

Avaliação do uso de simulação computacional para produção sob encomenda de peça fundida em aço

Joel Lima

joellima@globo.com
Centro Federal de Educação
Tecnológica de Minas
Gerais - CEFET-MG

Ernani Sales Palma

palma@pucminas.br
Pontifícia Universidade
Católica de Minas Gerais -
PUC MINAS

Wisley Falco Sales

wisley.sales@gmail.com
Universidade Estadual de
Santa Cruz - UESC

Resumo

A simulação computacional do processo de fabricação é uma tecnologia ainda pouco utilizada pelas fundições de peças sob encomenda em aço, ao contrário do que acontece com as fundições de peças seriadas. No setor, predominam empresas familiares de pequeno e médio porte, que carecem de investimentos em tecnologia para obtenção de produtos compatíveis com as exigências de mercado, tais como preços competitivos internacionalmente, redução do prazo para fabricação e melhor desempenho das peças em serviço. Os softwares para fundição, disponíveis no mercado, são apontados como solução para analisar criticamente os projetos, garantir a qualidade do produto e atenuar possíveis perdas decorrentes do método de tentativa e erro, habitualmente empregado por essas indústrias. O desenvolvimento deste trabalho, utilizando um software comercial para a simulação do processo de fundição, tem por objetivo avaliar se essa tecnologia pode se transformar em ferramenta de uso sistemático para otimizar a fabricação de peças não seriadas em aço. A metodologia aplicada foi a análise comparativa de uma simulação pós-produção com os resultados obtidos para um produto fabricado sem o uso deste recurso. Também foi avaliada a possibilidade da introdução de melhorias no processo e no produto, a partir da simulação computacional pré-produção para a fabricação da mesma peça. No decorrer do desenvolvimento do trabalho constatou-se que a contribuição da simulação computacional é proporcional ao nível de conhecimento e domínio da organização sobre as variáveis de seu processo e da disponibilidade de analistas, nessas empresas, com capacidade de interpretar os resultados simulados e introduzir, no software para processamento, dados referentes às melhorias desejadas. As conclusões indicam que a simulação computacional é uma ferramenta com elevado potencial para ser adotada nas fundições de peças não seriadas em aço, principalmente, para a previsão e prevenção de descontinuidades nos produtos.

Palavras-chave: Fundição de aço. Simulação computacional. Produtos não seriados.

Abstract

Computational simulation of manufacturing process is a technology still underused by custom steel foundries, unlike what is common practice to serial-part foundries. Small and medium-sized family-controlled companies are predominant in the sector and they lack technology investments to be able to obtain products matching market demand, such as internationally competitive prices, reduced production lead time and better performance of parts in service. Casting software available in the market are pointed as a solution to analyze projects critically, ensure product quality and reduce possible losses resulting from trial and error, which is usually employed by these industries. Development of the present work, using commercial software to simulate the casting process, aims at evaluating whether this technology is capable to become a systematic tool for optimizing custom steel parts manufacture. The methodology applied was a comparative analysis of a post-production simulation and the results from a product made without this resource. The possibility to introduce process and product improvements was also evaluated based upon preproduction computational simulation of the same part. In the course of the present work, the evidence of computational simulation contribution is proportional both to the knowledge and mastery level of the organization over their process variables and to the availability of analysts in these organizations to interpret simulated results and input the intended improvements data into the software for processing. Conclusions indicate that computational simulation is a high-potential tool to be adopted by custom steel foundries, mostly to forecast and prevent product discontinuity.

Keywords: Steel casting. Computational simulation. Custom products.

1 Introdução

A fundição de peças em areia, a partir do metal líquido elaborado em fornos com diferentes capacidades produtivas, apresenta vantagens em relação aos demais processos de fabricação, principalmente para a produção de pequenos lotes, peças unitárias ou de geometria complexa, ligas metálicas especiais e, também, para peças de grandes dimensões - características freqüentes na fabricação sob encomenda (Beeley, 2001). Blair e Monroe (2004) apontam que a estratégia a ser disseminada para ampliar ainda mais as vantagens e resultados positivos da fundição é a existência de uma forte interação entre compradores e fundidores. Entretanto, é necessário que ambos tenham conhecimento das especificidades e variáveis que interferem no processo e afetam a qualidade do produto.

Diversos autores, dentre eles Bonollo (2001), Pariona (2002) e Sturm (2004), afirmam que a indústria de fundição tem apresentado uma nova postura no mercado e que, gradativamente, vem abandonando o perfil de uma simples empresa subcontratada para assumir a posição de fornecedora com participação ativa no desenvolvimento de produtos junto aos clientes. Nas duas últimas décadas, materiais e equipamentos de alta tecnologia têm sido disponibilizados para aplicação no processo; fato, este, que permite que as empresas de fundição apresentem novas soluções para seus clientes (Brown, 2004). Como exemplo, pode ser citado a melhoria da qualidade superficial dos fundidos, que favorece a redução do sobremetal e, em alguns casos, possibilita, até mesmo, eliminar operações de usinagem (Schmidt e Menezes, 2005).

Para Oliveira, Guessser e Baumer (2003), a utilização de modelagem numérica ou de simulação computacional no processo de fundição é o diferencial que permite a apenas algumas empresas se destacarem com sucesso neste cenário. Isto se deve, principalmente, à possibilidade de minimizar os recursos e o tempo aplicado aos desenvolvimentos de novos produtos fundidos. Contudo, está é a realidade das empresas dedicadas à fabricação de produtos fundidos em série, como os fabricantes de autopeças, pois poucas são as empresas dedicadas à fundição não seriada que se enquadram nas condições apresentadas (Soares, 2000; Sschmidt, 2006).

Desta forma, a ênfase deste artigo é avaliar se a tecnologia da simulação computacional também se aplica as empresas de fabricação sobre encomenda como uma ferramenta sistemática para a otimização e melhoria dos seus processos e produtos.

