

ESTUDO DA SIMULAÇÃO NUMÉRICA APLICADA EM PEÇA FUNDIDA OBTIDA DE FORMA EMPÍRICA

Gustavo Trevisan Sartori

Universidade Federal de Santa Maria – CT – DEM
Campus Universitário Camobi 97105-900

Aleir Antonio Fontana De Paris

Universidade Federal de Santa Maria – CT – DEM
Campus Universitário Camobi 97105-900
aparis@ct.ufsm.br

Resumo. Para realizar um estudo comparativo foi empregada uma peça em ferro fundido nodular de fabricação seriada, obtida de forma “prática”, e recalculada de forma teórica aplicando a regra de Chvorinov para determinar o sistema de massalotagem. Em cima dos cálculos efetuados foi utilizado um software de simulação de solidificação. Os resultados mostraram uma redução do número de massalotes, diminuindo com isto o retorno de material e também o consumo de energia elétrica nos fornos. A aplicação de software de solidificação mostrou ser uma ferramenta importante no projeto de peças para fundição diminuindo o tempo de ajustes práticos e também economia de material permitindo peças com custos menores.

Palavras-Chave: fundição, ferro nodular, simulação numérica.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de massalotes nas fundições é um procedimento rotineiro que permite a obtenção de peças sem defeitos pelo suprimento de metal para preencher a contração da peça até o final de sua solidificação. Para produzir uma peça sem o massalote (ou reservatório de metal líquido que compensa a contração) necessita satisfazer duas condições independentes. Primeiro é o tamanho do massalote e o segundo é o posicionamento do massalote, que precisa ser determinado levando em conta a resistência ao enchimento da liga fundida Darwish (1995).

Após vaziar o metal líquido, uma camada externa em contato com o molde resfria a uma temperatura constante, e as bolhas de ar que entraram junto com a massa líquida ou gerado pelo contato com o molde, ficando aprisionadas. Isto resulta em uma peça porosa. Esta condição pode ser evitada pelo controle da solidificação e gradiente térmicos de modo que os vazios são eliminados ou produzidos fora da peça no massalote Chiang e Tsaj (1990), Lee et al (1990).

A escolha do posicionamento do massalote deve ser feita de modo que o metal comece a solidificar de um local mais distante da peça em direção ao massalote (solidificação dirigida) que obrigatoriamente será a última parte a solidificar. Esta técnica é bastante empregada, apesar de aumentar os custos da fundição, mas muitas vezes é o único meio de se obter peças sem defeitos Metevelis (1989). A relação do tamanho do massalote para a peça, significando o rendimento do processo, está sendo pesquisado visando reduzir ao máximo o volume do massalote ou massalotes empregados.

Um número bastante grande de fundições, principalmente as de menor tamanho, utilizam o método empírico de tentativas baseando-se na experiência dos fundidores mais antigos.

Com o surgimento de computadores velozes e potentes, desenvolveram-se softwares de simulação de solidificação visando diminuir o tempo de tentativas e erros utilizados na prática. Com estes programas, é possível o projeto dos massalotes e canais de alimentação de uma forma bastante aproximada da situação ideal, diminuindo com isto o tempo do projeto e adaptação até a fabricação do molde Creese (1987), Lee e Smith (1987), Hill (1991).

Os defeitos encontrados em peças são 90% devido a erros de projeto e somente 10% problemas de fabricação. O custo calculado de mudança no projeto é 10 vezes maior no próximo passo do projeto e processo de manufatura. Desta forma o processo de simulação e análise da fundição é uma ferramenta altamente produtiva, Louvo (1997).

