

SIMULAÇÃO DE SISTEMA DE ENCHIMENTO COM RELAÇÃO DE ÁREAS 1:2:1 PARA AÇOS AO CARBONO FUNDIDO¹

Rosangela Hartmann²
Iberê Roberto Duarte³
Kassim Shamil Al-Rubae⁴

Resumo

Visando minimizar os defeitos provocados em peças de aço fundido, oriundos de um sistema de enchimento projetado de forma inadequada, foi proposto neste trabalho analisar através de um corpo de prova alguns sistemas de enchimento. Partindo-se do princípio que o metal sai do forno com qualidade, no molde é necessário ter um sistema de enchimento bem dimensionado para conduzir o metal até a cavidade sem gerar turbulência danosa, o que poderia provocar defeitos, tais como: inclusão de óxido, escórias e bolhas de gás. Com base nisso, foi realizado um estudo comparativo no sistema de enchimento com relação de área entre os canais de descida, primário e ataques respectivamente de 1:2:1 variando-se a quantidade e o formato dos canais de ataque. O estudo foi feito com o auxílio de um programa de computador que processa a simulação numérica. Neste estudo se analisou o comportamento do fluxo do aço fundido ao longo do sistema de enchimento e na cavidade do molde. As simulações foram feitas considerando o aço ao carbono SAE 1020, que é um dos aços mais reativos quanto à oxidação, devido à elevada temperatura de vazamento, entre 1.580°C a 1.620°C. Os resultados obtidos com a simulação mostraram que o formato e a distribuição dos canais de ataque apresentam maior influência sobre a turbulência, o sistema com três canais de ataque se mostrou menos turbulento que o com um ataque.

Palavras-chave: Aço fundido; Fundição; Sistemas de enchimento; Simulação.

SIMULATION OF FILLING SYSTEMS WITH AREA RATIO 1:2:1 FOR CARBON STEEL CAST

Abstract

To minimize the defects caused in steel castings, from a filling system inappropriately designed, it was proposed in this work some filling systems. Starting from the assumption that the metal leaves the oven with quality, it is necessary to have a mould filling system and sized to drive the metal to the cavity without generating turbulence damaging; this may cause defects such as oxide inclusion, slag and gas bubbles. On this basis, it was conducted to compare the filling system with respect to the area between the channels descent, primary and attacks respectively of 1:2:1 by varying the quantity and the channels form of attack. The study was done with the aid of a computer program that processes the numerical simulation. The behavior of the flow of molten steel over filling system and mould cavity was examined. The simulations were made considering the SAE 1020 carbon steel, which is highly reactive to oxidation due to the high casting temperature, between 1,580°C and 1,620°C. The results of the simulation showed that the format and distribution channels of attack have a great influence on the turbulence; the system with three channels of attack was less turbulent when compared to that with an attack.

Key words: Steel Cast; Foundry; Filling Systems; Simulation.

¹ Contribuição técnica ao 67º Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Mestranda em Engenharia Mecânica, IST, Sociesc, Joinville, SC, Brasil; rosangela.hart@gmail.com

³ Prof. M.Sc. em Ciência e Engenharia de Materiais, IST, Sociesc, Joinville, SC, Brasil; ibereroberto@gmail.com

⁴ Prof. Dr. em Engenharia Mecânica, Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, IST, Sociesc, Joinville, SC, Brasil; kassim.alrubae@sociesc.org.br.

1 INTRODUÇÃO

Inclusões de óxidos, escórias e bolhas nas peças são muito comuns e dependendo da origem do defeito existe uma solução diferente, que precisa ser investigada e testada. Um dos problemas mais críticos nos aços fundidos se refere à inclusão de escória, óxidos e bolhas. Isto ocorre devido à alta temperatura de processamento, a qual favorece o aumento da reatividade do metal fundido com o ar e vapores oriundos dos materiais do molde. Como a densidade desta escória é menor do que a densidade do aço fundido o processo de flutuação é favorecido.⁽¹⁻⁴⁾

Guleypoglu⁽⁵⁾ cita que os aços fundidos possuem um intervalo de solidificação pequeno, cerca de 50°C, entre o início e o fim da solidificação. Isto favorece a formação de uma casca sólida que vai avançando para o núcleo, que devido à contração de solidificação, forma um rechupe na última região a se solidificar. Tal defeito é muito comum nos aços fundidos, porém, com um sistema de alimentação adequado é possível produzir peças de boa qualidade, isentas de rechupes.

O enchimento do molde com fluxo turbulento nos canais pode aumentar o atrito com as paredes do molde e provocar uma degradação térmica. A turbulência pode produzir defeitos, tais como a incorporação e arrastamento dos gases ou ar pelo metal. Este gás pode se transformar em defeitos tipo bolhas, produzir óxidos e escórias ou inclusões, isto ocorre devido à reação do gás com o metal líquido. O fluxo turbulento aumenta a área da superfície em que o metal líquido fica exposto ao ar dentro do sistema de canais. Há uma grande diversidade de ligas fundidas com diferentes níveis de oxidação. Para aquelas ligas que são altamente sensíveis à oxidação, tais como as ligas de alumínio, magnésio e bronzes, a turbulência pode gerar extensas películas de óxido devido à agitação do metal, causando defeitos.⁽⁶⁾

Apesar de todos os estudos já desenvolvidos em torno de sistemas de enchimento, parece que ninguém ainda conseguiu alcançar o objetivo. Pesquisas feitas em diversas fundições apontam que pelo menos 80% de todos os defeitos tem como causa raiz a turbulência.⁽⁷⁾ Trabalhos recentes têm demonstrado que a maioria dos danos causados na fundição se deve a sistemas de enchimento mal projetados.⁽⁷⁾

O objetivo deste trabalho foi avaliar diferentes sistemas de enchimento, a fim de verificar a tendência à formação de defeitos tais como: inclusão de escória, óxidos e bolhas. Para isto foi necessário à confecção de um corpo de prova que permite uma melhor visualização fluxo do metal fundido no seu interior. Foram feitos testes em um programa de computador que simula o enchimento do molde, a fim de verificar a velocidade e a turbulência com que o metal entra na cavidade do molde.

