foi de 90°C/min. Para a condição C3 foi utilizado a água a 35°C mantida durante todo o ciclo de injeção.

## 2.5 Remoção de Veículo Orgânico e Sinterização

Para a remoção do veículo orgânico foi utilizado o processo de leito de pó (*debinding by wicking*) e as amostras foram pré-sinterizadas na temperatura de 1000°C em um forno Sanchis B CER (máx. 1200°C). Para a etapa de sinterização foi utilizado um forno da marca Lindberg/blue M Box (máx. 1700°C) e foi aplicado um incremento de 1°C/min até atingir a temperatura de 1600°C e após foi mantido nesta temperatura por mais 2 horas (Figura 5).

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

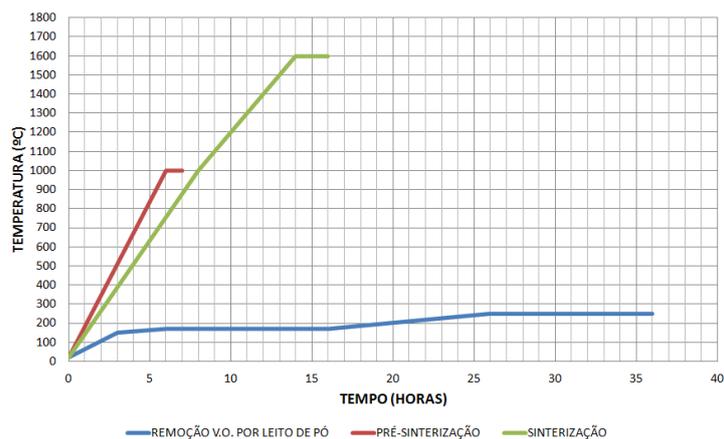


Figura 5. Curvas dos processos pós-injeção

## 2.6 Medições e Análises

Os resultados de planicidade, circularidade e contração foram obtidos por meio das medições em cada amostra realizada na máquina de medição tridimensional *Zeiss*, modelo *GaugeMax*. Os pontos de medição foram determinados (Figura 6) considerando uma distribuição uniforme dos mesmos, a fixação da amostra e evitando a área central devido aos defeitos gerados pela remoção do canal de injeção.

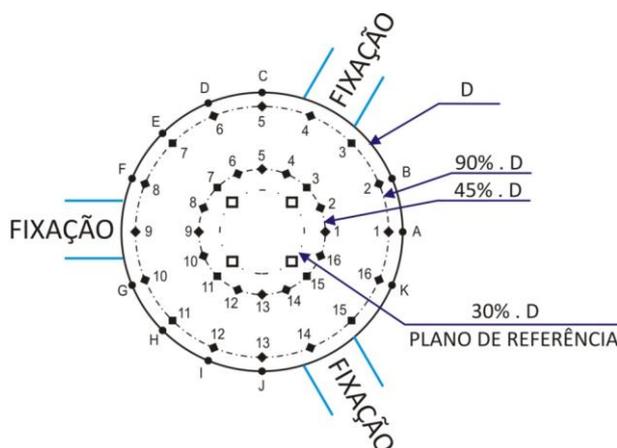


Figura 6. Posição das medições no disco.

A avaliação da planicidade foi feita através de medições de 16 pontos realizados em um diâmetro de 45% do diâmetro externo (próxima ao centro) e um diâmetro de 90% do diâmetro externo (próxima à borda). A tolerância máxima de circularidade foi identificada através do menor e o maior valor de raio medido entre os pontos A e K, enquanto a contração das amostras foi avaliada comparando o diâmetro formado pelos pontos A, D e I com a dimensão encontrada nas cavidades do molde de injeção ( $\varnothing 79,99 \pm 0,01$ ).

