

Simulação numérica e DOE aplicados na melhoria do processo de fundição sob pressão de ligas de alumínio

Guilherme Ourique Verran

Dr. , Professor do Departamento de Eng. Mecânica, CCT/UDESC
Joinville, SC, Brasil
gverran@joinville.udesc.br

Rui Patrick Konrad Mendes

Msc. , Professor do Centro de Tecnologia e Artes, UNERJ
Jaraguá do Sul, SC, Brasil
rmendes@unerj.br

Resumo

Foram investigadas as influências dos parâmetros de injeção velocidade na primeira fase, velocidade na segunda fase e pressão de recalque sobre a qualidade de peças injetadas usando a liga SAE 305. Inicialmente foram realizadas simulações usando um aplicativo numérico (MAGMASoft®) para auxiliar na caracterização e identificação das causas da ocorrência de porosidade na região da peça analisada. A seguir foi utilizada uma metodologia DOE (Design of Experiments) com o objetivo de verificar a influência destes parâmetros de injeção sobre a qualidade final do produto. A partir dos resultados experimentais foram realizadas simulações numéricas do processo usando as combinações de parâmetros de injeção que apresentaram os melhores e os piores resultados quanto à presença de porosidades e solda fria nas corridas experimentais. Os resultados experimentais e as informações obtidas nas análises das simulações realizadas apresentaram uma boa convergência quanto à tendência de ocorrência de porosidade e de solda fria em função das variações nos parâmetros de injeção investigados.

Palavras-chave: fundição sob pressão, simulação, ligas de alumínio, defeitos.

Abstract

The influence of the injection parameters, such as speed in the first and second phases and upset pressure over the quality of die casting parts in 305 aluminum alloy were studied. Initially, it was performed simulations using a commercial numeric applicative (MAGMASoft®) in order to enable the evaluation of their influence on the occurrence of foundry defects, such as porosities and cold shuts. Afterwards, it was performed a design of experiences using several combinations between the three injection parameters studied in order to enable the evaluation of its influence regarding to the quality of the casting product. In view of the obtained results, analyses were performed through numeric simulations of the die casting process, using the injection parameters for which the best and the worst results were obtained concerning the presence of porosities and cold shuts. The comparison between experimental results and the information obtained through the analyses of the performed simulations show a good convergence, regarding the trend to porosity and cold shuts occurrence as a function of the variations on the injection parameters.

Key words: die casting, simulation, aluminum alloys, defects.

1. Introdução

Na simulação da fundição sob pressão tem-se uma prévia do comportamento do metal fundido desde o preenchimento até a sua completa solidificação e extração, incluindo condições de ciclo, tais como tempo de abertura e fechamento do molde, tempo para extração e limpeza, número de ciclos e etc. Mas para que uma simulação corresponda ao que ocorre em condições reais, o software deve estar apoiado em equações e leis que regem todos os fenômenos envolvidos no processo, e desta forma as equações são resolvidas de acordo com as condições de contorno que o operador impõe, tais como a geometria da peça e os parâmetros de fundição. Pode-se afirmar então que tanto melhor será o software de simulação quanto mais a solução numérica, fornecida na simulação, se aproximar da solução analítica das equações fundamentais (Keil, 1979). Esta diferença se dá devido a complexidade das equações fundamentais, fazendo-se necessário algumas aproximações e simplificações, que dependendo da situação podem comprometer os resultados da simulação em questão.

O processo de injeção sob pressão é regido por uma série de parâmetros, que adequadamente determinados e ajustados, resultam em uma peça injetada de qualidade (Karban, 2001). O defeito mais comum nas peças obtidas é a porosidade interna decorrente da presença de ar aprisionado no metal líquido durante o processo de injeção. Porosidade interna também pode surgir na forma de rechupe, devido à solidificação prematura do metal no canal de ataque ou falta de controle na pressão de recalque.

O projeto dos canais de alimentação, ataques e bolsas do molde, normalmente, visam minimizar a turbulência do metal durante o preenchimento da cavidade do molde, para evitar aprisionamentos de ar e possibilitar a injeção de uma peça de qualidade. Uma vez definido o projeto do molde, resta a determinação adequada dos parâmetros de processo. Alguns parâmetros de injeção são facilmente ajustáveis durante o processo de injeção.

No presente trabalho utilizou-se uma metodologia de combinação de parâmetros experimentais (DOE), com o objetivo de determinar como alguns parâmetros influenciam na qualidade da peça injetada. Os parâmetros de injeção estudados neste trabalho foram:

- *Velocidade lenta de injeção* (velocidade da primeira fase) é a velocidade do pistão quando o mesmo se movimenta para posicionar o alumínio no canal de ataque, preparando a injetora para o disparo. Alguns autores definiram as velocidades ideais em função do percentual de enchimento (Gaber, 1973), (Karni, 1993), (Tzeng, 1992)

Velocidades muito altas da primeira fase podem provocar turbulência na câmara resultando no aprisionamento de ar (Wang, 2001) e (Faura, 2001). Caso isto ocorra, a peça injetada pode ficar com um alto índice de porosidade interna.

- *Velocidade alta de injeção* é a velocidade da fase responsável pelo preenchimento da peça. Esta fase determina o tempo de enchimento da peça e a velocidade no canal de ataque.

Velocidades muito baixas da segunda fase podem resultar em falhas de preenchimento e solda fria. Velocidades muito altas podem resultar em porosidades na peça injetada (Karban, 2001).

- *Pressão de recalque* - é a pressão multiplicada no cilindro de injeção após o preenchimento da peça, pressão esta responsável pela compactação da peça durante a solidificação, impedindo assim a expansão dos gases nela aprisionados e diminuindo a formação de rechupes devido à contração do metal. Caso ocorra demora na aplicação da pressão da terceira fase, o metal no canal já terá solidificado, resultando na formação de porosidade e rechupes (Savage, 2001).

