



Simulação numérica
e a fundição de metais do Brasil

Reinaldo José de Oliveira
Antonio César Galhardi



São Paulo
Centro Paula Souza
2016

Copyright © 2016

Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza

É proibida a reprodução total ou parcial desta publicação, por quaisquer meios, sem autorização prévia, por escrito, da editora.

Coordenação

Helena Gemignani Peterossi

Conselho editorial

Alexandre Formigoni, Antonio Cesar Galhardi, Eliane Antonio Simões, Elisabeth Pelosi Teixeira, Getulio Kazue Akabane, Humber Furlan, José Manoel Souza das Neves, Luciana Reyes Pires Kassab, Napoleão Verardi Galegale

Edição

Durval Cordas

Projeto gráfico, diagramação e capa

SeePix Comunicação

Impressão e acabamento

Graphium Gráfica e Editora

**Ficha elaborada pela Biblioteca Nelson Alves Viana — Fatec-SP/Ceeteps
(Bibliotecária Iris de Lima Muniz)**

Oliveira, Reinaldo José de

O48s Simulação numérica e a fundição de metais do Brasil / Reinaldo José de Oliveira, Antonio César Galhardi. – São Paulo : Centro Paula Souza, 2016.

96 p. -- (Coleção Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos; v.6)

ISBN 978-85-99697-70-2

1. Simulação numérica. 2. Fundição de metais. 3. Competitividade. 4. Produtividade. 5. Vantagem competitiva. I. Galhardi, Antonio César. II. Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza. III. Título.

CDU 621.74

Unidade de Pós-Graduação, Extensão e Pesquisa do
Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza
Rua dos Bandeirantes, 169, Bom Retiro
São Paulo (SP), 01124-010
Tel.: (11) 3327-3109

SUMÁRIO

Apresentação	5
Prefácio	6
Introdução	8
Capítulo 1	
O processo de fundição	14
Capítulo 2	
Simulação numérica no processo de fundição de metais.....	21
Capítulo 3	
Competitividade e vantagem competitiva	33
Capítulo 4	
Estudo de casos.....	42
1. Uso da tecnologia de SNPFM.....	47
2. Tempo para desenvolvimento de produto	51
3. Resultados obtidos com o uso da tecnologia de SNPFM.....	54
4. Competitividade na indústria de fundição com o uso da SNPFM	56
5. Motivos para implantar a tecnologia de SNPFM.....	58
6. Como mensurar os resultados obtidos com o uso da simulação.....	61
7. Geração de conhecimento com o uso da simulação.....	63
8. Grau de utilização do <i>software</i> de simulação.....	66
9. Vantagem competitiva.....	69
10. Barreiras enfrentadas no uso da simulação.....	72

Considerações finais.....	83
Referências.....	86



APRESENTAÇÃO

O Programa de Mestrado Profissional em Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos, oferecido pelo Centro Estadual de Educação Tecnológica Paula Souza, ao mesmo tempo em que complementa a natureza da ação educacional da instituição voltada à educação profissional em seus vários níveis, assume o desafio de irradiar para o setor produtivo a cultura da pesquisa e da inovação tecnológica por meio da formação acadêmica pós-graduada.

Nesse sentido, tem como diferencial linhas de pesquisa, em Gestão de Sistemas Produtivos e em Desenvolvimento Tecnológico, que oferecem ao aluno a construção de conhecimentos que o habilitem a procurar soluções para problemas práticos de base tecnológica e que impulsionem a pesquisa aplicada em sua área de atuação profissional. O Programa tem buscado cumprir esses objetivos por meio da formação de profissionais com posicionamento crítico, habilidades e competências técnicas e gerenciais que os tornem promotores da eficiência coletiva, aplicada ao desenvolvimento, à implantação e à gestão de sistemas produtivos eficazes, baseados em métodos científicos e focados nas premissas da sustentabilidade.

A coleção *Gestão e Tecnologia em Sistemas Produtivos* traz a público alguns dos resultados desse desafio. Os estudos e trabalhos de professores e alunos convertidos em volumes da presente coleção oferecem uma amostra da excelência buscada na formação dos profissionais empenhados nesse programa de pós-graduação e em experiências afins vividas em outras instituições.

Assim, a coleção está permanentemente aberta a contribuições de pesquisadores de todas as áreas e vinculações que comunguem da preocupação por formar e qualificar visando o aprimoramento do setor produtivo brasileiro, na perspectiva da inovação.

Prof.^a Dr.^a Helena Gemignani Peterossi
coordenadora

PREFÁCIO

O Brasil é um país relativamente jovem, e apresenta um desenvolvimento industrial significativo, apesar da crise econômica por que vem passando. Segundo dados do IBGE, em 2015 a indústria representou 22,7% do PIB, sendo responsável por 23,6% dos postos de trabalho em 2014; isso demonstra a participação da indústria no Brasil e sua importância para o desenvolvimento do país. Comparativamente, também em 2015, a indústria nos Estados Unidos, uma economia voltada para serviços, representava 20,7% do PIB; na China e na Índia, países em franco desenvolvimento, os percentuais eram de 40,5% e 30%, respectivamente.

Desses 22,7% de participação no PIB, de acordo com o IBGE, 2,1% são relativos à indústria extrativa, 6,4% são representados pela indústria da construção, 2,8% relativos a serviços industriais de utilidade pública e 11,4% se referem à indústria de transformação, isto é, metade do contingente.

Sabe-se que a tecnologia vem buscando contribuir de forma significativa nos vários segmentos, e na indústria em especial. A agilização dos processos, os controles de qualidade, a garantia dos tempos e especificações, bem como os ganhos de produtividade, são alguns dos exemplos em que os *software* e os novos produtos são utilizados, sempre na perspectiva de suprir necessidades até então não visualizadas no setor industrial. E isso em especial na área de fundição, onde os riscos são significativos e podem representar perdas irreparáveis.

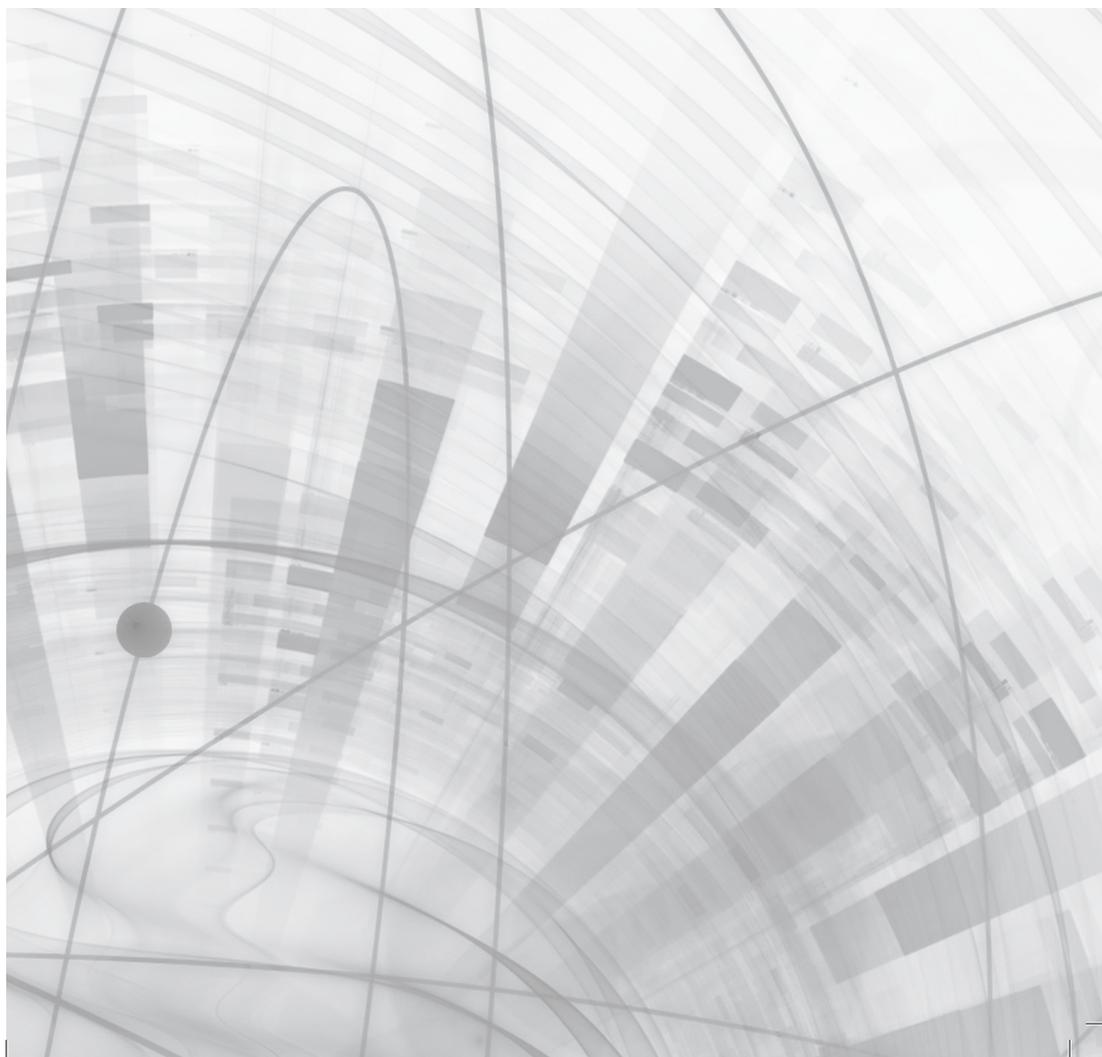
Com essa perspectiva, explorar o processo de simulação numérica na fundição de metais no Brasil se mostra um tema que muito pode contribuir com a evolução das indústrias de transformação, agregando novas tecnologias e inovando na indústria nacional, em busca da competitividade internacional tão pleiteada pela globalização, o que foi feito com maestria pelos autores deste trabalho.