Adicionalmente, uma análise conjunta dos resultados relativos à contração, planicidade e circularidade foi realizada por meio de avaliação de variância estatística considerando uma confiabilidade de amostra de 95%.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Temperatura do Molde

O monitoramento de temperatura no molde foi importante para a produção de amostras com melhor conformidade e repetibilidade, i.e., as mesmas condições para cada experimento. A Figura 7 mostra as temperaturas em cada condição de injeção medida nos três pontos determinados no molde, onde pode-se perceber que no momento da injeção o molde aquece devido ao contato da suspensão cerâmica com a superfície da cavidade do molde. Nas três condições (C1, C2, C3) é possível observar que o termopar central apresenta um pico de temperatura superior aos demais termopares, devido a ter maior proximidade em relação ao ponto de injeção. O ponto menos afetado do molde (para todas as condições) foi à região da borda do produto, pois é o ponto mais distante da injeção. No momento em que a suspensão cerâmica chegou ao fim da cavidade a temperatura da suspensão já estava menor. A temperatura na frente de fluxo da suspensão cai à medida que o material avança dentro da cavidade, o que é normal para este tipo de processo de fabricação e este efeito foi acentuado pelo método de refrigeração do molde que é do tipo espiral, alimentada do centro para fora.

Na condição 3, o pico de temperatura no termopar central é maior que nas demais condições, devido à maior diferença de temperatura entre o molde e a suspensão cerâmica. Este efeito é relativo à diferença de temperatura do molde (C3= 35°C, C1=C2= 45°C) e da suspensão cerâmica (90°C). Na C3 o tempo de estabilização foi menor devido à utilização de refrigeração contínua com água a 35°C durante todo o ciclo de injeção. Na C1 obteve-se um tempo de ciclo de 10 minutos, na C2 foram necessários 8 minutos e na C3 foram necessários 5 minutos.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