Algumas metodologias foram e estão sendo empregadas sob a forma de modelos matemáticos para uma aproximação do sistema de massalotagem de peças. O modelo mais antigo e mais empregado é a regra de Chvorinov (1940), que determina o tempo de solidificação de um determinado volume de metal em função da área de retirada de calor, e das características físico-químicas do metal e molde:

$$t_s = C \left(\frac{V}{A} \right)^2 \quad (1)$$

onde a constante C é definida como:

$$C = \frac{\alpha_m^2 [\Delta H_F + C_M(T_v - T_f)]^2}{4k^2(T_f - T_0)^2} \quad (2)$$

t_s - tempo de solidificação

C_M - calor específico do metal no estado líquido

V - volume da peça na temperatura de fusão

T_f - temperatura de fusão

A - área da peça

T_v - temperatura de vazamento

α - difusividade térmica do molde = $k/\rho.c$

T_0 - temperatura ambiente

k - condutividade térmica do molde

ΔH_F - calor latente do metal

ρ - densidade do molde

ρ_M - densidade do metal

c - calor específico do molde

Este tempo de solidificação é o mesmo para todo metal líquido dentro do molde, isto é: massalote + volume da peça. Como se trata de um mesmo metal pode-se escrever:

$$t_{s,\text{massalote}} = t_{s,\text{peça}}$$

$$C \left(\frac{V}{A} \right)_{\text{massalote}}^2 = C \left(\frac{V}{A} \right)_{\text{peça}}^2 \quad (3)$$

como a constante C é a mesma, já que se trata do mesmo metal, Internet (1999):

$$\left(\frac{V}{A} \right)_{\text{massalote}}^2 = \left(\frac{V}{A} \right)_{\text{peça}}^2 \quad (4)$$

Assim, chamando V/A de “módulo de resfriamento”, pode-se escrever:

$$M_m = M_p \quad (5)$$

onde M_m -módulo do massalote
 M_p - módulo da peça

Considerando que o massalote é a última porção de metal que deve solidificar, para poder suprir a peça durante o estágio de solidificação, sua relação entre volume e área de resfriamento deverá ser superior ao módulo da peça:

$$M_m > M_p \quad (6)$$

O objetivo deste trabalho é fazer uma comparação entre um sistema empírico de determinação de massalote, com o uso de um método de cálculo e com software de simulação de solidificação.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo foi efetuado em um cubo de roda para caminhão, Fig. (1) (as dimensões não foram cotadas, já que se trata de uma peça industrial, e portanto confidencial). O material do qual o cubo é fabricado é ferro fundido nodular SAE D4512. O metal foi fundido em forno de indução e a temperatura de vazamento foi $\sim 1450^\circ\text{C}$. O sistema de moldagem foi em areia verde.

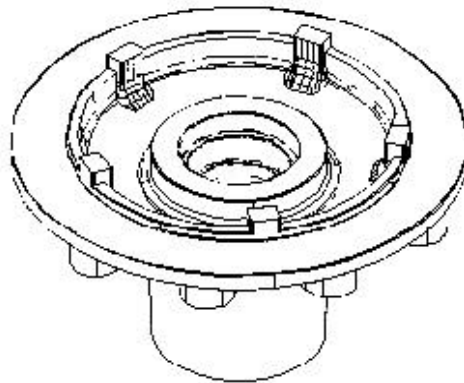


Figura 1. Cubo de roda de caminhão.

O sistema prático (significando como é feito atualmente) é composto de dois massalotes cegos, um lateral e outro direto, sendo que neste último foi utilizada uma luva exotérmica. Como a alimentação do molde é feita lateralmente, ver Fig. (2), através do massalote, o segundo massalote fica com metal mais frio a medida que o metal penetra a cavidade, tornando-se necessário o uso de luva exotérmica.

