

O USO DA SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO NO DESENVOLVIMENTO DE PEÇAS EM FERRO FUNDIDO NODULAR

Carlos Gomes de Oliveira ¹
Wilson Luiz Guessser ²
Ivo Baumer ³

RESUMO

Nos últimos anos, as indústrias de fundição têm sofrido grandes mudanças no seu perfil de fornecedor, passando de uma simples empresa de subcontratação para uma fornecedora de produtos e serviços de alta tecnologia. Este quadro, aliado à forte concorrência do mercado de fundidos faz com que as fundições ofereçam produtos e serviços cada vez melhores. Graças ao uso de ferramentas de simulação numérica do processo de fundição (*softwares* CAE), apenas algumas empresas têm conseguido atuar com sucesso neste cenário, tornando a simulação parte integrante do ciclo de desenvolvimento de seus componentes. Através da apresentação de três casos distintos, ilustra-se a aplicação da simulação na resolução de problemas e no desenvolvimento de peças produzidas em ferro fundido nodular, bem como os benefícios com ela alcançados nas diferentes fases do projeto.

Palavras-chave: simulação; fundição; nodular.

IV Seminário de Fundição, Volta Redonda, RJ, 14 a 16 de Maio de 2003.

¹ Especialista em simulação do processo de fundição da Tupy Fundições Ltda.

² Diretor-Gerente do setor de Engenharia Metalúrgica da Tupy Fundições Ltda.

³ Coordenador de processos metalúrgicos da Tupy Fundições Ltda.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, as indústrias de fundição têm sofrido grandes mudanças no seu perfil de fornecedor, passando de uma simples empresa de subcontratação para uma fornecedora de produtos e serviços de alta tecnologia, participando ativamente do desenvolvimento de componentes junto ao cliente. Este quadro, aliado à forte concorrência do mercado de fundidos faz com que as fundições ofereçam produtos e serviços cada vez melhores, mais baratos e muitas vezes em um espaço de tempo que a pouco seria inconcebível. Graças ao uso de ferramentas de simulação numérica do processo de fundição (*softwares* CAE), apenas algumas empresas têm conseguido atuar com sucesso neste cenário. Na Tupy Fundições, a simulação do processo de fundição vem sendo empregada no desenvolvimento de produtos desde 1997. Ao longo deste período, muita experiência foi acumulada, se refletindo em mais qualidade e economia de tempo e recursos no ciclo de desenvolvimento.

A seguir, três casos distintos serão apresentados, ilustrando as aplicações da simulação do processo de fundição em diferentes estágios do projeto. No primeiro, um eixo comando de válvulas (I4 1.6 l gasolina) tem o seu sistema de canais otimizado com o objetivo de se evitar a inclusão de escória, drosses, partículas do filtro e areia na peça. O segundo apresenta a otimização de um girabrequim (I4 1.6 l gasolina), onde os efeitos das dimensões de pescoço e massalote são verificados a fim de se reduzir regiões susceptíveis à porosidade. Por fim, a simulação de um novo girabrequim (I4 2.8 l diesel) é aplicada no desenvolvimento do sistema de canais, minimizando os efeitos da grande altura de vazamento inerente ao processo de fundição desta peça.

A SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE FUNDIÇÃO POR GRAVIDADE

As ferramentas para simulação numérica do processo de fundição por gravidade disponíveis no mercado permitem a previsão dos fenômenos associados ao enchimento das cavidades e à solidificação. Para os resultados relativos ao enchimento das cavidades cita-se por exemplo, a previsão do caminho do fluxo metálico, o seu perfil de temperatura, de velocidade e pressão. Para os resultados associados à solidificação, destaca-se o perfil de solidificação propriamente dito, previsão de regiões propensas à incidência de porosidade, previsão de microestrutura final, propriedades mecânicas e tensões residuais.

Ao se utilizar um programa de simulação numérica para fundição, deve-se conhecer muito bem o processo real que está sendo simulado, as características particulares do processo em questão e se possível, conhecer o comportamento de todos, ou do maior número possível de equipamentos que compõe a linha de produção na qual o componente simulado é ou será produzido. Características como o tipo de processo de moldagem, a rigidez e compactação do molde, o tipo e composição da areia utilizada na confecção de moldes e machos, tempo de desmoldagem disponível para a linha de produção, características do metal de base (forno cubilô, a arco, indução), composição química, tratamentos de nodulização e inoculação, forma do vazamento (manual ou automático), são algumas variáveis que podem alterar completamente as características do fundido e por consequência influenciar diretamente na qualidade dos resultados de simulação.