A utilização de ferramentas para análise via CAE (*Computer Aided Engineering*), tornou-se elemento essencial para otimização das condições de processo de fundição e do projeto dos ferramentais e das peças

fundidas. Através dela pode-se percorrer, indefinidamente, todo o processo de manufatura de uma peça, num curto espaço de tempo a um baixo custo, modificando parâmetros de processo ou mesmo detalhes da geometria tanto do molde como da peça a ser fabricada.

Estes recursos viabilizam a previsão de um conjunto de informações fundamentais para a construção do molde e definição de processo, como avaliação da vida útil do molde, suas variações dimensionais e possíveis deformações de seus componentes pela análise térmica. O mesmo pode-se aplicar à peça, prevendo propriedades estruturais localizadas, campos de tensões, precisão dimensional, crescimento de grão, segregações e defeitos provenientes da contração do metal durante o processo de solidificação e resfriamento, permitindo o ajuste de canais de distribuição e ataque, adaptações na geometria da peça, adequação dos canais de refrigeração, localização de bolsas de ar e outros parâmetros do processo (Tzeng, 1992).

Faura (2001) propuseram uma solução baseada no programa comercial WRAFTS, enfatizando a determinação da aceleração ótima do pistão de injeção. O código utiliza o método de Elementos Finitos convencional e as simulações foram feitas empregando elementos isoparamétricos de oito nós.

Uma análise utilizando o mesmo programa WRAFTS foi apresentada por Backer (2001), que discutiu a necessidade da inclusão de modelos capazes de descrever o comportamento do ar aprisionado. As soluções numéricas foram comparadas qualitativamente com processos industriais.

Wang (2001) utilizaram o programa comercial FLOW3D para otimizar a aceleração do pistão no início da fase de *dosagem*. Os autores concluíram que as melhores condições de injeção são obtidas quando o pistão avança com uma aceleração variável. O programa comercial FLOW3D é baseado no método de Diferenças Finitas, sendo formulado a partir de uma descrição *Euleriana* das equações de Navier-Stokes e de transferência de calor, associadas ao modelo de turbulência *k-ε*.

O Grupo de Pesquisa em Fundição e Solidificação dos Metais do DEM/PGCEM/UEDESC (LabFund) já vem realizando trabalhos sobre utilização de aplicativos numéricos no estudo da formação de defeitos na fundição sob pressão de ligas de alumínio (Verran, 2000-2001).

Nestes trabalhos, usando o módulo de fundição sob pressão do MAGMASoft[®], foi investigada a influência da velocidade na segunda fase da injeção (velocidade alta de injeção) sobre a capacidade de enchimento e a tendência ao surgimento do defeito "solda fria" em uma peça com geometria plana e grande relação largura-comprimento vs. espessura, ou seja, uma peça com grande área a ser preenchida, aumentando assim a tendência ao surgimento de regiões propícias ao surgimento de "solda fria". Os resultados obtidos na simulação confirmaram a influência da velocidade alta de injeção sobre o tempo de enchimento e sobre o perfil térmico da frente de enchimento, permitindo a identificação das prováveis regiões da peça com solda fria. As observações experimentais apresentaram boa concordância com os resultados obtidos através da simulação numérica usando o MAGMASoft[®].

O presente trabalho representa uma evolução desta linha de pesquisa, utilizando a simulação numérica na abordagem inicial do problema e uma metodologia de combinação de parâmetros experimentais (DOE), com o objetivo de determinar como estes parâmetros (velocidades de injeção e pressão de recalque) influenciam de forma combinada na qualidade da peça injetada. A partir dos resultados experimentais foram escolhidas algumas combinações de parâmetros de injeção e realizadas simulações do preenchimento e da solidificação, usando o MAGMASoft[®], com o objetivo de comparar os resultados experimentais com os dados obtidas nas simulações.

2. Materiais e Métodos

2.1 Abordagem Inicial do Problema

A peça utilizada nesta pesquisa foi uma “tampa duplo cilindro” para motores aplicados a compressores (Figura 1. a), que apresentava problemas de porosidade e alto índice de refugo. Para avaliação da sanidade foi escolhida uma região crítica desta peça quanto à ocorrência deste tipo de defeito (Figura 1. b). A principal causa de refugo é o aparecimento de porosidades após o fresamento das regiões que precisam ser usinadas para que ocorra o acoplamento da camisa do pistão.

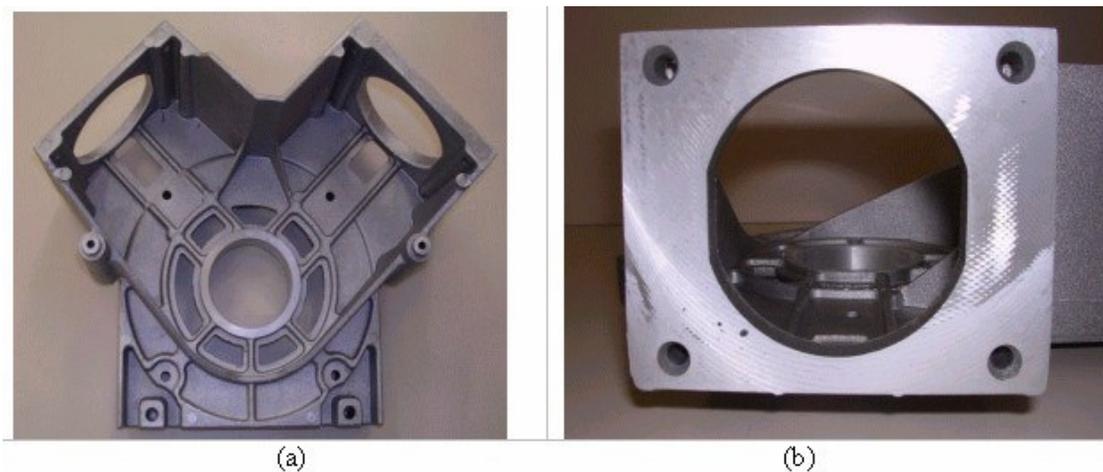


Figura 1. Peça utilizada neste estudo - Tampa Duplo Cilindro (a) e região da peça analisada mostrando a ocorrência de porosidades (b).