1.1 Sistemas de Enchimento

Guleypoglu⁽⁵⁾ faz algumas considerações sobre os cuidados que se deve ter com os canais que conduzem o aço líquido. A areia empregada na região dos canais deve ser de alta qualidade, pois o metal fundido possui altíssima temperatura. O sistema de canais deve ser simples, pois o aço é viscoso. Controladores de vazão cerâmicos, filtros e canais de descida em degraus não devem ser utilizados. Quando usar panela de vazamento com válvula para vazamento, a área da válvula deverá ser levemente menor que a área do canal de descida. É possível inclinar moldes pequenos em torno de 30° a 40° a fim de direcionar a solidificação, concentrando o metal mais frio na parte inferior do molde, porém não se recomenda esta prática para moldes grandes. A linha de partição do molde deve ser feita de forma que a metade da peça fique no molde superior e a outra metade no molde inferior. Desta

maneira se favorece o enchimento inicial na parte inferior e se promove uma solidificação direcional, sempre tomando o cuidado para que não haja queda de metal, formando o efeito do tipo cascata (alturas elevadas).⁽⁵⁾

O enchimento rápido do molde pode ser bom, como por exemplo, para peças finas, que tendem a solidificar antes do enchimento completo da cavidade, causando desta maneira o defeito de peça incompleta ou solda fria. Entretanto deve-se procurar um meio termo, pois o enchimento rápido poderá causar erosão na região dos canais, arrastando areia para dentro da cavidade do molde.⁽⁶⁾

O metal fundido que inicia a queda por gravidade no canal de descida possui turbulência suficiente para que ocorra ruptura dos óxidos da superfície e a consequente mistura com o líquido em movimento. Por esta razão, é adequado concluir que o vazamento por gravidade nunca irá possuir o mesmo nível de qualidade que é fornecido pelo sistema de enchimento feito de baixo para cima, tal como o processo a baixa pressão e outros sistemas que podem evitar a turbulência na superfície do metal líquido em deslocamento.⁽⁷⁾

1.1.1 Máxima velocidade de enchimento

O Conceito de velocidade é claramente representado na Figura 1, nela pode-se observar que na condição (a) a velocidade é igual a zero, porém esta condição não atende o enchimento de moldes, na condição (b) a velocidade é crítica, acima dela ocorre o fenômeno da situação representada em (c), situação na qual existe muita instabilidade na superfície do líquido e consequente quebra e mistura do filme de óxido no metal fundido. Desta maneira, a condição (b) é a ideal para enchimento de moldes.

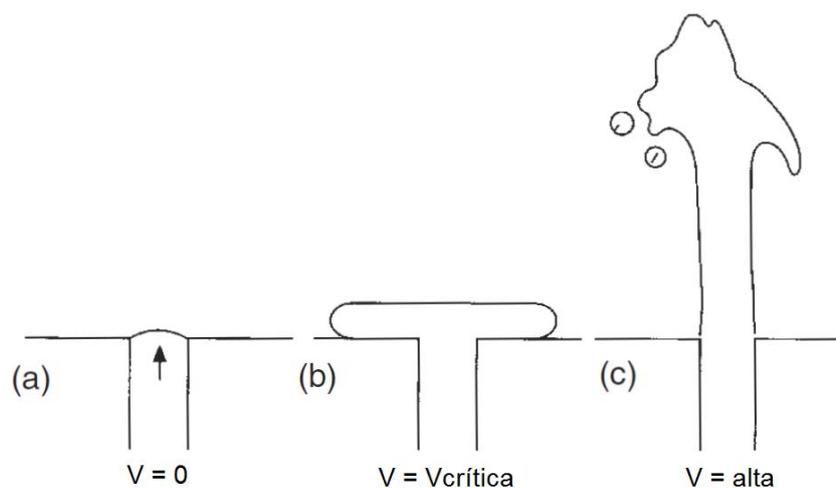


Figura 1. Velocidade crítica de enchimento.⁽⁷⁾

Segundo Campbell,⁽⁷⁾ "...na média, adota-se 0,5 m/s para todos os metais líquidos, que no geral é suficiente para a maioria dos propósitos relacionados a concepção de sistemas de enchimento de peças vazadas". Fuoco e Corrêa⁽⁸⁾ confirmam essa informação, utilizando essa velocidade para os experimentos práticos com sistemas de canais. Campbell⁽⁹⁾ em seu livro já citava essa velocidade como velocidade crítica.