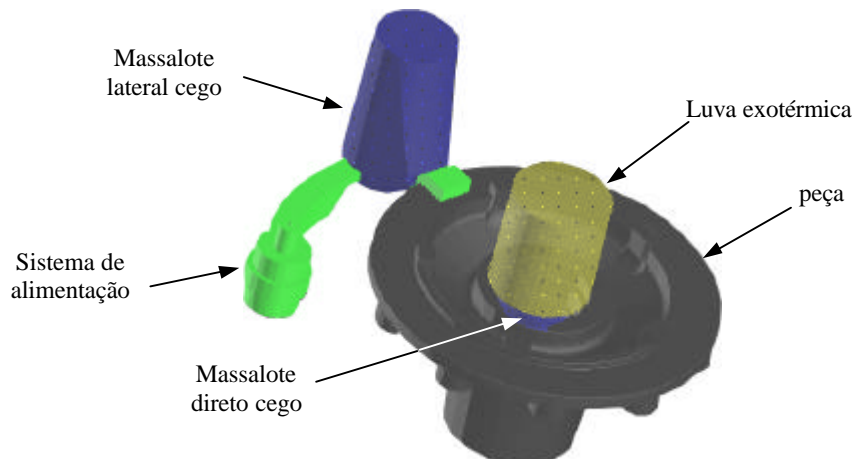


Figura 2. Sistema de vazamento e massalotes utilizados de forma prática.

O software utilizado para a simulação de solidificação foi o SolidCast 2000®(2000).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente foi feita uma simulação de solidificação da peça projetada de forma empírica, Fig.(3). Pode-se verificar pelo gradiente térmico que o massalote com luva exotérmica é a última porção de metal a solidificar.

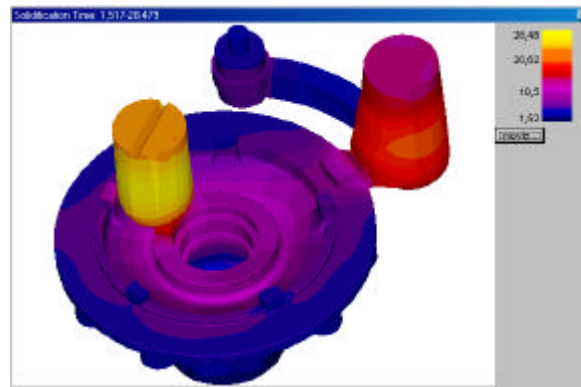


Figura 3. Simulação da peça em seu projeto empírico com dois massalotes.

O volume do metal da peça calculado foi de $4020,03 \text{ cm}^3$ e a área de retirada de calor $4966,61 \text{ cm}^2$. Aplicando a regra de Chvorinov determinou-se o módulo da peça:

$$M_p = \frac{V}{A} = \frac{4020,03}{4966,61} = 0,8 \text{ cm} \quad (7)$$

Pelas considerações anteriores, o módulo do massalote deverá ser superior ao módulo da peça. Para conseguir este resultado, se utiliza um coeficiente de proporcionalidade k que permite de forma arbitrária garantir que o massalote solidifique por último, então:

$$M_m > k.M_p \quad (8)$$

o coeficiente deve estar entre $1,1 < k < 1,3$, Facy e Pompidou (1983), Jeancolas (1961), Sanz et al (1971), assim:

$$M_m > 1,2.M_p \quad (9)$$

$$M_m > 0,96 \text{ cm} \quad (10)$$

Considerando que o volume do massalote, V_m , pode ser relacionado à contração do metal a ser fundido, chega-se a seguinte relação:

$$V_m > k'.r.V_c \quad (11)$$

Onde:

k' - coeficiente de segurança (6 para massalotes simples), Jeancolas (1964).

r - contração do metal durante a solidificação.

V_c - volume da cavidade em função da densidade do metal no estado líquido até o sólido

A densidade do ferro no estado líquido é igual a 7,8 g/cm³ e no estado sólido 6,9 g/cm³:

$$V_c = V_p \frac{\tilde{a}_s}{\tilde{a}_l} = 4020,03 \frac{7,8}{6,9} = 4544,38 \text{ cm}^3 \quad (12)$$

então, $V_m > 6.0.03.4544,38 = 817,98 \text{ cm}^3$

Este seria o valor mínimo para o massalote considerando que não houvesse nenhuma retirada de calor. Na prática, o massalote também inicia a solidificação mas de forma lenta com relação à peça. Substituindo o valor do volume encontrado e aplicando no caso de um massalote cilíndrico, temos:

$$817,98 = \frac{\delta D^2}{4} H \quad (13)$$

Da revisão bibliográfica, a relação da altura do massalote para o seu diâmetro normalmente fica situada entre 0,5 e 2,5, Jeancolas (1961), e para outros acima de 2,5, Creese (1986).