1.1 O processo de fundição e a simulação computacional

No Brasil, o setor de fundição possui uma série de vantagens competitivas, tais como a disponibilidade, em larga escala, de matérias-primas e recursos humanos. As grandes empresas são bem estruturadas e, em sua maioria, empregam tecnologia de ponta em seus processos. Alguns diferenciais competitivos são reconhecidos internacionalmente, como o fato de se utilizar ferro gusa líquido na elaboração de ferros fundidos, por meio de uma linha direta com o alto forno.

Por outro lado, as fundições de peças não seriadas, convivem com um baixo rendimento metálico, cujo aproveitamento oscila em torno de 60% para as ligas de aço. Este fato interfere na rentabilidade dessas empresas, por meio da elevação direta dos custos de fabricação e redução da capacidade de produção, sem garantir a sanidade dos produtos em relação aos defeitos oriundos da solidificação, o que pode ser constatado pelos elevados índices de rejeição (Soares, 2000). Assim, quando uma fundição consegue obter um rendimento metálico mais elevado, conjugado com produtos isentos de defeitos, conseqüentemente alcança uma economia significativa de recursos para a produção de fundidos, a maximização da capacidade produtiva, a elevação do nível de qualidade e a redução do lead time que, em conjunto, agregam valor ao produto. As empresas de fundição têm conhecimento de que a obtenção da melhoria do rendimento metálico e a isenção de defeitos no produto fundido têm como ponto de partida o adequado dimensionamento dos sistemas de alimentação e enchimento (Ferreira, 2001). Além disso, no mercado já estão consolidadas algumas tecnologias que auxiliam o controle da solidificação, como o uso de resfriadores, produtos exotérmicos e isolantes; mas estas, isoladamente, não são suficientes para garantir que o máximo rendimento seja alcançado na fabricação de peças íntegras, sob o aspecto da sanidade interna (Brown, 2004). É neste ponto que se concentram as pesquisas para a modelagem numérica da solidificação e o desenvolvimento dos softwares para simulação computacional do processo de fundição. Esta tecnologia alcançou um elevado grau de confiabilidade na produção de peças seriadas em todo o mundo, principalmente, quanto à previsão e eliminação das descontinuidades relacionadas aos fenômenos associados ao enchimento e à solidificação do metal no molde (Louvo, 1997; Sartori, 2006).

Em síntese, qualquer que seja o processo de fabricação, o controle ou o domínio do maior número de variáveis é essencial para a qualidade do produto, independente da utilização da simulação computacional. A fundição é,

reconhecidamente, um processo muito complexo, por envolver inúmeras variáveis determinantes para o êxito do mesmo. O controle das variáveis influencia diretamente os resultados obtidos em uma simulação realizada por qualquer software. Portanto, a veracidade e qualidade dos dados de entrada, a definição dos graus de liberdade e as condições de contorno impostas ao software são mais significativas que o modelo matemático utilizado pelo mesmo - considerando os avanços nesta área, alcançados nos últimos quinze anos (Louvo, 1997; Bonollo, 2001; Reis, 2004; SENAI/DN, 2007).

Ressalta-se que o presente trabalho não apresenta julgamento relativo ao software utilizado ou aos demais softwares disponíveis para simulação computacional do processo de fundição. Percebe-se que todos apresentam interface amigável com o usuário e que o principal cuidado operacional em relação ao uso dos mesmos está relacionado com a definição da malha para a simulação; uma malha grosseira acelera o processamento, mas compromete, quase sempre, a qualidade dos resultados simulados. Finalizando, o que se deve buscar, antes da escolha de um software, é conhecer muito bem o processo que será simulado, “assim, quanto melhor a produção real da peça puder ser representada no estudo computacional, mais próximos os resultados da simulação estarão da realidade” (Oliveira, Guesser e Baumer, 2003).

2 Desenvolvimento

2.1 Planejamento experimental

O trabalho desenvolvido compreende o acompanhamento da fabricação de um produto, em cinco etapas distintas, conforme o fluxograma apresentado na Fig. 1.

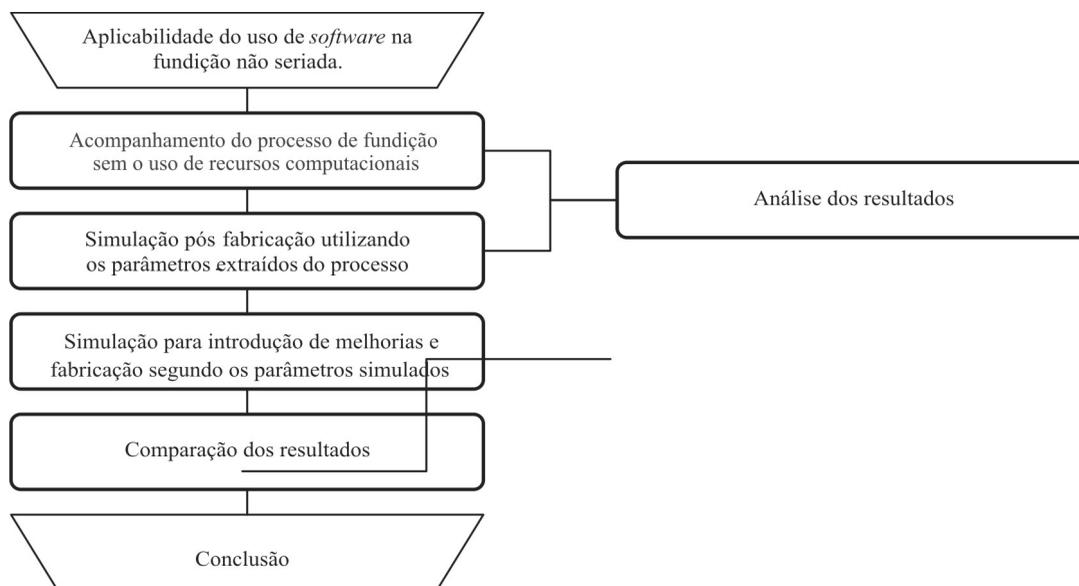


Figura 1: Fluxograma de desenvolvimento do trabalho.
Fonte: GUEYRARD et al. (2000).