Cabe ao projetista envolvido no processo de simulação, avaliar tanto a qualidade dos dados de entrada e condições de contorno que alimentam o *software*, quanto a qualidade dos resultados finais da simulação. Quanto melhor a produção real da peça puder ser representada no estudo computacional, mais próximos os resultados da simulação estarão da realidade.

O PROCESSO SHELL

As três peças a serem discutidas neste artigo são produzidas pelo processo *shell*. Neste processo, um molde com linha de divisão vertical é acondicionado em uma caixa metálica e envolvido por granalha de ferro. Como resultado, tem-se um molde rígido e com alta capacidade de extração de calor. A figura 1 mostra um lado de uma “casca”, que recebe os acessórios de fundição (filtros, luvas exotérmicas, etc.) e é fechada para ser colocada na caixa onde recebe o encosto da granalha de ferro. Na figura 2 mostra-se um molde pronto para o vazamento.



Figura 1 – Metade de um molde *shell*.

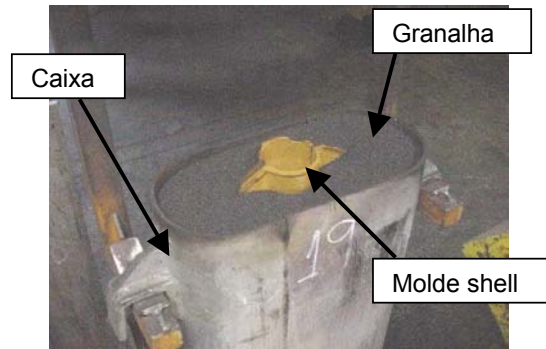


Figura 2 – Molde pronto para o vazamento.

CASO 1 – EIXO COMANDO DE VÁLVULAS I4 1.6 I GASOLINA

Este eixo comando de válvulas produzido em ferro fundido nodular FE 70002 teve seu sistema de alimentação otimizado durante a fase de desenvolvimento do produto. A necessidade de otimização se deu devido ao aparecimento de defeitos por inclusões não metálicas, principalmente drosses, detectadas durante as operações finais do cliente. A figura 3 mostra o projeto original e a figura 4 traz um defeito típico encontrado nesta peça. Para que as causas do problema pudessem ser levantadas, foi realizada uma simulação utilizando a configuração original. A figura 5 mostra o perfil de velocidades quando as cavidades do molde encontram-se 50% preenchidas e a figura 6 mostra em detalhe a região de saída do filtro e dos canais de ataque.

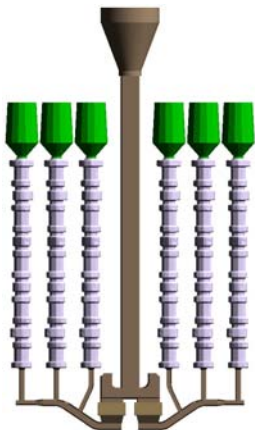


Figura 3 – Projeto original do sistema de canais.

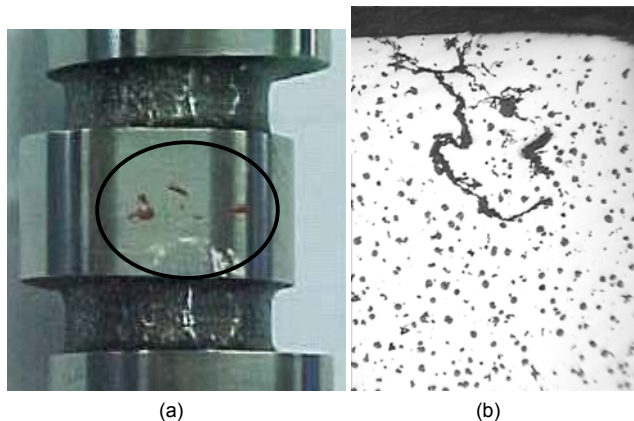


Figura 4 – Defeito de inclusão de drosses na superfície da peça:
(a) macro (b) micro (aumento 50 x).

Este sistema de canais não permite o enchimento de todas as cavidades simultaneamente, além das seções estreitas favorecerem o escoamento do metal sob altas velocidades. O fato de que o metal sofre uma aceleração devido à queda

no canal de descida e logo em seguida encontra o filtro, aumenta a tendência ao arraste de pequenas partículas do próprio filtro e de areia para dentro da peça. Como o metal é submetido a um fluxo turbulento, a tendência à formação de drosses também é elevada.