Além de conceituar o processo de fundição e suas características e o uso de simulação numérica como ferramenta para otimizar o processo, eles nos apresentam fatores que podem garantir a competitividade num

mercado tão acirrado, e uma pesquisa em indústrias de fundição que ilustra efetivamente o uso de uma tecnologia e os ganhos decorrentes dessa prática, de forma objetiva.

Boa leitura!

Prof.^a Dr.^a Marília Macorin de Azevedo



INTRODUÇÃO

O estudo que deu origem a este livro teve por objetivo identificar e compreender os ganhos de produtividade no setor de fundição de metais no Brasil, decorrentes do uso da tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais. O setor de fundição de metais no Brasil caracteriza-se por um conjunto de 1,3 mil empresas, que geram aproximadamente 70 mil empregos. Desde 2005, o Brasil é o sétimo maior produtor mundial de fundidos.

O processo de fundição de metais tem seu início ainda na época pré-histórica (Rossitti, 1993). Possui por características básicas a fusão do metal e o preenchimento em moldes, com a finalidade de produzir peças com geometrias complexas, não passíveis de serem obtidas por meio de outros processos. Contudo, somente nas últimas quatro décadas a solidificação dos metais e suas ligas começaram a ser investigados com critérios e metodologias científicas (Braga, 1992).

Entre as vantagens do processo de fundição destaca-se a capacidade de produção de peças complexas, com tolerâncias dimensionais restritas, em razão da facilidade de modelar o metal líquido exatamente como projetado. O processo permite produzir peças fundidas de poucas gramas ou até dezenas de toneladas (Soares, 2000).

Segundo dados da Abifa (2014), a indústria brasileira de fundição emprega cerca de 66 mil trabalhadores. Faturou 11,6 bilhões de dólares em 2013 e possui cerca de 1.300 empresas. A maioria delas é de pequeno e médio porte, com predomínio do capital nacional. No cenário mundial, o Brasil é o sétimo produtor de fundidos, superando, por exemplo, países como Coreia, Itália e França (Modern Casting, 2014).

A produção de peças técnicas fundidas em ferro, aço e ligas não ferrosas se destina, principalmente, aos seguintes setores da economia:

- a) *automotivo*, uma das principais atividades econômicas do Brasil. Em 2014 produziu-se mais de três milhões e cem mil veículos (Anfavea, 2015). O mercado interno brasileiro é o quarto maior do mundo (Abifa, 2014). Os principais exemplos de pe-

- ças fundidas para o mercado automotivo são: rodas, cabeçotes, blocos de motor, pistões, eixo comando, virabrequim, tambor de freio, cãliper, peças de suspensão, diferencial, mancais, coletores, cubo de roda e carcaça de volante;
- b) de *máquinas e equipamentos*, segmento importante do mercado consumidor de peças fundidas, como, por exemplo: base de máquina, engrenagens, carcaça de transmissão e de redutor, caixa de engrenagem, travessa, cruzeta, suporte e flange;
 - c) de *energia*: as características fundamentais das peças fundidas que são fornecidas para o mercado de geração de energia são as grandes dimensões e a complexidade técnica. Num mercado de forte expansão no Brasil, são fornecidas peças típicas para geração de energia eólica: *hub* para turbina eólica, *spindles* rotor e base suporte. Também nas usinas hidroelétricas são utilizadas peças fundidas de elevada responsabilidade técnica e controle, tais como: pás de turbina, cintas, rotores, cubo, palheta, munhão, bucha e carcaça;
 - d) *ferroviário*, mercado importante, consumidor de peças fundidas, com destaque para os produtos em aço, tais como: lateral e travessa, vagões ferroviários, discos de freio, peças para locomotiva e carcaça de motor elétrico;
 - e) de *mineração*, mercado que apresenta demanda por peças fundidas, tipicamente de ligas de aço, tais como: mandíbulas e cunhas para britadores, mantos e revestimentos, cones, barras para britadores, placas de revestimento para moinhos, martelos para britadores, rolete, carro grelha, *trumbler*, cabeça, bojo e sapata;
 - f) *agrícola*, outro setor importante da economia para o qual são fornecidas peças fundidas. Um percentual bastante considerável em peso de um implemento agrícola ou trator são peças produzidas em fundição, em sua maioria de ferro fundido e aço. Alguns exemplos são: terminador, ponteira, facão, cubo de roda, carcaças de transmissão, central, diferencial e coletores;

- g) *sucroenergético*: as peças fundidas para este setor são utilizadas desde as colheitadeiras até as usinas de processamento para fabricação de açúcar e álcool, e entre elas se encontram: camisa de moenda, bagaceira, rodete, casquilhos, carcaças e bombas.

As peças fundidas para aplicação técnica normalmente apresentam uma ou mais das seguintes características: alta complexidade; elevadas dimensões e peso; severos requisitos de engenharia; um processo de fabricação com muitas variáveis; grandes lotes de fabricação; elevada exigência dos clientes.

Como ferramenta de engenharia, a simulação numérica, valendo-se da evolução computacional, tem sido utilizada como suporte à tomada de decisão nas indústrias de manufatura (Oliveira; Guesser; Baumer, 2003). A simulação provê uma base importante de informação para a tomada de decisão em relação à execução dos projetos dos ferramentais para fabricação das peças fundidas (Vieira, 2006).

Existem *software* que simulam o processo de fundição, possibilitando visualizar o comportamento do metal ao preencher o molde e se solidificar e, ainda, tratar uma série de dados relevantes para avaliação do processo, seja para prever falhas, seja para implantar melhorias no produto, no projeto e no processo. A tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais (SNPFM) apresenta crescente utilização para otimização de projetos e processos (Verran; Rebelo; Oliveira, 2000).

Se a simulação de fundição assistida por computador era considerada uma ferramenta pouco importante entre as prioridades da empresa, nos últimos anos vem-se tornando imprescindível para alcançar de forma consistente a fabricação de peças com elevada qualidade e rendimento (Ravi, 2010).

Segundo Marques (2008), o uso da tecnologia de SNPFM permite à empresa analisar, avaliar previamente, criticar os resultados e introduzir modificações. O ciclo se repete até se obter o resultado de-

sejado, isto é, um fundido sem defeitos relevantes e com bom nível de qualidade. O processo de “tentativa e erro” está sendo substituído pela simulação numérica nas empresas de fundição de metais.

Com a maior internacionalização da economia, intensificou-se a necessidade da reorganização dos fatores produtivos e dos modos de gestão empresarial, com a finalidade de compatibilizar a organização aos padrões internacionais de qualidade e produtividade (Olive; Amato Neto, 2001).

Diferenciais competitivos são atributos que tornam a empresa única ou superior aos seus principais concorrentes. Contemplam as vantagens e benefícios exclusivos que a empresa proporciona à sua clientela e que a concorrência ainda não conseguiu oferecer. Eles agregam valor, mas só são reconhecidos quando o cliente percebe tais vantagens (Porter, 2009).

Considerando-se um cenário de alta competitividade, em que já não são suficientes estratégias estáticas, exigindo-se, isto sim, a prática da inovação aliada às estratégias competitivas, a empresa hoje deve focar seus esforços em proporcionar valor aos acionistas, agregar tecnologia aos produtos e serviços, manter o desempenho e a qualidade dos produtos e atender à demanda dos clientes.

A competitividade das empresas de fundição em geral apresenta alguns importantes desafios, como: tempo de ciclo de desenvolvimento de um produto; preço final; custos de fabricação; qualidade do produto. O presente trabalho explora a gestão da tecnologia de simulação numérica como recurso tecnológico para as empresas de fundição de metais no Brasil que a utilizam com o objetivo de redução dos custos de fabricação, menor prazo de entrega, garantia da qualidade, desenvolvimento dos recursos humanos, fidelização do cliente e ganhos de *marketing share*.

A indústria de fundição de metais tem procurado balancear as necessidades técnicas e comerciais, mantendo as capacidades de engenharia, assegurando operações eficientes e protegendo a lucratividade

do negócio. A comercialização dos fundidos não mudou em suas raízes; o que está mudando é a forma como é feita. Os requisitos técnicos e a amplitude das responsabilidades impostas às fundições de metais têm-se tornado cada vez mais exigente.

Isso requer recursos adicionais para a equipe de engenharia e desafia as empresas de fundição a pensar em novas maneiras de diminuir os prazos de entrega, reduzir os custos totais e interagir com os clientes de forma mais eficaz.

Com a rápida evolução das tecnologias computacionais no apoio à tomada de decisão, as empresas têm buscado assegurar a sustentabilidade e o crescimento dos negócios, enquanto mantêm suas vantagens competitivas.

