

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE PARÂMETROS DE FUNDIÇÃO NA FORMAÇÃO DE POROSIDADE DE LIGAS CONFORMADAS POR SPRAY EM MOLDES DE FUNDIÇÃO DE PRECISÃO¹

Neylor Oliveira²
Claudemiro Bolfarini³

Resumo

O objetivo desse trabalho é o desenvolvimento de um processo de fabricação de matrizes de forjamento com propriedades mecânicas superiores as obtidas pelo método convencional, reduzindo o tempo de fabricação e os custos do processo. No entanto a porosidade é um problema intrínscico desse processo e o fator limitante para que os resultados não sejam completamente satisfatórios. Por isso, esse trabalho visa estudar alguns dos parâmetros que influenciam a formação de porosidade. O processo consiste na fabricação de moldes cerâmicos por cera perdida, com o formato próximo do formato final da peça (near net shape). Esse molde, com a face interna com a forma da gravura de forjamento, será preenchido pelo metal fundido atomizado, que se choca na cavidade do molde na forma de gotículas líquidas, semi-sólidas e totalmente solidificadas. Essa gravura será fixada em um bloco de aço compondo assim a matriz de forjamento. Assim ter-se-á as vantagens da microestrutura da solidificação rápida, melhorando o desempenho e aumentando a vida útil das matrizes. Esse trabalho apresenta o avanço do desenvolvimento tecnológico desse novo processo de fabricação de matrizes de forjamento e discute alguns resultados de porosidade e a influência de parâmetros de fundição na formação de porosidade. Entre esses resultados se destacam a maior incidência para formação de porosidade na região superficial da matriz (interface molde-metal), o aumento da incidência de porosidade no interior das matrizes processadas em moldes aquecidos e a descoberta de um ângulo ideal para as paredes das matrizes que resultam em uma porosidade superficial mínima.

Palavras-chave: Matrizes de forjamento; Conformação por spray; Fundição de precisão; Porosidade.

STUDY OF THE CASTING PARAMETERS FOR POROSITY FORMATION IN ALLOYS SPRAY FORMED INTO INVESTMENT CASTING MOULDS

Abstract

The purpose of this work is to develop a new process of forging dies which have higher mechanical properties than those which are produced by the conventional method, resulting in significant cost and lead-time savings. However the porosity is a common problem of this process and it does not allow the results to be completely satisfactory. Therefore, this work studies some of the parameters which have influence in porosity formation. The process is based on the fabrication of near net shaped ceramic moulds by investment casting. The general approach involves depositing atomized droplets onto those ceramic moulds in order to image the pattern's features. The pattern is removed and the die insert is mounted in a standard mould base or holding block. This process provides the advantages of fast solidification, improving the performance and exhibiting extension in dies life. This works presents the advance of the technological development of this new process of dies fabrication and point some results about porosity and the influence of casting parameters in porosity formation. In these results is relevant the higher tendency of porosity generation in the superficial region of the die (interface mould-metal), the increase of porosity formation in the interior of the dies casted into heated moulds, and the evidence of an ideal mould wall angle's which results in a minimum superficial porosity.

Key words: Forging dies; Spray forming; Investment casting; Porosity.

¹ *Contribuição técnica ao 7º Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, 15 e 16 de julho de 2009, São Paulo, SP.*

² *Engenheiro de Materiais, cursando mestrado em Engenharia de Materiais como aluno especial na Universidade Federal de São Carlos.*

³ *Professor titular de Engenharia de Materiais na Universidade Federal de São Carlos.*

1 INTRODUÇÃO

A idéia central desse trabalho visa combinar a tecnologia de conformação por spray e as técnicas de fundição de precisão para criar um novo método de fabricação de moldes e matrizes. A técnica de conformação por spray consiste na atomização por gás inerte de um fluxo de metal líquido em gotas de vários tamanhos as quais são impulsionadas para fora da região de atomização, em alta velocidade. A trajetória das gotas é interrompida por um substrato sobre o qual elas se consolidam e solidificam para formar um depósito coerente e próximo da densidade teórica.⁽¹⁾ Já a fundição de precisão vem sendo utilizada há muito tempo na área de metalurgia e consiste na aplicação de uma lama cerâmica em torno de um modelo, normalmente em cera, permitindo o seu endurecimento e formando um molde. O modelo é então removido do molde para dar lugar ao metal que irá compor o fundido. Após vazamento, o molde é destruído obtendo-se assim o fundido.^(2,3)

O principal objetivo de utilizar a tecnologia de conformação por spray aliada à fundição de precisão para fabricação de matrizes de forjamento é a significativa redução do tempo e dos custos de fabricação, uma vez que as matrizes são de geometrias complexas e exigem materiais de elevada dureza o que torna o processo de usinagem extremamente lento, complexo e dispendioso. No entanto a elevada complexidade das matrizes de forjamento gera um problema de preenchimento do molde e de formação de porosidade quando fabricados por conformação por spray.