Os metais que mais tendem a ocorrer às inclusões de filmes de óxidos são o zinco, o alumínio, e os ferros fundidos dúcteis. Aço carbono e aços inoxidáveis deveriam se comportar da mesma forma, porém quando o filme de óxido é incorporado ao metal líquido acaba sendo parcialmente fundido e assim consegue flutuar facilmente,

migrando para próximo da superfície e causando defeitos como inclusão de escória e óxidos.^(7,9)

É importante lembrar o conceito central de velocidade crítica, o caráter de turbulência de superfície não é previsível em detalhe, o aspecto chave é que abaixo da velocidade crítica é seguro, acima dela há o risco de arrastamento e incorporação de impurezas no metal líquido.^(7,9)

Evitar a turbulência do metal que entra na cavidade do molde é provavelmente a regra mais complexa de se cumprir quando se trata de sistema de vazamento por gravidade, dessa forma admite-se que parece ser impossível garantir a prevenção de algum dano ou defeito de fundição. A exigência é ainda maior na indústria, pois sempre foi enfatizado a respeito da importância de se trabalhar com um sistema de enchimento sem turbulência na fundição.^(7,9)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O sistema de enchimento e alimentação e o corpo de prova empregado para a atividade de simulação foi projetado de acordo com os seguintes pré-requisitos:

- corpo de prova com geometria que não fosse impactar ou mascarar os resultados, desta maneira se evitou o emprego de superfícies e geometria irregulares;
- sistema de alimentação (massalote) dimensionado adequadamente para não ocorrer à formação de poros devido à rechupes, causados por alimentação insuficiente;
- a posição do sistema de alimentação não deveria alterar o fluxo do metal no sistema de enchimento, sendo assim, o massalote foi posicionado na peça sem ter ligação com o sistema de enchimento. Dessa maneira, o massalote foi dimensionado para solidificar após a peça, mesmo que receba metal mais frio que o da peça, ele atuará através da ação da gravidade, fazendo pressão e evitando que a contração do metal provoque alguma porosidade no corpo de prova em estudo;

De acordo com os pré-requisitos estabelecidos, foi projetado o corpo de prova para os testes de simulação (Figura 2).

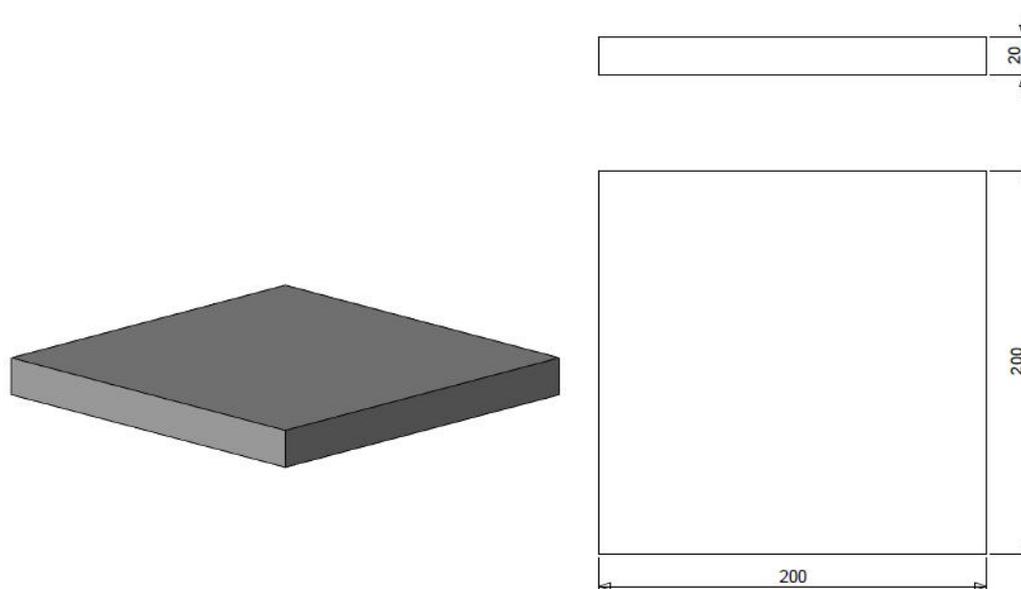


Figura 2. Geometria e dimensões do corpo de prova.

Foi escolhido o sistema de enchimento com relação de área 1:2:1, com partição horizontal, para ser simulado. Nesta representação, o primeiro número se refere ao módulo do canal de descida, o segundo número ao módulo do canal primário e o terceiro número ao módulo do canal de ataque.

Segundo Maehara e Esmeraldo⁽¹⁾ o sistema 1:2:1 é indicado para a produção de peças de aço. O metal entra no canal de descida de forma pressurizada e despressuriza no canal primário, desta maneira ocorre redução da velocidade e da turbulência, devido ao aumento da área em duas vezes.⁽¹⁾ Quando o fluxo de metal chega ao canal de ataque, o qual possui a mesma área do canal de descida, o metal flui com velocidade similar a obtida na base do canal de descida. Desta maneira, com o fluxo mais lento no canal primário, o metal tem mais tempo para permitir que ocorra a flutuação dos eventuais óxidos e escórias que se formaram.⁽¹⁾

Foram utilizadas duas condições para os canais de ataque, um ataque com entrada larga centralizada e de espessura fina (Figura 3) e três ataques iguais, com arredondamentos na junção com o canal primário, equidistantes (Figura 4).

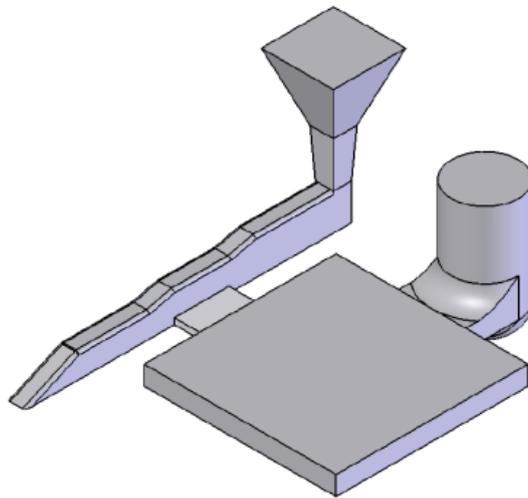


Figura 3. Sistema 1:2:1 com um ataque.

