

Avaliação numérica e experimental do processo de solidificação de Alumínio puro

Thiago Schwinden Leal, thiagol@weg.net^{1,2}

Paulo Sérgio Berving Zdanski, paulo.zdanski@udesc.br²

Fernando André Lindroth Dauner, e-mail^{1,2}

¹ WEG Equipamento Elétricos S.A – Avenida Waldemar Grubba 3000 - Jaraguá do Sul - SC, 89256-900

² Universidade do Estado de Santa Catarina - UDESC, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante - Rua Paulo Malschitzki, 200 - Zona Industrial Norte, Joinville - SC, 89219-710

Resumo: Este trabalho traz uma análise numérica e experimental do processo de solidificação de alumínio puro utilizando volumes finitos com o emprego do software ANSYS Fluent. A equação de energia é resolvida usando o método da entalpia com malha fixa. O processo de vazamento do metal líquido deu-se em um molde em aço seguido por uma resfriamento sob condição atmosférica. Por fim os resultados da simulação numérica são comparados com os resultados experimentais

Palavras-chave: Solidificação, Simulação Numérica, Fundição de Alumínio

1. INTRODUÇÃO

Um dos principais processos de fabricação dentro da indústria é o processo de fundição de metais e ligas metálicas. Apesar de ser um processo muito antigo, este ainda é objeto de estudo em vários setores, uma vez que há uma infinidade de ligas e aplicações. Santos, et al. 2006 comenta que o principal fenômeno envolvido no processo de fundição está voltado a compreensão da solidificação que pode ser definida como o processo de transformação da fase líquida em fase sólida devido a extração de calor do metal líquido e molde.

Para Beskow et al. 2008, a solidificação é um processo de transferência de calor em regime transiente onde o material no estado líquido libera energia na forma de calor latente para que o processo de mudança de fase ocorra. Ainda segundo Beskow et al. 2008, uma substância pura a uma determinada temperatura T_f pode existir tanto na forma sólida cristalina quanto na forma líquida. Essa temperatura é conhecida como ponto de fusão da substância e é o único ponto em que os dois estados podem coexistir em equilíbrio. Santos, et al. 2006 comenta que a solidificação pode ser entendida com a mudança de fase do estado líquido para sólido devido a redução da energia livre do meio. De acordo com Beskow et al. 2008 o ponto de fusão pode ser definido com a temperatura em que a fase líquida e sólida apresentam energia livre iguais. Neste momento, a variação da entalpia (ΔH) corresponde a quantidade de calor latente devido a mudança de fase, portanto tem-se que:

$$HL - HS = L \rho \quad (1)$$

O mecanismo de solidificação de metais pode ser considerado como um processo de transferência de calor em regime transitório onde a transformação líquido/sólido é acompanhada por liberação de energia térmica gerando uma fronteira móvel separando as fases líquida e sólida. Esta interface se move com o tempo à medida que se dá a extração de calor e tal efeito é governado pela taxa com que o calor latente é liberado durante o processo. Conforme Beskow et al. 2008, dentro do processo de solidificação dos metais a transferência de calor pode ocorrer por diferentes formas.

- A condução ocorre no interior do molde e no interior do líquido submetido à solidificação;
- A convecção ocorre entre uma superfície e um fluido quando eles se encontram em temperaturas diferentes e em movimento relativo. Tal processo irá existir externamente na superfície externa do molde ao meio ambiente, com a superfície do metal exposta ao ambiente e com as correntes convectivas surgidas no metal líquido.
- A radiação está relacionada com a perda de calor do molde para o ambiente ou então do metal fundido para o ambiente quando o mesmo se encontra exposto.

A Figura 1 ilustra os aspectos de transferência de calor citados anteriormente.

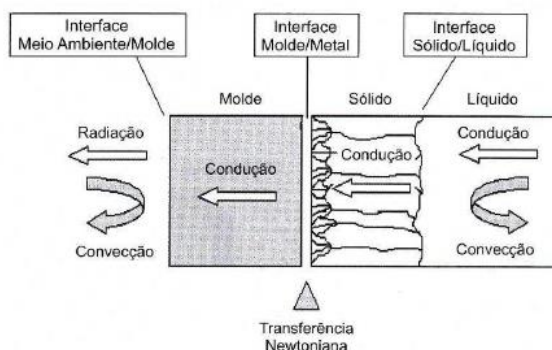


Figura 1 – Representação dos meios de transferência de calor na solidificação, conforme Garcia (2006).

Segundo Rocha et al. 2003, a análise da transferência de calor na solidificação apresenta essencialmente dois objetivos: a determinação da distribuição de temperaturas no sistema metal/molde e a determinação da cinética de solidificação. Do ponto de vista do metal fundido um importante aspecto no processo de solidificação é chamado de range de temperatura e representa a faixa de temperatura em que ambas as fases sólido e líquido coexistem. Tal região é denominada de zona pastosa ou mushy zone. A forma como o material solidifica desenvolve diferentes estruturas na região de transição, ou mushy zone. Em materiais com taxas de solidificação mais baixas, a interface apresenta-se plana. A medida que a taxa de crescimento de grãos na estrutura cresce, a interface líquido-sólido apresenta uma textura irregular com a formação de projeções no sólido. Aumentando-se ainda mais a taxa de crescimento passam a se formar estrutura chamadas dendritas no sólido conforme mostrado na figura 2. O modelamento matemático da mushy zone é abordado neste trabalho, porém os fatores que influenciam a formação das diferentes estruturas não serão abordados.