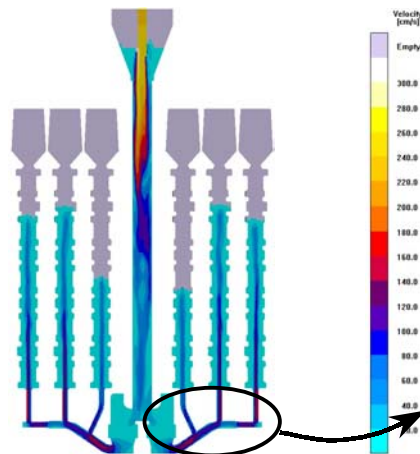


Figura 5 – Campo de velocidades em 50% do volume total a ser preenchido.

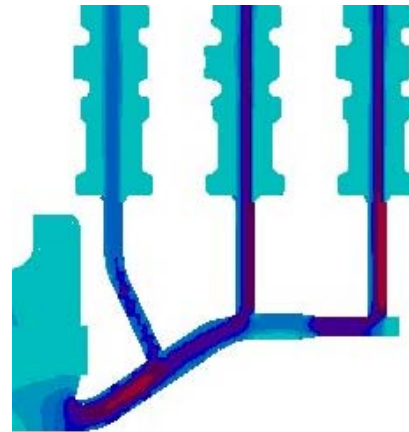


Figura 6 – Detalhe da região de ataques.

Para solucionar o problema, baseando-se nos resultados da primeira simulação, um novo sistema de alimentação foi projetado de modo a minimizar os efeitos da altura metalostática, permitir a segregação de escória, drosses, partículas de filtro e areia, diminuir a velocidade do metal principalmente nos canais de ataque – o que também auxilia na redução da formação de drosses – e equalizar o enchimento das seis peças. Várias versões foram simuladas até que o resultado final fosse satisfatório. Na figura 7, tem-se o campo de velocidades para a versão final do sistema de alimentação, e na figura 8, um detalhe da região de ataques. Nota-se que, quando comparada com a figura 6, a figura 8 mostra um fluxo sob velocidades mais baixas na região dos ataques. Já as figuras 9 e 10, trazem o detalhe da bolsa para segregação de escória, que recolhe e “confina” a primeira frente metálica, evitando assim com que as partículas de escória, filtro e areia por ela carregada alcancem a peça. As extensões dos canais que levam aos ataques também têm a função de segregar impurezas e estabilizar o fluxo nos primeiros estágios do enchimento.

Com o sistema de alimentação original, da figura 5, o índice médio de refugos por inclusões era de 5,5%, passando para 0,5% após a otimização.

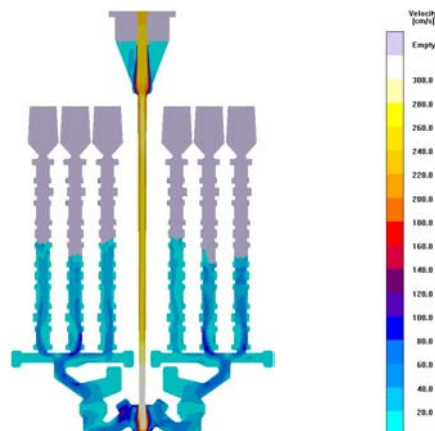


Figura 7 – Sistema de alimentação otimizado.

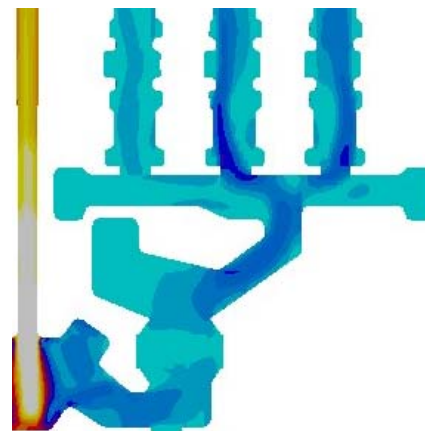


Figura 8 – Detalhe da região de ataques.

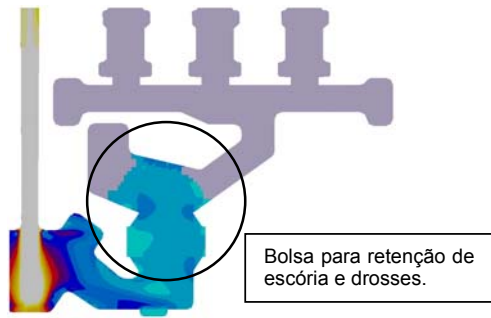


Figura 9 – Detalhe da bolsa de retenção de escória.