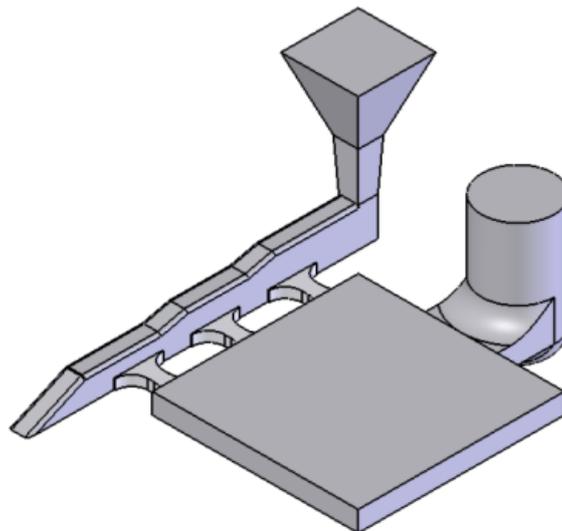


Figura 4. Sistema 1:2:1 com três ataques.

2.1 Parâmetros da Simulação

Para a simulação do sistema de enchimento foi utilizado o programa de computador denominado Magma, versão 8, no qual foram empregados os seguintes parâmetros:

- malha: 800.000 mesh;
- temperatura vazamento: 1.570°C;
- tipo de molde: cura frio; e
- pressão de vazamento: 38,38 g/cm².

A pressão de vazamento foi calculada de acordo com a seguinte equação e dados:

- pressão de vazamento = ρ (g/cm³)/altura (cm);
- pressão de vazamento = 7,833 (g/cm³)/5 (cm); e
- pressão de vazamento = 38,38 (g/cm²).

2.2 Módulo da Peça e do Sistema de Alimentação

Para determinar o módulo da peça e do massalote foi feita a simulação de enchimento e solidificação da peça, sistema de enchimento e massalote. Com os dados desta simulação o programa Magma verificou se o módulo do massalote estava acrescido de 20% a 40% sobre o módulo da peça,⁽¹⁰⁾ tal acréscimo é importante para garantir que o massalote solidifique depois da peça. Conforme Figura 5, o desenho em corte possibilita a visualização do módulo, número adimensional, de acordo com as cores referenciadas na escala. O módulo da peça ficou entre 0,6 e 1 e do massalote entre 1 e 1,3, desta forma ficou constatado que o massalote que foi dimensionado estava adequada para solidificar após a peça (corpo de prova).

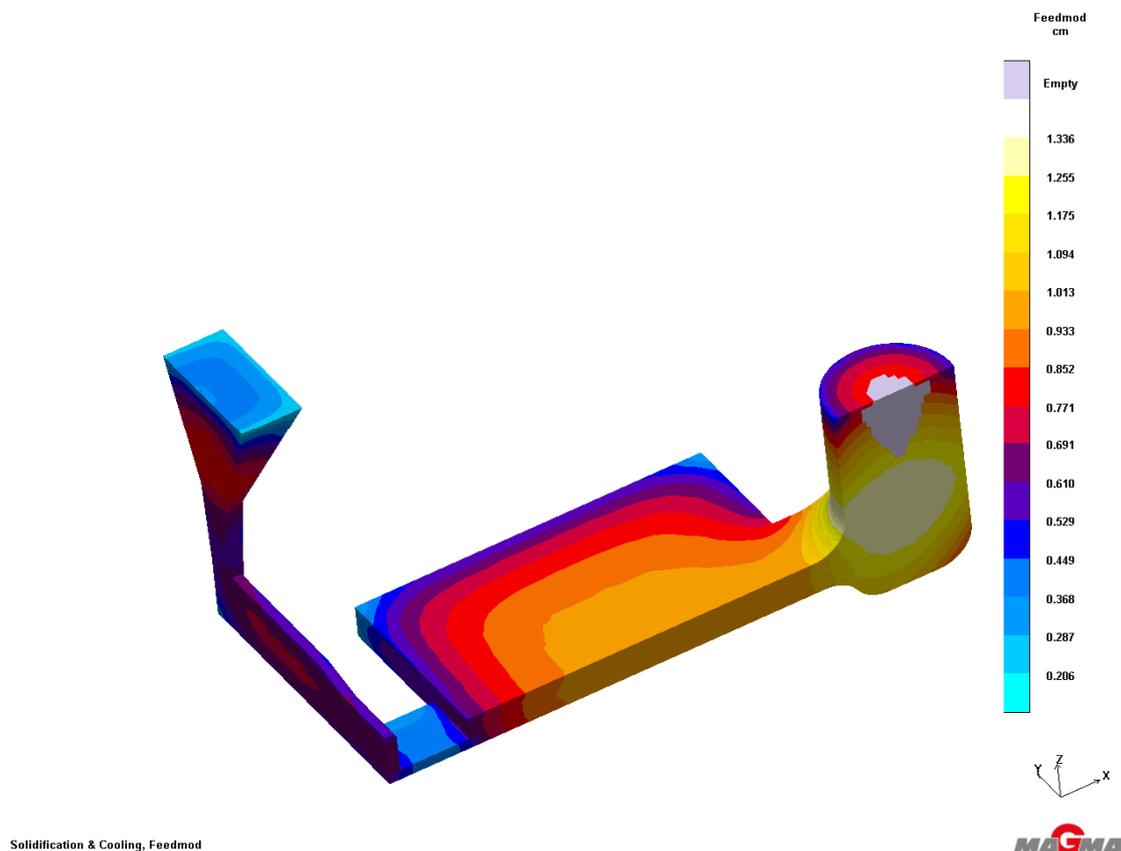


Figura 5. Módulo das partes do conjunto fundido.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Direção e Idade do Fluxo - Sistema de Enchimento com Três Ataques

Para verificar a direção e a idade que o fluxo possui ao preencher a cavidade do molde o programa de computador gera uma imagem gráfica conforme mostra a Figura 5.