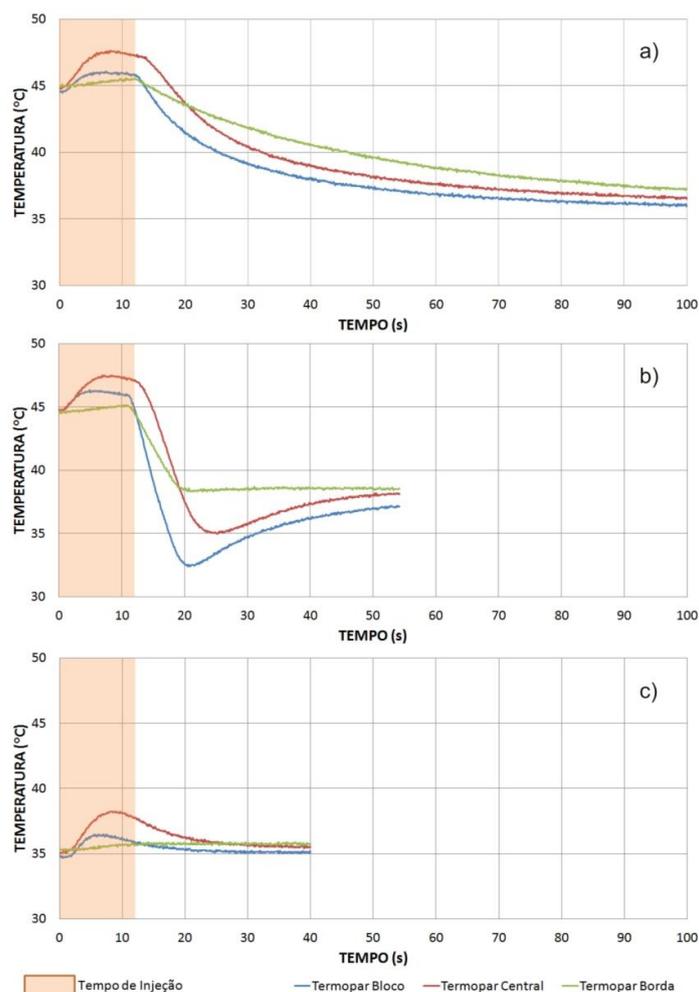


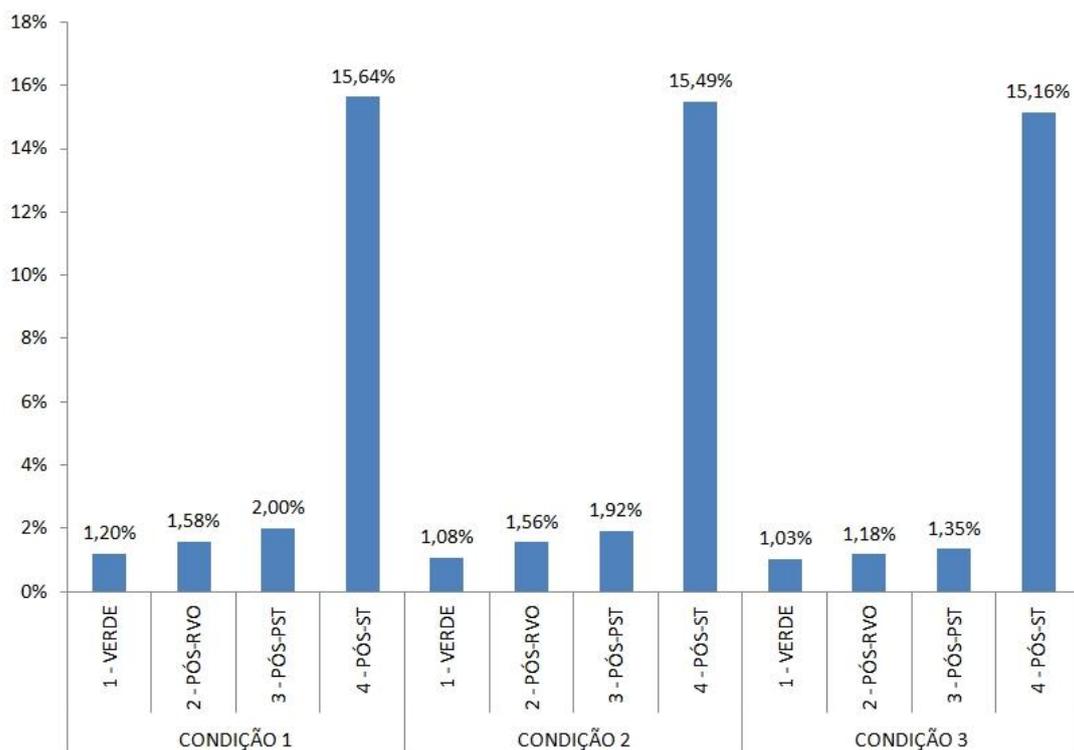
Figura 7. Curvas de temperaturas: a) da condição 1; b) da condição 2; c) da condição 3.

### 3.2 Análise Dimensional e Geométrica

Essa seção apresenta os resultados de contração dimensional absoluta, tolerância de planicidade e circularidade referente as medições realizadas nos disco cerâmicos em cada fase do processo.

Com base nos resultados obtidos, observa-se um aumento gradativo da contração média entre os processos pós-injeção de fase para fase (Figura 8). A contração final da C1 e C2 foram superiores e próximas, enquanto a contração na C3 foi inferior às demais. Isto se deve, principalmente, ao método utilizado no resfriamento, pois nas C1 e C2 o resfriamento foi acionado após o término do tempo de injeção e a compactação da suspensão cerâmica dentro da cavidade do molde é inferior a C3. Como na condição C3, a refrigeração permanece acionada durante todo o tempo de injeção, as amostras apresentaram um aumento de massa de 0,56% em relação às outras condições. Este fator revela uma maior compactação a verde e, como consequência, menor contração. Com análise de variância utilizando uma confiabilidade de 95% não se percebe diferenças significativas entre as três condições nas etapas a verde e pós sinterizada.

\* Contribuição técnica ao 69<sup>o</sup> Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14<sup>o</sup> ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.



**Figura 8.** Contração dimensional em cada fase do processo.

Os resultados de planicidade (Figura 9) apresentam dados relacionados à projeção do grupo de pontos medidos para cada análise em relação ao plano de referência especificado por quatro pontos próximos ao centro da amostra. A medição da cavidade do molde apresentou uma tolerância de planicidade de 0,02 mm em relação a 90% do diâmetro da cavidade e de 0,01 mm em relação a 45% do diâmetro.