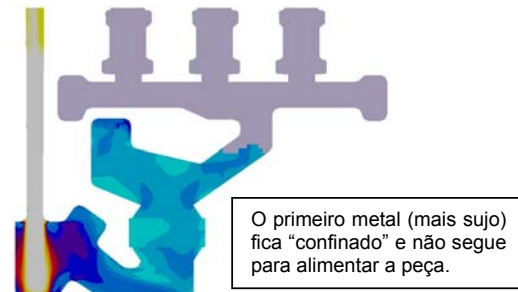


Figura 10 – A bolsa se enche antes do que o canal, e assim, segrega as impurezas.

CASO 2 – GIRABREQUIM I4 1.6 | GASOLINA

Produzido em ferro fundido nodular (FE 60003), este girabrequim foi simulado a fim de se resolver um problema de micro-rechue no primeiro mancal. Por conta desta porosidade, a peça poderia apresentar vazamento de óleo do motor para o sistema de embreagem. A figura 11 mostra um esquema que ilustra a causa do problema e a figura 12 mostra a micrografia de micro-rechue típico encontrado no primeiro mancal.

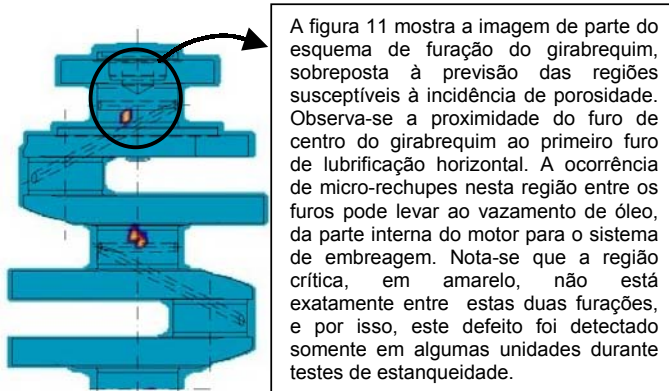


Figura 11 – O esquema de furação da peça sobreposto às regiões críticas do fundido.

A figura 11 mostra a imagem de parte do esquema de furação do girabrequim, sobreposta à previsão das regiões susceptíveis à incidência de porosidade. Observa-se a proximidade do furo de centro do girabrequim ao primeiro furo de lubrificação horizontal. A ocorrência de micro-rechupes nesta região entre os furos pode levar ao vazamento de óleo, da parte interna do motor para o sistema de embreagem. Nota-se que a região crítica, em amarelo, não está exatamente entre estas duas furações, e por isso, este defeito foi detectado somente em algumas unidades durante testes de estanqueidade.

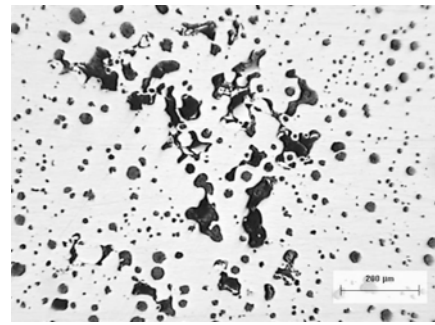


Figura 12 – Micrografia de micro-rechue típico encontrado no primeiro mancal.

Para evitar este defeito, fez-se a simulação da peça com o objetivo de se eliminar a região susceptível à micro-porosidade no primeiro mancal. A figura 13 mostra a previsão das regiões susceptíveis à incidência de porosidade (regiões mais claras), onde a peça da esquerda está conforme a situação original, alimentada por um massalote com luva exotérmica. O diâmetro do massalote é de 42 mm, afastado da peça em 5 mm e com o diâmetro do pescoço de 22 mm. O defeito a ser eliminado está em destaque. Ainda na figura 13, no lado direito, tem-se a primeira alteração proposta, onde o uso de um massalote de 91 mm de diâmetro, afastado da peça em 18 mm e com um pescoço de diâmetro de 28 mm foi simulado.