A porosidade é um problema intrínseco da conformação por spray e pode comprometer as propriedades mecânicas do material, especialmente quando utilizados a elevadas temperaturas. Por isso, existe um grande esforço em pesquisas para procurar entender os mecanismos de formação de porosidade e encontrar maneiras de controlar ou minimizar esse problema. Leatham⁽⁴⁾ publicou em seus trabalhos que a otimização dos fatores do processo podem reduzir a porosidade abaixo de 1%.

Na última década, pesquisas desenvolvidas por Grant,⁽⁵⁾ Mathur e Annavarapu⁽⁶⁾ e Zhang e Lavernia⁽⁷⁾ apontaram três mecanismos para a formação da porosidade: Líquido insuficiente para preencher os interstícios entre partículas depositadas, aprisionamento de gases e contração de solidificação. Dentre esses mecanismos a porosidade intersticial tem sido considerada o fator mais significativo para formação de porosidade, sendo a causa desse tipo de porosidade uma quantidade insuficiente de metal líquido no depósito. Assim criou-se uma idéia de que quanto maior fosse a pressão do gás de atomização (que proporcionaria taxas mais elevadas de resfriamento e um maior refino microestrutural), maior seria a incidência de porosidade. Estudos mais recentes de Cai e Lavernia,⁽⁸⁾ utilizando métodos de simulação computacional chegaram a resultados conclusivos de que o aumento da pressão do gás de atomização até um valor limite não provoca aumento na incidência de porosidade, e que esse valor limite da pressão do gás resulta em uma porosidade mínima.

Apesar do grande número de publicações a respeito da influência dos parâmetros da conformação por spray na formação de porosidade muito pouco se fala sobre a influência da geometria do molde (substrato) na formação da porosidade. Yang⁽⁹⁾ estuda a fabricação de matrizes com geometrias complexas, porém seus resultados se limitam a fotos e descrições da aparência e do acabamento superficial das matrizes. Além disso, Yang⁽⁹⁾ trabalha com um equipamento de conformação por spray que têm um canal de atomização duplo, que permite a fabricação de peças com geometria extremamente complexas.

Para a fabricação de matrizes de forjamento é necessário a utilização de ligas de composições complexas que são muito difíceis de processar pelo método convencional, resultando em um material com elevada segregação e necessitando de dispendiosos trabalhos mecânicos e tratamentos térmicos posteriores para atender as propriedades mecânicas necessárias. O método de conformação por spray é capaz de processar composições químicas complexas em alta velocidade e sem problemas de segregação, inerentes à fundição convencional, o que resulta em propriedades excelentes para os produtos.⁽¹⁰⁾

As ligas utilizadas nesse trabalho foram o ferro fundido branco alto cromo, que representa uma liga de baixo custo, mas com uma severa complexidade para se processar e o NiCrAlC (Níquel, Cromo, Alumínio e Carbono) que é uma liga nobre de uma elevada complexidade de composição química e vem sendo proposta como substitutas de aços refratários e ligas fundidas convencionais a base de cobalto e níquel.

Ferros fundidos brancos com alto teor de cromo (Fofu Branco) são utilizados em aplicações nas quais elevada resistência ao desgaste é necessária. Esta característica é atribuída à microestrutura constituída por uma alta fração volumétrica de carbonetos M₇C₃ (M=Cr, Fe) distribuída em matriz austenítica/martensítica.⁽¹⁰⁾ Por sua vez, a liga NiCrAlC são resistentes a elevadas temperaturas devido a refrateriedade do Níquel e resistentes ao desgaste pois contém uma dispersão de carbonetos duros em uma matriz de fase intermetálica do tipo Ni₃Al.⁽¹¹⁾

