

Comparação entre Prototipagem Real e Virtual em Fundição de Precisão Rápida: Aplicação a uma Liga com Memória de Forma Cu-Al-Mn

Carlos Eduardo da Silva Albuquerque

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – R. Antônio Figueira Sampaio, 134 - Nossa Sra. de Gracas, Salgueiro - PE, 56000-000

e-mail: carlos.albuquerque@univasf.edu.br

Carlos Jose de Araújo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-140

e-mail: carlos.araujo@ufcg.edu.br

Resumo. A simulação numérica permite, através de um modelo matemático, representar virtualmente um processo ou problema físico real e conduzir experimentos virtuais que possibilitam entender o comportamento e determinar como o processo responderá a mudanças em algumas de suas variáveis. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise experimental (real) e numérica (virtual) de um processo de fundição de precisão rápida que utiliza força centrífuga para injetar o metal fundido em moldes de gesso refratário. Esse processo foi aplicado para avaliar a fundibilidade de uma liga com memória de forma (LMF) do sistema Cu-Al-Mn. Para esse fim, foi definida uma peça com geometria no formato de rede tendo por base a metodologia proposta por Hinman et al. (1985). Foram simulados dois processos de fundição, um por gravidade (usado para estimar o coeficiente de transferência de calor metal/molde) e outro por centrifugação (utilizado para avaliar a fundibilidade da LMF Cu-Al-Mn estudada). Como resultados principais, o estudo permitiu identificar que a LMF Cu-7,9Al-5,4Mn (% em peso) possui um coeficiente de transferência de calor metal/molde igual a $535 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ para o processo centrifugo e uma fundibilidade de 93,00% e 99,00% quando injetada, respectivamente, a 5°C e 60°C acima da temperatura liquidus.

Palavras-chave: Simulação numérica. Análise experimental. Fundição de precisão. Fundibilidade. Defeitos de preenchimento. Ligas com memória de forma.

1. INTRODUÇÃO

A simulação numérica computacional da fundição e solidificação consiste em reproduzir virtualmente esses processos, com o auxílio de computadores e ferramentas mais avançadas de visualização tridimensional. Para esse fim é necessário ter o conhecimento detalhado do processo de fundição e solidificação, incluindo o comportamento do material em função da temperatura, o comportamento microestrutural, as interações entre molde e material e os métodos de cálculo adequados para representar os fenômenos envolvidos. Os processos de fundição e solidificação de ligas envolvem muitos fenômenos tais como variação química, transformação de fase, transferência de calor, fluxo de fluidos, evolução microestrutural e tensões mecânicas.

As tecnologias de simulação são aplicadas extensivamente em indústrias de fundição para entender os efeitos desses fenômenos na formação de defeitos e nas propriedades mecânicas finais das peças fundidas (Guo e Samonds, 2011). Existem diversas maneiras de analisar os fenômenos que ocorrem durante o processo de fundição e reduzir a formação de defeitos, dentre as quais se destacam os testes de fundição reais e a simulação de processos de fundição com auxílio de computadores. Por ser muito mais rápido e menos oneroso do que os testes de fundição reais, a análise do processo de fundição via simulação numérica se tornou uma abordagem alternativa muito viável e vantajosa. Por meio da simulação numérica, os processos de enchimento, solidificação, formação de defeitos e características de distribuição durante o processo de fundição podem ser previstos antes da realização de experimentos reais.

Recentemente, Kumar et al. (2020) realizaram um estudo de simulação numérica do processo de fundição de precisão para fabricação de uma peça com desenho complexo e de alto grau de acabamento, denominada adaptador rotativo. Neste estudo, o software Unigraphics® foi usado para construir o modelo físico da peça e o software ProCAST® foi usado para simular o processo de vazamento, enchimento, troca de calor e solidificação. Em um primeiro momento foram realizadas simulações para analisar e identificar os defeitos de processo. Posteriormente, um sistema de bloqueio diferente foi implementado para eliminar esses defeitos identificados e o processo foi repetido no software ProCAST®, com a eficiência tendo sido comprovada por meio da obtenção de uma fundição sem defeitos.

Pisarek et al. (2016) apresentaram resultados de simulação computacional do processo de fundição por gravidade de uma liga de bronze ao alumínio (Cu-Al-Fe-Ni-Cr), incluindo a solidificação e o resfriamento no molde no formato de uma árvore de fundição de paredes grossas. Como resultado da simulação do processo de fundição dessa árvore, identificaram-se regiões críticas para formação de defeitos.

Kan e Sheikh (2018) realizaram um estudo comparativo entre os principais softwares de simulação de fundição disponíveis até o momento da publicação. No total, oito softwares de simulação de fundição foram analisados. Os softwares são comparados em termos de processos de fundição simulados, módulos adicionais (se houver), métodos de solução usados, previsão de defeitos, clientes/usuários típicos e capacidade de simulação avançada. Analisando o estudo de Kan e Sheikh (2018) é possível afirmar que o software ProCAST® está entre as 3 ferramentas de simulação mais adequados para uso em análise de defeitos de fundição mais detalhada, pois possui a capacidade de simular diversos processos de fundição, de identificar a maioria dos defeitos que surgem em uma fundição de maneira confiável e rápida.

Alisson et al. (2006) descreveram uma metodologia denominada “Virtual Aluminum Castings”, desenvolvida e implementada na Ford Motor Company. A empresa Ford desenvolveu a capacidade de realizar as chamadas fundições virtuais, usando os softwares ProCAST® e Abaqus®, com as únicas entradas para o cálculo sendo: a geometria complexa da matriz, a composição da liga e as propriedades requeridas. A capacidade de fundição, as transformações de fase e as propriedades mecânicas resultantes (resistência à tração, bem como propriedades de fadiga de baixo ciclo) foram simuladas juntas no mesmo domínio virtual 3D. A empresa Ford afirmou que esta nova abordagem reduziu de 15 a 20% o tempo para o projeto de novos blocos de motor e, portanto, economizou milhões de dólares.

Neste contexto, esse trabalho apresenta uma análise computacional, realizada com auxílio do software ProCAST®, de um processo de fundição de precisão rápida, que utiliza força centrífuga para injetar o metal fundido no interior de moldes de gesso refratário obtidos a partir de modelos em resina obtidos por manufatura aditiva (impressão 3D). Com essa análise de prototipagem virtual foi possível avaliar a influência da liga e da temperatura de injeção na fundibilidade das peças fabricadas a partir de uma LMF Cu-Al-Mn. O conceito de “fundibilidade” adotado neste trabalho consiste do enchimento de um molde no formato de rede, conforme será detalhado posteriormente. Além dessa análise, neste trabalho são apresentados dados importantes sobre o coeficiente de transferência de calor metal/molde, parâmetro que influencia diretamente a capacidade de preenchimento dos detalhes do molde.

2. METODOLOGIA

A metodologia usada nesse trabalho é apresentada por meio do fluxograma da Fig. 1.