Normalmente, quando se enfrenta um problema de porosidade próximo ao massalote, a primeira idéia que vem ao fundidor é o aumento do diâmetro de ataques e massalotes. Assim, esta região demora mais a se solidificar, ou seja, busca-se aumentar o módulo de solidificação do pescoço e do massalote, até torná-los maiores que o módulo da região da peça a ser alimentada, e desta forma, direcionar a solidificação da peça para o massalote. Como se pode observar, esta alteração não surtiu o efeito desejado e os pontos críticos do primeiro mancal para as duas peças da figura 13 permaneceram com a mesma intensidade. A fim de se entender o problema, em uma nova versão fez-se os ataques muito maiores do que eles normalmente o seriam. Na figura 14, os resultados quanto à previsão de

porosidade mostram que o aumento do módulo de solidificação de pescoço e massalote não teve o efeito esperado sobre o defeito em questão. Mesmo com a alteração dos ataques (ambos foram aumentados para o diâmetro de 40 mm) e com a colocação de luva exotérmica no massalote maior, o que fez aumentar ainda mais o seu tempo de solidificação, as regiões susceptíveis à porosidade não diminuíram o suficiente para evitar o problema.

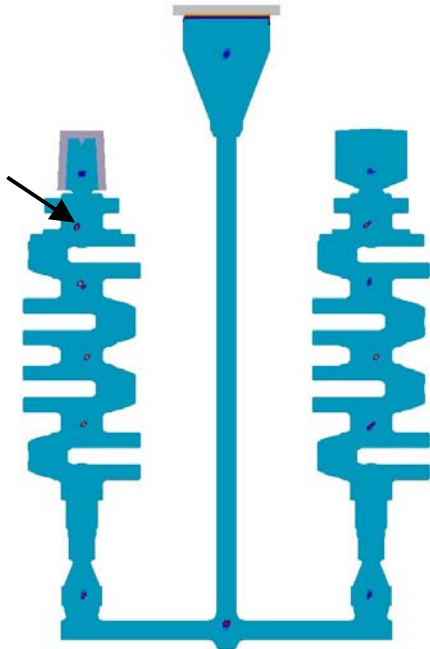


Figura 13 – Regiões susceptíveis à incidência de porosidade. Projeto inicial, à esquerda, e proposta de alteração à direita.

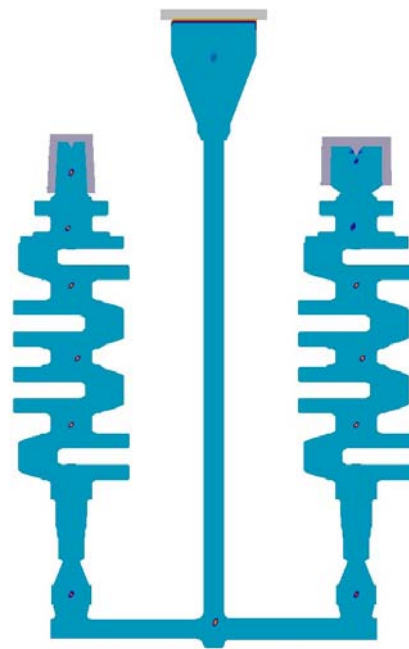


Figura 14 – Aumento do diâmetro do pescoço dos massalotes e adição de luva no massalote do lado direito.

Conforme descrito no item referente ao processo *shell*, o conjunto formado pela casca em areia e a granalha que a suporta dentro da caixa de aço, constitui um molde rígido e portanto, as forças de expansão geradas durante a precipitação da grafita devem ser aproveitadas para promover uma auto-alimentação da peça. Com base neste conceito, testou-se uma configuração para aproveitar melhor estas forças de expansão, conforme mostrado no lado esquerdo da figura 15. Na nova proposta, o girabrequim é alimentado pelo mesmo massalote utilizado nas simulações anteriores, porém afastado da peça em 20 mm e com um pescoço de diâmetro de 20 mm (na versão original o massalote está afastado da peça em 5 mm e o pescoço do massalote tem diâmetro de 22 mm). No lado direito, a mesma configuração do massalote maior simulado na versão anterior foi mantida a fim de se ter um parâmetro para comparação.

O afastamento do massalote em relação à peça e a diminuição do diâmetro do pescoço fizeram com que a ligação entre o massalote e a peça se fechasse na peça da esquerda muito antes do que na peça da direita – ver figura 16. Assim, devido à rápida solidificação do pescoço do massalote, boa parte das forças de expansão geradas durante a solidificação ficam confinadas dentro da peça, diminuindo a tendência à formação de micro-porosidade. Este efeito foi o responsável pela eliminação do defeito no primeiro mancal, e só foi possível por se tratar de uma peça produzida em molde rígido, e desta forma fazendo com que a capacidade de auto-alimentação da liga fosse efetivo na prevenção do defeito.