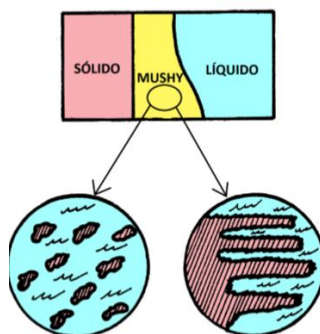


Figura 2 – Estrutura encontrada na frente de solidificação, conforme Odone (2013).

2. MODELAMENTO MATEMÁTICO DA SOLIDIFICAÇÃO

As primeiras análises matemáticas desse processo são descritas por Chorinov et al. 1940 definem o cálculo dos tempos de solidificação. Tal abordagem é adotada até os dias atuais pois apresenta boa acurácia, porém, apresenta limitações devido às aproximações empíricas realizadas. Outros modelos mais completos como o descrito por Scheil et al. 1942, envolvem fenômenos metalúrgicos mais complexos que descrevem até mesmo o processo de crescimento de grãos e permitem análise da solidificação de geometrias mais complexas.

Este trabalho tem o intuito de abordar o método de simulação de mudança de fase baseado no cálculo da variação da entalpia ao longo do processo. O método de entalpia foi desenvolvido pela primeira por Eyres et al. 1946, e Katayama e Hattori et al. 1972 e Shamsunder e Sparrow et al. 1975 apresentaram uma formulação mais completa onde a função de temperatura é determinada de modo que o conteúdo de calor total coincida com o calor latente L .

O método de entalpia, segundo Voller et al. 1987, tem vantagem no fato de que não é necessário um tratamento explícito da condição da interface sólido líquido. O avanço da frente de solidificação pode ser obtido com o uso de um termo fonte para o calor envolvido. Além disso esse método pode ser aplicado com o uso de malha fixa. Tal método é discutido por Odone et al. 2013 e comparado com os resultados obtidos por Voller et al. 1990.

Conforme abordado pelo material técnico do software ANSYS Fluent Theory Guide, o processo de solidificação baseia-se na formulação de entalpia para identificar a zona de transição líquido-sólido. Tal zona é descrita como uma zona porosa determinada em função da fração líquida. Outros termos são acrescentados para descrever os demais fenômenos envolvidos como por exemplo as equações de momento devido à necessidade de avaliar a queda de pressão causada pela presença de material sólido e fatores de dissipação adicionados às equações de turbulência para descrever as transições para as regiões sólidas.

A técnica de entalpia porosidade proposta por Voller et al. 1987 é usada pelo ANSYS Fluent para modelar o processo de solidificação. Nesta técnica, a interface de fusão não é controlada explicitamente. Em vez disso, uma quantidade denominada fração líquida, que indica a fração do volume celular que está na forma líquida, é associada a cada elemento

no domínio. A fração líquida é calculada a cada iteração, com base em um balanço de entalpia. A “mushy zone” é uma região na qual a fração líquida está entre 0 (totalmente sólido) e 1 (totalmente líquido). Essa região é modelada como um “pseudo” meio poroso no qual a porosidade diminui de 1 para 0 à medida que o material solidifica. Quando o material se solidifica completamente numa célula, a porosidade torna-se zero e, portanto, as velocidades tornam-se zero (ANSYS Fluent Theory Guide).

3. EQUAÇÕES DE GOVERNO

3.1. Conservação da massa

Para um caso 3D temos que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

Em que u, v, w são as velocidades nas direções x, y, z respectivamente.

3.2. Conservação de momento

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \vec{V} \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho u) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} u) - \nabla \cdot (\mu \nabla u) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + S_u \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho v) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} v) - \nabla \cdot (\mu \nabla v) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + S_v \end{aligned} \quad (3)$$

Onde p é a pressão, ρ é a Densidade, μ a Viscosidade da fase líquida, S_u e S_v são os termos fonte. A solução para a temperatura é essencialmente uma iteração entre a equação de energia e a equação de fração líquida. Segundo ANSYS Fluent Theory Guide o método sugerido por Voller e Swaminathan et al. 1991 é usado para atualizar a fração líquida. Para metais puros, onde Tlíquido e Tsólido são iguais, usa-se um método baseado em calor específico, dado por Voller et al. 1987.

3.3. Equação de Energia

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \vec{V} h) - \nabla \cdot (\alpha \nabla h) = S_h \quad (4)$$

Tal que α é a difusividade térmica e pode ser escrita como:

$$\alpha = \frac{K}{c} \quad (5)$$

Onde c corresponde ao calor específico e K é a permeabilidade do meio

3.4. Termos Fonte

No método da entalpia, o calor latente é utilizado na equação da energia atribuído de acordo com a temperatura em cada elemento. Ao ocorrer a mudança de fase o calor latente é ajustado conforme ocorre liberação ou absorção de calor latente. Esta operação se dá através do termo fonte na equação de energia, conforme Odone et al. 2013 e também abordado por Inácio et al. 2017.

A entalpia do material é calculada como a soma da entalpia sensível h , e do calor latente ΔH .

$$H = h + \Delta H \quad (6)$$

A entalpia sensível é dada por:

$$h = \int_{T_{ref}}^T c_p dT = c(T - T_{ref}) \quad (7)$$

Onde T_{ref} é a Temperatura de referência e C_p corresponde ao calor específico de referência, constante.