Inicialmente, simulações com o auxílio de um aplicativo numérico (MAGMASOFT), específico para simulação do processo de injeção sob pressão, foram realizadas para auxiliar na caracterização e identificação das causas da ocorrência de porosidade na região da peça analisada. O software possui um recurso de avaliação da distribuição da pressão de ar dentro da cavidade do molde durante o término do preenchimento. Este recurso possibilita a avaliação da tendência de ocorrência de porosidade resultante do aprisionamento de gases numa determinada região da peça. Foram então realizadas simulações com as combinações de parâmetros utilizada na condição normalmente utilizada na fabricação da peça em estudo.

Os resultados da simulação mostraram uma tendência significativa de ocorrência de porosidade na face da peça. Na figura 2 pode-se observar a região com maior pressão de ar na cavidade da peça, representada pela coloração laranja e amarela, de 9000 a 10500 [mbar].

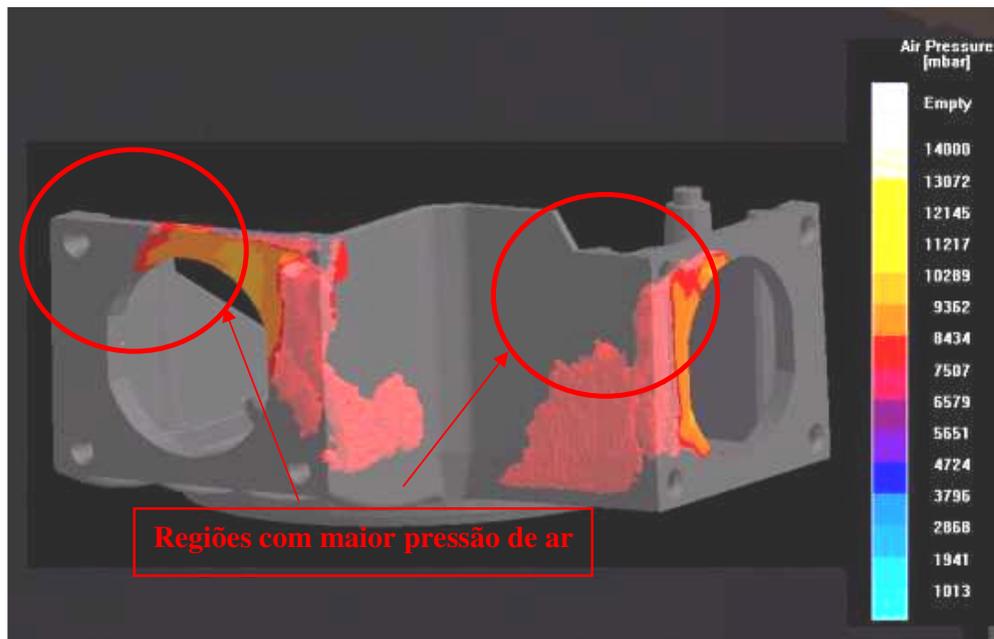


Figura 2. Resultado de simulação da pressão de ar na cavidade do molde no término do preenchimento.

Outro recurso do software foi usado para a simulação do tempo de enchimento da peça, ferramenta esta que permite observar o fluxo do metal na cavidade do molde ao longo do tempo, possibilitando a previsão do local de encontro de frentes metálicas, sugerindo o local com maior tendência de aprisionamento de gases (Figura 3).

A região da peça que apresentou maior tendência de ocorrência de porosidade na simulação, é a mesma que na prática ocorre a porosidade com maior intensidade (Figura 4).

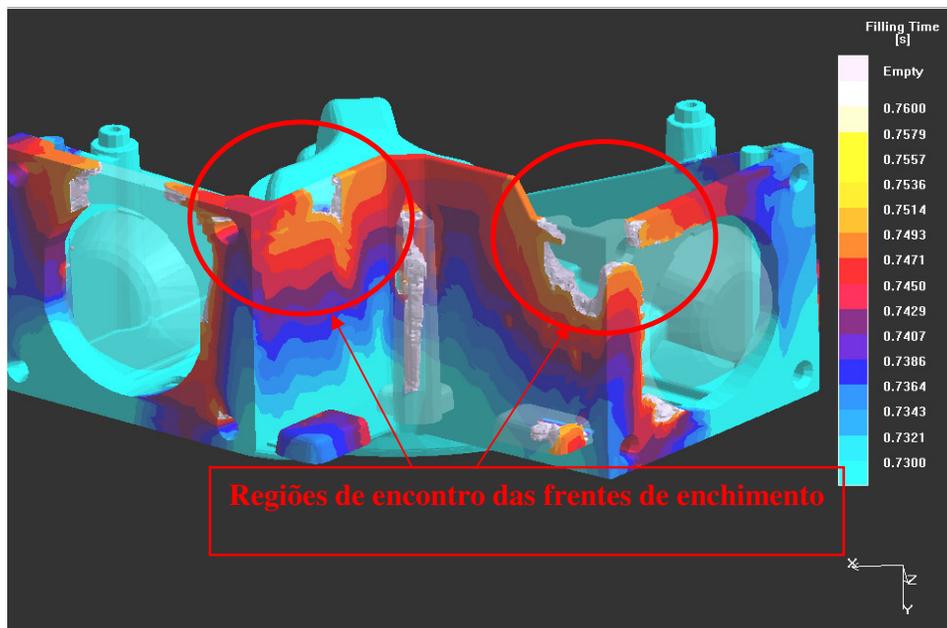


Figura 3. Resultado de simulação do tempo de enchimento da peça.