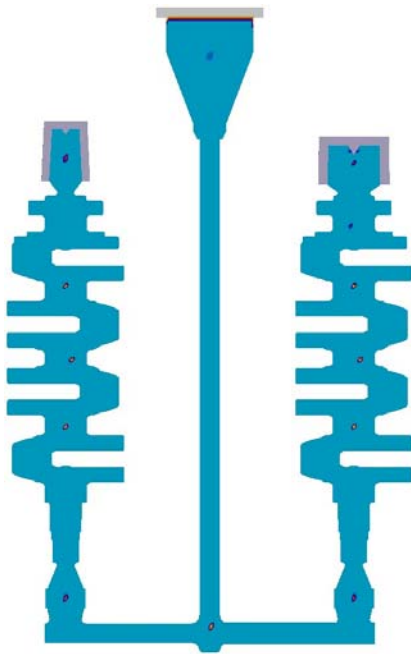


Figura 15 – Diminuição do ataque e afastamento do massalote em relação à peça.

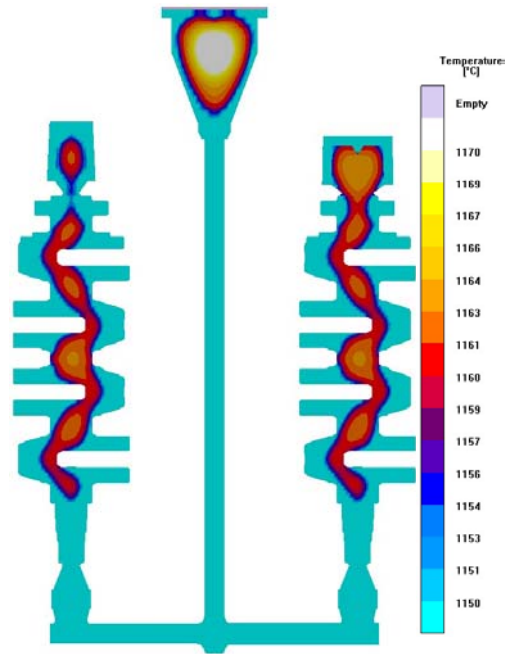


Figura 16 – Perfil de temperaturas com 80% do volume total já solidificado.

CASO 3 – GIRABREQUIM I4 2.8 I DIESEL

Neste girabrequim, os trabalhos de simulação iniciaram-se logo nos primeiros momentos do projeto. Por se tratar de uma peça muito grande – aproximadamente 700 mm de comprimento – as dificuldades do projeto começaram já no posicionamento da peça na placa de moldagem. Reservado o espaço para a peça, devem ainda ser alocados os guias para montagem, pinos de extração, canaletas de vedação, coquilhas de resfriamento, além do próprio sistema de alimentação. Sistema este que deve ser capaz de minimizar os efeitos da grande altura metalostática, evitando inclusões de escória, drosses, partículas de filtro e areia na peça. Várias propostas foram simuladas até que um resultado satisfatório fosse alcançado. As figuras 17 e 18 mostram duas propostas iniciais para este projeto e a seguir, faz-se alguns comentários acerca destas propostas.

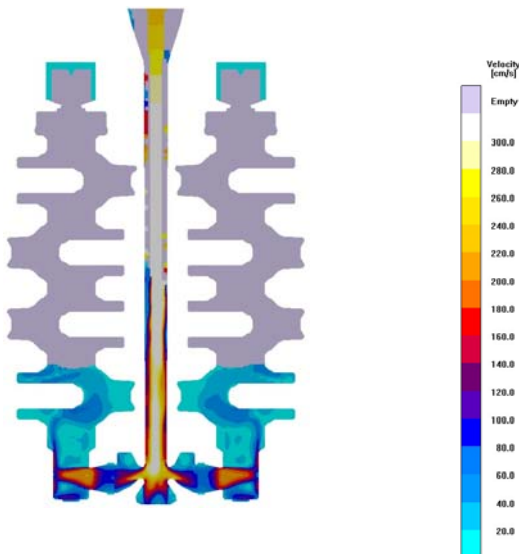


Figura 17 – Primeira proposta para o sistema de alimentação do novo girabrequim. As cores indicam a velocidade do fluxo.

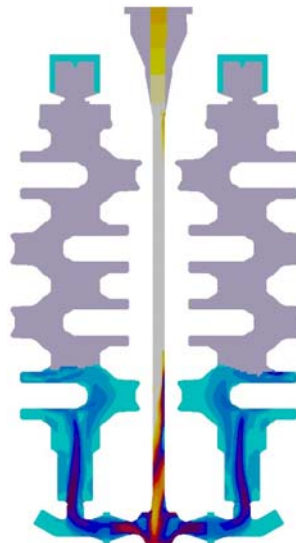


Figura 18 – Peça atacada por baixo, melhor configuração. As cores indicam a velocidade do fluxo.