Conforme abordado em ANSYS Fluent Theory Guide, o calor latente total é definido como uma função da temperatura por $\Delta H = f(T)$, válido para $0 < \Delta H < L$ sendo L o calor Latente de fusão. Combinando-se as equações 4 e 7, temos uma expressão para o termo fonte tal que:

$$S_h = -\frac{\partial}{\partial t}(\rho \Delta H) - \nabla \cdot (\rho \vec{V} \Delta H) \quad (8)$$

Sabe-se que o calor total latente tem valor igual a 0 para o material sólido quando a temperatura do material é $T = T_f$ sendo T_f a temperatura de fusão. O calor latente total assume um valor igual a L quando o material está na fase líquida e na temperatura de fusão T_f . Para estabelecer a fase da zona porosa (mushy zone) a fração líquida f_L é definida a partir do calor latente total de tal forma que:

$$\Delta H = L \times f_L \quad (9)$$

Tal que f_L corresponde a fração líquida da célula, ou seja, qual a quantidade do elemento está no estado líquido. Portanto tem-se que:

$$f_L = \begin{cases} 0, & \text{se } T < T_s \text{ (sólido)} \\ \frac{T - T_s}{T_l - T_s}, & \text{se } T_s \leq T \leq T_l \text{ (zona mushy)} \\ 1, & \text{se } T > T_l \text{ (líquido)} \end{cases} \quad (10)$$

A região onde para $0 < \Delta H < L$ é definida como interface sólido / líquido. Usando a equação 9 pode-se obter a fração líquida a partir da distribuição de temperatura, de modo que:

$$f_L = \frac{\Delta H}{L} \quad (11)$$

O valor de f_L permite definir a zona mushy, que pode ser entendida com um meio pseudo poroso, quando $0 < \Delta H < L$. Tal modelamento é feito a partir da definição de termos fonte para as equações de movimento baseados na lei de Darcy para escoamento em meios porosos, conforme Odone et al. 2014.

$$\vec{V} = -\frac{K}{\mu} \nabla p \quad (12)$$

Onde K é a permeabilidade do meio, que por sua vez será relacionado como função da porosidade f_L μ é a viscosidade do fluido e ∇p representa a queda de pressão do fluido ao passar pelo meio poroso. A medida que a porosidade diminui, a permeabilidade K também diminui e, portanto, as velocidades no meio são reduzidas até um valor zero. Tal efeito é relacionado ao momento em que a solidificação acontece. A equação de Carman-kozeny descrita por:

$$\nabla p = -C \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3} \vec{V} \quad (13)$$

Tal que C corresponde a uma constante de correção para cada aplicação, permite obter o termo fonte de forma que a zona mushy possa ser relacionada a um meio poroso. Dessa forma os termos fontes de quantidade de movimento podem ser escritos por:

$$S_u = A u = -C \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + q} u \quad (14)$$

$$S_u = A u + S_b = -C \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + q} u + S_b \quad (15)$$

Onde S_b é chamado de termo flutuabilidade e A pode ser definido como:

$$A = -C \frac{(1 - f_L)^2}{f_L^3 + q} \quad (16)$$

Conforme abordado em ANSYS Fluent Theory Guide, “q” corresponde a um valor pequeno para evitar divisão por zero. O valor de A varia de acordo com o resultado de fL . Sendo igual a 0 para o elemento completamente sólido. No processo de simulação transiente, para regiões líquidas, os termos fonte “A” citados na equação 16 são nulos e à medida que a zona mushy avança, os termos fonte passam a influenciar o campo de velocidades. O termo S_b mostrado na equação de momento é um termo utilizado para relacionar a convecção natural. Utilizando uma abordagem de Boussinesq como a densidade constante, o termo S_b pode ser escrito como:

$$S_b = \frac{\rho g \beta (h - h_{ref})}{c} \quad (17)$$

Onde β é o coeficiente de expansão térmica e h_{ref} é o valor de referência para o calor sensível e g é a aceleração da gravidade. No caso de estudo, optou-se por utilizar apenas os modelos de energia, com uso do modelo de solidificação que é obtido ao adicionar termos fonte nas equações de conservação.

4. CASO DE ESTUDO

Optou-se por desenvolver o caso de estudo no qual foi fabricado um cadinho de aço SAE 1045, cuja geometria segue apresentada na figura 3, c. Optou-se por aquecer o material a uma temperatura de 780°C. Para monitorar a temperatura do alumínio e do cadinho foram utilizados cinco termopares do tipo K, os mesmos podem ser vistos na Figura 3, a. Posicionaram-se três termopares ao longo da altura e outros dois termopares foram instalados próximo a região de interface do alumínio/cadinho (figura 3, b), sendo um posicionado diretamente em contato com o líquido e o outro na parede, logo abaixo da superfície interna do cadinho. O vazamento do alumínio foi realizado manualmente e os resultados obtidos no ensaio serão mostrados em conjunto com os resultados da simulação.