O objeto para desenvolvimento deste trabalho é um típico produto de fabricação não seriada em aço - rodas dos carros de grelhas para fornos de sinterização. Trata-se de peças sobressalentes para manutenção industrial, de uso contínuo, com reposição periódica em função de desgaste. Estas rodas são utilizadas por empresas de mineração (pelotização) e por empresas siderúrgicas (sinterização). A Fig. 2 e a Fig. 3 apresentam, respectivamente, o desenho e as rodas aplicadas.

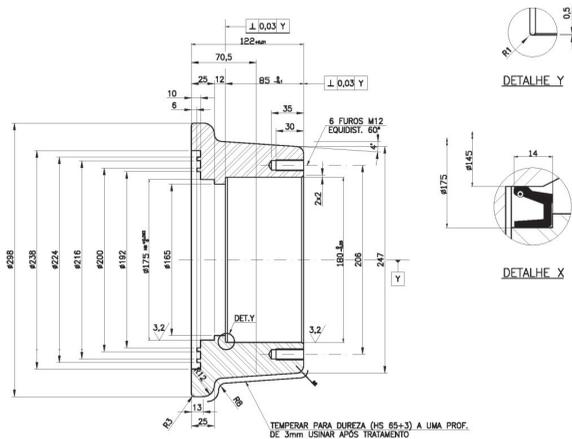


Figura 2: Desenho da peça acabada.
Fonte: Dados da pesquisa

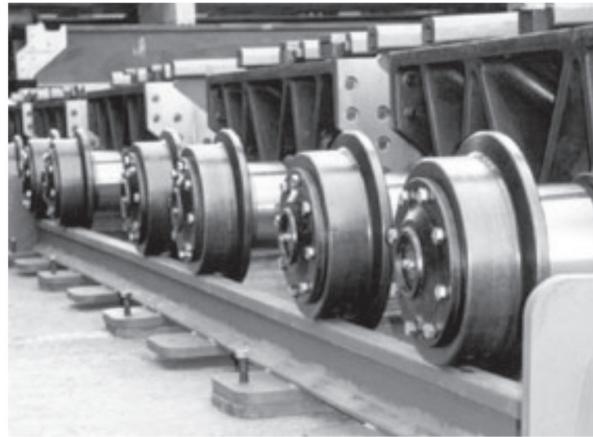


Figura 3: Exemplo de aplicação da peça.
Fonte: Dados da pesquisa

Usualmente, a empresa compradora não se envolve com questões relativas à fabricação de ferramental nem interfere na definição de detalhes do processo de fundição, que ficam a cargo do fabricante. A fabricação do produto reúne além da fundição, operações de usinagem e tratamento térmico superficial por indução.

2.2 Recursos

Para o desenvolvimento deste trabalho, realizou-se, inicialmente, uma sondagem sobre o tema proposto, junto a empresas e profissionais das áreas de engenharia, manutenção, fundição e software. Como resultado, ficou evidente que a melhor condição para avaliação da tecnologia de simulação computacional voltada para um processo tão complexo, pelo número de variáveis envolvidas, seria realizá-la em uma situação real de fabricação.

Diante deste fato, duas empresas, sem vínculo com os autores, foram convidadas e aceitaram participar deste trabalho. A primeira, uma tradicional empresa de fundição não usuária de software para simulação de seu processo, permitiu a realização do estudo da roda do carro de grelha, item da sua carteira de pedidos. A segunda, empresa de engenharia de software, realizou as simulações com os dados e parâmetros informados pelos autores. Entre as empresas não existiam relações comerciais até aquele momento.

Para as avaliações de amostras e análises dos resultados foram utilizadas as instalações e laboratórios da PUC MINAS e do CEFET-MG.

2.3 Projeto e parâmetros de fabricação

O procedimento para fabricação de uma peça fundida sob encomenda se inicia com a análise do desenho voltada para a definição do sistema de alimentação e enchimento. Deve-se seguir o conjunto de boas práticas de fabricação, disseminadas entre os profissionais do setor. Esse conjunto reúne técnicas e cálculos para o direcionamento da solidificação e dimensionamento dos alimentadores. O técnico em fundição realiza a avaliação das dimensões, geometria e material da peça, identificando a forma de solidificação do metal, distribuição das massas e localização dos pontos quentes. Para tal, são utilizadas, normalmente, as regras dos círculos inscritos e dos módulos, definidas, respectivamente, por Heuvers e por Chorinov, citados por Ferreira (2001). Convencionalmente, a análise térmica e o dimensionamento dos canais e alimentadores são estabelecidos com base na bagagem empírica da equipe de profissionais, nos dados técnicos históricos da organização e nas recomendações de fornecedores de materiais exotérmicos e isolantes.

Para a roda em estudo, o projeto de fundição exigiu alterações na forma geométrica original da peça, em razão de requisitos inerentes ao processo de fundição, como sobremetal para usinagem, ângulo de saída do modelo e direcionamento da alimentação. A Fig. 4 e a Fig. 5 apresentam, respectivamente, a sobreposição ilustrativa da peça bruta sobre a peça acabada - para melhor percepção das diferenças de forma e dimensão - e detalhes dos sistemas de alimentação e enchimento.

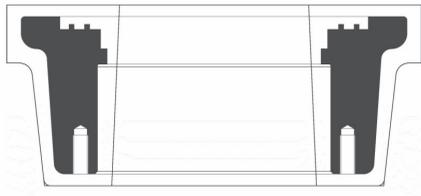


Figura 4: Peça bruta e peça usinada.
Fonte: Dados da pesquisa.