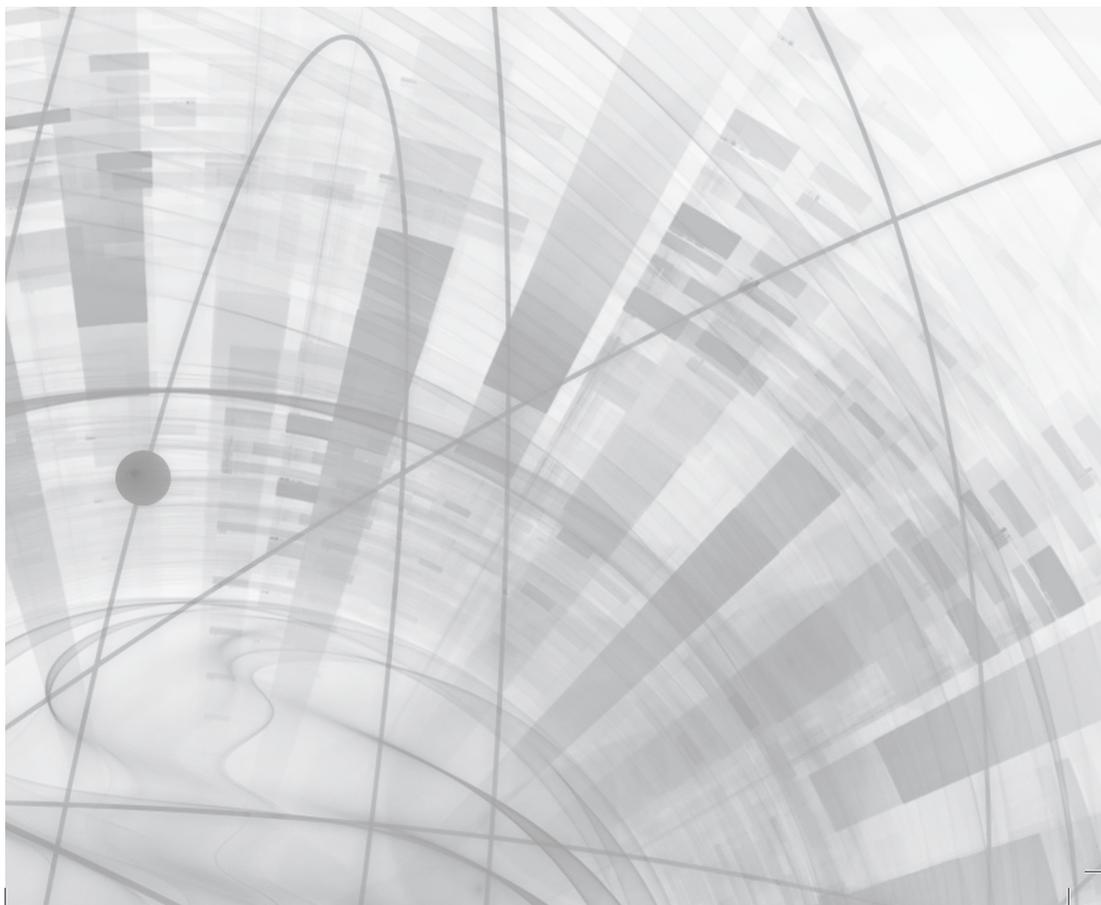
Os melhores projetos de componentes e processos de fundição são obtidos com interações entre engenheiros de fundição e projetistas, além do uso de novas ferramentas de engenharia, tais como o *computer aided design* (CAD) e o *computer aided engineering* (CAE). Em vez do processo de tentativa e erro no chão de fábrica, as fundições podem utilizar ferramentas computacionais para o aperfeiçoamento dos projetos e condições de processo.

Para muitas fundições, a tecnologia de SNPFM tornou-se uma ferramenta de avaliação do projeto, do processo e ferramental, aplicada à melhoria de qualidade e ao aperfeiçoamento de processos. As ferramentas de simulação consideram o comportamento do material, a composição química, a prática de fusão, a metalurgia, entre outros fatores.

Em muitos países, entre os quais o Brasil, muitas empresas utilizam a tecnologia de simulação numérica com o objetivo de enfrentar os desafios de um mercado tão competitivo como tem sido o de fundição, diminuir os custos e aumentar sua lucratividade.

Associar o uso da SNPFM com a competitividade da empresa permite estender o conhecimento da tecnologia de simulação à gestão empresarial, com o foco em explorar seus impactos nos resultados da empresa, principalmente em relação aos custos de fabricação, ao tempo de desenvolvimento de produto e à qualidade.

Assim, aqui, os autores se empenham em caracterizar a aplicação da tecnologia de SNPFM na indústria nacional de fundição. Os casos de estudo restringem-se às empresas que já a utilizam, com o propósito de conhecer os aspectos relevantes que relacionam o seu uso à competitividade da empresa. O conjunto de resultados pode ser útil a outras organizações, o que permite o emprego deste estudo como referência, desde que a forma de uso da tecnologia de SNPFM seja adaptada de acordo com as necessidades e a realidade de cada uma delas e de sua conjuntura específica, uma vez que as conclusões aqui apresentadas não devem ser generalizadas.



CAPÍTULO 1

O processo de fundição

Embrora não haja um consenso sobre a data exata de início do uso do processo de fundição de metais, esta se aproxima de 5 mil anos atrás. Naquela época já eram produzidos objetos em cobre fundido por meio de moldes em pedra lascada (Rossitti, 1993).

Durante a Segunda Guerra Mundial, desenvolveu-se o controle da morfologia da grafita, e conseqüentemente do ferro dúctil, o que proporcionou avanços significativos na ciência e na produção dos fundidos de ferro. As aplicações em engenharia da família dos ferros fundidos se iniciaram na metade do último século (Loper, 2003).

No Brasil, a primeira casa de fundição surgiu por volta de 1580, em São Paulo, e era destinada à fundição do ouro extraído das minas do Jaraguá e arredores. No decorrer do século XVIII, muitas casas de fundição foram criadas. A demanda por ferrovias e portos fomentou, por muito tempo, o desempenho das fundições, de maneira que os pátios de reparo das companhias ferroviárias e os estaleiros passaram a ter as mais bem equipadas oficinas metalúrgicas do País (Bethell, 2002).

Diversas inovações no método produtivo foram implantadas, bem como foram descobertas novas ligas metálicas; entre estas, os principais exemplos são o processo de descarbonetização dos ferros fundidos brancos, a partir de 1722, e a fundição em aço, em 1740 (Ribeiro, 2008).

Com a chegada da indústria automotiva e a construção de Brasília, o setor de fundição ganhou força. Passou a cumprir um importante papel no desenvolvimento da indústria nacional. Uma definição mais técnica e atual para fundição pode ser: a preparação, fusão e refino de insumos metálicos, seu vazamento em moldes (dependendo do

processo) e a limpeza e acabamento das peças brutas assim obtidas (Monticelli, 1994).

A fundição de metais é o processo de fabricação de peças que representa o menor caminho entre a matéria-prima e o produto final. Nota-se que o processo de fundição em si é complexo, pelo número de variáveis que apresenta, entre elas a matéria-prima, o molde, o forno, a mão de obra, o tipo de liga e os insumos. Destaque-se, porém, que o processo de fundição possui em sua essência particularidades que fazem dele um processo completo e ágil do ponto de vista da entrega do produto final (Braga, 1992).

Para o processo de fundição não há concorrente direto, pois, em muitos casos, é o método mais simples e econômico; às vezes, chega a ser o único método tecnicamente viável de se obter uma determinada geometria, como, por exemplo, no caso dos blocos de motores, que só podem ser obtidos com um metal com alta fluidez no estado líquido, ou seja, por meio da fundição (Kondic, 1973).

A indústria de fundição se confronta constantemente com desafios, tais como disponibilidade e qualificação da mão de obra, recursos materiais e custos de fabricação. Essa indústria deve atender ainda às demandas técnicas relacionadas com a qualidade do produto, a documentação e o tempo de entrega (Bonollo; Odorizzi, 2001).

No processo de fundição de metais, o molde é essencialmente importante. Utiliza-se na fabricação do molde para o processo de fundição por gravidade em areia, por exemplo, uma réplica da peça — geralmente fabricada em madeira, resina ou isopor —, também chamada de modelo de fundição. Para reproduzir as cavidades ou detalhes internos das peças, são utilizados machos também fabricados em areia (Lima, 2004).

Ainda segundo Lima (2004), após a confecção do molde e a extração do modelo, o macho é colocado no interior do molde e não permite o preenchimento daquele espaço pelo metal. Posteriormente, após o preenchimento da cavidade do molde com a liga metálica líquida

da e a completa solidificação do material, a areia do molde é retirada, e também o macho, obtendo-se o detalhe ou região vazia que se deseja.

Para a produção do metal líquido é necessário um sistema de fusão, com fornos capazes de transformar o material sólido em líquido. Após essa etapa, e para que o metal líquido seja vertido em uma cavidade, é necessária a construção de canais de enchimento, que devem ser cuidadosamente dimensionados.

O processo simplificado pode ser descrito da seguinte forma: o metal líquido é vertido no funil do vazamento, escoado para o canal de descida e penetra na peça (modelo) pelo canal de entrada.