O assunto abordado nesse trabalho é pouco divulgado no cenário de pesquisas sendo conhecidos apenas dois grupos de pesquisas no mundo que publicam artigos referentes a esse novo método de fabricação de moldes e matrizes. McHugh⁽¹²⁾ lidera um grupo de pesquisa na Universidade de Idaho, Estados Unidos e nomearam esse processo de “Rapid Spray Process Tooling” (RSP Tooling). Esse grupo de pesquisa trás resultados da aplicação dessas matrizes em campo. Entre os resultados obtidos destaca-se o considerável aumento na vida útil dos moldes e matrizes, aumentando até 180% a vida útil de matrizes de forjamento, processados pelo método RSP-tooling quando comparados com as matrizes convencionais. Outro grupo que é referência no assunto é liderado por Yang⁽⁸⁾ citado acima, que é responsável pelo projeto “Precision Spray Forming” (PSF) no centro de pesquisa VTT na Finlândia. No Brasil não existe registro de nenhuma publicação ou pesquisa sobre esse método de fabricação de moldes e matrizes, sendo esse trabalho pioneiro sobre o assunto.

A proposta desse trabalho é identificar e estudar as principais causas da formação da porosidade. Os parâmetros estudados foram a influência da liga, a temperatura do molde, a pressão do gás de atomização e a geometria do molde na formação de porosidade das matrizes de forjamento obtidas via conformação por spray e fundição de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As matrizes de forjamento foram produzidas através de um novo método de processamento desenvolvido por McHugh⁽¹²⁾ e Yang⁽⁸⁾ e adaptado a infra-estrutura do Laboratório de Fundição do Departamento de Engenharia de Materiais da UFSCar. Esse método combina a conformação por spray com a fundição de precisão como é mostrado no esquema representativo das etapas desse processo na Figura 1.

Um molde metálico foi usinado com a gravura da geometria da matriz de forjamento. Nesse molde foi injetado cera fundida obtendo-se o modelo da matriz em cera. O modelo de cera foi revestido por uma série de banhos de uma lama de material refratário formando um molde cerâmico onde o metal líquido foi conformado por spray. Operações de acabamento completam o processo de fabricação.