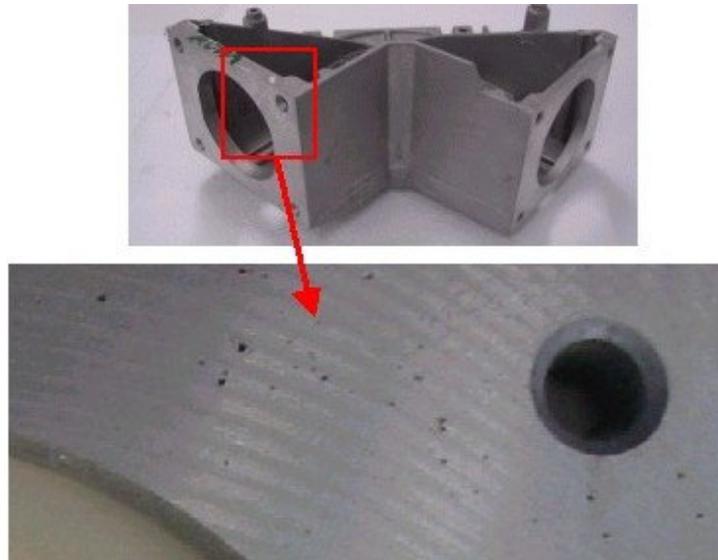


Figura 4. Região da peça com porosidade.

2. 2. Desenvolvimento experimental

Foi proposta a utilização de uma metodologia DOE (Design of Experiments) com o objetivo principal de verificar a influência de alguns dos principais parâmetros de injeção sobre a qualidade final do produto injetado.

Os experimentos, bem como o processo de manufatura desta peça, foram realizados numa célula de injeção composta de uma máquina injetora Wotan com força de fechamento de 630 ton, um forno de espera e sistemas automáticos de lubrificação. O metal líquido foi vazado na câmara de injeção pelo operador com o auxílio de uma concha, sendo que a extração da peça e a aplicação do desmoldante também foram feitas de forma manual.

Foram estudados três parâmetros de injeção com as seguintes configurações: dois níveis de velocidade de 2ª fase (rápida), três níveis de velocidade de 1ª fase (lenta) e três níveis de pressão de recalque. Ao todo, foram feitas dezoito combinações diferentes, sendo injetadas cinco peças para cada combinação, totalizando uma quantidade de noventa amostras, Tabela 1.

Como a injetora não possuía um sistema de aquisição e monitoramento de dados automático, foi necessário implantar este sistema. Para isto foi utilizado um sistema composto por CPU, cabos de conexão, placa de conversão Analógico/Digital (A/D), fonte de alimentação, transdutor de pressão, transdutor linear, starter, temporizador e um software.

Para determinação da qualidade das peças injetadas, foram utilizados dois critérios distintos. O primeiro critério utilizado foi a determinação da densidade, pelo princípio de Arquimedes, da região da peça que sofre usinagem em uma face. A densidade é um parâmetro muito utilizado no controle da sanidade em peças fundidas devido à facilidade na medição e eficiência na quantificação de vazios, tanto na forma de porosidades relacionadas com a presença de gases retidos no metal líquido, como na forma de rechupes devidos às contrações no estado líquido e durante a solidificação.

Como segundo critério foi realizada uma análise quantitativa do percentual de porosidades na face usinada da mesma usando técnica fotográfica e um software de análise de imagens.

Tabela 1. Programa de Experiências realizadas usando uma metodologia DOE.

Número da Corrida Experimental	Velocidade da 1º fase (m/s)	Velocidade da 2º fase (m/s)*	Pressão de recalque MPa
01	0,14	1,25	15,0
02	0,14	2,53	15,0
03	0,14	1,32	22,5
04	0,14	2,75	22,5
05	0,14	1,23	30,0
06	0,14	2,75	30,0
07	0,27	1,34	15,0
08	0,27	2,62	15,0
09	0,27	1,35	22,5
10	0,27	2,47	22,5
11	0,27	1,33	30,0
12	0,27	2,53	30,0
13	0,29	1,34	15,0
14	0,29	2,56	15,0
15	0,29	1,37	22,5
16	0,29	2,65	22,5
17	0,29	1,35	30,0
18	0,29	2,64	30,0

Para cada corrida experimental foram injetadas cinco peças, o que resultou num total de noventa peças fundidas. Na determinação da densidade e dos índices de porosidades foram analisadas todas as peças obtidas e calculados os valores médios.

3. Resultados e Discussão

Os valores médios de densidade e dos índices de porosidades obtidos em todas as corridas experimentais realizadas são apresentados na Tabela 2, onde estão grifados em negrito as combinações de parâmetros que permitiram a obtenção dos melhores (corrida 05) e piores (corrida 14) resultados.

Conforme pode ser observado na Tabela 2, a combinação de parâmetros que resultou nos melhores valores de qualidade das peças para os dois critérios de avaliação utilizados aconteceu na corrida cinco (baixas velocidades nas primeiras e segundas fases da injeção e alta pressão de recalque), enquanto que os piores resultados ocorreram na corrida 14 (altas velocidades de injeção nas duas fases e baixa pressão de recalque). Estas observações confirmam as previsões teóricas sobre as influências das velocidades nas duas fases da injeção sobre o surgimento de porosidades, ou seja, a utilização de maiores velocidades de injeção, tanto na primeira como na segunda fase, aumenta a turbulência no metal líquido, ocasionando aprisionamento de ar pela frente de enchimento e formação de maiores índices de porosidades nas peças produzidas.