O uso de massalote (alimentador) é necessário para compensar a contração volumétrica que ocorre durante a solidificação, mas sua presença significa diminuição no rendimento metálico, que é a razão entre o peso líquido (apenas a peça) e o peso total do fundido, somando-se o peso dos canais e do alimentador (Alves, 2009).

Lima (2004) e Biolo (2005) observam que a matéria-prima para a produção de peças fundidas é constituída pelas ligas metálicas ferrosas (de ferro e carbono, com ou sem outros elementos químicos) e não ferrosas (de cobre, alumínio, zinco, magnésio, entre outros elementos). O processo de fabricação de peças por meio de fundição por gravidade pode ser resumido nas operações apontadas a seguir.

- a) *Confecção do modelo*: consiste em construir um modelo com o formato da peça a ser fundida. Esse modelo servirá para a construção do molde e suas dimensões devem prever a contração do metal quando ele se solidificar, bem como a quantidade de sobremetal necessária para posterior usinagem. Ele normalmente é confeccionado em madeira, alumínio ou resina.
- b) *Projeto dos sistemas de canais e massalotes*: esta é a etapa do projeto para dimensionamento do canal de alimentação, que são as vias, ou condutos, por onde o metal líquido passa até chegar ao molde, e do massalote, reserva de metal posicionada nas re-

giões de maior massa da peça, que preenche os espaços que se formam à medida que a peça se solidifica e contrai. Em paralelo à confecção do modelo, é efetuado o cálculo e o dimensionamento dos canais e massalotes. Esta etapa é importante para a qualidade da peça.

- c) *Confecção do molde*: o molde é o dispositivo no qual o metal fundido é colocado para que se obtenha a peça desejada. Ele é feito de material refratário composto de areia e aglomerante. Esse material é moldado sobre o modelo, que, depois de retirado, deixa uma cavidade com o formato da peça a ser fundida.
- d) *Confecção dos machos*: o macho é um dispositivo, feito também de areia, que tem a finalidade de formar os vazios, furos e reentrâncias da peça. Ele é posicionado no molde antes que seja fechado para receber o metal líquido.
- e) *Fusão/vazamento*: é a etapa em que acontece a fusão do metal no forno, elaboração da liga e posterior preenchimento do molde com metal líquido.
- f) *Desmoldagem*: é realizada após determinado período de tempo, quando ocorre a solidificação do metal, e depende da geometria de peça, do tipo de molde, da liga metálica e das condições de resfriamento.
- g) *Rebarbação e limpeza*: retirada dos canais de alimentação, massalotes e rebarbas que se formam durante a fundição. Esta operação é realizada por meio de jatos abrasivos, quando a peça atinge a temperatura ambiente, para eliminação de incrustações superficiais da areia.

Se a fundição é uma atividade tão antiga, a ponto de permitir o registro histórico por meio do achado de objetos fundidos, a fundição moderna é uma indústria especializada no processo de fabricação de peças para diversos ramos de atividade e sua organização, seus métodos e sua tecnologia pouco se assemelham aos das antigas (Braga, 1992).

Dentre os processos de fabricação, a fundição se destaca por permitir a produção de peças com grande variedade de formas e tamanhos. A produção de peças fundidas pode ser unitária, como, por exemplo, no caso de grandes peças para determinada aplicação ou reposição, e seriada, voltada principalmente para as indústrias que demandam alto volume, como a automotiva. Toda essa variedade é obtida adequando-se às exigências do cliente, com qualidade, mínimo custo e dentro do prazo acordado (Soares, 2000).

A fundição desempenha um papel importante, uma vez que permite obter peças com formatos complexos, que muitas vezes exigem um mínimo de usinagem para atingir sua forma final para utilização. Em razão da sua importância, numerosas pesquisas têm sido feitas com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos produtos (Kolososky, 2001).

Segundo Lima (2004), peças fundidas estão presentes em quase todas as atividades humanas, mas, em termos de mercado, dificilmente um consumidor — pessoa física — compra uma peça fundida bruta (exceto obras de arte ou peças ornamentais), uma vez que, frequentemente, a peça fundida é parte integrante de um objeto, equipamento ou maquinário comprado e/ou utilizado por um consumidor industrial.

A escolha pelo processo adequado dependerá da característica da peça e das especificações de qualidade. A tecnologia disponível no mercado de fundição de metais agrega conhecimento e valor para os técnicos e engenheiros responsáveis pelo desenvolvimento de projetos e processos, que por sua vez são cada mais exigentes. Destacam-se as seguintes tecnologias: modelamento CAD, prototipagem rápida, digitalização e desenho 3D e simulação.

Segundo Rossitti (1993), os principais processos de fundição de metais em moldes de areia são: fundição em areia sintética, também chamada areia verde ou areia preta; fundição em areia com cura a frio; fundição em areia Shell; fundição em cerâmica; fundição em cera perdida.

Um dos desafios para as empresas de fundição de metais é a gestão estratégica para criar um diferencial de sucesso. Conhecer e aplicar adequadamente as ferramentas econômicas e financeiras a partir das informações

do negócio tornou-se fundamental para a estratégia competitiva, bem como gerir os custos de produção das peças por meio de informações e medições, para vender a preços competitivos (Moraes et al., 2007).

Defeitos de fundição são descontinuidades encontradas nas peças fundidas que não estão de acordo com os requisitos dos clientes, no que diz respeito a geometria (desencontros, ondulações ou defeitos dimensionais, por exemplo), porosidade, trinca, óxidos e inclusões e propriedades do material, como dureza e resistência mecânica abaixo do especificado por norma (Ravi, 2011).

Segundo Ravi (2011), são críticos os problemas associados à baixa produtividade e à perda de confiabilidade por parte do cliente. Na maioria das vezes, são causados pelos defeitos gerados no processo produtivo. As perdas de peças por defeitos causados na produção são da ordem de 3 a 6% para empresas que fornecem peças seriadas, e de 8 a 15%, para as empresas que produzem peças sob encomenda. Ainda para o mesmo autor, as empresas de fundição tentam reduzir as rejeições por meio da experimentação de parâmetros do processo, como a composição da liga, o molde, o revestimento e a temperatura do envase. Quando essas medidas não são eficazes, os projetos são alterados (sistema de canais e massalotes), e, se tais medidas ainda não forem suficientes, dá-se a alteração do modelo ou ferramental de fundição.

Para Marques (2008) e Stuewe e Ubeda (2013), um dos defeitos mais comuns do processo de fundição de metais é a retração ou “rechupe”, que se manifesta como um vazio de aspecto irregular que se forma durante a solidificação e surge nos pontos quentes dos fundidos, nas zonas maciças cujo tempo de solidificação é maior. Esse tipo de defeitos pode ser controlado pela utilização de um sistema de alimentação e canais adequados, refrigeração específica, retirada de massa, entre outros procedimentos. A análise da geometria e a simulação numérica, por exemplo, permitem determinar quais são os pontos quentes de um fundido e planejar um projeto mais adequado para a eliminação total ou a redução dos defeitos de fundição na peça final.

Segundo Malavazi (2005), a ocorrência de retrações está associada à transferência de calor do molde ao sistema de alimentação da cavidade, sendo mais frequente em regiões de maior espessura, onde não é possível compensar a contração do metal, quando ele se solidifica. Em relação à análise e à detecção dos defeitos de fundição, Stuewe e Ubeda (2013) destacam que as retrações podem ser detectadas por raios X ou *computer tomography* (CT).

Para Lima, Palma e Sales (2011), em qualquer processo de fabricação o controle ou o domínio do maior número de variáveis é essencial para a qualidade dos produtos.

Por meio da tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais, as retrações podem ser previstas pela análise da evolução da solidificação.



CAPÍTULO 2

Simulação numérica no processo de fundição de metais

A fundição de metais talvez tenha sido o processo a ter trazido as maiores contribuições para o desenvolvimento da civilização, e também aquele que apresentou os maiores desafios. Foi necessária muita perseverança em jornadas exaustivas de tentativas e erros, até o desenvolvimento dos métodos de simulação, que puderam substituir esse procedimento sofrido, baseado nas práticas, nas experiências e nas habilidades individuais dos funcionários.

A descrição do processo de fundição de metais em modelos físico-matemáticos e os respectivos cálculos em sistemas computacionais permite a quantificação de parâmetros e etapas do processo, e a medição de seu impacto na qualidade da fundição.

A ideia de utilizar modelos matemáticos para prever o comportamento do fundido durante a solidificação é oriunda dos interesses dos físicos, matemáticos e engenheiros. As primeiras tentativas surgiram no final da década de 1970, e foram acompanhados de enorme ceticismo por parte da comunidade de profissionais de fundição, com comentários do tipo “nós não precisamos de computadores para identificar os maiores desafios de um projeto” ou “nós já produzimos com a melhor qualidade possível”.

No entanto, nos últimos quinze anos a simulação numérica no processo de fundição passou a ser reconhecida como uma ferramenta essencial para a maioria das grandes empresas. Atualmente a simulação numérica tem sido utilizada para o desenvolvimento de pessoal

técnico, além de construir um banco de dados técnicos que permite o treinamento e a formação técnica em fundição, para o desenvolvimento de pessoal. Tudo isso estabeleceu uma nova linguagem de comunicação entre as fundições, seus fornecedores e clientes. Tornou-se comum, depois de uma implantação de sucesso, ouvir algo semelhante a "eu nunca imaginei que a simulação pudesse mudar tão drasticamente nossa empresa".