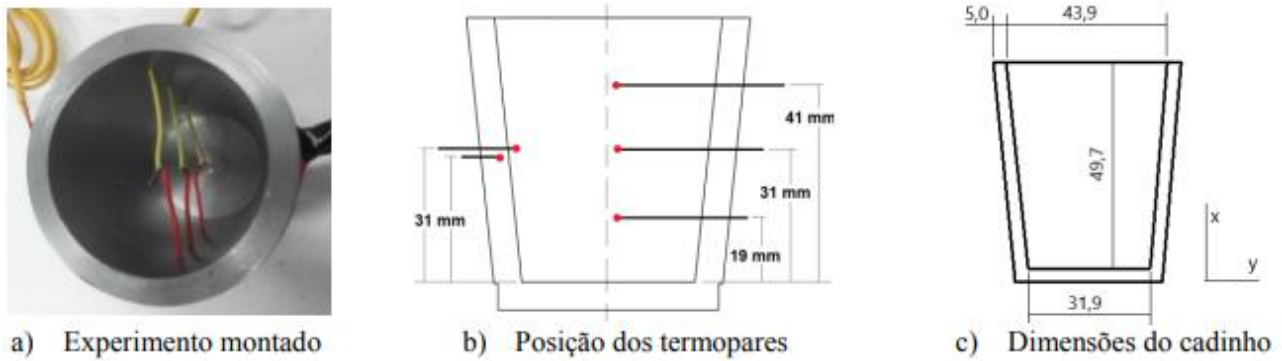


Figura 3 - Termopares utilizados no ensaio.

5. PROPRIEDADE TÉRMICAS DO ALUMÍNIO PURO

Devido ao fato de que nesta simulação a variação de temperatura ser elevada [>100 K], obtiveram-se valores das propriedades térmicas do alumínio puro para uma faixa de temperatura de 300 K até 1400 K. Na figura 4 são mostradas as curvas utilizadas neste trabalho para a condutividade térmica (k), calor específico (cp), densidade (ρ), calor latente (L). Para a realização das avaliações utilizaram-se propriedades do alumínio puro extraídas de literaturas (Ruel, Sayavur e Raymond, 2002; Juan J e Peter, 2013; Matthias; Thomas; Alexander; Kirmanj e Gernot 2017; NIST 2017; Brookhaven 2017).

Como pode ser visto na figura 4, além da variação das propriedades na fase sólida, há uma acentuada transição das propriedades na mudança de fase. Sendo assim modelou-se o valor para cada uma das propriedades utilizando três expressões, a primeira para o estado sólido, a segunda para a região de transição e a terceira para o estado líquido. Em todas as expressões utilizaram-se polinômios de até 2° grau com a forma mostrada na equação 18.

$$F(x) = c_1 x^2 + c_2 x + c_3 \quad (18)$$

Onde, c_1 , c_2 , c_3 são constantes determinadas utilizando o método de mínimos quadrados. Estas constantes são apresentadas na Tabela 1

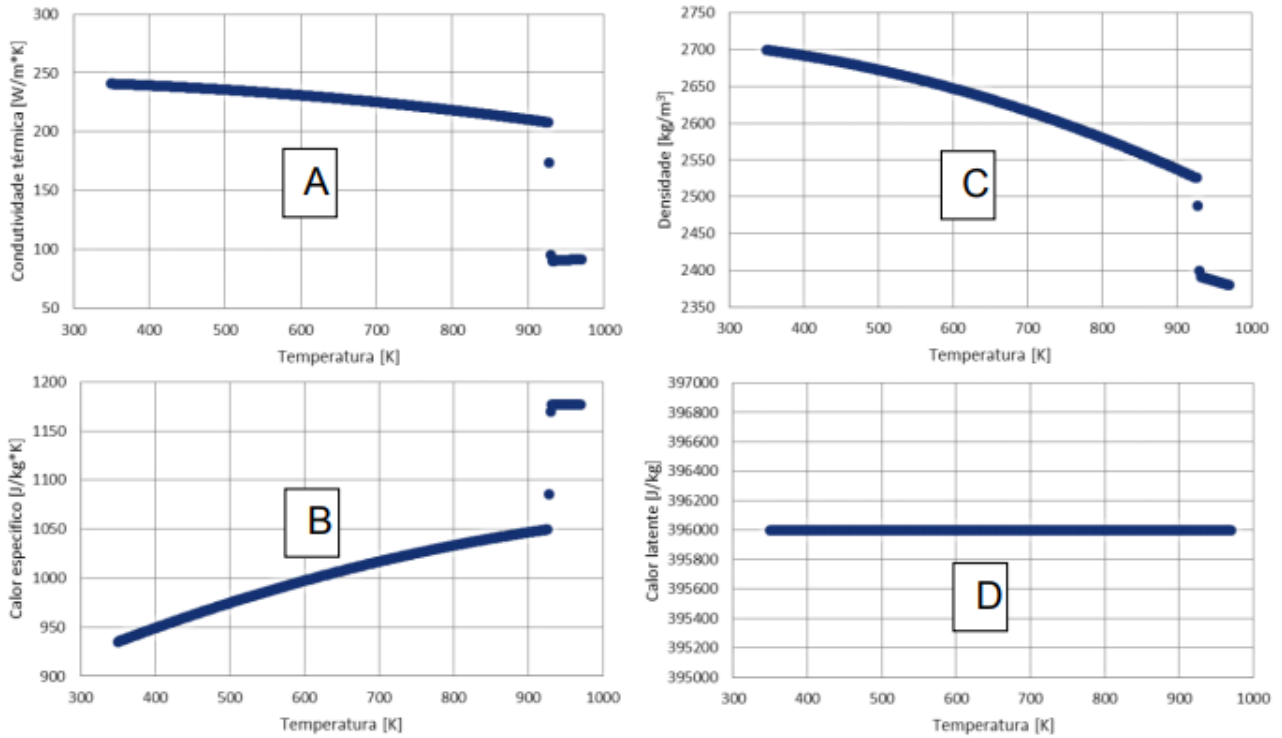


Figura 4 - Propriedade térmicas para o alumínio puro - condutividade térmica (A), calor específico (B), densidade (C), calor latente (D).