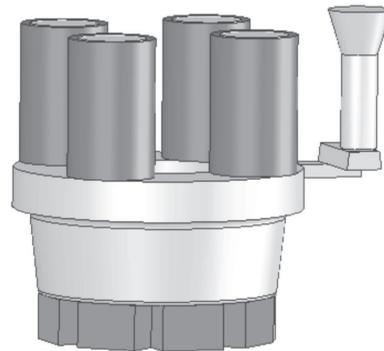


Figura 5: Desenho do projeto de fundição.
Fonte: Dados da pesquisa.

Pode-se destacar na Fig. 5 os alimentadores posicionados na parte superior da peça, revestidos com luvas exotérmicas; na parte inferior, resfriadores metálicos colocados no molde para acelerar a troca térmica na região em que estão inseridos, favorecendo a alimentação da contração no restante da secção.

Para a fabricação da roda foi utilizado um modelo em madeira fixado em caixa-placa para moldagem manual em areia resinada de cura a frio. A Fig. 6 apresenta o modelo utilizado, onde se destaca a caixa placa que acompanha a geometria da peça para minimizar a relação areia / metal. Na Fig. 7 observa-se as partes superior e inferior do molde em areia, evidenciando a colocação dos resfriadores metálicos e as aberturas correspondentes aos alimentadores, revestidas por luva exotérmica.



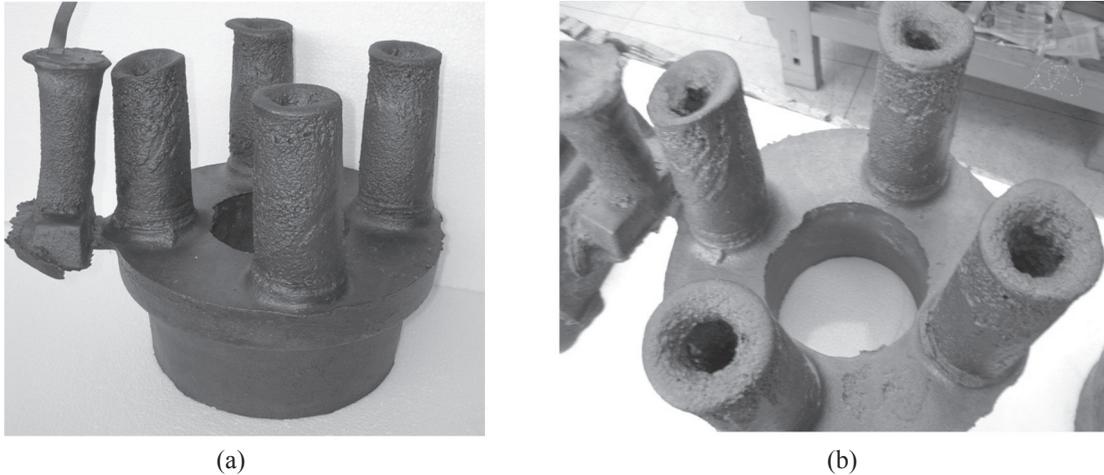
Figura 6: Modelo em caixa-placa.
Fonte: Dados da pesquisa.



Figura 7: Partes inferior e superior do molde.
Fonte: Dados da pesquisa.

Definido o processo de fabricação, as informações para produção foram registradas em documentação técnica com a descrição dos padrões de fabricação escolhidos, com as estimativas de consumo e com os croquis detalhados da peça, indicando o posicionamento e a quantidade de canais e alimentadores. A composição química do material, as temperaturas de fusão e vazamento, os procedimentos metalúrgicos e as recomendações técnicas para cada setor, incluindo parâmetros para tratamentos térmicos e plano de inspeção e testes, também foram informados na mesma documentação.

A Fig. 8 (a) e (b) mostra a peça fundida antes da separação dos canais e alimentadores. É possível observar a disposição dos alimentadores e as cavidades oriundas da contração de solidificação.



(a) **Figura 8:** Detalhes da peça fundida com seus alimentadores.
Fonte: Dados da pesquisa.

Destaca-se que a rotina descrita anteriormente é semelhante para a maioria das empresas de fundição sob encomenda; entretanto, em algumas delas, predomina um maior grau de empirismo para determinação dos parâmetros técnicos para a fabricação.

2.4 Inspeção do produto e resultados da fabricação

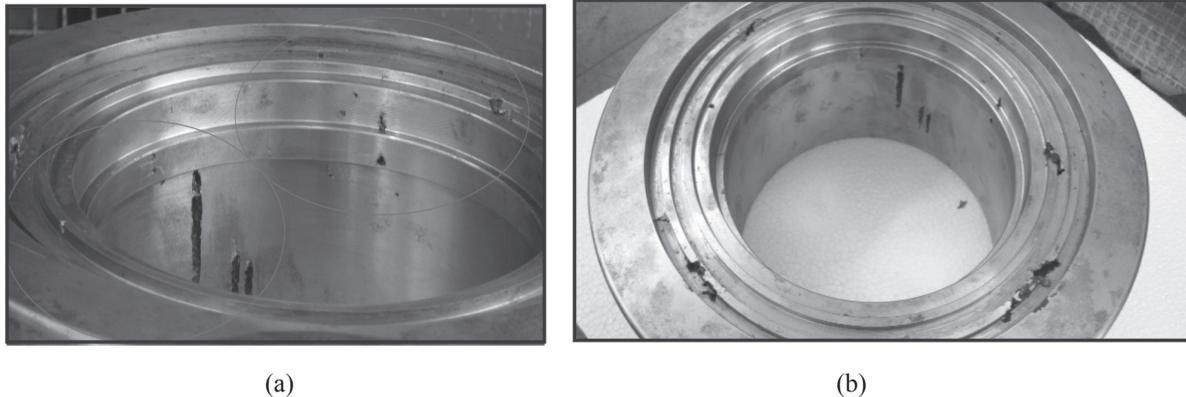
Após o processo de fundição e separação dos canais, as peças acabadas foram submetidas a tratamento térmico de normalização, a limpeza com jato de granalhas de aço e, posteriormente, foram inspecionadas pelos métodos visual e ultra-som. Na inspeção visual foi possível detectar que algumas peças apresentavam descontinuidades nas regiões em que foram posicionados os alimentadores, conforme mostra a Fig. 9.