Considerando $H_p = 2,5.D_p$, chega-se a seguinte expressão para as dimensões do massalote:

$$D = \sqrt[3]{\frac{817,98.4}{\delta.2,5}} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} D_p &\cong 7,5 \text{ cm} \\ H_p &\cong 18,75 \text{ cm} \end{aligned}$$

Aplicando a regra dos módulos para um massalote genérico de forma cilíndrica, tem-se:

$$\text{Volume} = \frac{\delta D^2}{4} H \quad (15)$$

$$\text{Área} = \frac{\delta D^2}{4} + \delta DH \quad (16)$$

Sem levar em conta a seção de ligação do massalote com a peça, já que não há gradiente térmico, tem-se:

$$M_m = \frac{2,5D_m}{11} \quad (17)$$

Como o diâmetro é 7,5 cm, obtemos um massalote com módulo 1,7 cm, que é maior do que o necessário, de 0,96 cm, para manter o metal mais tempo sem solidificar.

Aplicando a regra da “zona de ação”, distância coberta pela alimentação do massalote, Fig. (4), e considerando que o funcionamento é aproximadamente igual para o ferro fundido e aço, utilizou-se a relação desenvolvida por Heine (1982), e revisada por Carlson et al (2002), Ou et al (2002), chegando-se ao resultado de que um massalote é suficiente.

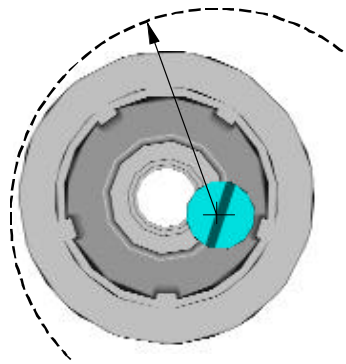


Figura 4. Vista superior da peça mostrando a zona de ação do massalote.

O volume de massalote calculado é ligeiramente inferior (menos de 2%) ao aplicado no exemplo prático, pois a luva utilizada é de dimensões padronizadas pelo fabricante. Retirando o massalote lateral e aplicando a simulação de solidificação na peça, verificou-se que um massalote é suficiente para evitar os rechupes de contração. A sequência da Fig. (5) mostra como a solidificação da peça se desenvolve no tempo, confirmando o cálculo anterior. A zona de maior concentração de calor é no massalote que desta forma se mantém líquido pra preencher a cavidade que compõe a peça.