Tabela 1 - Constantes utilizadas para modelar as propriedades térmicas.

Propriedade	c_1	c_2	c_3
k (sólido)	$-5.41 \cdot 10^{-5}$	$1.25 \cdot 10^{-2}$	2429.8
k (transição)	0	-39.25	3659.9
k (líquido)	$-1.00 \cdot 10^{-5}$	$5.46 \cdot 10^{-2}$	48.14
c_p (sólido)	$-1.53 \cdot 10^{-4}$	$3.95 \cdot 10^{-1}$	815.76
c_p (transição)	0	42.34	-38208.0
c_p (líquido)	0	0	1176.8
ρ (sólido)	$-2.86 \cdot 10^{-4}$	$6.28 \cdot 10^{-2}$	2712.6
ρ (transição)	0	$6.28 \cdot 10^{-2}$	43655.0
ρ (líquido)	0	-44.36	2670.0
L	0	0	396000

6. PARÂMETROS EXPERIMENTAIS NECESSÁRIOS PARA A SIMULAÇÃO

Para a realização da simulação fez-se necessário a obtenção de parâmetros como: resistência de contato entre o alumínio e o cadinho, o coeficiente convectivo na superfície do cadinho, a temperatura inicial do alumínio e também a temperatura inicial do cadinho. Para a determinação do coeficiente convectivo na superfície do cadinho considerou-se que todo o calor extraído do alumínio era transferido para o cadinho de aço, e a partir do cadinho de aço para o ambiente externo. Para cada intervalo de tempo da leitura (0,04 s para o experimento), relacionou-se a variação da temperatura do alumínio com o valor do coeficiente convectivo superficial do cadinho. Para tal, primeiramente determinou-se a quantidade de calor retirada do alumínio entre duas medições consecutivas utilizando a equação 19.

$$Q = mc_p \Delta T_t \quad (19)$$

Onde, Q é a quantidade de calor retirado do alumínio em J, m é a massa de alumínio em kg, c_p é o calor específico do alumínio em J/kg.K e ΔT_t é a variação de temperatura do corpo no intervalo de tempo em K.

A etapa seguinte é determinar a taxa de transferência média de calor do cadinho para o ar externo para cada intervalo de tempo, este valor pode ser obtido através da seguinte equação 20.

$$\dot{Q} = hA_{sup} \Delta T_{sup} \quad (20)$$

Onde, $\dot{Q}$ é a taxa de transferência de calor em W, h é o coeficiente convectivo em W/m²K, A_{sup} é a área superficial de troca de calor em m² e ΔT_{sup} é a diferença entre a temperatura superficial e a temperatura do ar em K.

Como a taxa de transferência de calor é a quantidade de calor trocada por unidade de tempo e deseja-se obter um valor médio do coeficiente convectivo, é possível relacionar as duas equações anteriores utilizando a seguinte expressão:

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (21)$$

onde, Δt é a variação de tempo em segundos. Substituindo as expressões da quantidade de calor retirada do alumínio (Eq.19) e da taxa da troca de calor por convecção (Eq. 20) na equação 21 e isolando o coeficiente convectivo, é possível então determinar uma expressão para o mesmo. Esta relação é apresentada na figura 4 onde são apresentados os valores de coeficiente convectivo ao longo do tempo, observados no experimento.

$$\bar{h} = \frac{mc_p \Delta T_t}{A_{sup} \Delta T_{sup} \Delta t} \quad (22)$$

Aplicando a equação 22 em cada ponto lido experimentalmente é possível obter uma variação do coeficiente convectivo ao longo de todo o experimento.

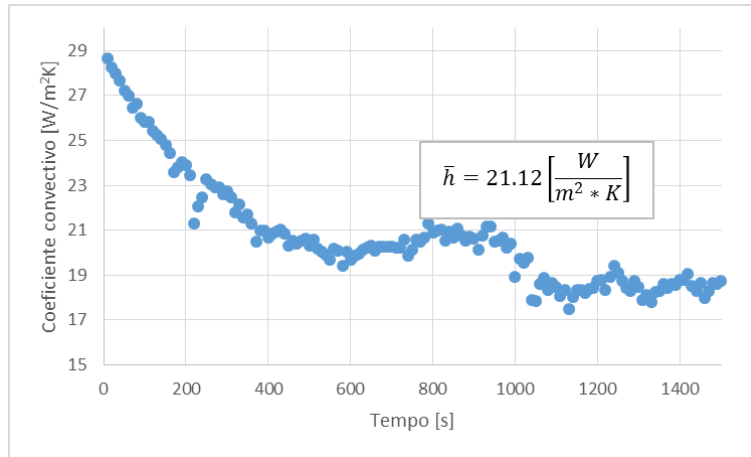


Figura 5 – Coeficiente convectivo calculado para o experimento ao longo do tempo.