Segundo Heisser, Flender e Sturm (2011), os fundamentos teóricos da condução de calor em matéria sólida foram desenvolvidos por Jean Baptiste Joseph Fourier na Escola Polytechnique, em Paris. Sua tese, *A teoria analítica de calor*, recebeu prêmios em 1822. Ele forneceu a base para todos os cálculos posteriores de condução e transferência de calor em materiais sólidos.

O físico e engenheiro francês Navier e o matemático e físico irlandês Stokes apresentaram posteriormente os conceitos básicos da dinâmica de fluxos. Assim, as equações diferenciais que descrevem o escoamento de fluidos são conhecidas como equações de Navier-Stokes, as quais, aliadas às equações básicas para difusão desenvolvidas por Adolf Fick e aos conhecimentos anteriores, permitiram na década de 1950 que Paskhis utilizasse computadores analógicos para prever o movimento de uma frente de solidificação em uma ou duas dimensões (Heisser; Flender; Sturm, 2011).

Segundo Rios (1996), os primeiros trabalhos associados à modelagem matemática da transferência de calor foram realizados no início dos anos 1960. Heisser, Flender e Sturm (2011) informam que foi a partir do desenvolvimento dos primeiros computadores digitais que Fursund estudou problemas relacionados aos defeitos de penetração de ligas de aço no molde de areia, em 1962.

Em 1965, Hentzel e Keverian publicaram seu trabalho pioneiro sobre simulação de solidificação de peças fabricadas em ligas de aço em duas dimensões. Em 1968, Vestby desenvolveu um modelo de duas dimensões para avaliar a distribuição de temperatura na solda-

gem, utilizando-se, pela primeira vez, do método das diferenças finitas. Em 1970, Davies utilizou os programas desenvolvidos por Vestby para simular a distância de alimentação nos fundidos e Hansen publicou sua tese sobre a previsão de trincas a quente em peças fundidas em ligas de aço (Heisser; Flender; Sturm, 2011).

No início da década de 1980, as atividades de pesquisa e desenvolvimento em torno do tema da simulação de processos aumentaram substancialmente em vários locais. Hansen, na Universidade Técnica da Dinamarca; Berry e Pelke, nos Estados Unidos; Niyama, no Japão; Kurz, em Lausanne (Suíça); Durand, em Grenoble, na França; e Sahm, em Aachen, na Alemanha (Heisser; Flender; Sturm, 2011).

Historicamente, destacam-se alguns eventos importantes: introdução de critérios de análise da simulação por Hansen e Berry, em 1980; introdução de uma função para descrever porosidades de centro, por Niyama, em 1982; e a proposta de critérios de análise para detectar trinca a quente em fundição de peças de aço, por Flender e Hansen, em 1984. No final dos anos 1980, foram desenvolvidas as primeiras soluções para simular o enchimento do molde para fabricação de peças pelo processo de fundição (Heisser; Flender; Sturm, 2011).

Tradicionalmente, o desenvolvimento de ferramentais de fundição tem se dado pelo método da tentativa e erro. O desenvolvimento de uma peça fundida realizado dessa forma é lento, apresentando ainda um custo elevado em razão das diversas mudanças necessárias no ferromental (Mendes; Visconti; Rondet, 1993).

Para Oliveira, Guesser e Baumer (2003), as ferramentas de simulação do processo de fundição cumprem papel importante no desenvolvimento de fundidos, auxiliando projetistas e fundidores desde a concepção do produto até a sua produção final.

Para Vieira (2006), a simulação é uma importante aliada no processo de tomada de decisões. A flexibilidade permitida na análise de diferentes cenários ou configurações de um modelo permite numerosas vantagens no uso dessa tecnologia.

Campbell (1991) descreveu os principais passos para a realização de uma simulação: entrada de dados no computador por meio de desenho em três dimensões e de dados do processo; realização de cálculos numéricos por *software*; análise das informações.

Caso o projeto não seja aprovado após a análise da simulação, por não estar de acordo com as especificações técnicas da peça, previstas pelo cliente ou por norma técnica, é alterado o projeto e uma nova simulação é processada a partir da mesma sequência. Quando o projeto está de acordo, novos testes, tais como o *design of experiments* (DOE), podem ser realizados para melhor conhecer potenciais problemas, por meio da combinação das variáveis detectadas experimentalmente, objetivando melhoria de processo ou redução de custos de fabricação.

A simulação numérica é de fundamental importância no desenvolvimento de técnicas que permitam reduzir a quantidade de protótipos de fundidos. O objetivo é identificar a distribuição das propriedades dos materiais, as tensões residuais, a influência do *design* de componentes e dos parâmetros do processo, suas variações e a influência da liga fundida (Menne et al., 2007).

Para Ravi (2008), a tecnologia de simulação numérica pode ser utilizada em empresas de fundição de metais para obtenção das seguintes vantagens:

- a) *melhoria da qualidade e rendimento metálico*: a simulação permite melhoria na qualidade das peças e na produtividade. O método para fabricação dos fundidos a partir do uso da simulação numérica, quando corretamente concebido, permite a antevisão e a correção das possíveis falhas. Em razão da escala das corridas, uma pequena melhoria no rendimento metálico pode trazer economia significativa de recursos, e maior produtividade, como também foi observado por Alves (2009). Os custos da não qualidade com usinagem, transporte, reparos, garantia e substituição estão se tornando fatores cada vez mais

importantes, os quais podem ser reduzidos consideravelmente com o uso da simulação;

- b) *redução do número de testes para aprovação da peça fundida*: os ensaios de chão de fábrica para o desenvolvimento de um novo produto não só elevam o seu custo, como também consomem os recursos de produção. O custo desse processo inclui a modificação de ferramentas, a fusão, o vazamento, a inspeção e a perda de materiais que não puderem ser recuperados. Na fundição de metais ferrosos o custo de fusão é o mais elevado, enquanto, para a fundição de não ferrosos, o custo mais expressivo é o da modificação de ferramentas. Em ambos os casos, o uso da tecnologia de SNPFM permite que mais ensaios virtuais sejam realizados para alcançar melhor qualidade e rendimento metálico. A simulação permite menores custos finais e maior rapidez, uma vez que reduz o ciclo de testes piloto;
- c) *agregação de valor*: os programas de simulação aumentam o nível de confiança em uma fundição para peças mais complexas, que geralmente contribuem com a maior margem. Eles também fornecem uma base científica e documentada para a garantia da qualidade e a certificação. A simulação pode apontar os locais prováveis de defeitos internos, que podem ser mais cuidadosamente observados. Muitos clientes preferem fornecedores equipados com a tecnologia de simulação; assim, essa se torna uma valiosa oportunidade na comercialização dos produtos;
- d) *gestão do conhecimento*: esse é um benefício importante, porém de difícil contabilização. Uma vez que o computador armazena as entradas e os resultados de cada ensaio virtual, essa informação pode ser reutilizada para novos projetos similares e na formação de novos profissionais.

Para Alves (2009), a utilização da tecnologia de SNPFM pode ser uma alternativa para melhoria da confiabilidade dos processos pro-

dutivos e obtenção de projetos mais ágeis e com menores custos nas empresas de fundição. Uma das maneiras mais efetivas de diminuir o impacto do custo do metal na peça é por meio do aumento do rendimento metálico.

Segundo Ravi (2010), a partir de um estudo realizado com 215 fundições da Índia, o uso de CAD, CAM e simulação numérica contribui para redução do tempo médio de desenvolvimento em 30%, redução pela metade da taxa média de rejeição, melhoria no rendimento metálico, redução de custos e satisfação de clientes. A redução nos custos com o melhor rendimento metálico, descrita por Alves (2009), também foi observada por Ravi (2010), reforçando a tese da vantagem competitiva obtida com a prática da SNPFM.

A complexidade dos processos metalúrgicos requer o uso de ferramentas computacionais avançadas para o cálculo, a otimização, o armazenamento e a análise de dados técnicos. Vários programas de computador são utilizados pela indústria de fundição. A interdisciplinaridade da tecnologia de fundição requer o uso de ferramentas modernas para a sua concepção e otimização (Malinowski; Suchy, 2010). Segundo Lima, Palma e Sales (2011), a principal aplicação da simulação computacional no processo de fundição está relacionada também com a previsão de descontinuidades; segundo os autores, as fundições que possuem domínio das variáveis e parâmetros de seu processo podem obter mais vantagens no uso da simulação computacional. Esse conhecimento acumulado é uma forma de geração da competência, essencial, e que pode assumir várias formas, incluindo conhecimentos técnicos (Akabane, 2012).

Ravi (2011) observa que os profissionais de fundição trabalham para reduzir as rejeições encontradas nas peças por meio de experimentos de parâmetros do processo (como a composição da liga ou a temperatura de vazamento). Quando essas medidas são ineficazes, são alterados os projetos (canais e massalotes). À medida que não são encontradas soluções, o ferramental é que é modificado (linha de par-

tição ou disposição das peças na cavidade). Segundo Lima, Palma e Sales (2011), a simulação computacional do processo de fundição é uma ferramenta com elevado potencial para ser aplicada de maneira sistemática nas fundições, objetivando a melhoria do processo produtivo e da qualidade do produto.