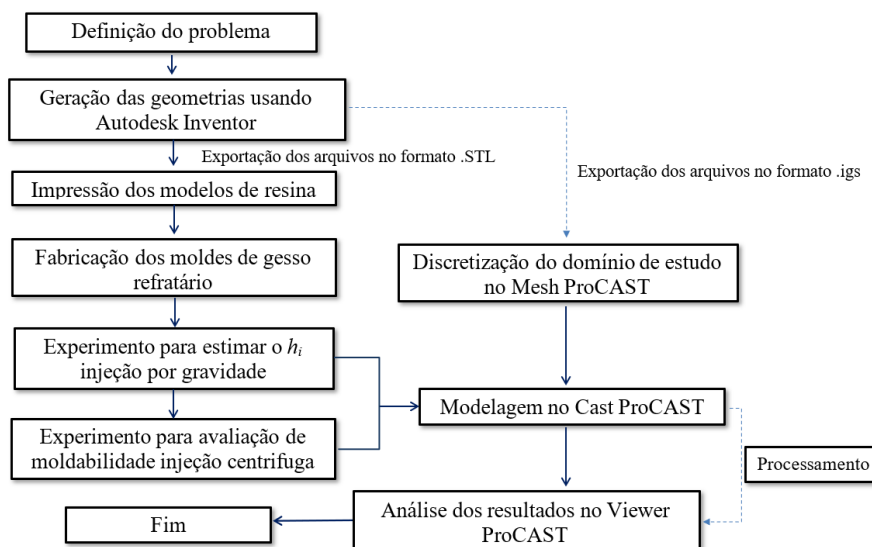


Figura 1. Fluxograma esquemático de metodologia usada (Autoria própria, 2020).

O problema abordado trata da comparação entre a fabricação real e a simulação computacional do processo de enchimento, solidificação e formação de defeitos para uma LMF Cu-Al-Mn usando o software ProCAST 2020.0. O processo de fundição escolhido para estudo usa a força centrífuga como meio de forçar o metal fundido para o interior do molde. Esse processo tem sido usado para a produção de componentes miniaturizados de ligas com memória de forma com a máquina PowerCast 1700 (Simões & De Araújo, 2018). A máquina utilizada possui a capacidade de fundir até 50 gramas de liga, rotacionar a velocidade de 350 a 450 rpm e alcançar temperaturas de até 1500 °C. Devido ao fato da máquina ser muito bem fechada durante a fusão e injeção, e trabalhar com elevadas rotações do braço de fundição, cadinho e molde, a determinação do coeficiente de transferência de calor na interface metal/molde (h_i) diretamente neste processo se torna uma tarefa muito complexa. Sabendo que o coeficiente de transferência de calor h_i é um parâmetro essencial para obter resultados numéricos mais precisos, foi necessário elaborar um experimento complementar para estimar esse parâmetro para a liga estudada. Diante disso, para essa pesquisa o coeficiente de transferência de calor h_i foi estimado primeiramente pelo processo de fundição por gravidade e depois ajustado para o processo de fundição centrífuga.

A metodologia específica usada para estimar o coeficiente de transferência de calor h_i na interface metal/molde foi baseada nos trabalhos de Chen et al. (2014), Konrad et al. (2011) e O'Mahoney e Browne (2000).

Durante o processo de vazamento do metal por gravidade foram utilizados 4 termopares do tipo K (100 µm de diâmetro), um deles posicionado no centro da peça e os outros 3 distribuídos no interior do molde, a aproximadamente 4 mm, 14 mm e 24 mm do centro do molde. Para melhor entendimento, a Fig. 2 mostra a vista em corte de como os termopares foram posicionados e a Fig. 3a exibe as dimensões da peça ilustrada na Fig. 2. Os termopares foram nomeados como T00, T02, T12, T22 em referência as distâncias que estão da interface metal/molde, excluindo o T00 que foi nomeado dessa maneira para referenciar o centro do molde.

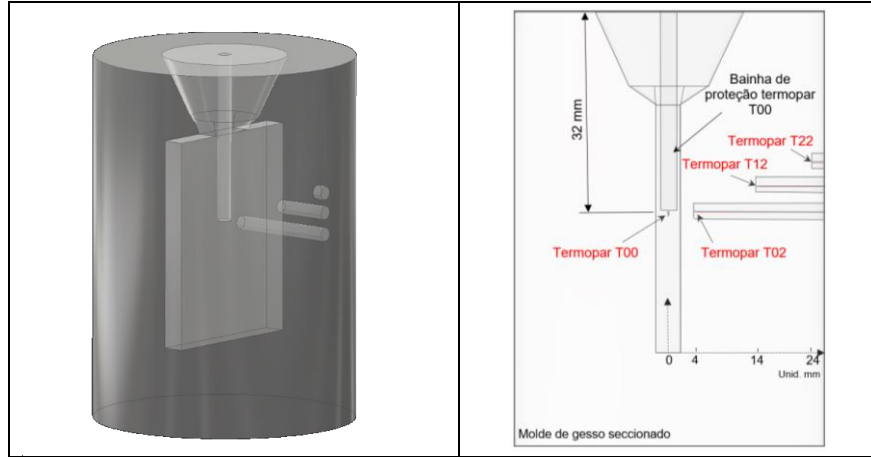


Figura 2. Posicionamento dos termopares na montagem para fundição por gravidade (Autoria própria, 2020).

Uma vez medidas as temperaturas na liga e no molde, os dados foram tratados. Assim, foi possível calcular um valor aproximado de coeficiente de transferência de calor metal/molde para cada composição de liga e molde. Esse resultado será usado como um valor inicial nas simulações feitas usando o software ProCAST®, para definir o valor do coeficiente de transferência de calor metal/molde final para essa montagem.

Os cálculos foram feitos baseados no fato de que o coeficiente de transferência de calor da interface liga/molde h_i depende do fluxo de calor do metal líquido para o molde q_N através da interface e da queda de temperatura ΔT na interface, conforme descrito pela Eq. (1) (Garcia, 2007).

$$q_N = h_i(T_{is} - T_{im}) \quad (1)$$

Segundo Konrad et al. (2011), o fluxo de calor total, q_N , na interface metal/molde consiste na soma do fluxo q_c que o metal fundido perde para o molde e do fluxo q_s devido à natureza exotérmica da solidificação. O fluxo q_c é calculado pela diminuição da temperatura no volume considerado, como indicado pela Eq. (2).

$$q_c(t) = \frac{\rho_f \chi c_p (T(t) - T(t + \Delta t))}{\Delta t} \quad (2)$$

onde ρ_f é a densidade do fundido, χ é metade da espessura da placa, c_p é o calor específico do fundido, $T(t)$ é a temperatura no instante t e Δt é o incremento de tempo.

Devido à natureza exotérmica da solidificação, supõe-se que o fluxo q_s diminua linearmente no intervalo de solidificação, sendo calculado pela Eq. (3) (Konrad et al., 2011).

$$q_s(t) = \frac{2(1 - ((t - t_{liquid}) / (t_{solid} - t_{liquid}))) \rho_f \chi E_s}{\Delta t} \quad (t_{liquid} \leq t \leq t_{solid}) \quad (3)$$

E_s é o calor latente da liga, t_{liquid} é o início da solidificação e t_{solid} é o fim da solidificação.

As propriedades necessárias das ligas para alimentar as Equações (2) e (3) foram calculadas no ambiente do próprio ProCAST® em associação com o banco de dados da CompuTherm (CompuTherm, 2022). O valor de incremento de tempo usado foi de 0,17 segundos. Para os cálculos, algumas simplificações foram feitas: i) o calor só é transportado perpendicularmente à superfície do molde; ii) transferência de calor no metal fundido é infinitamente alta; iii) condutividade térmica no molde constante; iv) calor específico da liga constante; e v) propagação da temperatura no molde linear devido condutividade térmica constante no molde.

A Fig. 3 ilustra as geometrias projetadas no Autodesk Inventor e usadas tanto para produção dos modelos em resina fotossensível, usando uma impressora 3D AnyCubic Photon, como na discretização do domínio de estudo na prototipagem virtual. Para avaliação da fundibilidade foi definida uma peça com geometria no formato de malha ou rede, Fig. 3b, tendo por base a metodologia proposta por Hinman *et al.* (1985). Para representação do cadinho cerâmico de fundição, foi necessário realizar sua digitalização usando um scanner Matter and Form Desktop 3D Scanner.