Figura 9: Peça em bruto com descontinuidade visível na região do alimentador.
Fonte: Dados da pesquisa.

Ao serem submetidas à inspeção por ultra-som, algumas peças apresentaram descontinuidades internas de difícil interpretação pelo teste; isto em razão da detecção de falhas concentradas em pontos isolados. Para esclarecer as dúvidas do teste, as peças com esta indicação foram submetidas à usinagem e nova inspeção.

Após a inspeção das peças usinadas, constatou-se que as mesmas apresentavam porosidades em toda a extensão de seu perímetro, conforme Fig. 10 (a). O modo como as porosidades incidiram sobre as peças é característico do processo de oxidação do metal (AFS, 2007). Em parte das peças também foram identificadas cavidades em decorrência de deficiência de alimentação da contração de solidificação, ou seja, rechupes coincidentes com o posicionamento dos alimentadores, conforme mostra a Fig. 10 (b).



(a)

(b)

Figura 10: Peças usinadas apresentando descontinuidades.

Fonte: Dados da pesquisa.

A Tab. (1) apresenta os dados da inspeção do produto após a realização de todas as etapas de fabricação.

Tabela 1: Resultado da inspeção final nas rodas fabricadas.

Situação	Peças aprovadas	Peças retrabalhadas	Peças refugadas
%	36	57	7

Fonte: Dados da pesquisa.

Foram consideradas aprovadas as peças isentas de defeitos, equivalente a 36% do lote fabricado. Algumas peças, sem condições de recuperação, foram refugadas (7%), devido à extensão dos defeitos ou da área defeituosa. As demais peças (57%) foram submetidas à recuperação por soldagem e posterior retrabalho de acabamento, usinagem e tratamento térmico. Os resultados da inspeção surpreenderam os envolvidos no processo, que não se lembravam da ocorrência de descontinuidades e não dispunham do histórico de fabricação da peça, já produzida anteriormente.

2.5. Simulação pós-fabricação

Conforme o planejamento experimental apresentado, os dados coletados durante o acompanhamento do processo foram inseridos em um software para simulação do processo de fundição pós-fabricação, a fim de verificar a possibilidade de a simulação reproduzir os resultados obtidos para o produto.

Na Fig. 11 pode-se verificar o resultado da aplicação de resfriadores no molde para acelerar a solidificação da parte inferior da roda. Este recurso teve por objetivo reduzir a seção dependente de metal dos alimentadores a fim de suprir os efeitos da contração de solidificação.

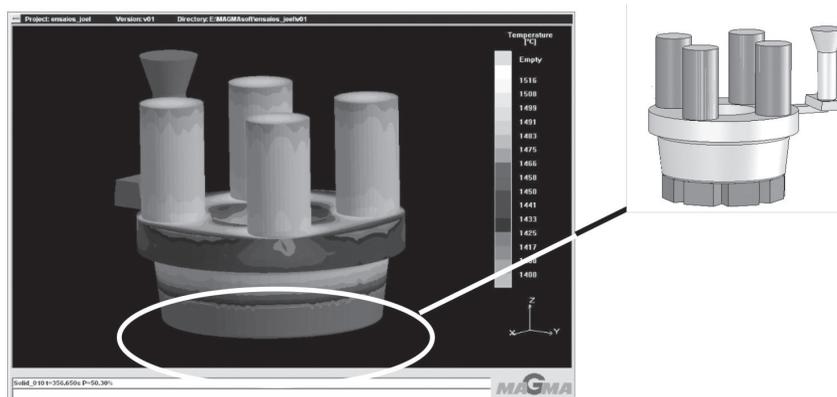
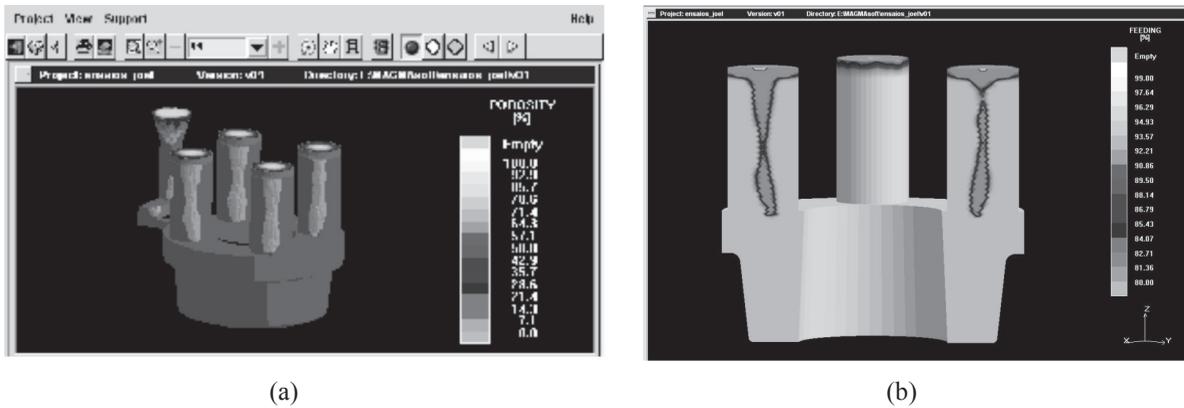


Figura 11: Análise da eficiência dos resfriadores.

Fonte: Dados da pesquisa.

A região escura no diâmetro inferior da peça comprova que os resfriadores exerceram suas funções. No detalhe, são mostrados os resfriadores que não aparecem na imagem da simulação.