A figura 17 mostra a primeira configuração simulada, na qual a peça é atacada pela lateral da espiga. A idéia de atacar a peça pela lateral surgiu devido ao espaço restrito para alocar todo o conjunto na placa de moldar. Com esta configuração, a distribuição dos componentes na placa pode ser feita valendo-se de uma menor altura (compare as figuras 17 e 18 – nesta primeira, os canais não ultrapassam a cota inferior da peça), porém necessita-se de uma maior distância entre as duas peças, o que também é fator limitante neste caso. A posição do ataque inferior em uma face cilíndrica também leva a outro problema, a rebarbação. A remoção do ataque que fica na peça após a quebra dos canais não pode ser feita por esmerilhamento convencional, devido ao risco de se danificar a peça, e portanto, um dispositivo para o acabamento se faz necessário. Quanto ao perfil de enchimento, esta configuração leva a um escoamento sob alta velocidade na região dos ataques, além de promover o aquecimento excessivo do molde nesta região. Como consequência da velocidade do fluxo, pode ocorrer o aparecimento de defeitos por inclusão de drosses, escória e areia na peça. Já o aquecimento excessivo, pode resultar na sinterização da areia do molde nas regiões próximas dos ataques.

A figura 18 traz a segunda versão para o sistema de alimentação deste girabrequim. Neste sistema, os canais de distribuição estão dispostos de forma a evitar com que a primeira frente metálica caminhe direto para a peça. O perfil de velocidades mostra um escoamento na região dos ataques sob velocidades mais baixas que as encontradas no projeto anterior. O ataque na seção plana da espiga também favorece a rebarbação, além de permitir o uso de uma seção transversal maior para a alimentação da peça.

A dificuldade para o acabamento e a alta velocidade do fluxo metálico na região de ataque fez com que a opção pelo ataque lateral fosse abandonada. Nas versões subseqüentes, buscou-se o aprimoramento do sistema de canais da figura 18 a fim de permitir a diminuição da velocidade do fluxo e também, evitar a formação de drosses e o arraste de impurezas para dentro da peça. A figura 19 mostra uma versão intermediária do sistema de canais e a figura 20 a proposta final para a alimentação da peça.

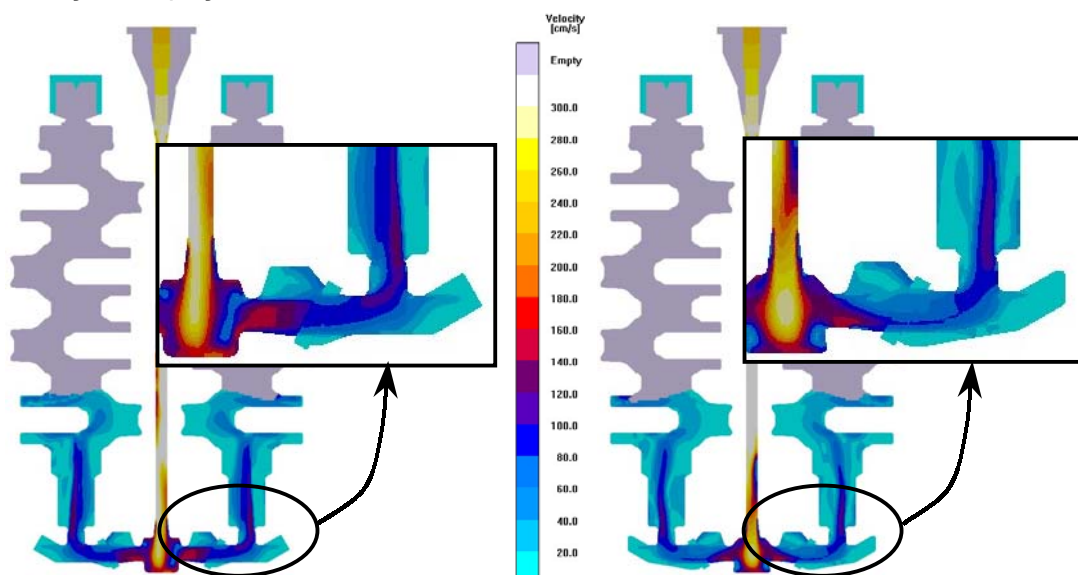


Figura 19 – Alterações em relação ao projeto anterior. Modificações para melhorar as condições de enchimento. As cores indicam a velocidade do fluxo.