Na análise da planicidade houve uma tendência das peças deformarem de forma convexa em relação ao ponto de injeção das amostras. A maior deformação para todas as condições de injeção foi verificada na região mais externa (90%.D).

A C1 apresentou o maior desvio de planicidade, devido à baixa taxa de resfriamento induzir uma solidificação lenta e as partículas acomodarem-se de forma livre. A C2 apresentou o menor desvio de planicidade em função da rápida solidificação da peça dentro do molde gerada pela alta taxa de resfriamento. Além disso, a C2 apresentou a menor variação entre as etapas pós-injeção.

Dentre as condições analisadas, a C3 apresentou a uma condição de planicidade irregular. É possível perceber na Figura 9 que houve uma deformação acentuada na etapa de pré-sinterização e depois uma redução da deformação na etapa de sinterização. Analisando os resultados estatísticos apenas a planicidade em 90%.D das amostras a verde apresentaram diferenças significativas, porém não distintas entre as condições C1, C2 e C3.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

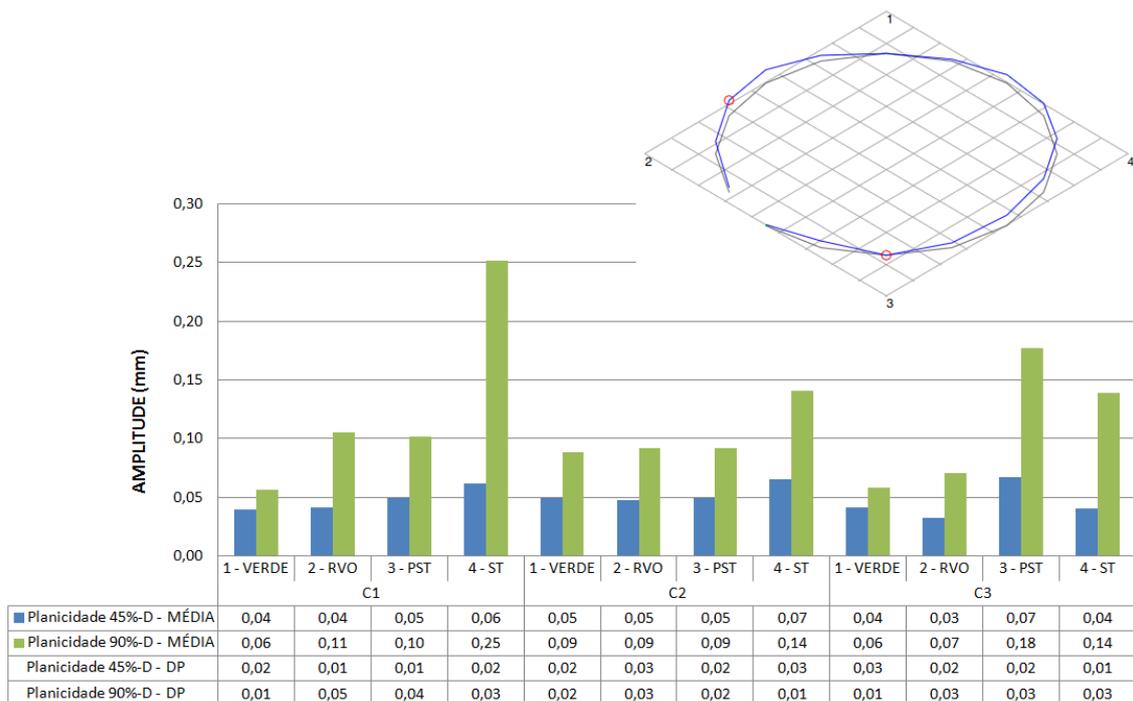


Figura 9. Planicidade das amostras em cada fase do processo.

Os resultados de circularidade (Figura 10) apresentam dados relacionados à deformação radial das amostras em relação a um diâmetro médio. A medição da cavidade do molde apresentou uma tolerância de circularidade de 0,014 mm.