A conjugação dos conceitos de transferência de calor, densidade e transporte de massa, com o objetivo de se prever o impacto do mecanismo de solidificação sobre a geometria do produto, aliada às ferramentas de previsão de porosidade e crescimento de poros em função da interação entre a pressão e concentração de gases, todas passíveis de simulação numérica, podem ser utilizadas como ferramentas de engenharia, como descritos por Ravi (2011). A simulação deve ser utilizada para a prevenção de descontinuidades nos produtos a serem fabricados, em razão de sua efetiva capacidade de reproduzir virtualmente, e com fidelidade, os possíveis resultados para as condições de fabricação planejadas.

Diferentemente do uso do processo de tentativas e erros, que mais se apura quanto maior o banco de dados de informações sobre experiências práticas, nem sempre disponibilizados às empresas, permanecendo como conhecimento tácito dos funcionários, a simulação trabalha com propriedades termofísicas como condutividade, calor específico, capacidade térmica, energia específica, calor latente, densidade, etc.. Essas características estão disponíveis para os mais diversos tipos de ligas; porém, vale lembrar que os dados não devem ser de valores discretos, mas sim presentes em uma função de termodependência.

O enfrentamento do problema da segregação de fases também foi possível incorporando-se os conhecimentos disponibilizados pelos diagramas de equilíbrio de fases e pelos coeficientes de difusão.

Para Schmidt e Sturm (2013), a construção ágil do ferramental ou modelo de fundição representa um fator competitivo. O tempo de confecção pode ser reduzido aplicando-se técnicas modernas de gestão, realizando a execução de diversas partes em paralelo. Mas essa

vantagem competitiva pode ser comprometida, se o ferramental necessitar de várias alterações até que uma condição robusta de produção seja alcançada, como já foi destacado por Ravi (2008). Segundo Schmidt e Sturm (2013), as alterações de ferramental ou modelos são necessárias na maioria das vezes em decorrência de erros na sua fabricação, modificação do projeto e correções dimensionais. As modificações geram perdas de competitividade e custos associados ao uso de equipamentos e recursos humanos para o planejamento e execução, ao tempo gasto para a realização da alteração, ao tempo de transporte do modelo ou ferramental e ao tempo necessário para a produção de novas amostras e sua validação.

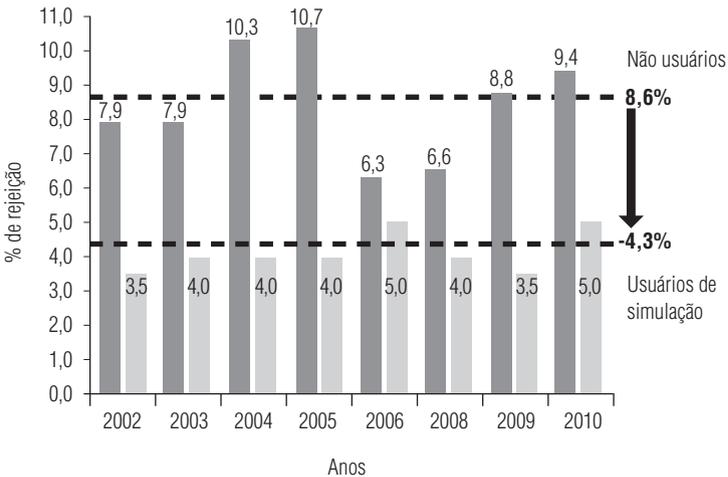
O objetivo final da fundição é a previsão das propriedades dos materiais/produtos. Com base nos estudos para uma adequada previsão quantitativa, foi possível um incremento substancial do desempenho de novos produtos, com requisitos complexos, e o emprego de diversos outros processos, principalmente os de tratamento térmico e usinagem.

Outros estudos publicados por Ravi (2011) mostram que a substituição de ensaios de chão de fábrica por simulação computacional permite obter economia de tempo e ajuda a reduzir as rejeições pela metade. Um estudo realizado com aproximadamente duzentas fundições da Índia trouxe um resultado percentual de rejeição das peças fundidas maior (em média, 8,6%) para as empresas não usuárias de simulação numérica, quando comparado com o percentual médio de rejeição das peças fundidas nas empresas usuárias de simulação (4,3%), conforme ilustra o Gráfico 1.

No início, o emprego da simulação numérica no processo de fundição era exclusivo dos departamentos de engenharia e de qualidade. Hoje, é sabido que a principal vantagem competitiva do emprego da simulação está na redução de custos, que é tanto maior quanto mais cedo for introduzido no ciclo de desenvolvimento de produtos. A simulação deixou de ser utilizada apenas na predição de defeitos, passando a ser também uma importante ferramenta para a redução de espessuras e

peso e a seleção da geometria mais adequada aos esforços a que serão submetidos (incorporação dos conceitos de resistência dos materiais).

Gráfico 1 – Taxa média de rejeição entre usuários e não usuários de simulação.



Fonte: Ravi (2011, p. 2).

As numerosas possibilidades de uso e a rapidez dos cálculos fizeram que os provedores de *software* de simulação se preocupassem com a formação dos usuários, no sentido de que pudessem gozar de todas as prerrogativas de sua utilização.

Na utilização de métodos numéricos para a simulação de solidificação, a geometria do fundido é dividida numa série de elementos, sendo aplicadas equações ao longo de intervalos de tempo. O método das diferenças finitas (FDM) e o método dos elementos finitos (FEM) constituem os métodos de aproximação mais comuns na maioria dos programas de simulação (Teixeira, 2013).

Uma importante vantagem das ferramentas numéricas de simulação é a de permitir realizar testes virtuais e prever os comportamentos

do material antes da fabricação, minimizando ou evitando a necessidade de pré-séries (Teixeira, 2013), que além de elevar os custos também consomem recursos da produção (Ravi, 2008).

Para Khade e Sawant (2014), o processo convencional de fundição inclui ensaios reais de chão de fábrica, sendo necessárias alterações no tamanho do massalote, na forma e localização dos canais e na disposição de peças no molde em cada um dos testes caso a peça não seja aprovada. Obviamente isto traz como impacto o aumento do custo do ferramental, a necessidade de adaptação do ferramental, o aumento da quantidade de material fundido, os atrasos de entrega, o maior consumo de energia, o maior consumo dos insumos de fundição e a ampliação do tempo total de desenvolvimento do projeto. No processo assistido por computador, as modificações são feitas com base nos resultados virtuais; assim, reduzem-se os custos de fabricação pelo método convencional, o que também foi descrito por Schmidt e Sturm (2013).

A simulação computacional do processo de fundição é uma ferramenta que auxilia a tomada de decisão com o objetivo de alcançar a garantia de qualidade, em menor tempo e sem consumir ensaios práticos na fundição (Gondkar; Inamdar, 2014).

Os pacotes de *software* permitem prever a localização dos defeitos e as decisões necessárias, em termos de projeto, para mitigar a ocorrência dos defeitos previstos, baseando-se em informações como: características de enchimento da cavidade; defeitos decorrentes de turbulências do sistema de canais; falhas de solidificação; resultado de dureza; perfil térmico do sistema; propriedades mecânicas; espaçamentos dos braços dendritos; retrações; características microestruturais (Gondkar; Inamdar, 2014).

Segundo Gondkar e Inamdar (2014), o uso da simulação pode reduzir os defeitos de fundição, os custos de fabricação e o prazo de entrega em até 25%. Para Souza, Aguilar e Nogueira (2012) o alto nível de concorrência, aliado a uma constante necessidade de redução

de custos de produção, tem conduzido as indústrias brasileiras a se depararem com desafios de melhoria de qualidade de seus produtos.

Um caso prático da aplicação da tecnologia de simulação, por exemplo, é a definição dimensional do ferramental ou modelo de fundição. Segundo Schmidt e Sturm (2013), a aprovação dimensional de componentes fundidos segue, a partir do modelo usinado, a seguinte rota tradicional de desenvolvimento: adição do sobremetal para a usinagem; aplicação da contração; geração da nova geometria; fabricação do modelo ou ferramenta; produção de amostras; medição das amostras e comparação com as dimensões especificadas; geração do relatório de desvios.

Após a geração do relatório dimensional, os desvios são avaliados e, quando necessário, são feitas correções repetindo-se as etapas, até que as dimensões se encontrem dentro da tolerância especificada.

Segundo Schmidt e Sturm (2013), é possível a produção de fundidos, dimensionalmente corretos, sem a utilização de amostras reais, determinando-se a contração correta por meios computadorizados e pelo uso da tecnologia de simulação.

O modelo CAD inicial recebe a aplicação dos fatores de contração e incorpora-se na simulação que determinará a contração do produto. A forma final do produto é avaliada digitalmente, confrontando as dimensões obtidas pela simulação com as dimensões e tolerâncias especificadas. A nova geometria deverá ser simulada para verificar se as correções produziram o resultado desejado, e, em caso afirmativo, o modelo poderá ser utilizado para a construção do ferramental.

Do ponto de vista de áreas de aplicação no processo de fundição de metais, a simulação tem múltiplas aplicações e traz importantes benefícios para qualquer empresa. Mas a simulação tem sido muito mais um instrumento de gestão empresarial do que técnica. Ela pode ser utilizada como ferramenta de desenvolvimento humano, principalmente para os funcionários mais inexperientes, porque, além de atuar como ferramenta de comunicação interna e externa, preserva o *know-how* das empresas.