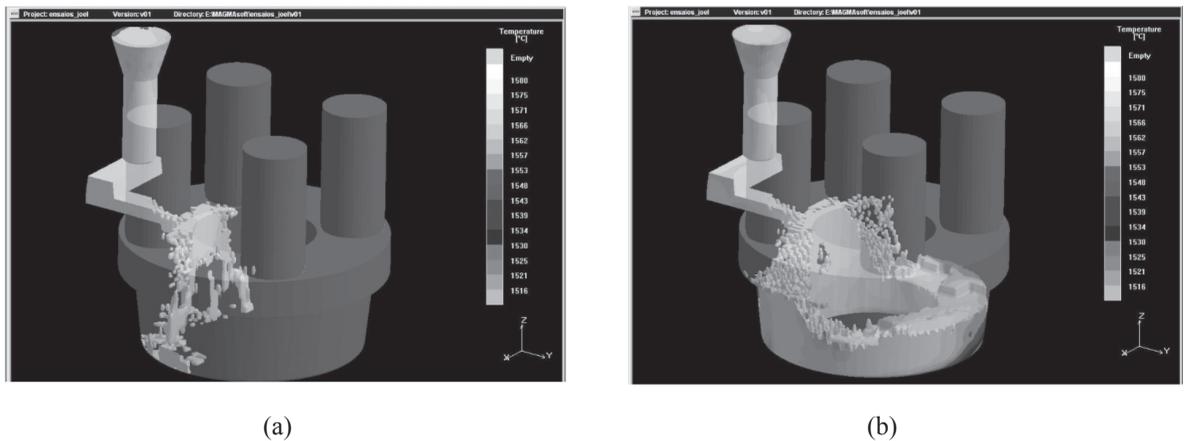
A Fig. 12 (a) e (b) apresenta, respectivamente, o projeto de fundição e a imagem gerada pelo software para avaliação da eficiência do sistema de alimentação utilizado.



(a) (b)
Figuras 12: Análise da eficiência do sistema de alimentação.
Fonte: Dados da pesquisa.

Observa-se que as cavidades dos alimentadores estão próximas a face da peça, indicando que o projeto encontra-se no limite extremo em relação a capacidade dos alimentadores de suprirem a contração de solidificação da peça. As possíveis variações de processo, tais como oscilações de temperatura, falta de cobertura exotérmica e ineficiência das luvas exotérmicas, aliado a inexistência de margem de segurança da alimentação, concorreram para que a profundidade da cavidade atingisse ou não a peça, como constatado no lote fabricado.

A Fig. 13 (a) a (b) apresenta a imagem do enchimento da peça.



(a) (b)
Figuras 13: Análise do sistema de enchimento.
Fonte: Dados da pesquisa.

Percebe-se que a forma de enchimento projetada compromete a sanidade da peça. A entrada por cima do material provoca fluxo irregular, com má distribuição de metal, elevada turbulência e refluxo. O canal de descida na forma cilíndrica favorece o aprisionamento de gases e a demasiada exposição do metal à atmosfera concorre para uma acentuada oxidação da liga de aço. As possíveis quedas dos teores dos elementos desoxidantes presentes na liga, tais como alumínio, silício e manganês, a excessiva exposição do metal durante as transferências forno-panela-molde e as evidências obtidas na simulação do enchimento, justificam o fato de algumas peças apresentarem porosidades e outras não, conforme constatado na inspeção.

2.6. Simulação para introdução de melhorias no processo e produto

Diante da constatação de que a simulação computacional pós-fabricação, utilizando os parâmetros reais do processo de fundição, foi capaz de reproduzir resultados coincidentes com aqueles obtidos nas peças produzidas, uma nova simulação foi realizada. Esta simulação teve por objetivo introduzir melhorias nos sistemas de alimentação e enchimento, a fim de evitar a reincidência das discontinuidades detectadas.

A solução escolhida pelos autores para a reposição das peças refugadas, no menor prazo possível e sem gerar novas despesas com projeto e ferramental, foi realizar adequações dos aspectos que intensificavam as possibilidades da ocorrência de discontinuidades nas peças diante das variações do processo, evidenciados pela simulação computacional.

Em síntese, o sistema de enchimento foi alterado para se evitar a turbulência, o refluxo e a excessiva agitação e exposição do metal a reações com a atmosfera, que favorecem a oxidação da liga (Fuoco, 2006). O canal de descida cilíndrico foi substituído por um canal trapezoidal e o enchimento por cima passou a ser realizado por baixo e tangente ao diâmetro menor da peça, favorecendo o fluxo do metal. Essas adequações do projeto de fundição podem ser evidenciadas pela Fig. 14.

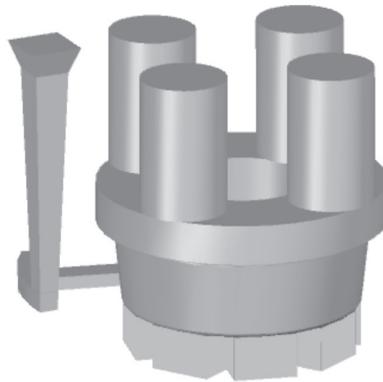


Figura 14: Detalhes do projeto revisado.
Fonte: Dados da pesquisa.

A Fig. 15 e a Fig. 16 representam, respectivamente, o início do processo de enchimento da peça e a fase final do processo de solidificação da mesma. Essas imagens foram extraídas da simulação computacional realizada com as alterações do projeto de fundição.