Para determinar o valor da resistência de contato, utilizou-se uma estratégia semelhante, porém neste caso, ao invés de utilizar a equação da taxa de transferência de calor por convecção, utilizou-se a equação da taxa de transferência de calor por condução em uma região de contato. Esta equação é apresentada a seguir:

$$\dot{Q} = \frac{A_{cont} * \Delta T_{cont}}{R_{cont}} \quad (23)$$

Onde, A_{cont} é a área de contato em m^2 , ΔT_{cont} é a diferença de temperatura entre os dois corpos em contato em K, e R_{cont} é a resistência de contato em m^2K/W . Assim, de forma análoga ao feito anteriormente, é possível igualar as expressões da taxa de transferência de calor e da quantidade de calor retirada do alumínio isolando agora a resistência de contato, assim a expressão pode ser escrita como:

$$R_{cont} = \frac{A_{cont} * \Delta T_{cont} * \Delta t}{m * c_p * \Delta T_t} \quad (24)$$

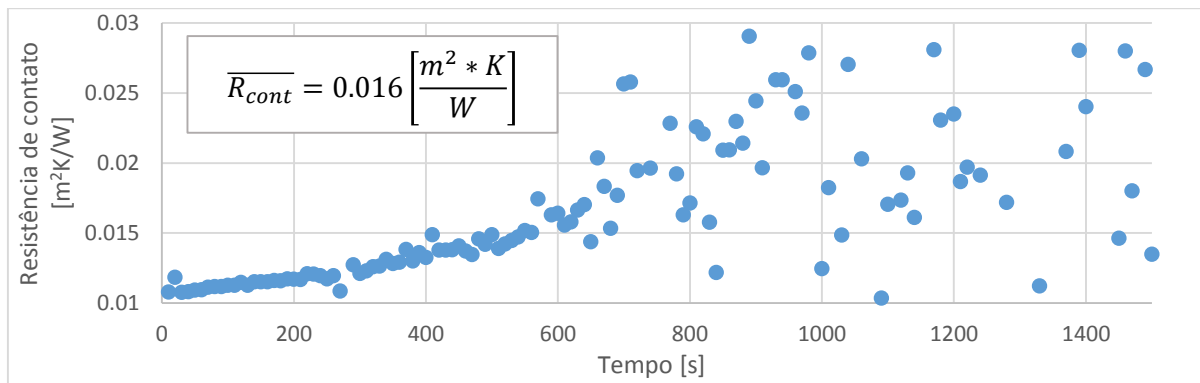


Figura 6 - Resistência de contato ao longo do tempo.

Como é possível notar na figura 5, o valor da resistência de contato entre o alumínio e o cadinho apresenta variações muito grandes, principalmente após um tempo de 400 segundos. Tal fato pode ser atribuído as variações de contato devido a contração do metal. Apesar das variações vistas nos valores do coeficiente convectivo e da resistência de contato, optou-se por utilizar os valores médios apresentados nas figuras 5 e 6 para a análise numérica. A temperatura inicial do alumínio considerada como dado de entrada na simulação foi a maior temperatura medida pelos termopares, sendo este o valor de 680 °C, ou 953.15 K.

Obteve-se o valor da temperatura inicial do cadinho, T_{ini} , utilizando-se a média ponderada no tempo para a temperatura do cadinho entre o momento que foi iniciada a aquisição de dados e o momento em que foi iniciado o vazamento do alumínio. Tal método mostrou um valor de T_{ini} igual a 51,3 °C.

7. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

No emprego do software, optou-se por utilizar apenas os modelos de energia com uso do modelo de solidificação que é obtido ao adicionar termos fonte nas equações de conservação, conforme já abordado nos itens anteriores. Utilizou-se um método implícito para simular o regime transiente com malha fixa. As derivadas no tempo foram aproximadas usando um esquema de primeira ordem e as derivadas espaciais foram aproximadas usando um esquema de *upwind* de primeira ordem.

7.1. Geometria

Para realizar a simulação fez-se necessário modelar o cadinho de aço e também o volume que será ocupado pelo alumínio líquido. Esta geometria é apresentada na figura 7.

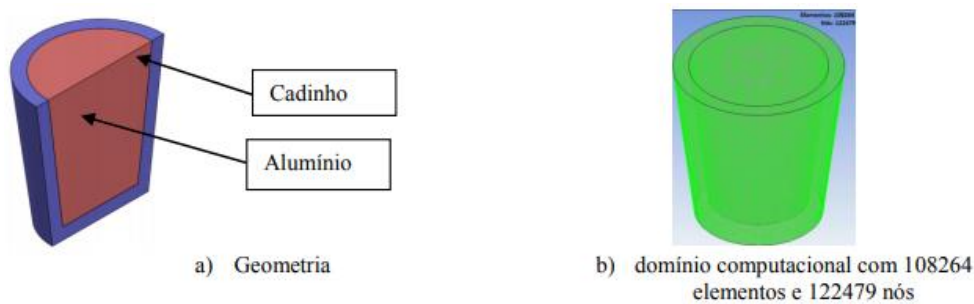


Figura 7 - Geometria da simulação.

7.2. Condições de contorno

Na região superior do alumínio, exposta ao ar, optou-se por utilizar a condição de contorno de fluxo de calor igual a zero (adiabático).

$$-k \frac{dT}{dx} \Big|_{x=0} = 0 \quad (25)$$

O posicionamento de cada uma das condições de contorno para o alumínio é apresentado na figura 8.