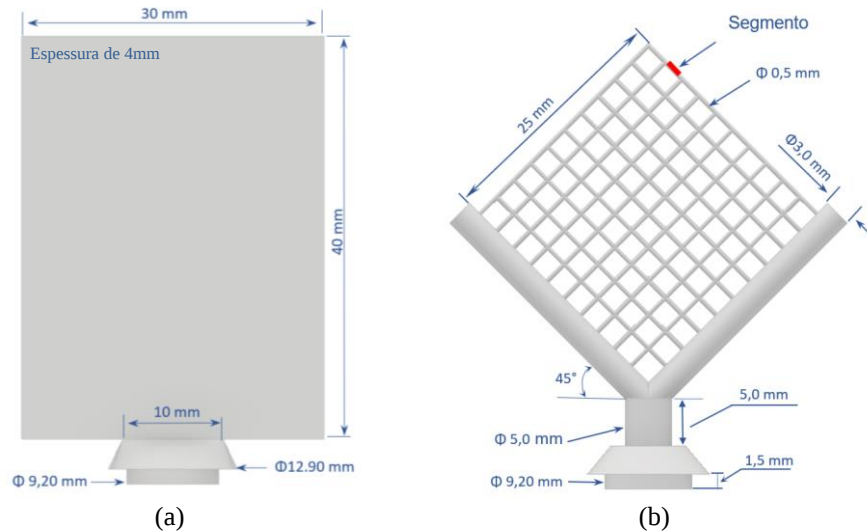


Figura 3. Formato definido para a peça com rede em Y a ser fundida. (a) Geometria gerada para estimar h_i por gravidade (b) Geometria definida para estudo da fundibilidade (Autoria própria, 2020).

Após produzidas as geometrias, estas são importadas no formato “.igs” para o *Mesh* do ProCAST®, com a finalidade de confecção da malha que discretiza o domínio. Para as duas geometrias foram criadas duas malhas idênticas usando a mesma metodologia e parâmetros. A Fig. 4 ilustra exemplos das malhas criadas para o conjunto completo (cadinho, molde e peça). Os dados usados na simulação computacional são apresentados na Tab. 1.

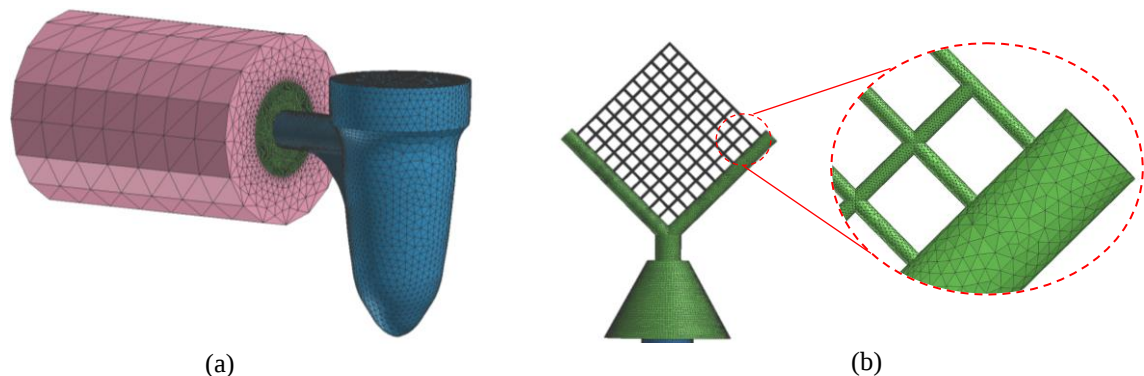


Figura 4. Malha confeccionada para as análises no software ProCAST®. (a) Conjunto completo: molde, peça e cadinho. (b) Detalhe do refinamento da malha da peça (Autoria própria, 2020).

Tabela 1. Dados de entrada usados na simulação do processo de fundição de precisão rápida (Autoria própria, 2022)

Dado de entrada	Vazamento por Gravidade	Injeção Centrifuga
Tempo de preenchimento (s)	2,00	(Não se aplica)
Velocidade de rotação (rpm)	(Não se aplica)	350
Temperatura de injeção (°C)	Igual a adquirida pelo termopar para as duas ligas	Dependente do caso avaliado: 5 °C > $T_{liquidus}$ (Liga1) 5 e 60 °C > $T_{liquidus}$ (Liga2) 1 °C < $T_{liquidus}$ (Liga2)
Temperatura solidus e liquidus (°C)	Calculado, para cada liga, usando o CompuTherm	Calculado, para cada liga, usando o CompuTherm
Temperatura de molde (°C)	Igual a adquirida pelo termopar	420°C
Temperatura externa ao molde (°C)	Temperatura ambiente	Temperatura ambiente
Coefficiente de troca de calor entre o molde e ambiente (W/m².K)	Considerado convecção natural com 10 W/m².K	Considerado convecção forçada com 65,50 W/m².K
Coefficiente de troca de calor entre peça e molde (W/m².K)	Estimado para cada montagem de liga e molde	h_i = 895,00 (Liga 1) h_i = 535,00 (Liga 2)
Massa da liga fundida (g)	50	8

As ligas selecionadas para os testes de fundibilidade da peça da Fig. 3b foram o cobre comercialmente puro (Cu-0,05Al, liga 1) e a liga Cu-7,90Al-5,40Mn (liga 2), com percentuais em peso.

A liga 2 apresenta a transformação de fase martensítica típica das ligas com memória de forma. O material do molde escolhido foi o gesso Resincast®, da marca Rutenium

A análise dos resultados ao fim das simulações foi feita através de gradientes, gráficos e ilustrações geradas no Viewer do ProCAST 2020.0. Além das ferramentas oferecidas pelo Viewer também foi feito o uso da metodologia de Whitlock modificada, para determinar o valor de fundibilidade. Essa metodologia foi apresentada inicialmente no estudo de Hinman *et al.* (1985) e posteriormente citada também no trabalho Qiu *et al.* (2015). Após a fundição, o número de segmentos incompletos da peça da Fig. 3b foi contabilizado e inserido na Eq. (4) para determinar a porcentagem de fundibilidade.

$$F(\%) = \frac{(N_T - N_i)}{N_T} \times 100 \quad (4)$$

Sendo F a fundibilidade, N_T o número de segmentos total da peça e N_i o número de segmentos incompletos após a fundição. Nesse trabalho, a rede produzida forma uma grade com 100 quadrados abertos e 200 segmentos. O segmento foi considerado completo ou incompleto de acordo com a ilustração da Fig. 5, na qual todos os segmentos apontados como “I” são considerados incompletos.

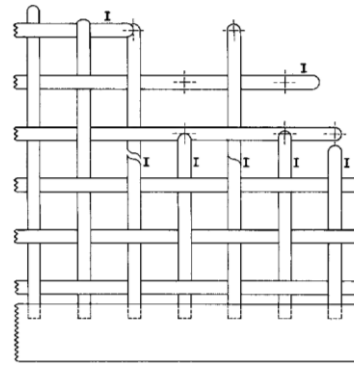


Figura 5. Ilustração do método para contagem de segmentos considerados completos (Hinman *et al.*, 1985).