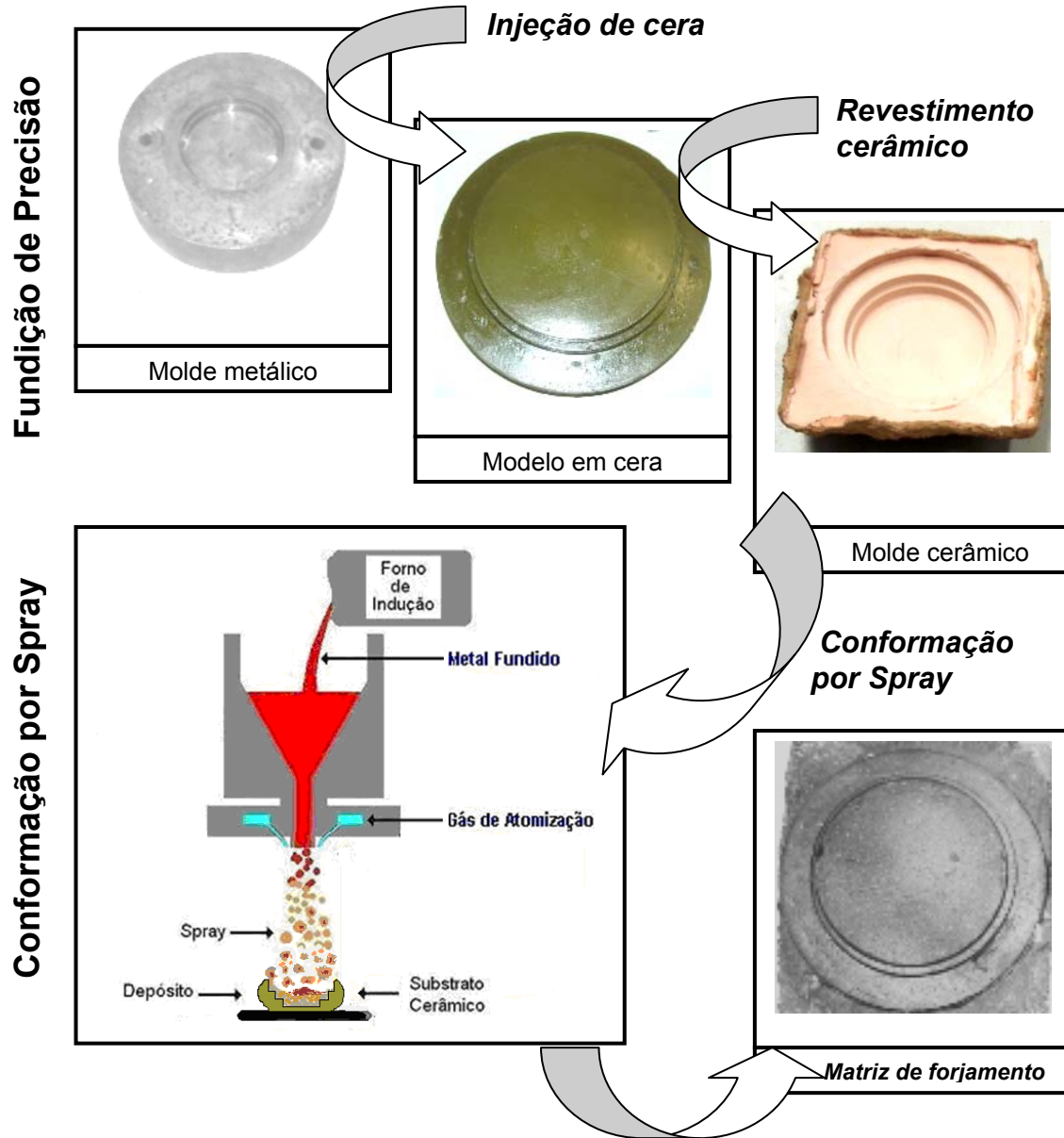


Figura 1: Esquema representativo do processo de fabricação das matrizes de forjamento.

A liga de Ferro Fundido Branco Alto Cromo foi conformada por spray em moldes cerâmicos a uma temperatura de 100°C e de 350°C. Os moldes cerâmicos foram aquecidos por uma resistência elétrica acoplada na base do molde e termopares foram utilizados para controlar a temperatura segundos antes do vazamento.

Para a liga NiCrAlC foram confeccionados moldes com as paredes internas com ângulos de 30°, 45° e 90° (Figura 2) com o objetivo de estudar a influência da geometria na formação de porosidade.



Figura 2: Moldes cerâmicos com paredes internas de diferentes ângulos.

Todos os depósitos obtidos foram submetidos a metalografia de acordo com a norma ASTM E 3-95 “Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens”.

Então foi realizada a análise quantitativa da porosidade presente nas amostras de acordo com a norma ASTM E562-95 “Standard Test Method for Determining Volume Fraction by Systematic Manual Point Count”. As amostras foram divididas em duas regiões para a análise da porosidade. Uma região superficial (até aproximadamente 6 mm da interface com o molde) e o interior da amostra. A Figura 3 mostra essas regiões em detalhe.

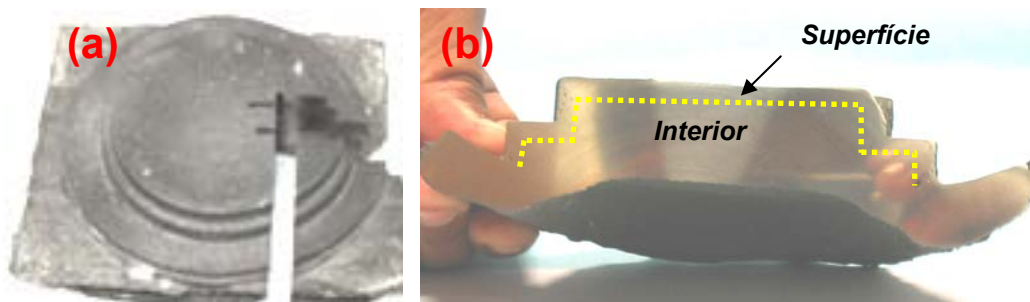


Figura 3: (a) Matriz de Fofo Branco mostrando a retirada de uma amostra para análise metalográfica; (b) Secção transversal de uma matriz de NiCrAlC. A região acima da linha pontilhada é identificada como superfície da amostra e a região abaixo dessa linha como interior da amostra.