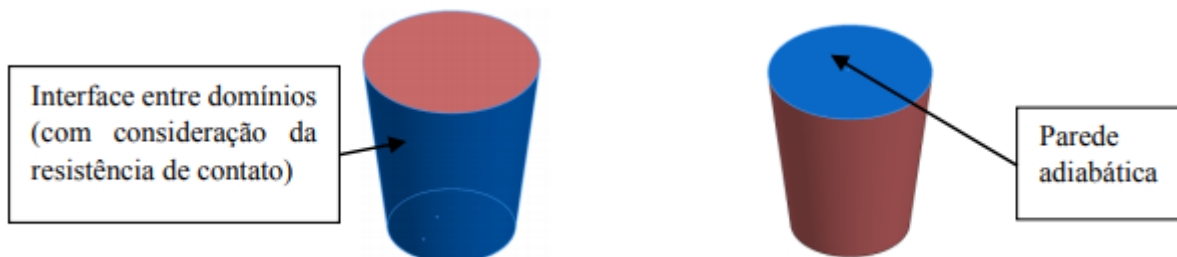


Figura 8 - Condições de contorno.

Para o cadinho de aço, as condições de contorno empregadas são apresentadas na figura 9. Para a formulação do problema considerou-se adicionalmente que o molde é preenchido instantaneamente e nenhuma convecção está presente no metal líquido.

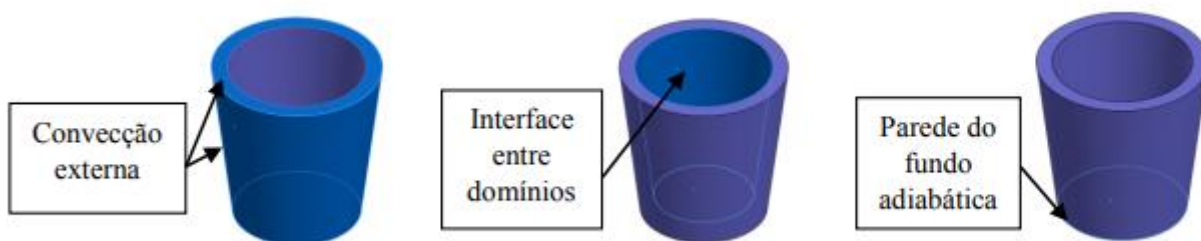


Figura 9 - Condições de contorno do cadinho.

7.3. Resultados

Na figura 9 são apresentadas a curva experimental de temperatura do alumínio para o termopar do central. Como pode-se observar, após a solidificação a queda inicial de temperatura na simulação foi mais acentuada que a queda de temperatura no ensaio, sendo que após 200 segundos, tanto a curva numérica como a curva experimental permaneceram bastante similares. Como o tempo de solidificação é muito curto, a figura 10 não possibilita a identificação entre a curva experimental e numérica, para isto, na figura 11 são apresentadas as curvas de temperatura do alumínio para os primeiros 40 segundos onde é possível observar uma boa concordância entre o resfriamento do alumínio na fase líquida e também uma concordância entre os tempos de solidificação (tempo em que a temperatura permanece constante), tanto no experimento quanto na simulação, o tempo de solidificação ficou próximo à 25 s.

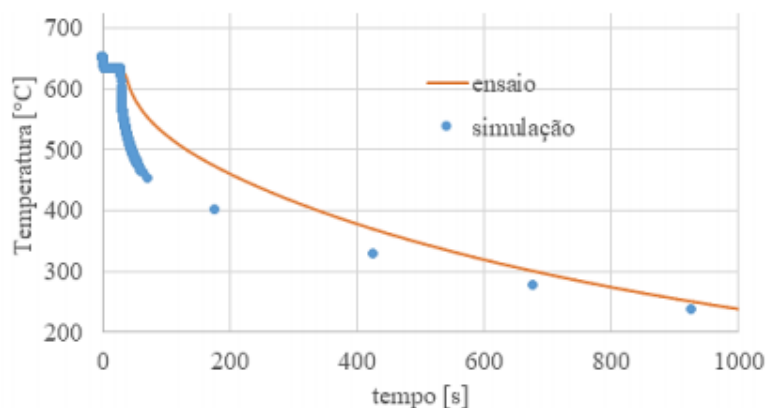


Figura 10 - Curva de temperatura do alumínio ao longo do tempo.

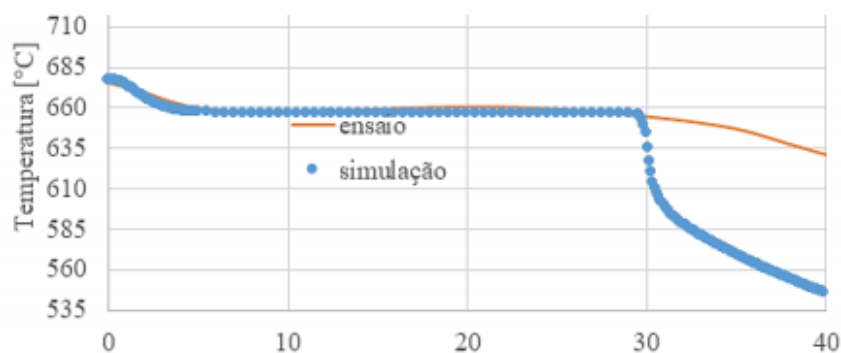


Figura 11 - Curva de temperatura do alumínio durante o processo de solidificação.