Obviamente, a simulação requer um fluxo aberto de informações, e regras claras para a tomada de decisão, no estabelecimento de quem deve fornecer as informações e em que momento, de quem deve receber informações e, finalmente, dos responsáveis por implementar as decisões, estabelecendo a lucratividade e vantagens competitivas. Com relação ao desenvolvimento de produto, são visíveis os resultados obtidos em termos de melhorar a assertividade, além de reduzir o tempo de ciclo, pela redução do número de “corridas” até a otimização.



CAPÍTULO 3

Competitividade e vantagem competitiva

Segundo Nakagawa (1994), a competitividade da empresa caracteriza-se pela capacidade que ela tem de desenvolver e sustentar vantagens competitivas, capacitando-se para enfrentar a concorrência.

Haguenauer, Ferraz e Kupfer (1996) definem competitividade como a capacidade da empresa de formular e implantar estratégias concorrenciais que lhe permitam ampliar ou conservar, de forma duradoura, uma posição sustentável no mercado.

Com a globalização, a competição torna-se mais intensa; para Franco (1999), isso obriga a empresa ser mais inovadora e criativa, para se manter competitiva.

No estudo da competitividade, é importante observar a eficácia operacional, descrita por Porter (2009) como sendo o desempenho das atividades de uma organização melhor que os concorrentes. O autor destaca dois exemplos: a redução de defeitos ou o desenvolvimento de melhores produtos e com maior rapidez e o uso mais consciente e racional dos insumos. Para dificultar a imitação por parte dos concorrentes, é importante que a empresa defina uma combinação de atividades entrelaçadas, chamada por Porter (2009) de “compatibilidade”, dando origem à vantagem competitiva e a uma rentabilidade superior.

Porter (1989) descreve dois tipos de vantagens competitivas, a de baixo custo e a de diferenciação, que quando combinadas resultam em três estratégias genéricas para alcançar o desempenho superior: liderança por custo baixo, diferenciação e enfoque.

Segundo Leone e Leone (2004), os custos de fabricação são os recursos de produção, caracterizados monetariamente, utilizados na fabricação em determinados períodos ou relativos a determinada obra ou serviço. Na prática, é a soma dos débitos feitos num período à conta de produção em processo, ou seja, dos materiais diretos, da mão de obra direta e dos custos indiretos de fabricação.

Para Motta (1995), uma vantagem competitiva nasce a partir do valor que a empresa cria para seus clientes, materializada em menores preços para bens equivalentes ou oferta de bens exclusivos.

Maramaldo (2000) define competitividade como a melhor combinação possível entre satisfazer o mercado no qual a empresa atua e ganhar dinheiro. Na opinião do autor, são metas conflitantes, e atendê-las passa a ser o desafio. Porter (2004) retoma os próprios estudos publicados no ano de 1989 sobre vantagem competitiva e reforça os conceitos pelos quais uma empresa pode se diferenciar no mercado e ser mais competitiva, que são: redução de custos e diferenciação. O autor acrescenta ainda que, apesar de ser impossível ter mais de uma empresa com liderança em custo num mesmo setor, é perfeitamente concebível que várias empresas obtenham sucesso com a adoção de estratégia voltada para a diferenciação.

Para visualizar o nível de competitividade de uma empresa, Maramaldo (2000) destaca que é essencial um comparativo com seus principais concorrentes. Para realização desse comparativo, são necessários dois indicadores: satisfação de mercado, que define a expansão da empresa em relação a seus concorrentes, e o crescimento no faturamento nos últimos cinco anos. Na opinião do autor, ao satisfazer os clientes, e obter os níveis de faturamento e de lucro desejáveis, é possível identificar a empresa como competitiva.

O modelo da dinâmica da competitividade, apresentado por Maramaldo (2000), indica que a busca da vantagem competitiva pode resultar em quatro possibilidades diferentes. Uma delas é a falência, representada pelas organizações que não satisfazem o mercado e nem

ganham dinheiro, portanto não sobreviverão às exigências competitivas. Já empresas que procuram atender aos requisitos dos clientes e consequentemente satisfazem o mercado podem sair dessa situação e ainda não serem lucrativas, mas já caminhando na direção da qualidade. Outra situação é a das empresas com um lucro considerado ideal para a operação, mas que, sem satisfazer o mercado, podem não se manter na operação por muito tempo, pelo baixo nível de competitividade. Isso é arriscado, pois, caso ocorra a perda de *market share*, ocorrerá um impacto negativo no caixa da empresa. Por fim, há a competitividade, em que as duas metas (satisfazer o cliente e ganhar dinheiro), apesar de conflitantes, são atendidas, proporcionando a condição desejada.

Da mesma forma, Meneghetti (2002) enfatiza que para a empresa se manter competitiva em relação à concorrência ela deve estar atenta ao mercado e às opções a serem praticadas no futuro, sendo necessária especial atenção aos investimentos, aos custos, às novas tecnologias e ao pioneirismo em processos, procedimentos e produtos.

Hitt, Ireland e Hoskisson (2003) enfatizam que, para alcançar a competitividade e auferir retornos superiores à média, uma empresa deve analisar o seu ambiente externo identificar as oportunidades existentes, determinar quais recursos e capacidades internas são competências essenciais e selecionar a estratégia mais adequada.

Para Brito e Brito (2012), os recursos e competências da empresa podem desempenhar um papel-chave na geração de valor, permitindo que a empresa apresente uma vantagem competitiva perante seus concorrentes.

Prahalad e Hamel (2005) destacam três aspectos relevantes como alternativas para a recuperação da competitividade. São eles: *empowerment*, que é o redesenho de processos e a racionalização de portfólio; *downsizing*, basicamente a redução de despesas administrativas; e re-engenharia de processos e melhoria contínua, erradicando o trabalho desnecessário e apontando os processos que conseguirão obter redução do tempo de ciclo e qualidade total, para a satisfação do cliente.

As recomendações de Prahalad e Hamel (2005) fazem com que as empresas alcancem os concorrentes, não necessariamente os superem, o que se assemelha ao conceito de Maramaldo (2000) para o aspecto da qualidade. Aí se encontra justamente o ponto em que a empresa satisfaz o mercado, mas ainda não é lucrativa. Emparelhar-se aos concorrentes é necessário, porém não levará nenhuma organização à liderança de mercado. Ocupar uma posição de liderança hoje não significa que esta será ocupada amanhã; a liderança e a competitividade precisam ser continuamente reinventadas.

A qualidade, embora não seja por si só uma vantagem competitiva, quando somada à receptividade dos clientes e ao menor tempo de lançamento de produto faz parte da lista de diferenciais competitivos enumerados por Prahalad e Hamel (2005). Os autores descrevem, ainda, a preocupação com o planejamento das ações futuras, em quatro pontos distintos: que clientes a empresa servirá no futuro; quais serão seus concorrentes; qual será a base de sua vantagem competitiva; que habilidades ou capacidades farão de sua empresa uma empresa única.

Segundo Oliveira, Gonçalves e De Paula (2013), em ambientes competitivos caracterizados como incertos e turbulentos, fatores como flexibilidade estrutural, inovação contínua, rapidez e eficácia nos processos de tomada de decisão podem ser determinantes para que as organizações sobrevivam e prosperem em seus respectivos setores ao longo do tempo. Tudo isto faz com que os profissionais de planejamento estratégico levem em consideração os ambientes competitivos incertos.

Para Porter (2009), competir está na essência do negócio, pois a concorrência na indústria, seja qual for ela, é uma constante. E não somente se concorre com outras empresas do mesmo ramo, mas também se disputa espaço no mercado com potenciais entrantes, substitutos, fornecedores e clientes, numa disputa sistêmica, contra todos e contra si mesmo. Assim se apresenta o mercado contemporâneo, como uma arena de contendias em que ter um diferencial competitivo,

que traga vantagens competitivas, é uma busca incessante e necessária. Competir é a causa e a consequência para a existência das empresas. Quanto aos fatores estruturais relacionados à competitividade, o autor indica ainda as cinco forças que, segundo ele, determinam a dinâmica da competição em uma indústria: a ameaça de novos entrantes, a ameaça de substitutos, o poder de negociação dos clientes, o poder de negociação dos fornecedores e a rivalidade entre os concorrentes atuais.

Uma análise do mercado de fundição de metais no Brasil, a partir das cinco forças de Porter (2009), permite destacar alguns pontos relevantes: o elevado poder de negociação dos compradores, sobretudo no mercado automobilístico; a ameaça de produtos substitutos em alguns segmentos de mercado, por outros processos de fabricação, tais como forjaria, metalurgia do pó ou polímeros; em relação ao poder de negociação dos fornecedores, destaca-se aquele relacionado aos itens essenciais, como matéria-prima, energia elétrica e insumos de produção em geral; em relação à ameaça de novos entrantes, o destaque é para a intensa competição internacional que sofre a maior parte das médias e grandes fundições de metais no Brasil. Na rivalidade entre os concorrentes atuais, destaca-se a forte competição por preço e o tempo de entrega do produto final.

A partir dos estudos de Porter (1989), em relação às três estratégias genéricas para criação de uma posição sustentável em longo prazo, observa-se que a estratégia competitiva que mais se adapta ao mercado de fundição de metais no Brasil é a de baixo custo, que tem no preço um dos principais atrativos para o cliente, e na qual a empresa centra seus esforços na busca de eficiência produtiva, na ampliação do volume de produção e na minimização de gastos com propaganda, assistência técnica, distribuição, pesquisa e desenvolvimento.