3 RESULTADOS

3.1 Influência da Temperatura do Molde na Formação de Porosidade

Os resultados em relação à porosidade obtidos para as amostras de Ferro Fundido Branco Alto Cromo foram de $26,17 \pm 14,83\%$ na superfície da amostra (até 10mm da interface metal-molde) e de $9,8 \times 3,6\%$ no interior da amostra para as matrizes produzidas no molde aquecido a uma temperatura de 100°C . Já para o molde aquecido a uma temperatura de 350°C a porosidade encontrada foi de $40,58 \pm 19,74\%$ na superfície e de $5,9 \times 1,8\%$ no interior da amostra.

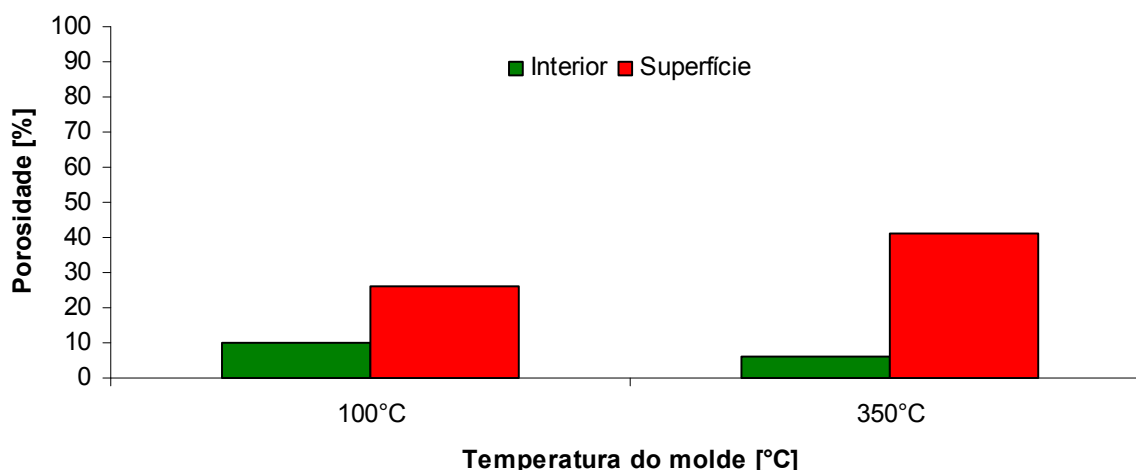


Figura 4: Gráfico indicando a porosidade no interior e na superfície das matrizes obtidas em um molde aquecido a 100°C e 350°C. A liga utilizada foi o Ferro fundido Branco Alto Cromo.

3.2 Influência da Geometria na Formação de Porosidade

Os resultados em relação à porosidade obtido para as amostras de NiCrAlC foram de 12.89 χ 1.96% na superfície da amostra e de 8.13 χ 1.46% no interior da amostra para as matrizes produzidas no molde de parede interna de 30°. Já para o molde de 45° a porosidade encontrada foi de 10.6 χ 1.38% na superfície e de 7.14 χ 3.29% no interior da amostra e para o molde de 90° a porosidade superficial foi 24.8 χ 1.38% e a porosidade no interior da amostra foi 8.36 χ 0.76%.

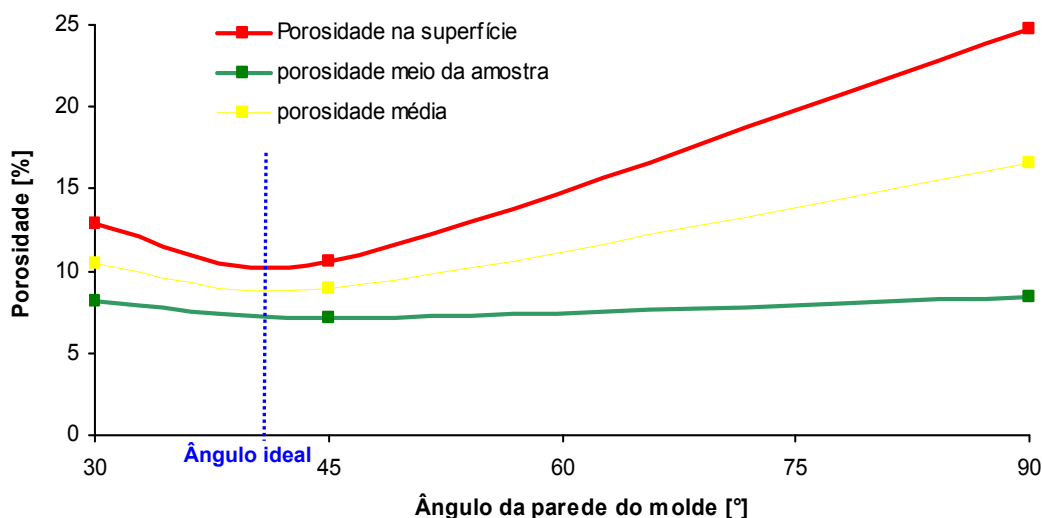


Figura 5: Curvas da porcentagem de porosidade média, no interior e na superfície da amostra em relação ao ângulo da parede do molde.