8. CONCLUSÕES

O método da entalpia-porosidade foi avaliado por meio do pacote comercial ANSYS Fluent com boa concordância de resultados. Cabe ressaltar que alguns erros observados na comparação numérica / experimental podem ser estudados de modo a aumentar a acurácia da análise.

9. REFERÊNCIAS

ANSYS Fluent Theory Guide, 2015

- BESKOW, Arthur Bortolin. “Estudo da solidificação unidirecional ascendente para obtenção de estruturas colunares grosseiras”. Dissertação de Mestrado - Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2008
- Brookhaven National Laboratory, “Banco de dados A. Aluminum B. 1 D. E”, disponível em < <https://www.bnl.gov/magnets/staff/gupta/cryogenic-data-handbook/Section14.pdf>> (acessado em 25/11/2017)
- Chvorinov, Nicolas. "Theorie der Erstarrung von Gussstücken" [Theory of the Solidification of Castings]. Giesserei (in German) – 1940
- Eyres, N. R., Hartree, D. R., Ingham, J., Jackson, R., Sat-jam, R. J. & Wagstaff, J. B. (1946). “The calculation of variable heat flow in solids”. Phil. Sot. Roy. Sot. Lond. A, 240,1-57.
- Garcia, A. “Solidificação: Fundamentos e aplicações”. 2. Ed. Campinas: Unicamp, 2007
- Inácio, G. R., Beppler, D. L; Zdanski, P.S B.; Junior, M, V. “Influência da Disposição de Canais de Refrigeração de Moldes de Injeção sobre o Avanço de Fronteira de Solidificação de Polímeros”. 9º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Joinville, 2017. Juan J. Valencia; Peter N. Qusted, 2013, “Thermophysical Properties” , ASM Handbook Committee, Volume 15: Casting, p 468-481
- Katayama, K., Hattori, K., Okada, S. & Otake, S. (1972).” Numerical calculations for nonsteady heat conduction with temperature-dependent thermal properties”, 38,574-80.
- L Matthias; L. Thomas; S. Alexander; A. Kirmanj; Pottlacher. Gernot .“Thermophysical Properties of Liquid Aluminum “. Metallurgical and Materials Transactions A, June 2017, Volume 48, Issue 6, pg 3036–3045.
- NIST Livro de Química na Web, “Banco de dados sobre alumínio”, Disponível em: < <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7429905&Mask=2>> acessado em 25/11/2017
- N. Shamsunder and E. Sparrow, 1975, “ASME Journal of heat transfer” 97, 333
- Odone, M.W.N, Toledo, E., Barra, L.P, Da Silva, C.E., “Um estudo numérico sobre Obras Citadas”, 2013
- Rocha. O.F.L., “Análise teórico-experimental da transição celular/dentrítica e da evolução da morfologia dentrítica na solidificação unidirecional em condições de fluxo de calor transitório”. 2003. 200 f. tese de Doutorado – Universidade Estadual de Campinas, 2003
- Ruel A. O.; Sayavur I. B.; Raymond E. T. “Thermophysical properties of A201, A319, and A356 aluminium casting alloys.” High Pressures, 2002, volume 34, pg 401 - 409.
- Santos, Rezende Gomes dos.”Transformações de fases em Materiais metálicos”. São Paulo: Unicamp, 2006.
- Scheil, E., Z. Metallk., 1942, 34:70,
- Toledo, Rafael Cardoso, “Estudo da solidificação de ligas metálicas eutéticas em ambiente de microgravidade”, Tese de Espaciais Doutorado - Instituto Nacional de Pesquisas
- Voller, V.R. “Fast implicit finite-difference method for the analysis of phase change problems.” Numérical Heat transfer: Part B, Oxford, 1990.
- Voller, V.R., Prakash, C. “A fixed grid numerical modelling methodology for convections-diffusion mushy region phase-change problems”, Internation Journal of Heat and Mass Tranfer, 1987
- Voller V. R. and C. R. Swaminathan C. R. “Generalized Source-Based Method for Solidification Phase Change”. Numer. Heat Transfer B, 19(2):175-189, 1991.
- Katayama, K., Hattori, K., Okada, S. & Otake, S. (1972). “Numerical calculations for nonsteady heat conduction with temperature-dependent thermal properties”, 38,574-80.

10. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

NUMERICAL AND EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE SOLIDIFICATION PROCESS OF PURE ALUMINUM

Thiago Schwinden Leal, thiagol@weg.net^{1,2}

Paulo Sérgio Berving Zdanski, paulo.zdanski@udesc.br¹

Fernando André Lindroth Dauner, dauner@weg.net^{1,2}

¹ WEG Electrical Equipments S.A – Waldemar Grubba Ave, 3000 - Jaraguá do Sul - SC, 89256-900

² University of the State of Santa Catarina - UDESC, University Campus Prof. Avelino Marcante - Paulo Malschitzki, street 200 – Industrial Area North, Joinville - SC, 89219-710

Abstract. *This work brings a numerical and experimental analysis of the solidification process of pure aluminum using finite volumes using the ANSYS Fluent software. The energy equation is solved using the fixed-meshed enthalpy method. The casting process of the liquid metal occurred in a steel mold followed by a cooling under atmospheric condition. Finally the results of the numerical simulation are compared with the experimental results.*

Keywords: *Solidification, Numerical Simulations, Aluminium Casting*