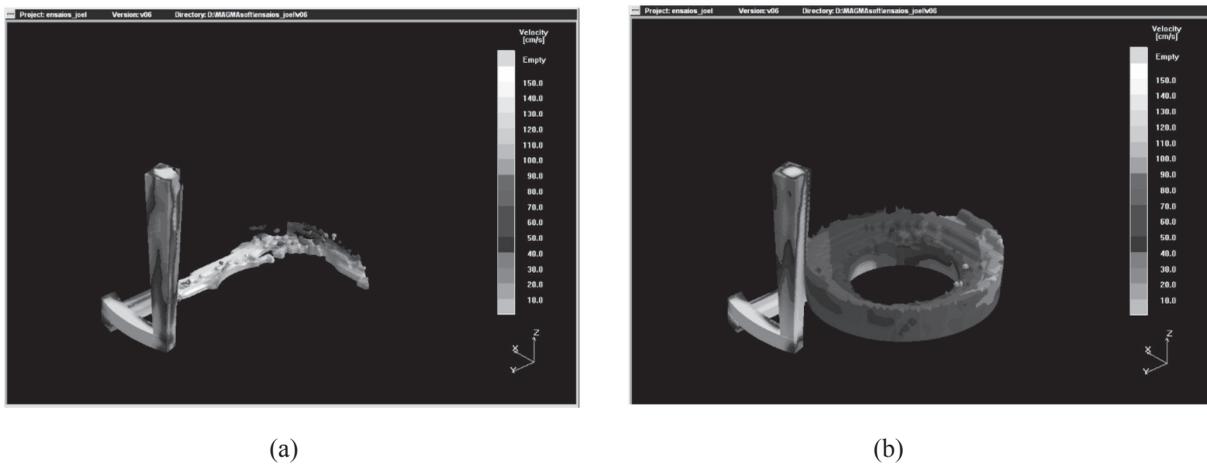


Figura 15: Simulação do enchimento.
Fonte: Dados da pesquisa.

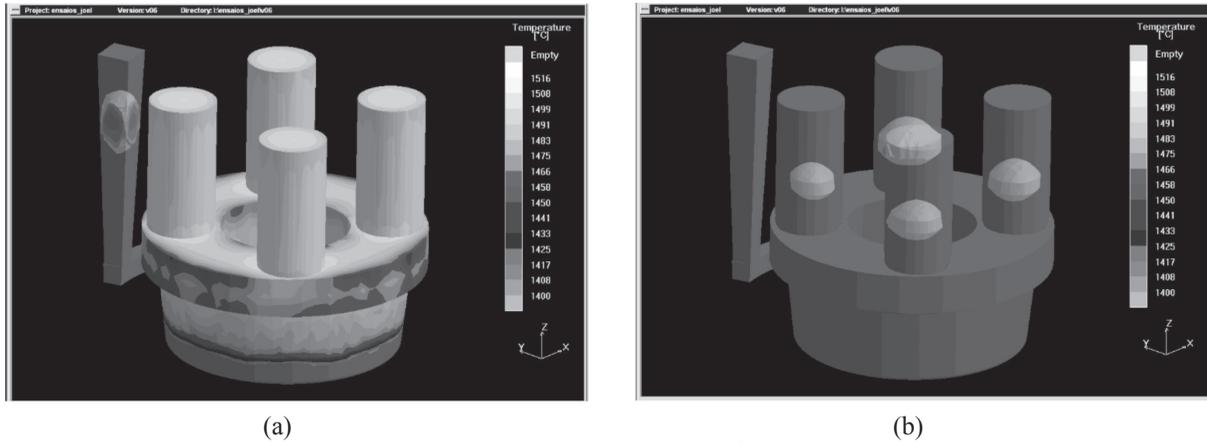


Figura 16: Simulação da solidificação.
Fonte: Dados da pesquisa.

Pelas imagens da Fig. 15 (a) e (b), é possível verificar que a posição do canal com entrada por baixo e tangente a roda favorece o fluxo de metal sem excessiva agitação ou turbulência, conforme esperado pelos projetistas. Na imagem da Fig. 16 (a), a eficiência dos resfriadores pode ser visualizada e pela imagem da Fig. 16 (b), observa-se que os últimos pontos quentes, localizados nos alimentadores, estão distantes da face da roda, minimizando a possibilidade de ocorrência de rechupes.

Concluída a simulação computacional para introdução de melhorias no processo e no produto, as peças foram, então, fabricadas. Para garantir um maior controle das variáveis relacionadas às discontinuidades detectadas nas peças produzidas anteriormente, o acompanhamento do processo produtivo foi intensificado. Os elementos desoxidantes presentes na liga - alumínio, silício e manganês - foram controlados para permitir uma perfeita desoxidação ao longo de toda a etapa de vazamento. A aproximação dos moldes em relação ao forno e um efetivo controle da temperatura de fusão, vazamento e pré-aquecimento de panelas foram realizados, com o intuito de preservar os elementos químicos essenciais à qualidade do aço fundido. As luvas exotérmicas, por serem altamente higroscópicas, foram acondicionadas com proteção contra umidade ou colocadas em estufas sob temperaturas constantes. Este fator, quando não observado, contribuiu significativamente para a ocorrência de ambas as discontinuidades detectadas na fabricação anterior.

A Fig. 17 apresenta a peça fundida fabricada após a simulação do processo.



Figura 17: Peça fundida com projeto revisado.
Fonte: Dados da pesquisa.

Na imagem é possível observar que os alimentadores não apresentam as cavidades características do esvaziamento do mesmo durante a alimentação da contração, que acontece na solidificação do metal. Este fato ocorreu devido à utilização do recurso “recalque” ou “bombeamento”, que consiste no reabastecimento imediato da cavidade à medida que o alimentador se esvazia - procedimento também simulado. O recalque é um recurso prático, normalmente adotado pelas fundições de peças não seriadas em aço, quando se percebe que os alimentadores não possuem margens de segurança, como evidenciado pelas simulações realizadas.

As peças fabricadas foram submetidas à inspeção por ultra-som, usinadas e não apresentaram descontinuidades. Desta maneira, o resultado das alterações de projeto foi considerado satisfatório. Mais uma vez, a simulação computacional mostrou sua capacidade em reproduzir, de forma fidedigna, o processo de fabricação.

3 Comentários e discussões

O trabalho realizado mostrou que a principal aplicação da simulação computacional do processo de fundição está relacionada com a previsão de descontinuidades. Apesar da evidente preocupação com a redução de custos pela melhoria do rendimento metálico, a ocorrência de não-conformidades nos produtos e a conseqüente necessidade de retrabalho e reposição de peças rejeitadas têm um efeito mais significativo, sob o aspecto econômico, para as empresas. Este fato contribui para que o rendimento metálico das fundições sob encomenda seja, ainda, mais comprometido pela simples relação direta existente entre os sistemas de alimentação e enchimento e as descontinuidades, oriundas do processo de solidificação. Um ciclo vicioso é, então, observado, quando os canais são superdimensionados para evitar as não-conformidades e, conseqüentemente, o baixo rendimento metálico torna-se um efeito deste procedimento.