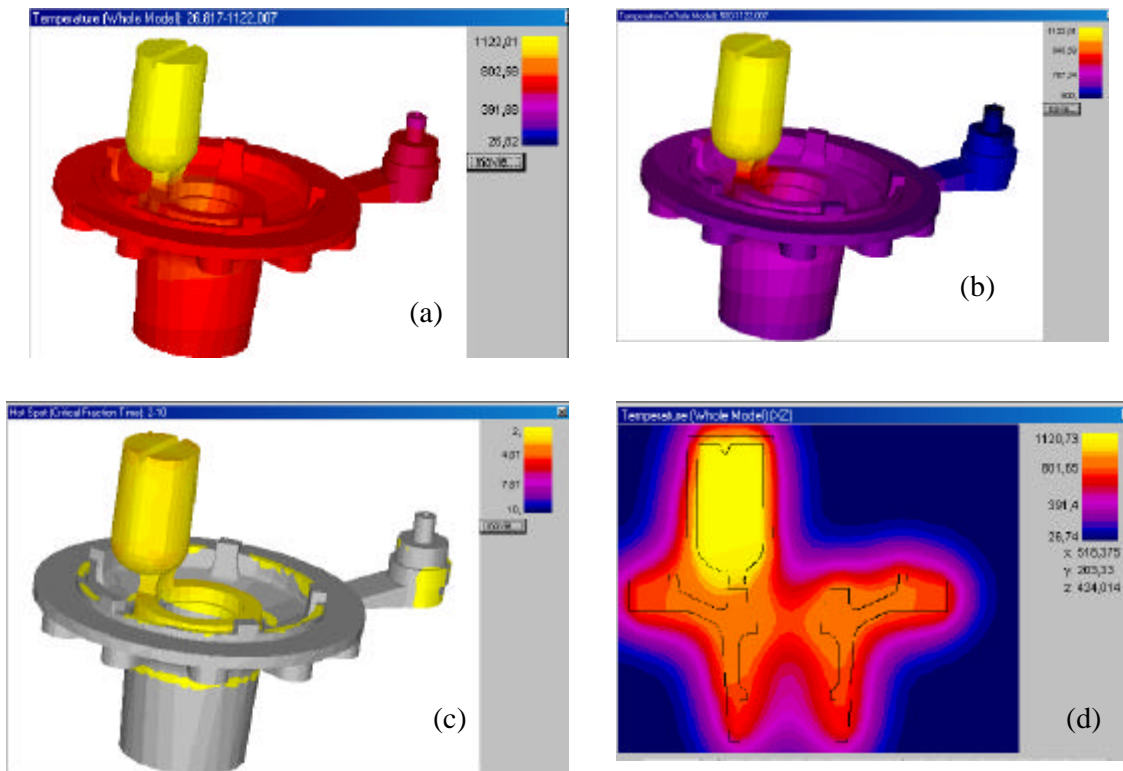


Figura 5. Simulação de solidificação do cubo de roda empregando um massalote.

A Fig. (5d) mostra a solidificação do sistema na seção transversal da peça e do massalote. Pode-se verificar que o massalote é a última parte a solidificar.

4. CONCLUSÕES

A metodologia de cálculo desenvolvida por Chvorinov (1940), apesar de antiga, ainda é uma boa prática para se calcular o sistema de massalotes na alimentação de peças, principalmente as de forma geométrica complexa. É claro que isto não oferece uma precisão sempre correta, mas possibilita uma aproximação bastante boa, permitindo economia de tempo na fabricação e/ou readaptação dos modelos e moldes.

A simulação de solidificação mostrou ser uma ferramenta muito importante no desenvolvimento de novos projetos e adaptação de antigos, com ganhos de custo e tempo. Não obstante, é necessário sempre aplicar uma forma de cálculo que permita desenhar o protótipo para efetuar sua posterior simulação.

Os dois métodos acima citados interligados (cálculo e simulação), apresentam uma aproximação que permite obter bons resultados. Isto reduziria o tempo final empregado na obtenção de peças pelo método empírico de erro e acerto, e também diminui a dependência na necessidade de fundidores com muita experiência.

A peça fabricada de forma empírica torna o processo caro devido entre outros, as sobremedidas dos massalotes, com maior consumo de energia ocasionada pelo baixo rendimento do processo. No caso específico do exemplo utilizado, um massalote poderia solucionar o problema.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores desejam expressar seu agradecimento a Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), pelo suporte financeiro ao projeto, processo nº.01/0879.3.