3. RESULTADOS

3.1 Comportamento das propriedades termofísicas da LMF Cu-Al-Mn

A liga escolhida para realizar este estudo é uma liga de bronze ao alumínio com composição de 86,7Cu – 7,9Al – 5,4Mn (% em peso). Esta liga foi escolhida para análise pois tem potencial de apresentar o efeito memória de forma, tanto na forma de lingote como após injeção, como pode ser visto nas curvas de fluxo de calor versus temperatura apresentadas na Fig. 6. Verifica-se que o material apresenta as transformações de fase reversíveis no resfriamento e aquecimento, típicas de uma liga com memória de forma.

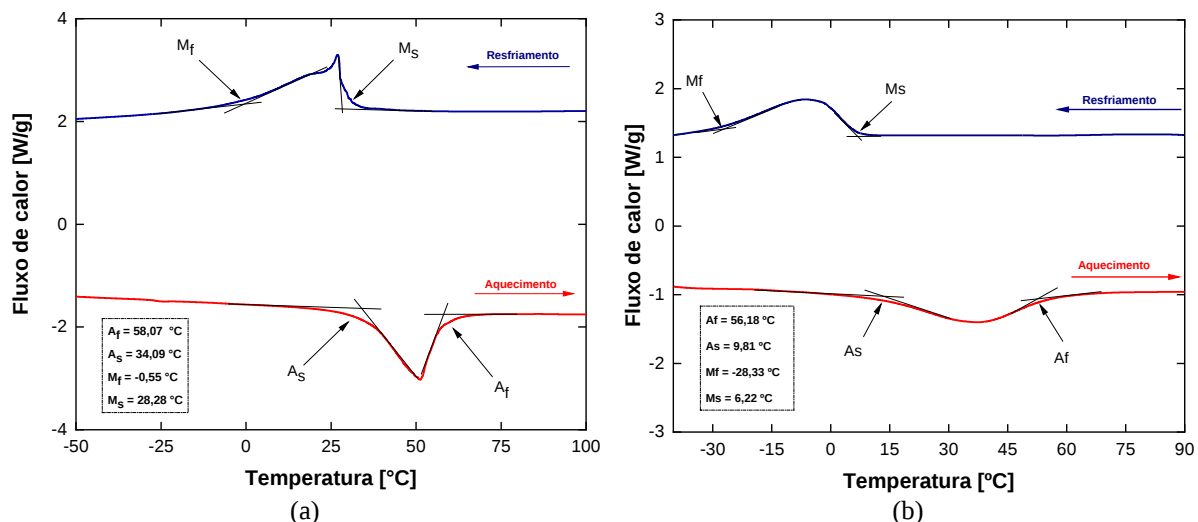


Figura 6. Curvas de fluxo de calor versus temperatura obtida por calorimetria diferencial de varredura (DSC) para a liga Cu-7,90Al-5,40Mn. (a) Lingote e (b) peça injetada (Autoria própria, 2022)

Para a liga 86,70Cu – 7,90Al – 5,40Mn, as temperaturas de transição fornecidas pelo software são: temperatura solidus (T_{sol}) igual a 993,00 °C e temperatura líquidus (T_{liq}) igual a 1038,00 °C.

A título de comparação, Meigh (2000) apresentou para uma liga semelhante a liga estudada nesse trabalho, com composição em peso Cu-9Al-2Mn, a temperatura solidus igual a 1045 °C e temperatura líquidus igual a 1100,00 °C.

A Figura 7 mostra algumas curvas de propriedades termofísicas em função da temperatura para a liga estudada calculadas pelo ProCAST® com o banco de dados da CompuTherm®.

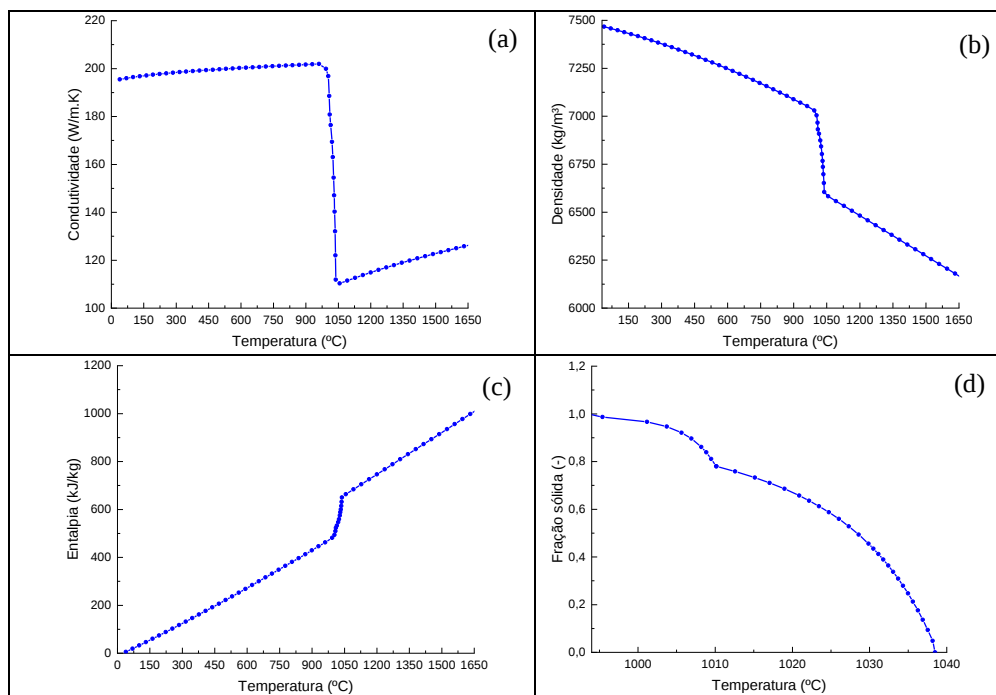


Figura 7. Propriedades termofísicas em função da temperatura para liga 86,70Cu – 7,90Al – 5,40Mn. (a) Condutividade. (b) Densidade. (c) Entalpia. (d) Fração sólida (Autoria própria, 2022).

Uma das curvas apresentadas é a da condutividade térmica, Fig. 7(a), que apresenta um comportamento linear ascendente até a temperatura de 960,9°C. Ultrapassando essa temperatura, a curva inicia um processo de queda acentuada até a temperatura de 1056,0°C, quando novamente inicia uma ascendência linear, porém mais proeminente do que a apresentada no intervalo de 30°C a 960,9°C. Segundo Valencia e Qusted (2008), esse comportamento é esperado para a maioria dos metais, pois geralmente a condutividade diminui acentuadamente devido à desordem excepcional do estado líquido.

A densidade, Fig. 7(b), apresenta um comportamento semelhante ao da condutividade térmica, porém com uma diminuição quase linear entre as temperaturas de 35°C a 993°C e 1056 °C a 1650°C.

Já a entalpia, Fig. 7(c), aumenta linearmente com o acréscimo de temperatura, partindo de um valor mínimo aproximado de 5,31 kJ/Kg a uma temperatura de 39°C para um valor aproximado de 998,0 kJ/Kg a uma temperatura de 1650°C. Outro comportamento importante que se pode observar na curva de entalpia é o aumento considerável de 168 kJ/Kg apresentado entre as temperaturas de 993°C e 1038°C. Esse aumento ocorre justamente no intervalo de mudança de fase e representa a diferença entre a entalpia nas temperaturas solidus e liquidus. Segundo Mills (2002), para o cobre puro esse aumento é de 208 kJ/kg e para uma liga de cobre e alumínio (Cu-9,7Al-4,6Fe-0,64Mn-4,6Ni) o aumento é de 240 kJ/kg.