Quanto à pressão de recalque também foi confirmada a hipótese de que maiores pressões se tornam necessárias para uma compactação mais efetiva da peça. No entanto uma análise mais detalhada dos resultados experimentais indicou que em várias combinações, especialmente naquelas onde foram utilizadas baixas velocidades de injeção, o uso de valores intermediários de pressão de recalque (22,5 MPa) resultou em peças com boa qualidade (Verran, 2004).

Tabela 2. Resumo dos resultados obtidos usando a metodologia experimental DOE.

Corrida	Velocidade da 1º fase (m/s)	Velocidade da 2º fase (m/s)	Pressão de Recalque MPa	Densidade (g/cm ³)	Índice de Porosidade Quantitativo (% em área)
1	0,14	1,25	150	2,678	0,031
2	0,14	2,53	150	2,662	0,167
3	0,14	1,32	225	2,675	0,005
4	0,14	2,75	225	2,689	0,021
5	0,14	1,23	300	2,707	0,001
6	0,14	2,75	300	2,702	0,018
7	0,27	1,34	150	2,673	0,031
8	0,27	2,62	150	2,658	0,075
9	0,27	1,35	225	2,700	0,014
10	0,27	2,47	225	2,691	0,054
11	0,27	1,33	300	2,703	0,022
12	0,27	2,53	300	2,689	0,041
13	0,29	1,34	150	2,688	0,021
14	0,29	2,56	150	2,639	0,197
15	0,29	1,37	225	2,702	0,033
16	0,29	2,65	225	2,684	0,027
17	0,29	1,35	300	2,700	0,016
18	0,29	2,64	300	2,665	0,037

Os resultados mostraram que a combinação dos parâmetros de injeção: pressão de recalque 30,0 MPa e velocidades de injeção da primeira fase igual 0,14 m/s e da segunda fase igual a 1,23 m/s resultou na peça com a maior densidade, no entanto foi observada a ocorrência de defeito tipo solda fria em algumas das peças obtidas usando esta combinação.

A princípio a ocorrência de solda fria foi atribuído à baixa velocidade na segunda fase da injeção, o que elevou o tempo para o preenchimento das peças ocasionando queda na temperatura da frente de enchimento, gerando então o defeito conhecido como solda fria. Para evitar a ocorrência de solda fria foi proposta e testada uma velocidade intermediária (1,95 m/s) na segunda fase da injeção, o que eliminou a ocorrência deste tipo de defeito sem alterar de forma significativa o índice de porosidades.

A seguir foram realizadas as simulações do preenchimento e da solidificação da peça usando como dados de entrada as combinações de parâmetros de injeção que resultaram nos melhores (corrida 05) e piores resultados (corrida 14) em termos de presença de porosidades (ou densidades), conforme apresentado na tabela 3.

Tabela 3. Combinações de parâmetros de injeção para a realização das simulações numéricas.

Combinação 01 – Piores Resultados		Combinação 02 – Melhores Resultados	
Velocidade 1ª fase	0,27 m/s	Velocidade 1ª fase	0,14 m/s
Velocidade 2ª fase	2,6 m/s	Velocidade 2ª fase	1,3 m/s
Pressão de Recalque	15,0 MPa	Pressão de Recalque	30,0 MPa

Foram realizadas análises das distribuições de temperatura no interior da cavidade nos estágios finais do preenchimento, de modo a permitir avaliar a tendência à formação de solda fria em função da velocidade de enchimento (velocidade na segunda fase da injeção). A figura 5 mostra os resultados de análises das distribuições de temperatura no interior da cavidade nos estágios finais do preenchimento para

as duas combinações estudadas, permitindo avaliar a tendência à formação de solda fria em função da velocidade de enchimento (velocidade na segunda fase da injeção).