3.3 Influência da Pressão de Atomização na Formação de Porosidade

Os resultados em relação à porosidade obtido para as amostras de NiCrAlC foram de 12.24 χ 3.22% na superfície da amostra e de 8.56 χ 1.78% no interior da

amostra para as matrizes produzidas com a pressão do gás de atomização de 0,4 Mpa. Já para a pressão de 0,8 Mpa a porosidade encontrada foi de $10,6 \pm 1,38\%$ na superfície e de $7,14 \pm 3,29\%$ no interior da amostra.

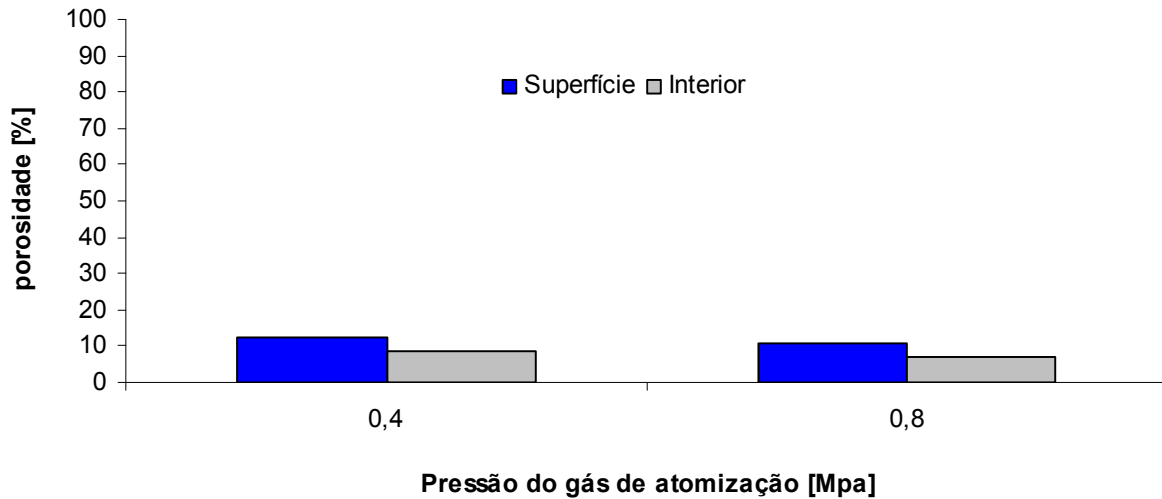


Figura 6: Gráfico da porcentagem da porosidade em relação à pressão do gás de atomização.

3.4 Influência da Liga na Formação de Porosidade

Foram comparados os resultados de porosidade para as ligas de Ferro Fundido Branco Alto Cromo (Fofu Branco) e a liga NiCrAlC, ambas conformada em um molde a mesma temperatura e com ângulo das paredes internas de 45° . A porcentagem de porosidade encontrada para a liga Fofu Branco foi $33,37 \pm 17,28\%$ na superfície da amostra e $7,85 \pm 2,7\%$ no interior da amostra. Já para a liga NiCrAlC a porosidade foi $15,13 \pm 1,98\%$ na superfície e $8,04 \pm 1,82\%$ no interior da amostra.