3.2 Estimativa do coeficiente de transferência calor da interface liga/molde h_i

O coeficiente de transferência calor da interface metal/molde é um parâmetro importante que tem influência direta na queda de temperatura na zona de contato do fundido e do molde durante a solidificação (Konrad et al., 2011). Nas simulações numéricas de fundição e solidificação, o h_i é imposto como uma condição de contorno e deve ser conhecido, ou bem aproximado, para se obter resultados com melhor grau de confiabilidade.

Para estimar os coeficientes de transferência de calor metal/molde para o processo de fundição por gravidade durante o processo de vazamento da liga no molde foram feitas aquisições das temperaturas em três pontos do molde e em um ponto na liga. Após a aquisição dessas temperaturas, com auxílio das equações (1), (2) e (3) foram calculados os coeficientes h_i em cada instante de tempo. Porém, para possibilitar o uso mais geral como valor de referência para as simulações futuras, o h_i foi considerado constante e para isso foi necessário calcular valores médios para esses coeficientes.

Segundo O'Mahoney e Browne (2000) essa abordagem é usual, mas deve-se ter em mente que as condições na interface liga/molde não permanecem constantes durante todo o processo de solidificação.

A Tab. 2 apresenta os valores dos h_i médios calculados tendo como referências os valores obtidos pelas Eq. (1), (2) e (3).

Tabela 2. h_i médio calculados para as ligas em estudo (Autoria própria, 2022).

Liga	Composição	(h_i) médio calculado pela Equação (1) (W/m ² .K)
1	99,95Cu – 0,05Al	481,76
2	86,70Cu – 7,90Al – 5,40Mn	68,41

3.3 Otimização do coeficiente de transferência calor estimado para o método de gravidade

Os valores de h_i apresentados na Tab. 2 foram usados como condições de contorno iniciais, em um processo iterativo, para definir os coeficientes de transferência calor da interface liga/molde ótimo para cada liga utilizando o método inverso.

A Fig. 8 mostra uma comparação das curvas reais (representadas pelas linhas contínuas) e simuladas (representadas pelas linhas tracejadas) de resfriamento da liga 1 em um molde de gesso com a forma interna de placa (Fig. 3a).

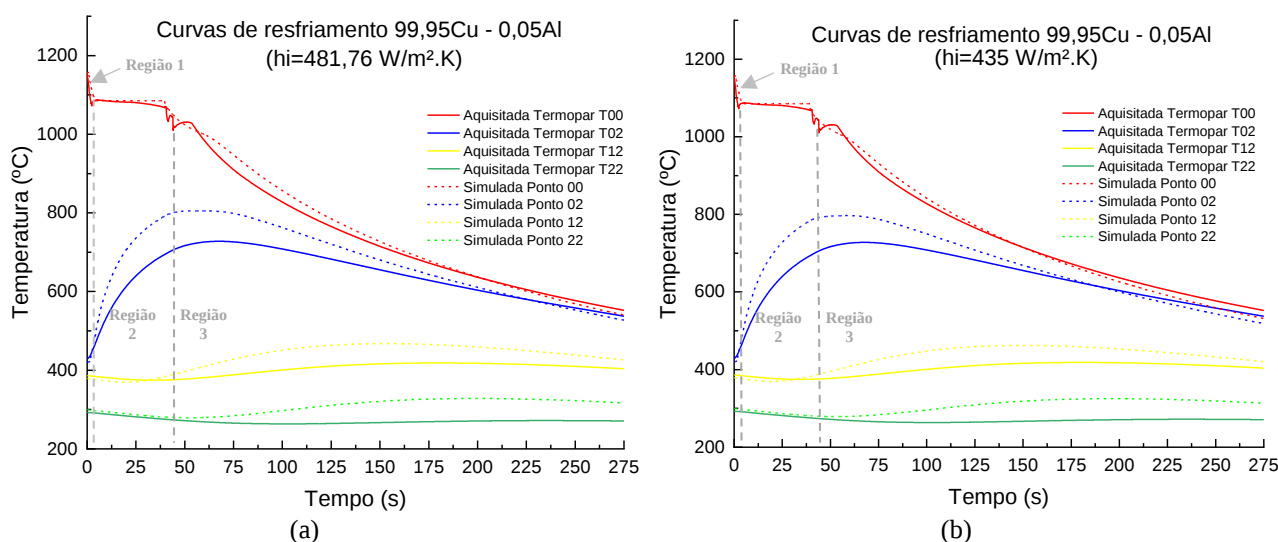


Figura 8. Comparações entre as curvas de resfriamento experimentais e simuladas para a liga 2. (a) Simulação obtida com $h_i = 481,76$ W/m².K. (b) Simulação obtida com $h_i = 435,00$ W/m².K (Autoria própria, 2022).

Analisando a Fig. 8 é possível inferir que o valor fornecido pelo cálculo da média dos valores de h_i calculados para cada intervalo de tempo apresenta uma boa aproximação, tendo em vista que as curvas de resfriamento simuladas com esse valor se aproximaram das curvas obtidas experimentalmente. Com intuito de melhorar e aproximar mais esses resultados, foram feitas algumas simulações com valores de h_i diferentes do calculado, observando sempre a aproximação das curvas simuladas das experimentais. As simulações de aproximação para a liga 1 começaram com o valor de 10 W/m².K acima do valor de referência de 481,76 W/m².K, porém as curvas obtidas com este valor apresentaram uma divergência maior em relação às curvas experimentais. Levando em consideração esse resultado, as simulações seguintes foram realizadas reduzindo sempre 5 W/m².K da anterior até alcançar um valor ótimo. A Figura 8(b) exibe o resultado de uma dessas simulações, em que foi imposto que o valor de $h_i = 435,00$ W/m².K. Dentre as simulações para melhorar a aproximação das curvas simuladas das experimentais, este caso foi o que apresentou melhor resultado.

Para quantificar a aproximação entre os resultados teóricos e experimentais, a Tab. 3 apresenta os erros calculados em três regiões distintas das curvas de resfriamento. São apresentados o erro total e a raiz quadrada do erro quadrático médio (REQM).

Tabela 3. Valores de erro percentual médio e REQM entre as curvas de resfriamento experimental e numérica para a liga 1 (Autoria própria, 2022).

h_i (W/m ² .K)	Erro região 1 (%)	Erro região 2 (%)	Erro região 3 (%)	Erro total (%)	REQM (°C)
481,76	2,07	0,43	1,65	1,30	17,10
435,00	2,17	0,41	1,62	1,30	14,12

Observando os valores apresentados na Tab. 3, nota-se que o erro total para os dois h_i são os mesmos, porém o REQM é menor para o valor de $435 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, apresentando assim um desvio padrão menor. Outro ponto importante identificado é que o erro percentual da região 2 para o h_i otimizado foi inferior ao estipulado. Esta região é de particular interesse, pois é a região onde a liga passa da fase líquida para a sólida.

A Fig. 9 exibe curvas comparativas entre as experimentais e numéricas simuladas, obtidas com h_i constante de $68,41 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (estimado pela média dos valores calculados pela Eq. 1) e $75,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (valor encontrado por iteração), para a liga 2.