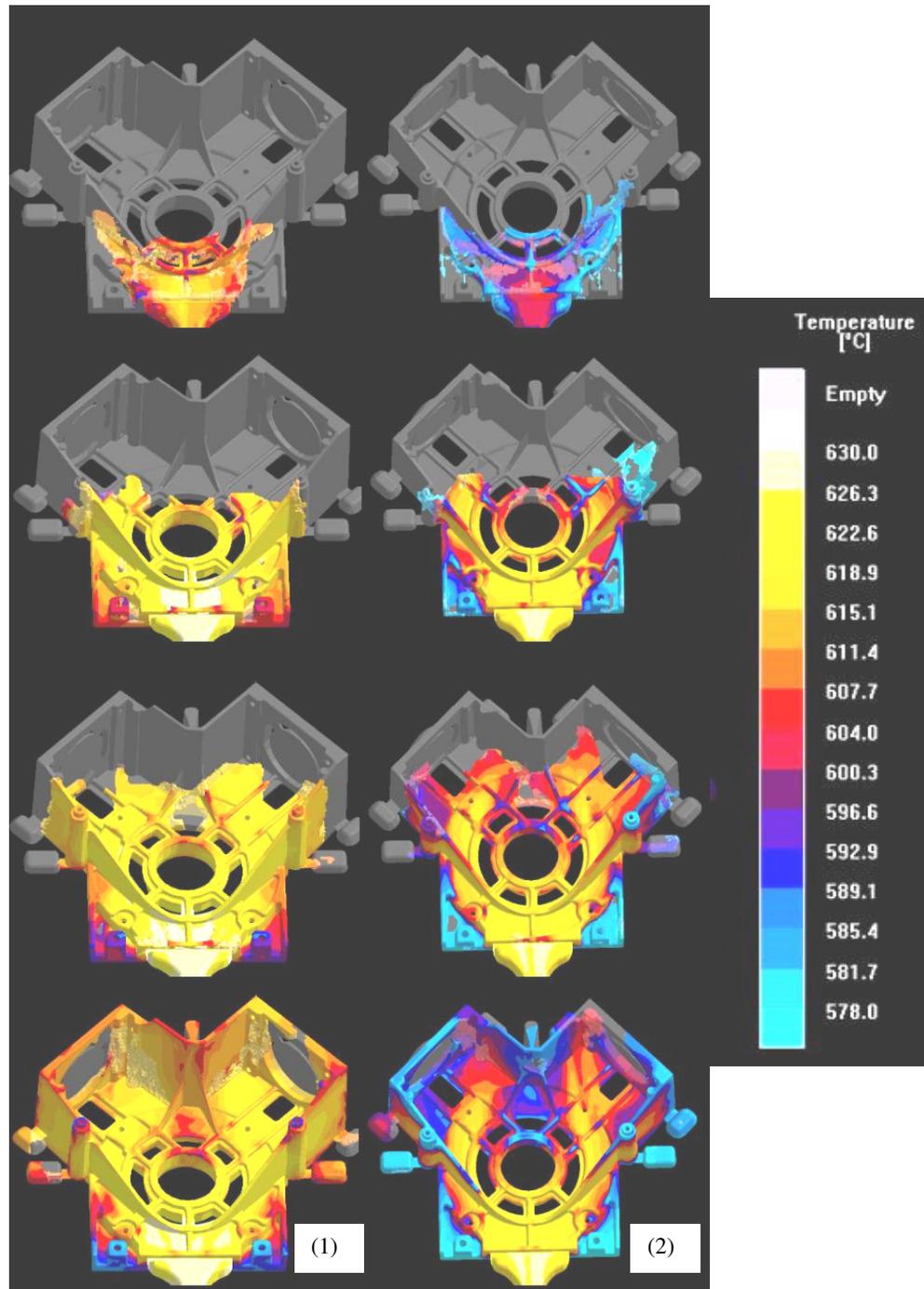


Figura 5. Seqüência de preenchimento da peça com a simulação da distribuição da temperatura para as combinações de parâmetros 01 e 02.

A figura 6 apresenta as imagens obtidas na simulação da distribuição de temperaturas do metal no estágio final do preenchimento do molde, indicando que para o uso de menores velocidades de injeção (combinação 2) existe um maior decréscimo da temperatura (Figura 6.b), observando-se a existência de

regiões com temperaturas inferiores à temperatura liquidus da liga utilizada o que aumenta a tendência ao surgimento do defeito solda fria. Na Figura 6.a observa-se que o uso de maiores velocidades de injeção faz com que o decréscimo de temperatura seja menos acentuado, eliminando assim a ocorrência de solda fria.

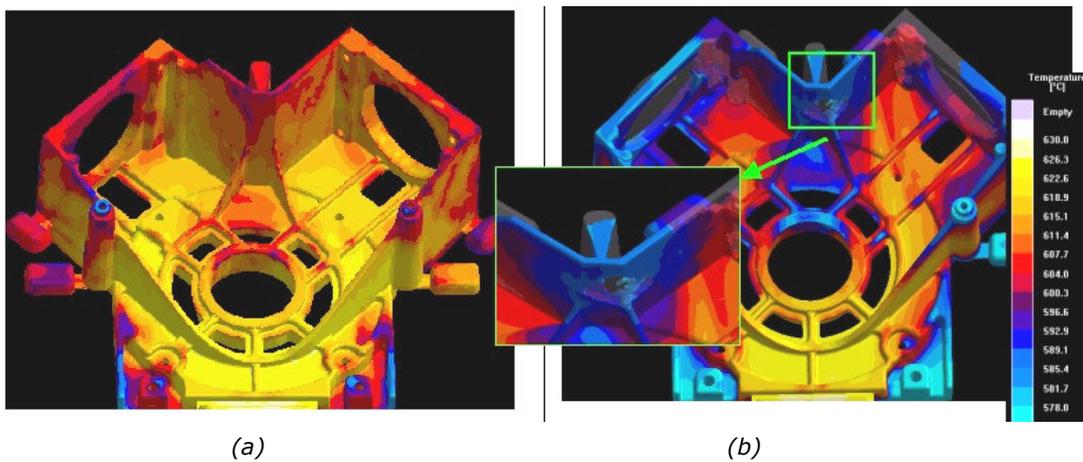


Figura 6. Simulação do preenchimento da peça, (a) uso de maiores velocidades de injeção e (b) uso de menores velocidades de injeção causando um maior resfriamento da frente de enchimento conforme observado no detalhe ampliado.

A figura 7 apresenta peças obtidas experimentalmente, mostrando os resultados práticos para a combinação 1 (melhor resultado quanto à ocorrência de solda fria), figura 7.a, e para a combinação 2 (pior resultado quanto à ocorrência de solda fria), figura 7.b.