6. REFERÊNCIAS

- Darwish, S.M.H., 1995, "Computer-Assisted Riser Design and Placement for Casting", JOM, No. 10, pp. 60-63.
- Chiang, K. and Tsaj, H., 1990, "Interaction Between Shrinkage-Induced Fluid Flow and Natural Convection During Alloy Solidification", Int. J. of Heat and Mass Transfer, No. , pp. 1771-1778.
- Lee, Y.W., Chang, E. and Chieu, C.F., 1990, "Modeling of Feeding Behavior of Solidifying Al-7Si-0,3Mg Alloy Plate Casting", Metallurgical Transactions B, Vol. 210, No.8, pp. 715-722.
- Metevelis, G., 1989, "Permanent Mould Design through the Use of Computerized Solidification", Foundry Trade Journal, p. 4.
- Creese, R.C. and Waibogha, S., "Casting Reject Elimination Using Expert Systems", Transactions of AFS, Vol 95, No. , pp. 617-620.
- Lee, K. and Smith, C.T., 1987, "Computer-Aided Pattern Design for Casting Processes. Proceedings of the artificial Intelligence in Mineral and Materials Technology". Ann Arbor, Michigan, pp. 365-371.
- Hill, J.L., Berry, J.T. and Guleyupoglu, S., 1991, "Knowledge-Based Design of Rigging Systems for Ligh Alloy Casting", Transactions of AFS, Vol. 99, No. 62, pp. 91-96.
- Louvo, A., 1997, "Casting Simulation as a Tool in Concurrent Engineering. International ADI and Simulation Conference", May 29-30, Espoo, Finland, pp. 1-12.
- Chvorinov, N., 1940, "Theory of the Solidification of Castings", Giesseri, Vol. 27, No. 10, pp. 177-225. British Iron and Steel Institute Translation, No. 117.
- <http://www.eng2.uconn.edu/vc/projects/s99-151/proj2/part2.html>, 1999, "Part I: Alloy Casting: Principles and Process", pp. 1-7, acessado em 19/08/2002.
- Manual do SolidCast2000, Finite Solutions Inc.
- Facy, G. and Pompidou, M., 1983, "Précis de Fonderie", Ed. AFNOR, Paris, França, 178p.

- Jeancolas, M., 1961, "Donnés Générales sur le Masselottage des Pièces Moulées en Sable", Fonderie, Vol. 298, No. 2, pp. 43-56.
- Sanz, R., Chazé, L. and Chaussat, R., 1971, "Détermination des Systèmes de Masselottage et d'Attaque", Fonderie, Vol. 298, No. 2, pp. 39-56.
- Jeancolas, M., Chevriot, R. and Virolle, X., 1964, "Méthode Générale pour la Détermination des Masselottes: Application au Cas des Alliages Ferreux", Fonderie, Vol. 215, No. 1, pp. 1-16.
- Creese, R.C., 1986, "The M-C Method for Riser Design for Non-Ferrous and Ferrous Metals", Transactions of AFS, Vol. 4, No. 03, pp. 5-8.
- Heine, R.W., 1982, "Design Method for Tapered Riser Feeding of Ductile Iron Castings in Green Sand" Transactions of AFS, Vol. 90, No. 20, pp. 147-158.
- Carlson, K.D., Ou, S., Hardin, R.A., and Beckermann, C., 2002, "Development of New Feeding-Distance Rules Using Casting Simulation: Part I, Methodology", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 33B, No. 10, pp. 731-740.
- Ou, S., Carlson, K.D., Hardin, R.A. and Beckermann, C., 2002, "Development of New Feeding-Distance Rules Using Casting Simulation: Part II, The New Rules", Metallurgical and Materials Transactions B, Vol. 33B, No. 10, pp. 741-755.

STUDY OF APPLIED NUMERIC SIMULATION IN PIECE CAST OBTAINED BY EMPIRIC WAY

Gustavo Trevisan Sartori

Federal University of Santa Maria – CT – DEM
Campus Universitário Camobi 97105-900

Aleir Antonio Fontana De Paris

Federal University of Santa Maria – CT – DEM
Campus Universitário Camobi 97105-900
aparis@ct.ufsm.br

Abstract. *To accomplish a comparative study it was used a piece of ductile iron cast of seriate production, obtained of practical " form ", calculus were made in a theoretical way applying the rule of Chvorinov to determine the riser system. With these calculations a software of solidification simulation was used. The results showed a reduction of the riser numbers, decreasing with this the material return and also the consumption of furnace electric energy. The application of solidification software showed to be an important tool in the project of pieces for foundry decreasing the time of practical fittings and also material economy allowing pieces with smaller costs.*

Keywords: *foundry, ductile iron, numeric simulation.*