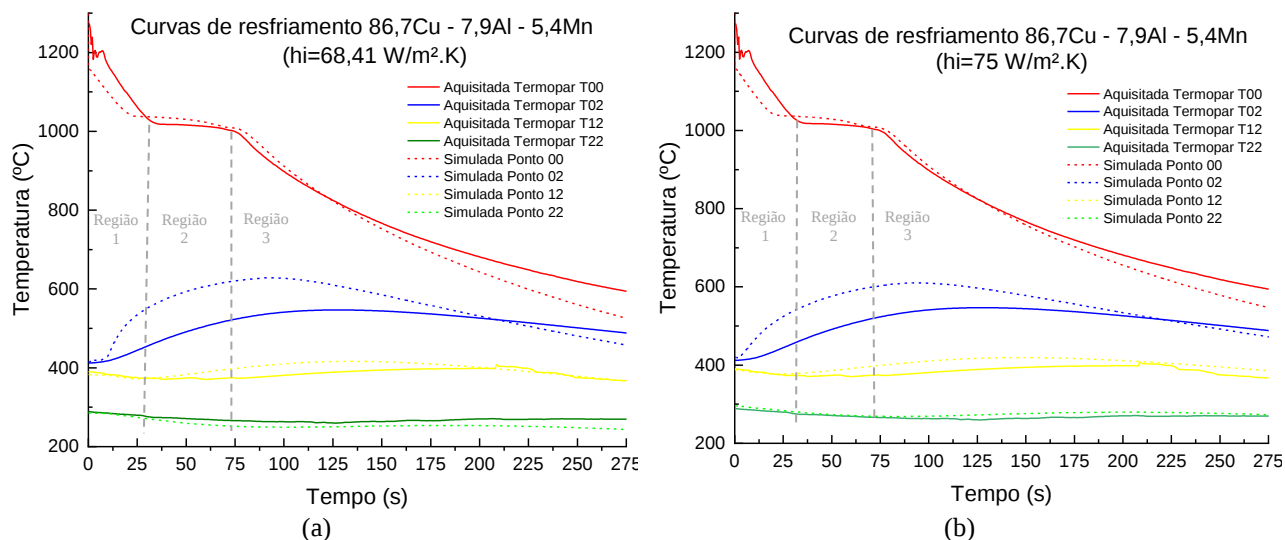


Figura 9. Comparação das curvas de resfriamento experimental versus simulada para a liga 2. (a) Simulação obtida com $h_i = 68,41 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ e (b) Simulação obtida com $h_i = 68,41 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ (Autoria própria, 2022).

É possível notar que para a liga 2 o valor de h_i fornecido pelo cálculo da média dos valores de h_i em cada instante de tempo, calculados pela Eq. (1), apresentou uma boa aproximação já de início. Assim como o h_i constante de $68,41 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$, o uso do h_i constante de $75,00 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ também apresentou uma boa aproximação das curvas reais, porém com uma aproximação ligeiramente maior na faixa de transição de 993°C a 1038°C . Essa pequena melhoria de convergência pode ser melhor observada ao se analisar somente as curvas de resfriamento experimentais e simuladas da liga (curvas vermelhas).

Essa análise pode ser feita através dos cálculos dos erros médios absolutos e pelo REQM apresentados na Tab. 4. Analisando os valores percentuais de erro apresentados nesta tabela, é possível notar que os valores de erro total médio apresentado pela curva gerada com h_i constante de $75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ é menor (aproximadamente 1,63%) do que o apresentado pela curva levantada com h_i constante de $68,41 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$. Ainda avaliando os erros absolutos médios nesta tabela, pode-se inferir que os erros apresentados para as curvas de resfriamento obtidas usando o h_i estimado pela média dos valores calculados com a Eq. (1) e o obtido via iteração são próximos, com pequena diferença na região 1 e região 2 (região de transição de fase) e uma divergência maior na região 3, onde o h_i constante de $75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ apresentou um erro menor. Além dessa diferença, também é possível notar que o REQM da curva de resfriamento obtida com $h_i = 75 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ apresentou um valor menor, ou seja, apresentou um desvio padrão menor, atendendo bem ao objetivo de otimizar o valor de h_i para este elenco.

Tabela 4. Erro percentual médio e REQM entre as curvas de resfriamento experimental e numérica liga 2 (Autoria própria, 2022).

$h_i(\text{W/m}^2\cdot\text{K})$	Erro região 1 (%)	Erro região 2 (%)	Erro região 3 (%)	Erro total (%)	REQM ($^\circ\text{C}$)
68,41	5,54	1,18	5,30	4,16	43,76
75,00	5,78	1,16	2,31	2,53	35,37

3.4 Fundibilidade

O coeficiente de transferência de calor metal/molde influencia a taxa de resfriamento e, portanto, a solidificação das peças fundidas. Esse fato tem impacto direto na capacidade de preenchimento dos detalhes do molde, ou seja, na fundibilidade (Szeliga *et al.*, 2017).

A fundibilidade depende também das condições do processo de solidificação (vácuo, atmosfera protetora, ar, vazamento e temperatura do molde), pressão externa do metal líquido, rugosidade da superfície do molde e da fundição

(O'Mahoney e Browne, 2000). Diante disto, os valores de h_i definidos nos tópicos 3.2 e 3.3 precisaram ser ajustados para o processo centrífugo avaliado nesta pesquisa.

O ajuste foi feito de forma iterativa, primeiramente analisando a fundibilidade do experimento com os resultados das simulações de injeção centrífuga da liga 1 (99,95Cu – 0,05Al). Após definir o valor de h_i que fornece uma fundibilidade próxima ao experimento, foi realizado o cálculo da diferença entre o h_i obtido via simulação de fundição por gravidade para liga 1 e o h_i ajustado iterativamente para o processo de fundição centrífuga da liga 1. Esta diferença foi aplicada aos valores de h_i obtidos nos tópicos 3.2 e 3.3 para a liga 2, sendo possível assim obter um valor inicial para as simulações.

A Tab. 5 apresenta os valores de h_i obtidos via simulação para o processo por gravidade e para o processo de injeção centrífuga, e os valores de fundibilidade obtidos via simulação numérica e experimentais para as ligas em estudo.

Tabela 5. Valores de fundibilidade dos casos estudados (Autoria própria, 2022).

Liga	h_i (W/m ² .K)	Temperatura de injeção					
		5 °C > T _{liquidus}		1 °C < T _{liquidus}		60 °C > T _{liquidus}	
		Real F (%)	Virtual F (%)	Real F (%)	Virtual F (%)	Real F (%)	Virtual F (%)
1	895,00	34,50	33,50	-	-	-	-
2	535,00	93,00	92,00	66,00	65,00	99,00	100,00

Observando os dados exibidos nesta tabela, nota-se que a mudança do processo e geometria causaram um grande aumento no coeficiente de transferência de calor metal/molde. A diferença entre o h_i estimado para o processo por gravidade de uma placa para o processo de injeção centrífuga de uma rede, foi de 460 W/m².K.

Ainda analisando os dados da Tab. 5 é possível verificar que o aumento do percentual de alumínio e manganês na liga gera uma melhora significativa de preenchimento dos detalhes do molde do processo de fundição avaliado, tanto para os casos reais como os virtuais. Este comportamento já era esperado, pois é de conhecimento da literatura que o cobre puro apresenta menor fundibilidade (ASM, 2008).

Comparando a liga 1, com apenas 0,05% de Al, com a liga 2, com 7,9% de Al e 5,4% de Mn na sua composição, observa-se uma melhoria de aproximadamente 58,5 % da fundibilidade tanto nas peças reais como virtuais. Este aumento expressivo ao adicionar o Al e Mn está associado ao fato de que estes elementos aumentam a faixa de transição do estado líquido para o sólido e reduzem o h_i , que, por sua vez, diminui a taxa de resfriamento. Segundo ASM (2008) a fundibilidade é geralmente influenciada pelas características de contração e faixa de transição de fase da liga.