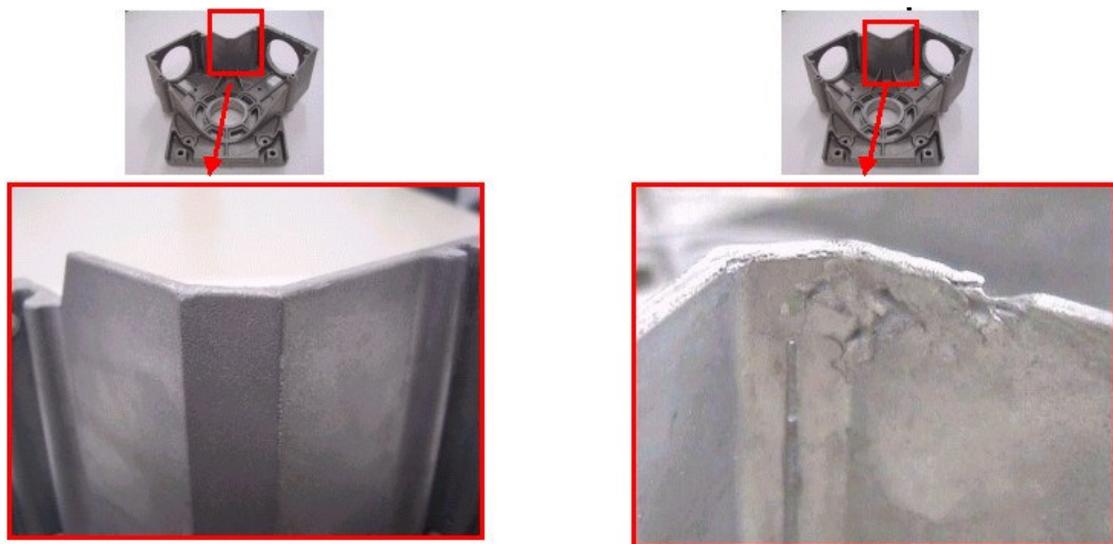


Figura 7. Peça sem solda fria (a) e peça com solda fria (b).

Adicionalmente foram feitas simulações do preenchimento do molde para cada uma destas combinações, visando avaliar a tendência à formação de porosidades através da análise da distribuição de pressão do ar preso na cavidade durante o processo de injeção, quanto maior a pressão de ar preso na cavidade maior será a tendência à ocorrência de porosidades na peça injetadas. Através deste método é possível prever a presença de porosidades nas peças, porém não se prevê o local e o tamanho exato dos poros (Garber, 1973).

A figura 8 apresenta imagens das simulações indicando que para a combinação 1 (piores resultados) existe uma maior quantidade de pressão de ar distribuída (Figura 8. a) em comparação com a combinação 2 (Figura 8. b), indicando a mesma tendência observada nos resultados obtidos experimentalmente.

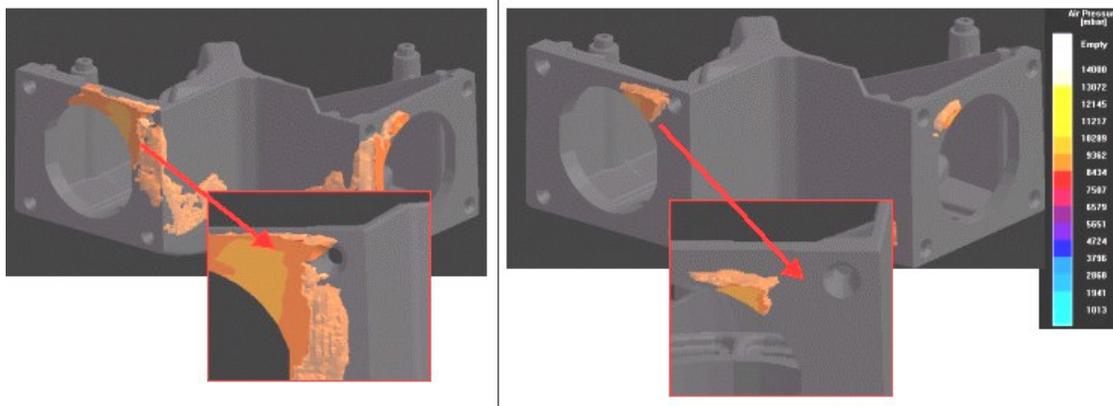


Figura 8. Simulação do preenchimento da peça mostrando a distribuição da pressão de ar preso no interior do molde para a pior combinação de parâmetros (a) e para a melhor combinação dois (b).

A figura 9 mostra a qualidade superficial após a usinagem das faces de peças com a combinação que resultou no pior resultado quanto ao índice de porosidades (9.a) e com a combinação que permitiu o melhor resultado quanto a este índice de porosidades (9. b).

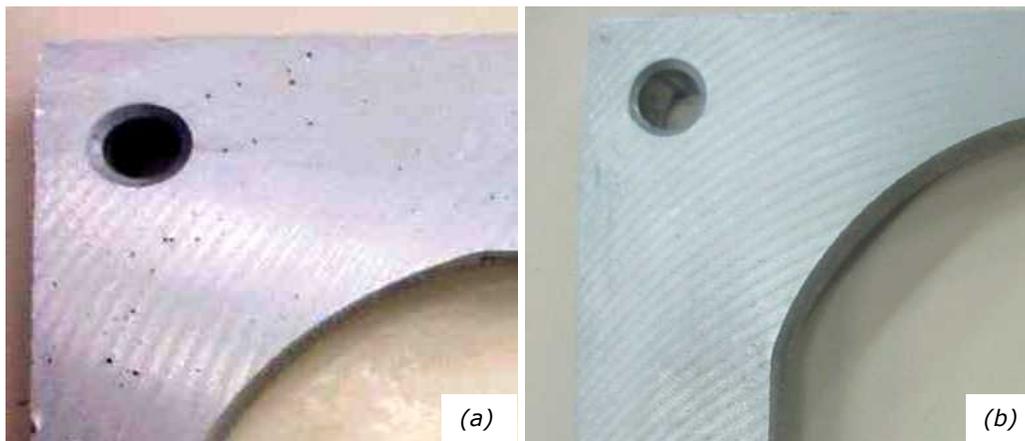


Figura 9. Região de peças fundidas mostrando peça com porosidades (a) obtida com a pior combinação de parâmetros e sem porosidades para a melhor combinação de parâmetros (b).