De acordo com a Figura 6 observa-se a sequência que o fluxo de metal ao preencher a cavidade do molde com três canais de ataque. O tempo que o metal permanece na cavidade e a direção que o metal faz são ilustrados pela cor e sentido das setas respectivamente. No início do vazamento constata-se uma pequena quantidade de metal estacionada no funil, o qual uma parte vaza junto com o fluxo principal no canal primário. O metal que está na extremidade do canal de distribuição, após os canais de ataque, permanece estacionado. Durante o enchimento da cavidade do molde o fluxo é uniforme, sofrendo agitação somente dentro do massalote, que também causa um pouco de refluxo para a cavidade da peça que está parcialmente preenchida. Aquele fluxo a partir do metal estacionado no funil continua fluindo junto com o fluxo principal, tal fluxo pode ser danoso devido à agitação prévia no funil, o qual pode favorecer a oxidação.

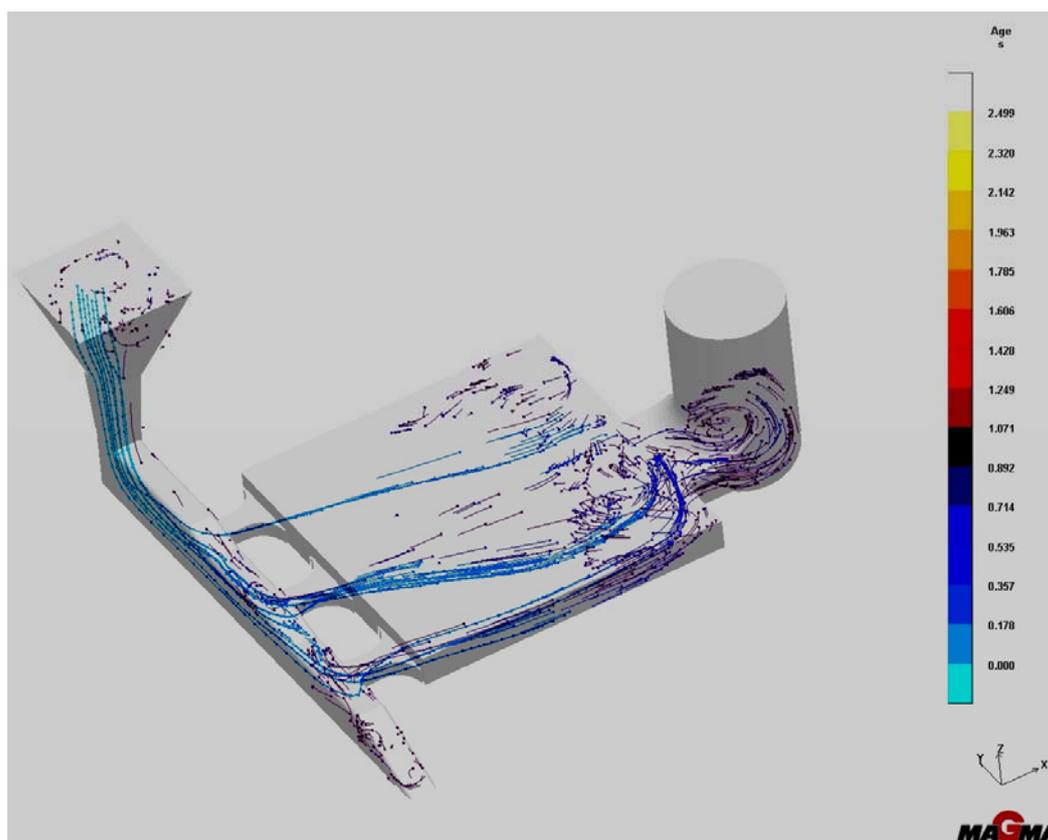


Figura 6. Idade, direção do fluxo e comportamento do metal na cavidade durante o enchimento.

3.2 Direção e Idade do Fluxo - Sistema de Enchimento com um Ataque

A Figura 7 mostra o fluxo de enchimento para o sistema com um canal de ataque. Na etapa inicial de enchimento há um fluxo principal desde o funil até o massalote, nesta etapa inicial também se constata uma pequena quantidade de metal estacionada no funil, o qual uma parte vaza junto com o fluxo principal no canal

primário. O metal que está na extremidade do canal de primário, após o canal de ataque, permanece estacionado. Durante o enchimento da cavidade do molde existe um fluxo turbulento de forma bastante aleatória, com a cavidade parcialmente preenchida. Existe também um refluxo de metal oriundo do massalote. Essa condição turbulenta na cavidade pode favorecer a oxidação da liga. Aquele fluxo a partir do metal estacionado no funil continua fluindo junto com o fluxo principal, tal fluxo pode ser danoso devido à agitação prévia no funil que favorece a oxidação.