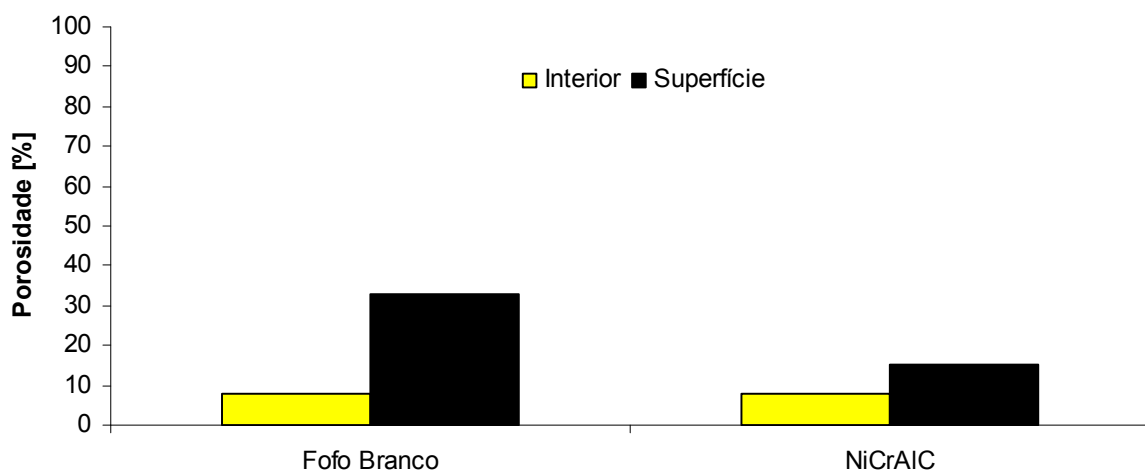


Figura 7: Gráfico da porcentagem da porosidade para as ligas de NiCrAlC e Fofu Branco.

4 DISCUSSÃO

4.1 Influência da Temperatura do Molde na Formação de Porosidade

Os resultados mostram que o aumento da temperatura de aquecimento do molde diminui a porosidade interna e contribui para a formação de porosidade na superfície da amostra. Essa diminuição da porosidade interna para o molde mais aquecido pode ser justificada pela maior quantidade de gases dissolvidos que são liberados para atmosfera ao invés de serem aprisionados e gerarem poros internos com formato esférico. Isso pode ser comprovado pela geometria circular dos poros encontrados no interior da amostra e pela geometria irregular dos poros localizados na interface metal-molde, como é mostrado na Figura 8.

Já na região superficial da amostra (interface molde-metal) a causa da elevada porosidade se deve ao fato de que nos instantes iniciais, quando a superfície está sendo formada, o processo não atingiu regime estacionário de transferência de calor. Devido à faixa de temperatura na qual os experimentos foram realizados ser muito pequena, não é possível chegar a uma conclusão concreta sobre a influência da temperatura do molde para a formação de porosidade superficial.

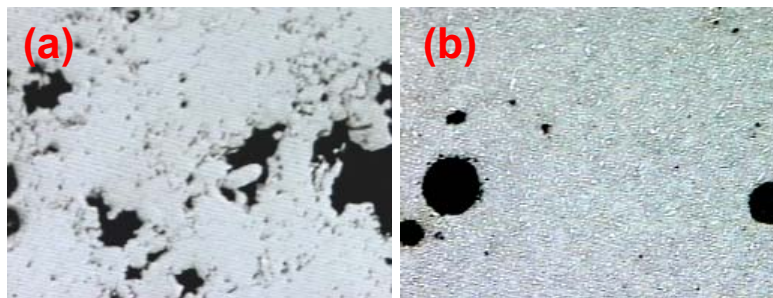


Figura 8: (a) Imagem ampliada 500X da região superficial da amostra; (b) Imagem ampliada 1000X do interior da amostra evidenciando o formato circular dos poros.

4.2 Influência da Geometria do Molde na Formação de Porosidade

Os resultados obtidos mostram que a variação do ângulo da parede do molde não exerce uma significativa interferência na formação de porosidade para ângulos menores ou iguais a 45° . Porém para ângulos próximos de 90° , o ângulo da parede do molde é determinante para formação da porosidade. Através de uma análise mais detalhada dos resultados obtidos, podemos observar que a porosidade não decresce linearmente com a diminuição do ângulo da parede do molde, mas sim existe um valor ideal para esse ângulo onde a porosidade é mínima. Uma alternativa prática para o processamento de peças com paredes de 90° seria inclinar o molde até o ângulo ideal e rotacioná-lo em seu próprio eixo além da rotação do molde deslocado em relação ao fluxo de metal atomizado.