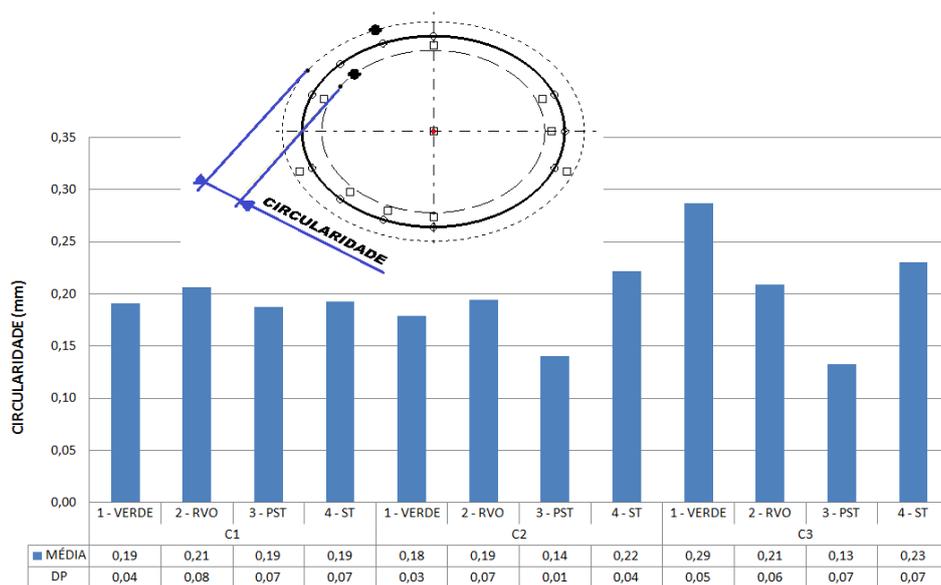


Figura 10. Circularidade das amostras em cada fase do processo.

Na circularidade os resultados apresentaram variações que podem ser verificados pelos desvios padrões mostrados na Figura 10. Considerando os resultados médios, a C1 apresentou menor variação de circularidade entre as etapas, a C2 uma condição intermediária e a C3 a pior condição comparada com as demais. Analisando a correlação na etapa a verde existe uma correlação moderada entre circularidade e planicidade e uma correlação fraca entre contração e circularidade.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

Na etapa sinterizada existe uma correlação moderada entre a contração e a circularidade e uma correlação fraca entre circularidade e planicidade.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou os resultados de três diferentes condições de resfriamento num molde de injeção, no processo de injeção em baixa pressão de discos cerâmicos, onde foram variadas a temperatura do molde e o método de resfriamento. Foi possível perceber a influência da temperatura no processo de injeção e como afeta as propriedades do produto injetado, sendo essas, dimensionais e geométricas. Um molde de injeção experimental foi desenvolvido com um circuito de refrigeração controlado, permitindo realizar o experimento em condições controladas e com uniformidade na produção das amostras de estudo. Os discos dimensionados mostraram-se adequados para as análises dos resultados. Com os experimentos realizados até o momento, não se pode afirmar que uma das condições de injeção foi a melhor em todos os cenários, visto que, a condição com alta taxa de resfriamento (C2) obteve menor desvio de planicidade e menor variação de circularidade e a condição com resfriamento contínuo (C3) obteve menor contração e menor tempo de ciclo.

Analisando-se estatisticamente os resultados obtidos em relação às etapas a verde e sinterizada não houveram diferenças significativas, ou seja, não há distinção sobre os resultados para a contração, planicidade e circularidade. Sendo assim em termos dimensionais a condição C2 apresenta melhor resultado médio, enquanto do ponto de vista produtivo a condição C3 apresenta o menor tempo de ciclo, além de necessitar de menor aparato para produção.

Para aprofundar os resultados deste trabalho sugere-se um estudo sobre as propriedades mecânicas, como: densidade a verde e sinterizada, resistência à flexão, distribuição do tamanho dos poros, a fim de identificar os fatores de impacto das condições de injeção nos defeitos das peças cerâmicas, bem como em suas propriedades dimensionais e estruturais.