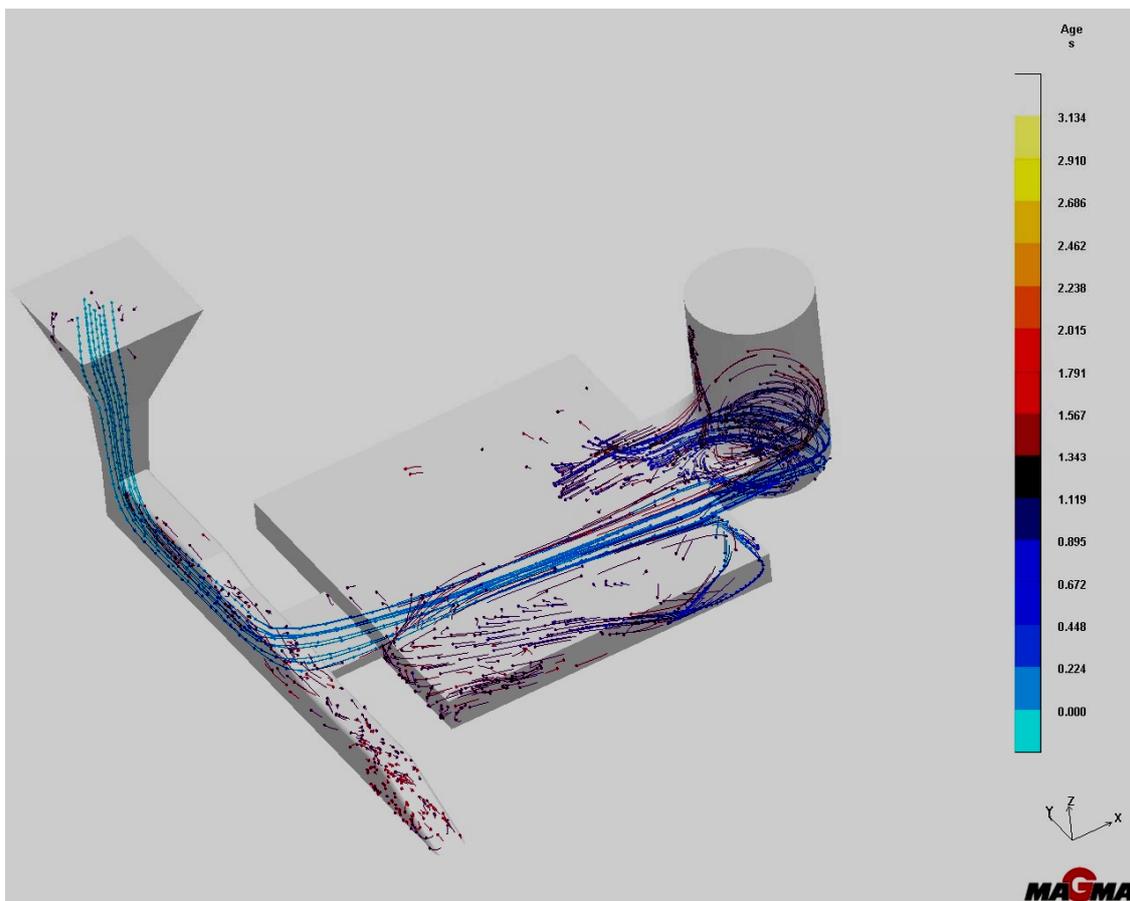


Figura 7. Idade, direção do fluxo e comportamento do metal na cavidade durante o enchimento.

3.3 Velocidade do Fluxo - Sistema de Enchimento com Três Ataques

A variação de velocidade do fluxo nos canais e na cavidade do molde obtidas no programa de computador é mostrada na Figura 8, observa-se o comportamento da velocidade do fluxo do metal fundido no sistema com três canais ataques.

Inicialmente o fluxo que entra pelo canal de descida, flui no canal primário, em toda a sua extensão, porém não o preenchendo completamente, ao se chocar com a extremidade em forma de cunha, o metal da extremidade volta pelo canal primário em alta velocidade. Antes de o canal primário encher completamente, no canal de ataque posicionado a 90° em relação ao canal primário, inicia a entrada de metal para a cavidade do molde. Sendo que é no último canal de ataque da sequência que inicia a passagem de fluxo de metal fundido para a cavidade do molde, em seguida ocorre no canal de ataque do meio e por último no primeiro canal de ataque (Figura 8). O primeiro canal de ataque, aquele localizado logo após o canal de descida, permanece parcialmente vazio durante quase todo o tempo de enchimento

da cavidade do molde, apesar de possuir um raio de arredondamento, que visa facilitar a passagem do fluxo. Isto ocorre provavelmente porque o canal primário nesta região também atua parcialmente cheio.

O fluxo nos canais de ataque possuía velocidade maior que o fluxo no canal primário, 1,8 m/s nos ataques e no canal de primário, entre 0,3 m/s a 0,9 m/s. O fluxo atravessa a cavidade do molde com o aço em velocidade de cerca de 1,3 m/s, o qual bate na parede oposta da cavidade do molde e região do massalote, gerando pouca turbulência, o fluxo após bater na parede oposta aos canais de ataque retorna a velocidade abaixo de 0,6 m/s.

O preenchimento completo do primeiro canal de ataque, aquele que está mais próximo do canal de descida, ocorre quando a cavidade no molde está quase completa. O tempo de enchimento total foi de 2,56 s.