Comparando os resultados obtidos experimentalmente com as informações extraídas das análises das simulações realizadas, pode-se afirmar que tanto os dados experimentais como os resultados das simulações estão de acordo com as previsões teóricas sobre a influência dos parâmetros de injeção investigados sobre a formação dos defeitos porosidades e solda fria em peças fundidas sob pressão. Publicações anteriores apresentam de forma mais detalhada os resultados experimentais obtidos nesta pesquisa (Verran, 2004) e (Mendes, 2005).

4. Conclusão

Com base nos resultados obtidos neste trabalho, conclui-se que

- o uso da simulação numérica na análise inicial do problema foi eficaz na detecção dos prováveis fatores geradores da grande incidência de porosidades e solda fria na peça em estudo,
- a utilização da metodologia DOE se mostrou efetiva na obtenção de evidências experimentais sobre a influência dos parâmetros de injeção investigados na qualidade das peças obtidas,
- os melhores valores em termos de sanidade interna da peça em estudo foram obtidos com a utilização de baixas velocidades de injeção, tanto na primeira fase (0,14m/s), como na segunda fase (1,33 m/s) e elevadas pressões de recalque (30,0Mpa),
- os resultados obtidos concordam com os dados da revisão bibliográfica, de que baixos índices de porosidade estão relacionados com baixas velocidades de 1ª e 2ª fase e altas pressões de recalque,
- a velocidade na segunda fase da injeção apresenta uma forte influência sobre a ocorrência de solda fria em peças injetadas,
- as informações obtidas nas simulações numéricas estão de acordo com os resultados experimentais quanto à influência dos parâmetros de injeção estudados sobre a tendência à formação dos defeitos porosidades e solda fria.

5. Referências

- BACKER, G.; RANGANATHAN, M.; HEIMSCH, J. MCLAUGHLIN, M. e KIM, W. 2001. Simulation of flow-induced gas entrapment and its effects on porosity in aluminum die castings. *In: North American Die Casting Association Transactions*. Indianapolis, USA. Proceedings of the North American Die Casting Association Congress, Indianapolis, USA, NADCA, 2001, 44-53.
- FAURA, F.; LÓPEZ, J. e HERNÁNDEZ, J. 2001. On the optimum plunger acceleration law in the slow shot phase of pressure die casting machines. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **41**:173-191.
- GARBER, L.W. 1973. A Monograph for Determination of Slow Shot Travel. *Die Casting Engineer*, **17**:75-84.
- KARBAN, R. Jr. 2001. The Effects of Intensification Pressure, Gate Velocity & Intermediate Shot Velocity on the Internal Quality of Aluminum Die Castings. *In: North American Die Casting Association Transactions*. Indianapolis, USA. Proceedings of the North American Die Casting Association Congress, Indianapolis, USA, NADCA, 2001, 221-240.

- KARNI, Y. 1993. Optimization of Process Variables for Die Casting. *In: 17th International Die Casting Congress and Exposition. (Paper G-T93-018), Cleveland, Ohio, USA.*
- KEIL, E. e KOCH, P. 1979. *Processo Del Fundir a Presión.* Uzwill, Suíça, Buhler Hermanos S.A., 199 p.
- MENDES, R.P.K. 2005. *Influência dos Parâmetros de Injeção sobre a Qualidade de Peças Fundidas Sob Pressão em Liga de Alumínio.* Joinville, SC. Dissertação de Mestrado. Universidade do Estado de Santa Catarina, 88 p.
- SAVAGE G.; GRESHENZENZON, M. e ROGERS K.J. 2001. The Role of Pressure in High Pressure Die Casting. *In: North American Die Casting Association Transactions. Indianapolis, USA. Proceedings of the North American Die Casting Association Congress, Indianapolis, USA, NADCA, 2001, 151-155.*
- TSENG, C.H.E. e ASKELAND, D.R. 1992. Study of the EPC Mold Filling Process Using metal Velocity and Mass and Energy Balances. *AFS Transactions, 100:520- 529.*
- VERRAN, G.O.; OLIVEIRA, C.G. e REBELLO, M.A. 2000. Influência da Velocidade de Enchimento Sobre a Formação de Defeitos em Peças de Alumínio: Simulação Numérica Vs. Resultados Experimentais *In: 14 CBECIMAT- Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2000, Anais ..., São Pedro, UFSCar, 2004, 201-210.*
- VERRAN, G.O.; REBELLO, M.A. e OLIVEIRA, C.G. 2001. Comparação Entre a Simulação Via Software e os Resultados Experimentais na Fundição Sob Pressão de Ligas de Alumínio. *Fundição & Serviços, 11(105):24-31.*
- VERRAN, G.O.; REBELLO, M.A. e OLIVEIRA, C.G. 2001. Simulação do Enchimento de Peças de Geometria Simples Injetadas em Ligas de Alumínio. *Fundição & Serviços, 11(100):38-47.*
- VERRAN, G.O.; MENDES, R.P.K. e ROSSI, M.A. 2004. Influência dos Parâmetros de Injeção na Qualidade de Peças Injetadas em Ligas de Alumínio *In: SULMAT 2004 - II Congresso em Ciência dos Materiais do Mercosul, 2004. Anais ..., Joinville, Udesc, 2004, 471-480.*
- WANG, F L.; NGUYEN, T. e MURRAY, M. 2001. Simulation of Flow Pattern and Temperature Profile in the Shot Sleeve of a High Pressure Die Casting Process. *In: North American Die Casting Association Transactions. Indianapolis, USA. Proceedings of the North American Die Casting Association Congress, Indianapolis, USA, NADCA, 2001, 4-13.*

Submissão: 27/04/2006

Aceite: 06/06/2006