#### Agradecimentos

Os pesquisadores gostariam de agradecer a FAPERGS (Fundação de Amparo a Pesquisa do RS) - Projeto Pesquisador Gaúcho (Proc. 1904-2551/13-8SIAFEM) pelo apoio financeiro, e ao Laboratório LNTP da UCS (Universidade de Caxias do Sul) pelo apoio nas medições realizadas.

#### REFERÊNCIAS

- 1 Rödel J, Kouna ABN, Weissenberg-Eibl M, Koch D, Bierwisch A, Rossner W, Hoffmann MJ. Development of a Roadmap for Advanced Ceramics: 2010-2025. Journal of the European Ceramic Society. 2009;29(9):1549-60.
- 2 German RM, Bose A. Injection molding of metals and ceramics. New Jersey: Metal Powder Industries Federation; 1997.
- 3 Zorzi JE. Produção de peças de cerâmica avançada com perfil complexo [Tese de doutorado]. Porto Alegre: UFRGS; 2001.
- 4 Moritz T, Lenk R. Ceramic injection molding: a review of developments in production technology, materials and applications. Powder Injection Molding International. 2009;3(3):23-34.

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.

- 5 Müller M, Bauer W, Ritzhaupt-Kleissl HJ. Low-pressure injection molding of ceramic micro device using sub-micron and nanoscaled powders. In: Proceedings of the 4M Conference; 2005. p.203- 206.
- 6 Zorzi JE, Perotoni CA, Jornada JA. Moldagem por injeção em baixa pressão de peças complexas de cerâmicas avançadas produzidas com pós submicrométricos. *Cerâmica*. 2004;50:202-208.
- 7 Richerson DW. Modern ceramic engineering: properties, processing, and use in design. 3.ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group; 2006.
- 8 Knitter R, Haußelt J, Loebbecke B. Rheological properties of alumina feedstocks for the low-pressure injection moulding process. *Journal of the European Ceramic Society*. 2009;29:1595-1602.
- 9 Peltsman M, Medvedovski E. Low pressure moulding mass production technology of complex shape advanced ceramic components. *Advances in Applied Ceramics*. 2012;111(5-6):333-344.
- 10 Zhang H, German RM, Bose A. Wick debinding distortion of injection molded powder compacts. *International Journal of Powder Metallurgy*. 1990;26(3):217-230.
- 11 Zampieron JV. Caracterização física de partículas e reológica de um sistema heterogêneo em moldagem de pós por injeção a baixa pressão [Tese de Doutorado]. São Paulo: Ipen; 2001.
- 12 Erickson AR, Amaya HE. Recent development in injection molding of p/m parts. In: *Anais da Conferência Internacional - Materials by Powder Technology*; 1993; Oberursel, Alemanha. MPT'93; 1993. p.145-155.
- 13 Costa CA, Tifton AP, Pasquali FM, Cruz RCD. The influence of low pressure injection molding process parameters on ceramics disks geometry. In: *Anais do 20<sup>th</sup> Annual International Conference on Composites or Nano Engineering*; 2012; China.
- 14 Andreola R. Conformação de molas cerâmicas por moldagem por injeção em baixa pressão [Dissertação de Mestrado]. Caxias do Sul: UCS; 2007.
- 15 Menges G, Mohren P, Michaeli W. How to make injection molds. 3.ed. Munique: Hanser Publishers; 2001.
- 16 Rees H. Mold engineering. New York: Hanser; 1995.
- 17 Barbieri RA. Influência da temperatura de sinterização nas propriedades mecânicas de molas de alumina injetadas em baixa pressão [Dissertação de Mestrado]. Caxias do Sul: Universidade de Caxias do Sul; 2011.

---

\* Contribuição técnica ao 69º Congresso Anual da ABM – Internacional e ao 14º ENEMET - Encontro Nacional de Estudantes de Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas, 21 a 25 de julho de 2014, São Paulo, SP, Brasil.