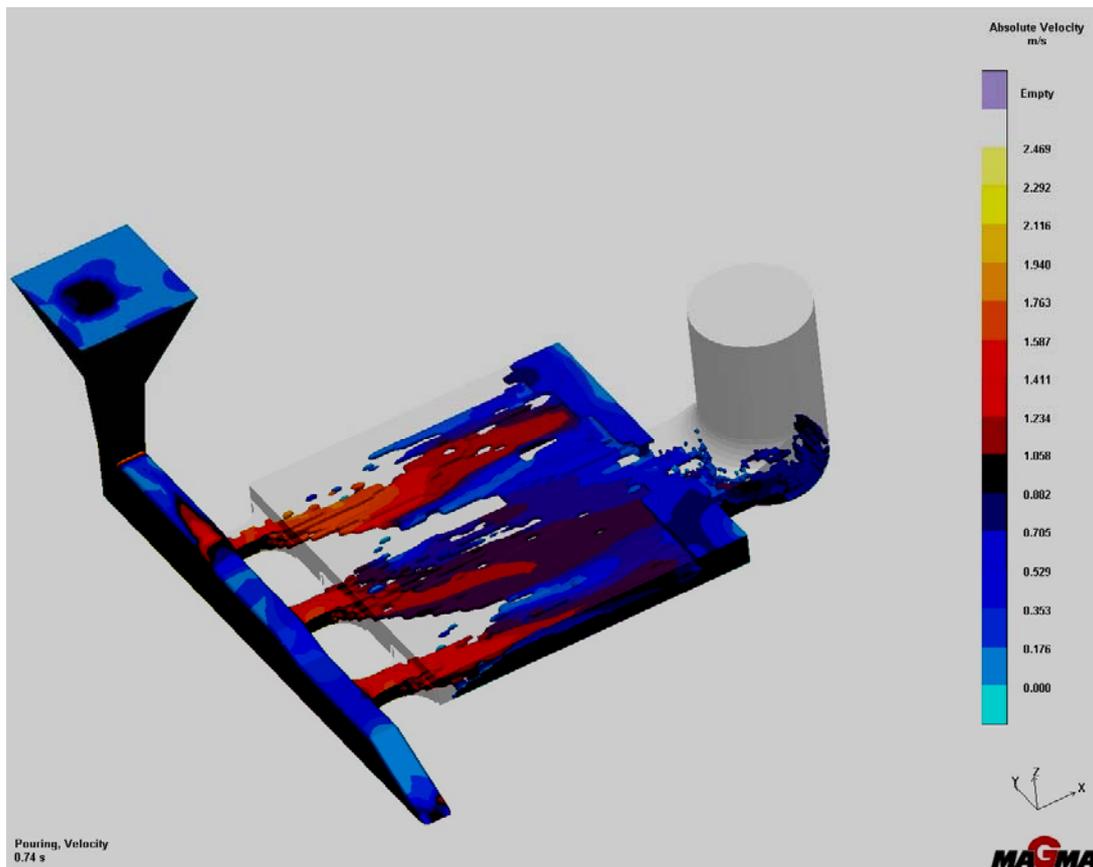


Figura 8. Velocidade do fluxo de metal na cavidade no início do enchimento.

3.4 Velocidade do Fluxo - Sistema de Enchimento com um Ataque

Na Figura 9 observa-se o comportamento da velocidade do fluxo de metal no sistema de enchimento que possui um canal de ataque. Inicialmente o fluxo que entra pelo canal de descida, flui no canal primário, em toda a sua extensão, porem não o preenche completamente, ao se chocar com a extremidade em forma de cunha o metal da extremidade volta pelo canal primário em alta velocidade. Antes de o canal primário encher completamente, o canal de ataque posicionado a 90° em relação ao canal de primário, inicia o fluxo de enchimento da cavidade do molde.

O fluxo no canal de ataque possui uma velocidade maior que o fluxo no canal primário, 1,5 m/s no ataque e no canal primário estaria entre 0,4 m/s a 1 m/s. O fluxo no canal de ataque ocorre de maneira descolada na parede lateral que está mais

próxima do canal de descida. O fluxo atravessa a cavidade do molde com o aço na velocidade de cerca de 2 m/s, o qual bate na parede oposta da cavidade do molde e do massalote, gerando turbulências e respingos. A velocidade de movimento do fluxo dentro do restante da cavidade do molde, não considerando o fluxo central gerado a partir do canal de ataque, é menor, cerca de 0,5 m/s. O preenchimento completo do canal de ataque ocorre quando a cavidade no molde está quase completamente cheia e o metal retorna preenchendo o canal de ataque. O tempo de enchimento total foi de 3,22 s.