4.3 Influência da Pressão do Gás de Atomização na Formação de Porosidade

Os resultados mostram uma menor porcentagem de porosidade para a amostra processada com maior pressão do gás de atomização. Esse resultado está de acordo com os resultados de Cai e Lavernia⁽⁸⁾ que diz que o aumento da pressão do gás de atomização até um determinado valor crítico causa uma redução na porosidade, como foi discutido na introdução desse trabalho.

4.4 Influência da Liga na Formação de Porosidade

Os resultados mostram uma pequena diferença entre a porosidade no interior das amostras processadas com as ligas NiCrAlC e Fofu Branco. Já na superfície das amostras a porosidade presente na liga NiCrAlC foi consideravelmente menor do que na liga Fofu Branco. Existe uma série de fatores que podem justificar essa diferença, por exemplo, a solubilidade do gás de atomização na liga ou as propriedades termodinâmicas da liga. No entanto devido ao grande número de fatores que influenciam a formação de porosidade nesse processo, não é possível tirar uma conclusão concreta a partir dos resultados encontrados.

5 CONCLUSÃO

Alguns dos fatores que influenciam a porosidade foram investigados e se destacam entre os resultados a existência de um ângulo ideal da parede do molde que resulta em uma porosidade mínima, a confirmação da existência de um valor crítico para a pressão de atomização que resulta em uma porosidade reduzida e a diminuição da porosidade interna quando os moldes utilizados são aquecidos. Apesar da elevada porcentagem de porosidade esperada ter sido confirmada, vale lembrar os estudos desenvolvidos por Leatham⁽³⁾ e apresentados na introdução desse trabalho que dizem que o controle e otimização do processo de conformação por Spray pode reduzir a porosidade abaixo de 1%. Os resultados apresentados nesse trabalho representam um primeiro passo para entender os fatores envolvidos na formação da porosidade e adaptar e ajustar os equipamentos ao processo, reduzindo a quantidade de porosidade presente nas matrizes aos limites toleráveis. Através dos resultados obtidos e o acompanhamento do projeto foi possível concluir que a fabricação das matrizes de forjamento pela combinação dos processos de fundição de precisão e conformação por spray é viável, resultando em matrizes com excelente acabamento em um tempo de fabricação reduzido.

Agradecimentos

Os autores são gratos ao CNPq e ao FVA pelo suporte financeiro.

REFERÊNCIAS

- 1 LEAL, V. S. Conformação por spray da liga Fe-6%Si: estudo do processo e da microestrutura. São Carlos, 1999. 214p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de São Carlos;
- 2 ASM Metals hand book, Vol.15 (Casting), 9º edição, (1992);
- 3 BEELEY, R. , SMART , R.F. - Investment Casting, (1995);
- 4 LEATHAM, A.; Spray Forming Technology. Advanced Materials & Processes, vol. 150 (2), p.31-34, (1996);
- 5 GRANT, P. S.; Spray forming. Progress In Materials Science, vol. 39 (4-5) p.497-545, (1995);
- 6 MATHUR, P.; ANNAVARAPU, S.; APELIAN, D.; LAWLEY, A.; Spray Casting: An Integral Model for Process Understanding and Control. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure and Processing, vol. 142 (2), p.261-276, (1991);
- 7 ZHANG, J.; LAVERNIA, E. J.; GUNGOR, M. N. The effect of porosity on the

- microstructural damping response of 6061 aluminium alloy. *Journal of Materials Science*, v.28, n.6, p.1515-1524, (1993);
- 8 Cai W.D., and Lavernia E.J., "Modeling of porosity during spray forming", University of California, 1997.
 - 9 Yang Y., and Hannula S.P., "Development of precision spray forming for rapid tooling," Proceedings of the SDMA 2006: CD ROM, Bremen, 01-04/09/2006, Alemanha, paper 36, pg 01-10
 - 10 KASAMA, A. H. RESISTÊNCIA AO DESGASTE DE FERRO FUNDIDO BRANCO ALTO CROMO CONFORMADO POR SPRAY . São Carlos, 2001. Tese (Mestrado) – Universidade Federal de São Carlos;
 - 11 Silva, Y.N., Yoshimura, H.N., Silva, W.S, Goldenstein, H., "Modelamento do diaframa de fases Ni-Cr-Al-C", 58° Congresso Anual da ABM, Julho de 2003, Rio de Janeiro/RJ - Brasil. Anais (CD).
 - 12 K. M. McHugh: *Spray forming system for producing moulds, dies and related tooling*, US Patent 6,074,194, June 13, 2000.