Figura 20 – Projeto final, velocidades mais baixas na região dos ataques. As cores indicam a velocidade do fluxo.

No projeto mostrado na figura 19, optou-se pelo uso do filtro inclinado, que juntamente com a adição de uma bolsa na sua entrada, favorece a flotação da escória. Devido à desaceleração do fluxo e à inclinação do filtro, a escória tende a ocupar o espaço mais alto desta bolsa e com isso diminui a quantidade de inclusões que vão de encontro ao filtro, reduzindo a possibilidade de obstrução dos seus orifícios. Assim sendo, tem-se um metal mais limpo e um enchimento mais constante do início ao final do vazamento. No projeto mostrado na figura 20, as alterações ficaram apenas na otimização dos canais, sem mudar a sua concepção, com o objetivo de diminuir a velocidade do fluxo nos ataques. Na figura 20, nota-se uma diminuição das regiões vermelhas, que indicam velocidades de aproximadamente 140 cm/s, e também se percebe uma diminuição na velocidade do escoamento através e após o filtro.

Com o auxílio da simulação, a produção desta peça alcançou ótimos resultados já nos primeiros lotes. Embora ainda em fase de amostras, pôde-se perceber que os efeitos da grande altura de queda na qual o metal é submetido durante o vazamento estão sendo absorvidos pelo sistema de distribuição, cumprindo assim o propósito ao qual concebeu-se este sistema de canais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

As ferramentas de simulação do processo de fundição vêm cumprindo um grande papel no desenvolvimento de fundidos, auxiliando projetistas e fundidores de uma forma simples e direta, desde a concepção do produto até a sua produção final. Com o uso da simulação, é possível detectar falhas no projeto já nos seus instantes iniciais. Pode-se garantir a fundibilidade de um componente durante a sua criação, definir sistemas de canais de distribuição e sistemas alimentação e definir dados de processo, tudo isto sem vazar uma só gota de metal. Desta forma, ganha-se tempo e dinheiro. Tempo, com a redução do ciclo de desenvolvimento; reduz-se drasticamente o número de provas para “acertar” o processo de fundição, que sem a simulação seria na forma de tentativa e erro. Dinheiro, com a economia de recursos físicos, resultado de um desenvolvimento mais “enxuto”.

Vale ressaltar que as ferramentas de simulação servem para auxiliar projetistas e fundidores nas suas tarefas e em momento algum, podem substituí-los. O sucesso na implementação e uso desta tecnologia se deve muito mais à forma de como a simulação é tratada pelos profissionais responsáveis pela sua aplicação e uso, e aqui se incluem desde o operador do sistema computacional ao responsável pela fundição da peça, do que na qualidade do *software* propriamente dito. Isto significa dizer que o *software* de simulação só dará o devido retorno se a indústria de fundição estiver preparada para aplicá-lo. Na Tupy Fundições esta tecnologia vem gerando bons resultados desde a sua implantação em 1997, onde vem sendo aplicada tanto na resolução de problemas, quanto no desenvolvimento de novos componentes. Atualmente, o desenvolvimento de peças toma cerca de 90% dos trabalhos de simulação, gerando um retorno que se reflete diretamente na qualidade de nossos produtos e por conseqüência, na satisfação de nossos clientes.

FOUNDRY PROCESS SIMULATION USE IN THE DEVELOPMENT OF THE DUCTILE IRON PARTS

Carlos Gomes de Oliveira ¹
Wilson Luiz Guessser ²
Ivo Baumer ³

ABSTRACT

In the last years, the foundry industries have been undergoing big changes in its supplier profile, passing from a simple outsider company for a supplier with products and services with high technology. This scene, allied with a strong competition in the foundry market makes the foundries improve constantly its products and services. Due to the use of the foundry process numerical simulation tools (*software* CAE), only a few companies have been success, using the simulation as a feature of the development cycle of its components. Three distinct cases are presented. The simulation application will be illustrated in the problems resolution and in the product development of the ductile iron parts, as well as the benefits achieved with the simulation used in different stages of the project.

Key-words: simulation; foundry; ductile iron.

IV Seminário de Fundição, Volta Redonda, RJ, May, 14th to 16th of 2003.

¹ Specialist in foundry process simulation at Tupy Fundições Ltda.

² Director-Manager of the Metallurgical Engineering at Tupy Fundições Ltda.

³ Metallurgical process coordinator at Tupy Fundições Ltda.