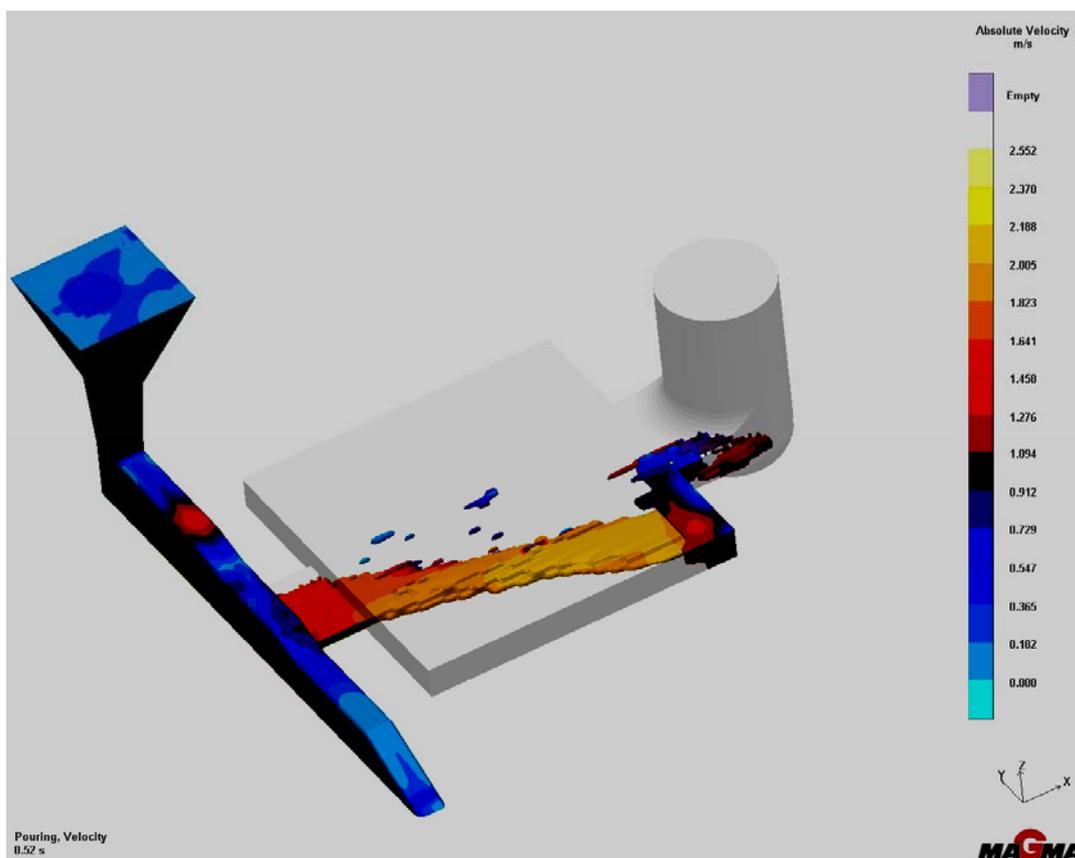


Figura 9. Velocidade do fluxo de metal na cavidade no início do enchimento.

3.5 Sumarizando os Resultados

Analisando o descrito acima, podem-se destacar em resumo (Tabela 1), as principais diferenças entre os dois sistemas de canais submetidos ao programa simulador de canais. Constata-se que a velocidade no canal de ataque foi maior no sistema com três ataques, o tempo de enchimento é maior no sistema com um canal de ataque. O enchimento da cavidade do molde com três ataques ocorre de forma mais homogênea.

O comportamento do fluxo de metal no final do canal primário se dá de maneira igual em ambos os sistemas de enchimento, ao contrário da eficiência de uso do canal de ataque, onde o sistema com três ataques trabalha aproximadamente 90% cheio versus 60% do sistema com um canal de ataque. O preenchimento do sistema com três canais de ataque ocorre de forma mais uniforme, entretanto no sistema com um canal de ataque, o preenchimento da cavidade do molde ocorre à formação de um redemoinho e com maior agitação do fluxo de metal.

Apesar da velocidade no canal de ataque ser maior no sistema com três canais de ataque, o comportamento do metal dentro da cavidade da peça foi menos turbulento do que no sistema com um ataque, o qual formou vórtice turbulento. Portanto, de acordo com a simulação, o formato e a distribuição dos canais de ataque apresentou maior influência sobre a turbulência na cavidade do molde, do que a velocidade do metal durante o enchimento.

Tabela 1. Resumo comparativo dos resultados obtidos na simulação

	Três ataques	Um ataque
Velocidade nos canais de ataque (m/s)	1,8	1,5
Velocidade no canal primário (m/s)	0,3 a 0,9	0,4 a 1
Tempo de enchimento (s)	2,56	3,22
Comportamento no final do canal primário	Forma onda de retorno	Forma onda de retorno
Enchimento da cavidade da peça	Preenchimento mais uniforme da cavidade do molde	Preenchimento com formação de redemoinho

4 CONCLUSÃO

Nos dois casos analisados, os canais de ataque, trabalharam parcialmente vazios, principalmente o canal de ataque que fica mais próximo do canal de descida. Porém o sistema com três ataques trabalhou mais cheio do que o canal com um ataque. Todos os canais preencheram a cavidade com velocidade acima de 1,4 m/s, quase três vezes maior do que o recomendado por Campbell,⁽⁷⁾ para ligas de alumínio. Os aços possuem algumas particularidades quando comparado ao ferro fundido e ao alumínio, por exemplo, o gradiente de temperatura é mais elevado, isso exige que o molde seja preenchido rapidamente, caso contrário há a possibilidade de ocorrer solda fria. Motivo pelo qual, pode-se supor que a recomendação de Campbell⁽⁷⁾ quanto a velocidade crítica para enchimento da cavidade do molde, 50 cm/s, indicada para ligas de alumínio, não se aplique aos aços, entretanto não foi encontrado alguma literatura que descrevesse a respeito da velocidade crítica de enchimento para aços.

Agradecimentos

À empresa Acearia Frederico Missner pelas atividades de simulação que foram desenvolvidas com o programa de computador Magma.

REFERÊNCIAS

- 1 MAEHARA, Y.; ESMERALDO, J. N. Padrões de Fabricação para Aços Fundidos. Ouro Preto - MG: Eletec, v. 1, 1989.
- 2 FONSECA SOUZA, T. N. Aços Fundidos. 1. ed. Belo Horizonte: Perfil Editora, v. 1, 2001.
- 3 FINARDI, J. Refino Secundário de Aço. Conaf. São Paulo, p. 17. 1979.
- 4 FINARDI, J. Técnicas de Refino e Fabricação de Fundidos em Aço. Máquinas e Metais, São Paulo, p. 12-19, Julho 1979.

- 5 GULEYPOGLU, S. Casting Process Design Guidelines. Concurrent Technologies Corporation, Pennsylvania, 2 may 2003. p. 869-876.
- 6 SUSCHIL, A.; PLUTSHACK, L. A. Metals Handbook Casting – Gating Design. 9. Ed. Ohio: ASM International, v. 15, 1992.
- 7 CAMPBELL, J. CASTING PRATICE - The 10 Rules of Castings. Oxford: Elsevier, 2004.
- 8 FUOCO, R.; CORRÊA, E. R. Efeito do Projeto de Sistemas de Canais na Qualidade de Peças Fundidas por Gravidade em Ligas de Alumínio. CONAF, São Paulo, 23 Setembro 2003.
- 9 CAMPBELL, J. Castings. Butterwort: Heinemann, 1991.
- 10 MINTEGUI, J. Curso Avanzado de Tecnologia de Fundición. Técnicas de Alimentacion, Disamatic, 2001.