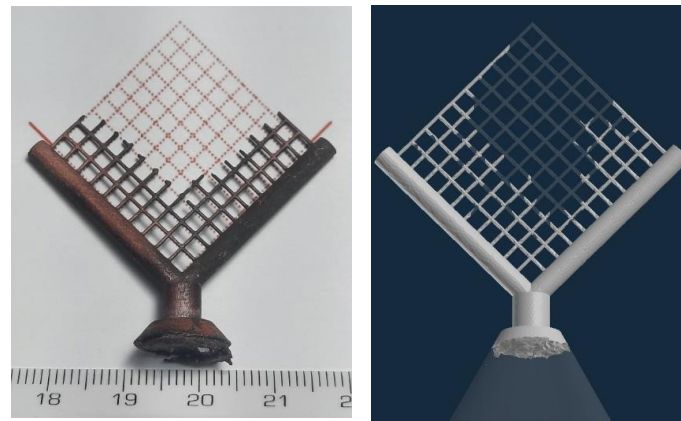
A Fig. 10 mostra as peças real (Fig. 10a) e virtual (Fig. 10b), injetadas por centrifugação da liga 1. Como pode ser visto, a peça real apresentou um preenchimento mais uniforme com falhas concentradas na região central com duas seções de segmentos completos próximos ao canal de entrada. Já a rede virtual apresentou uma tendência de preenchimento semelhante, porém com um desenvolvimento maior dos segmentos periféricos e com alguns segmentos incompletos na segunda seção de segmentos, comportamento não verificado na peça real.

A Fig. 11 mostra, respectivamente, a peça obtida via experimento físico e via experimento virtual com a injeção centrífuga da liga 2 a temperatura aproximada de 1043°C. Neste caso foi observado um percentual de fundibilidade de 93,0 % na rede real e de 92,00 % na rede virtual. As falhas apresentadas na rede virtual se concentraram em alguns nós posicionados na região central direita da peça. Na rede real os defeitos de preenchimento surgiram em segmentos centrais mais à esquerda da peça. A Fig. 11(c) mostra com maior detalhamento as falhas de preenchimento da liga 2 injetada a 5 °C acima da temperatura liquidus.

Para a liga 2, além das injeções com temperatura 5 °C acima da temperatura liquidus já apresentadas na Fig. 11, foram feitas injeções com temperaturas 1 °C abaixo e 60° C acima da liquidus. O intuito foi, respectivamente, de aumentar e reduzir a presença de defeitos de preenchimento, sendo assim possível avaliar melhor a capacidade e sensibilidade do software usado nesta pesquisa na identificação desses defeitos.

As Fig. 12(a) e Fig. 12(b) mostram o resultado da prototipagem real e virtual para a fundição centrífuga com temperatura de injeção 1 °C abaixo da temperatura liquidus. Analisando essas imagens pode-se notar que na peça real as falhas de preenchimento se concentraram na região da extremidade superior da rede com uma discreta tendência de preenchimento maior no lado direito e alguns segmentos falhos na posição central inferior. O resultado virtual mostra uma tendência de preenchimento semelhante a real, porém com maior preenchimento da região superior direita e não exibe as falhas na posição central inferior como o caso real.

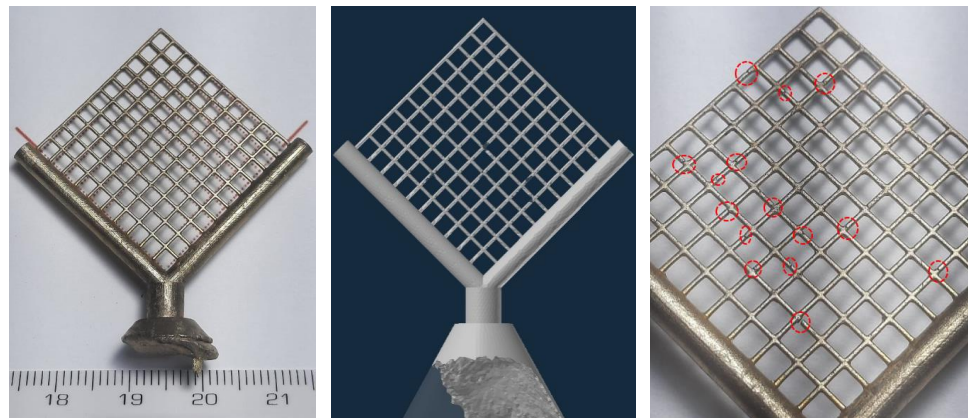
As Fig. 12(c) e 12(d) exibem o resultado real e virtual da fundição centrífuga com temperatura de injeção 60 °C acima da temperatura liquidus. Neste caso, a peça real apresentou uma fundibilidade de 99,0 %, com apenas 2 segmentos incompletos. Já a peça virtual obtida via simulação apresentou uma fundibilidade de 100 %. Comparando esses resultados com os resultados da injeção de 5 °C acima da temperatura liquidus, Fig. 11(a), nota-se que houve uma melhora no preenchimento, porém o aumento da temperatura de injeção também gerou uma reação da liga com o material do molde deixando a peça com uma aparência final ruim.



(a) $F = 34,50 \%$

(b) $F = 33,50 \%$

Figura 10. Preenchimento da rede de segmentos da liga 1 injetada a 5°C acima da temperatura liquidus. (a) Prototipagem real da rede de segmentos. (b) Prototipagem virtual da rede de segmentos (Autoria própria, 2022).

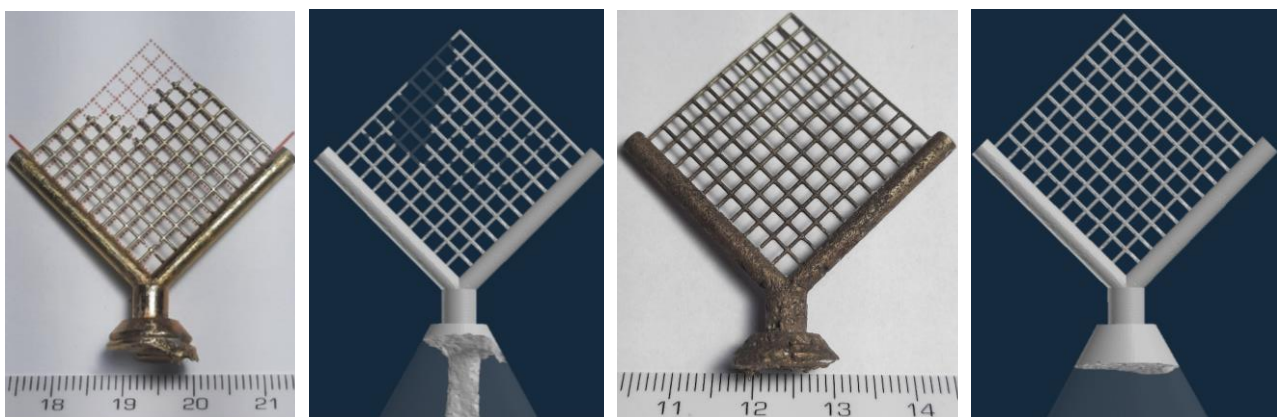


(a) $F = 93,00 \%$

(b) $F = 92,00 \%$

(c)

Figura 11. Comparação do preenchimento da rede com a liga 2 injetada a 5°C acima da temperatura liquidus. (a) Prototipagem real da rede de segmentos. (b) Prototipagem virtual da rede de segmentos. (c) Detalhamento das falhas de preenchimento da rede (Autoria própria, 2022).



(a) $F = 66,00 \%$

(b) $F = 65,50 \%$

(c) $F = 99,00 \%$

(d) $F = 100,00 \%$

Figura 12. Comparação do preenchimento da rede com a liga 2. (a) Prototipagem real da rede de segmentos liga injetada a 1°C abaixo da temperatura liquidus. (b) Prototipagem virtual da rede de segmentos liga injetada a 1°C abaixo da temperatura liquidus. (c) Prototipagem real da rede de segmentos injetada a 60°C acima da temperatura liquidus. (d) Prototipagem virtual da rede de segmentos injetada a 60°C acima da temperatura liquidus (Autoria própria, 2022).