No presente trabalho, o projeto elaborado sem o uso da simulação apresentou resultado satisfatório para quase metade do lote produzido. No cotidiano das fábricas, esse é um forte indicativo de problemas com origem no processo. Isso revela que as fundições que possuem domínio das variáveis e parâmetros de seu processo podem extrair mais vantagens do uso da simulação computacional, pois não é necessário investir muito tempo para identificar a origem das não conformidades. Também é fato que os profissionais que trabalham com software para simulação do processo de fundição devem ser qualificados no processo para analisarem criticamente os resultados da simulação.

No exemplo analisado, as imagens geradas pelo software na simulação pós-fabricação mostraram que o projeto apresentava-se inadequado para garantir a qualidade do produto; isso em razão de falhas no sistema de enchimento por cima e pela falta de margem de segurança nos alimentadores. No entanto, foi o processo, sem o devido controle, que permitiu a oscilação dos parâmetros e acentuou os problemas decorrentes do projeto de fundição. A obtenção de peças isentas de defeitos evidenciou que as variáveis fundamentais do processo não foram adequadamente controladas.

Percebe-se que o estágio de evolução técnica das empresas de fundição e o cenário em que suas atividades se desenvolvem são determinantes para a análise de seu desempenho e, conseqüente, diagnóstico sobre a adoção de novas tecnologias. Um investimento em software de simulação do processo de fabricação é uma ferramenta voltada, especialmente, para auxiliar na definição dos sistemas de enchimento e alimentação; mas não interfere nas condições de processamento ou no controle das demais variáveis da fundição.

No caso apresentado, a empresa de fundição não possuía registros de fabricações anteriores para o produto e, como conseqüência, teve que assumir o ônus da rejeição e retrabalho para um produto conhecido. A falta de memorial técnico adequado, a necessidade de treinamento e qualificação de pessoal suficiente para o desenvolvimento das atividades e a cultura organizacional em que persiste o fato de que decisões técnicas são tomadas sob o peso da influência hierárquica ou de fatores financeiros e comerciais são, também, algumas das dificuldades para obtenção de melhores resultados nestas empresas.

4 Conclusões

O presente trabalho e os resultados analisados indicam que a simulação computacional do processo de fundição é uma ferramenta com elevado potencial para ser aplicada de maneira sistemática nas fundições que produzem peças não-seriadas em aço, objetivando a melhoria do processo produtivo e da qualidade do produto. Deve ser utilizada para a prevenção de descontinuidades nos produtos a serem fabricados, em razão de sua efetiva capacidade de reproduzir virtualmente, com fidelidade, os possíveis resultados para as condições de fabricação planejadas. Para isso, a empresa de fundição deve contar com analistas capazes de introduzir no software os dados e parâmetros reais para processamento e

de interpretar corretamente os resultados das simulações. A aquisição de software para simulação computacional agregará valor aos resultados de uma empresa proporcionalmente ao nível de conhecimento e domínio da organização sobre o seu processo.

Referências

- AMERICAN FOUNDRY SOCIETY. *Analysis of casting defects*. 4th ed. Schaumburg, 2007.
- BEELEY, P. *Foundry technology*. 2nd ed. Oxford: Butterworth Heinemann, 2001.
- BLAIR, M.; MONROE, R. W. *Castings or forgings? A realistic evaluation*. Illinois: Steel Founders' Society of America, 2004.
- BONOLLO, F.; ODORIZZI, S. *Numerical simulation of foundry processes*. Padova: Servici Grafici Editoriali, 2001.
- BROWN, J. R. *Foseco ferrous: foundryman's handbook*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth Heinemann, 2004.
- CAMPBELL, J. *Castings*. 2nd ed. Oxford: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005.
- FUOCO, Ricardo. *Sistemas de enchimento e alimentação de peças fundidas*. Joinville: CINTEC - Congresso de Inovação Tecnológica. Joinville, 2006. CD-ROM.
- OLIVEIRA, Carlos Gomes de; GUESSER, Wilson Luiz; BAUMER, Ivo. O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular. In: SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 4., 2003, Volta Redonda, RJ. *Anais...* Volta Redonda, RJ: ABM, 2003.
- PARIONA, Moises M.; BIHUMA, Eliane; SANTOS, Pedro A. dos. Simulação numérica por elementos finitos da solidificação do aço em moldes de areia. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM INTERNACIONAL, 57., 2002, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2002. p. 555-565.
- REIS, A; SANTOS, A. D.; XU, Zhian. A utilização da simulação numérica na otimização do processo de fundição. In: JORNADAS TECNOLÓGICAS DE ENGENHARIA, 7, 2004, Lisboa. *Anais...* Porto: Feup, 2004.
- SARTORI, Gustavo Trevisan. A simulação numérica aplicada em uma peça fundida obtida empiricamente. *Revista Fundição e Serviços*, v. 16, n. 157, p. 96-103, jan. 2006.
- SCHMIDT, Joern. Avaliação de métodos numéricos para otimização de projeto e processo de fundição. In: SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO, 6., 2006, São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABM, 2006. CD-ROM.
- SCHMIDT, Joern; MENEZES, Geraldo. Redução do custo de fabricação associado ao sobremetal de usinagem em peças fundidas de aço de grande porte. In: CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO, 12., São Paulo. *Anais...* São Paulo: ABIFA/ABAL/ABM, 2005.
- SOARES, G. A. *Fundição: mercado, processos e metalurgia*. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ, 2000.
- STURM, Jorg C. Simulação e ferramenta auxiliar para o desenvolvimento de uma nova geração de motores. *Revista Fundição e Serviço*, São Paulo, v. 14, n. 135, p. 20-28, mar. 2004.