4. CONCLUSÕES

Após análise dos resultados apresentados neste trabalho pode-se concluir que:

O processo de vazamento tem forte influência sobre o coeficiente de transferência de calor metal/molde, pois ao injetar a liga LMF de Cu-7,9Al-5,4Mn (% em peso) pelo processo centrífugo a montagem metal/molde apresenta um h_i de 535 W/m².K. Já para o processo de vazamento por gravidade a montagem apresenta um h_i de 68,41 W/m².K.

Admitir h_i constante para o cobre e para a LMF de Cu-7,9Al-5,4Mn (% em peso) é uma simplificação que não afeta de forma negativa a aproximação das condições reais de resfriamento destas ligas.

A metodologia de Whitlock se mostrou uma excelente ferramenta para avaliar uma liga de forma qualitativa e quantitativa em relação à capacidade da mesma de preencher os detalhes do molde, representada pela fundibilidade, em um processo de fundição.

A LMF de Cu-7,9Al-5,4Mn (% em peso) apresenta uma fundibilidade de 93,00 % quando injetada a 5°C acima da temperatura liquidus e uma fundibilidade de 99,00% quando injetada a 60°C acima da temperatura liquidus.

O aumento da temperatura de injeção gera uma melhora do preenchimento da peça com a LMF de Cu-7,9Al-5,4Mn (% em peso), porém o aumento excessivo provoca reações entre a liga e o gesso refratário usado para fabricação dos moldes deixando a peça com um acabamento superficial ruim.

Os resultados numéricos apresentados neste trabalho mostram um alto grau de confiabilidade quando comparados com os resultados reais. Confirmando que o uso de softwares de simulação pode reduzir o tempo e os custos dos projetos de fundição das LMF.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento do projeto PQ 1C (Proc. 302740/2018-0), assim como ao ESI Group, na pessoa do Eng. Rodrigo Morishita, pela concessão da licença do programa ProCAST (Ref: CA/ARDS/RSD_2007_01BR).

6. REFERÊNCIAS

- Allison, J.; Li, M. C. Wolverton, C.; Su, X.M., 2006. Virtual Aluminum Castings: An Industrial Application of ICME. JOM, Vol. 58, n.11, p. 28-35.
- ASM., 2008. Handbook Casting: Casting of Copper and Copper Alloys. ASM International. All Rights Reserved. v.15, Ohio, p. 1026- 1044, 2008.
- Chen, L.; Wang, Yingxin.; Peng, L.; Fu, P.; Jiang, H., 2014. Study on the interfacial heat transfer coefficient between AZ91D magnesium alloy silica sand. Experimental thermal and fluid science. v. 54, p. 196-203.
- Garcia, A., 2007. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. 2ª Edição; São Paulo: Editora Unicamp.
- Guo, J.; Samonds, M., 2011. Modeling of alloy casting solidification. Jom, v. 63, n. 7, p. 19–28.
- Hinman, R.W. Tesk, J.A., Whitlock, R.P., Parry, E.E., Durkowski, J.S., 1985. Technique for Characterizing Casting Behavior of Dental Alloys. Journal of Dental Research. Vol. 64, n2, p.134-138.
- Khan, M. A. A.; Sheikh, A. K., 2018. Comparative Study of Simulation Software for Modelling Metal Casting Processes. International Journal of Simulation Modelling. v.17, n2, p. 197-209.
- Konrad, C.H.; Brunner, M.; Kyrgyzbaev, K. ;Vokl, R.; Glatzel, 2011. Determination of heat transfer coefficient and ceramic mold material parameters for alloy IN738LC investment castings. Journal of materials processing technology. v. 211, p. 181-186.
- Kumar, R.; Madhu, S.; Aravindh, K.; Jayakumar, V.; Bharathiraja, G.; Muniappa, A, 2020. Casting design and simulation of gating system in rotary adaptor using procast software for defect minimization. Materials Today: Proceedings. v22, n.3, p. 799-805.
- Meigh, H., 2000. Cast and Wrought Aluminum Bronzes Properties, Processes and Structure, 1 ed., IOM Communications Ltd, London.
- Mills, K. C., 2002. Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys. Cambridge: Woodhead Publishing Ltd and ASM International.
- O'Mahoney, D.; Browne, D. J., 2000. Use of experiment and an inverse method to study interface heat transfer during solidification in the investment casting process. Experimental thermal and fluid science. v. 22, p. 111-122.
- Pisarek, B. P.; Kolakowski, D.; Pacyniak, T., 2016. Analysis of the Causes of Cracks in a Thick-Walled Bush Made of Die-Cast Aluminum Bronze. Archives of Foundry Engineering, v. 16, n4, p. 119–124.
- Qiu, K.J.; Liu, Y.; Zhou, F.Y.; Wang, B.L.; Li, L.; Zheng, Y.F.; Liu, Y.H., 2015. Microstructure, mechanical properties, castability and in vitro biocompatibility of Ti–Bi alloys developed for dental applications. Acta Biomaterialia, Vol. 5, p. 254–265.
- Simões, J.B.; De Araújo, C.J., 2018. Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Mechanical Components Produced by Investment Casting. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, v. 29, n.19, p. 3748-3757.

Szeliga, D.; Kubiak, K.; Ziaja, W.; Cygan, R.; Suchy, J. Sz.; Burelko, A.; Nowak, W.J.; Sieniawski, J., 2017. Investigation of casting–ceramic shell mold interface thermal resistance during solidification process of nickel based superalloy. *Experimental Thermal and Fluid Science*, v. 87, p. 149-160.
Valencia, J. J.; Quesada, N. P., 2008. *Thermophysical Properties*. ASM International. All Rights Reserved. v.15, Ohio, p. 468- 481.

7. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Comparison between Real and Virtual Prototyping in Rapid Investment Casting: Application to a Cu-Al-Mn Shape Memory Alloy

Carlos Eduardo da Silva Albuquerque

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF– R. Antônio Figueira Sampaio, 134 - Nossa Sra. de Gracas, Salgueiro - PE, 56000-000

e-mail: carlos.albuquerque@univasf.edu.br

Carlos Jose de Araújo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58429-140

e-mail: carlos.araujo@ufcg.edu.br

Abstract. Numerical simulation allows, through a mathematical model, to virtually represent a real physical process or problem and to conduct virtual experiments that make it possible to understand the behavior and determine how the process will respond to changes in some of its variables. This work aims to present an experimental (real) and numerical (virtual) analysis using the ProCAST software of a rapid investment casting process that uses centrifugal force to inject molten metal into refractory gypsum molds. This process was applied to evaluate the castability of a shape memory alloy (SMA) of the Cu-Al-Mn system. For this purpose, a part with geometry in the grid format was defined based on the methodology proposed by Hinman et al. (1985). Two casting processes were simulated, one by gravity (used to estimate the metal/mold heat transfer coefficient) and another by centrifugation (used to evaluate the castability of the studied SMA Cu-Al-Mn alloy). As main results, the study identified that the SMA Cu-7,9-Al-5,4Mn (% wt) has a metal/mold heat transfer coefficient equal to 535 W/m². K for the centrifugal process and a castability of 93.00 % and 99.00% when injected, respectively, at 5°C and 60°C above the liquidus temperature.

Keywords: Numerical simulation. Experimental analysis. Investment casting. Castability. Filling defects. Shape memory alloy.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.