Porter (2009) observou que algumas empresas são capazes de obter maior aproveitamento dos insumos do que outras, pois eliminam os desperdícios, adotam tecnologias mais avançadas, motivam melhor seus funcionários e conseguem ouvir aconselhamentos por

parte do grupo para melhoria de determinada atividade ou conjunto de atividades. Veronese (2014) enfatiza a exigência, às organizações, de atenção especial à melhoria contínua de seus processos. A adoção de tais práticas indica, segundo os autores, que a empresa conseguirá reduzir seus custos e estabelecer níveis de diferenciação, melhorando a sua competitividade e gerando valor aos seus clientes.

Para Gamble e Thompson Jr. (2012), uma vantagem competitiva sustentável permite à empresa atrair um número suficientemente grande de compradores que tenham preferência por seus bens ou serviços em relação àqueles oferecidos por seus concorrentes. Os autores enfatizam que as abordagens mais confiáveis e utilizadas pelas empresas para obter uma vantagem competitiva sustentável são: desenvolver vantagem baseada no custo; criar uma vantagem baseada no diferencial; concentrar-se em um nicho de mercado do setor; desenvolver recursos e competência competitiva que não possam ser alcançados, imitados ou superados pelos concorrentes.

Brito e Brito (2012) descrevem que, embora haja convergência, a definição de vantagem competitiva ainda oferece desafios importantes. Os autores enfatizam três pontos relevantes: delimitar o que é valor criado, estabelecer o referencial contra o qual se determina a vantagem e definir a dimensão do tempo do conceito.

Drnevich, Madsen e Newbert (2010) questionam: como é possível retratar, modelar e medir a vantagem competitiva? De maneira semelhante, Brito e Brito (2012) se perguntam se seria a vantagem competitiva um estado momentâneo ou algo que se refere a um intervalo de tempo.

As competências essenciais descritas por Prahalad e Hamel (1990), que constituem o aprendizado coletivo na organização, especialmente associado à coordenação das diversas habilidades de produção, cumprem, segundo Akabane (2012), três critérios fundamentais: dificuldade de serem imitadas pelos concorrentes, possibilidade de serem alavancadas para muitos produtos e mercados e possibilidade

de contribuir para benefício do cliente final. A competência essencial não diminui com o uso, ao contrário dos ativos físicos, que se deterioram ao longo do tempo; as competências são reforçadas conforme são aplicadas e compartilhadas.

Além de se manifestar na lucratividade da organização, a vantagem competitiva, segundo Harrison, Bosse e Phillips (2010), pode afetar a participação de mercado e o desempenho operacional da empresa, em diferentes momentos e situações. O estudo da vantagem competitiva pela observação de medidas de desempenho deve ser norteado pela lógica de criação de valor, que para Brandenburger e Stuart (1996) é a diferença entre o custo de oportunidade do fornecedor e a disposição do cliente a pagar.

Lindgreen e Wynstra (2005) descrevem como sendo subjetiva a disposição do cliente a pagar, pois antes ele deverá perceber os benefícios oferecidos; ou seja: somente é valorado aquilo que é percebido.

Segundo Coff (2010), os efeitos da vantagem competitiva sobre o desempenho organizacional dependerão de aspectos e decisões da gestão estratégica, contemplando momentos de criação e outros de monetização do valor criado, da mesma forma que, como enfatizado por Porter (2009), uma empresa só é capaz de superar em desempenho os concorrentes se conseguir estabelecer uma diferença preservável. Ela necessita gerar maior valor aos clientes, ou um valor compatível a um custo mais baixo, ou até mesmo ambos.

A diferença de desempenho entre empresas é resultado das diferentes bases de seus conhecimentos e capacidades ao desenvolver e desdobrar o conhecimento (João; Fischmann, 2004). Como observam Santos Netto, Santos e Kunyoshi (2012), algumas empresas já adotam a gestão do conhecimento como forma de responder às demandas do ambiente externo, bem como gerir os recursos internos para se tornar mais eficientes.

Massuqueto e Freitas (2014) afirmam que a busca pelo diferencial competitivo está associada à atitude organizacional e à administração

das atividades executadas pelas empresas. Segundo Prahalad e Hamel (2005), as empresas descobrem soluções novas porque estão dispostas a enxergar muito além das antigas.

Aliando-se aos conceitos de estratégias competitivas, e aplicáveis aos processos de fundição, é interessante introduzir os conceitos da produção enxuta, que surgiram na década de 1950, na indústria automobilística, quando Taiichi Ohno e Shingeo Shingo iniciaram uma nova forma de pensar e gerenciar a produção da indústria automobilística, mais precisamente a da Toyota Motor Company, que atualmente se destaca pelos ganhos de seu processo enxuto, batizado como Sistema Toyota de Produção (STP).

Essa iniciativa trouxe à tona ideias simples e inovadoras, que auxiliaram na redução de perdas e na melhoria de resultados, baseadas em um objetivo em comum: aumentar a eficiência da produção pela eliminação consistente e completa de desperdícios.

De acordo com Murli (2014), todo negócio bem-sucedido segue uma abordagem *lean* na gestão. Para Dennis (2008), a produção *lean*, ou STP, representa fazer mais com menos — menos tempo, menos espaço, menos esforço humano, menos maquinário, menos material — e, ao mesmo tempo, dar aos clientes o que eles desejam.

Ballester-Alvarez (2012) descreve que, apesar de o principal objetivo da produção enxuta ser a redução de custos, ela proporciona condições para aumentar o giro de capital (receitas/despesas) e melhorar a produtividade da empresa.

Outro princípio fundamental para o entendimento do STP é o da função produção, um mecanismo, segundo Shingo (1996), que se caracteriza como uma rede de processos e operações diversas. O processo é entendido como o fluxo dos materiais em um determinado período de tempo e espaço definidos, que seguem o caminho desde matéria-prima até o produto final, o que é denominado como fluxo de valor.

Segundo Womack e Jones (2004), o pensamento enxuto é uma forma de especificação de valor em que é realizada a compreensão do

funcionamento de todo o processo e em seguida são definidos os seguintes itens: definição da melhor sequência para a realização das atividades e execução das tarefas de uma única vez, e sem interrupções. Para os autores, a ideia da realização de determinado trabalho com o mínimo de desperdício e o máximo de eficiência é uma ideia enxuta.

A principal característica do pensamento enxuto é localizar e especificar o que é de fato o valor percebido pelo cliente (Costa; Jardim, 2010). Mapear o fluxo de valor e identificar o desperdício refere-se ao entendimento de todas as etapas e passos necessários para que o processo gere o valor esperado pelo cliente (Womack; Jones, 2004).

Para Porter (2009), a produção enxuta permite melhorias substanciais na produtividade fabril e na utilização dos ativos. O autor ressalta a necessidade da preocupação dos gestores com a melhoria na eficácia operacional, por meio de programas como a gestão da qualidade total e a competição baseada no tempo, de modo a eliminar as ineficiências, aumentar a satisfação dos clientes e atingir as melhores práticas.



CAPÍTULO 4

Estudo de casos

A pesquisa que deu origem ao presente volume se caracterizou como aplicada, qualitativa e exploratória.

Os dados foram coletados em campo, com atuação direta em empresas de fundição de metais no Brasil. Aplicou-se uma *survey* em um evento fechado para usuários da tecnologia de SNPFM e um estudo de casos que teve como objeto oito empresas de fundição de metais.

Utilizou-se aqui uma *survey* de tipo interseccional (*cross-sectional* ou de corte-transversal), que se trata de uma pesquisa na qual os dados são coletados em uma amostra, em um dado momento, e as informações daí originadas e validadas podem descrever ou determinar relações entre variáveis da população, na mesma época (Babbie, 1999).

O critério de escolha da amostragem da pesquisa aqui relatada foi o da amostra não probabilística por conveniência (Freitas et al., 2000), feita com os usuários de um *software* de simulação numérica em um evento fechado, sem a intenção da generalização dos resultados.

A amostra objeto deste estudo foi composta por 57 profissionais.

O instrumento de coleta de dados foi um questionário respondido em um evento fechado por usuários de um mesmo *software* de simulação.

Para o trabalho aqui relatado, as perguntas do questionário foram elaboradas com foco em três pontos: o mapeamento da realidade dos usuários do *software*; a aplicação na empresa da tecnologia da simulação numérica no processo de fundição de metais; a avaliação das vantagens do uso da tecnologia, do ponto de vista do usuário.

Realizou-se um pré-teste com três profissionais da área de fundição de metais que trabalham numa mesma empresa, os quais deram sugestões e apontaram dúvidas em relação às perguntas do questionário.

Para a *survey* propriamente dita, a empresa cedeu espaço em seu evento fechado, realizado anualmente, em que se congregam usuários do mesmo *software* de simulação numérica de toda a América do Sul. O evento realizou-se em agosto de 2013.

Responderam à pesquisa funcionários de empresas localizadas nos estados de Minas Gerais, Paraná, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e São Paulo.

Buscou-se um levantamento mais amplo de informações e análise, por meio do estudo de múltiplos casos, com o intuito de responder ao questionamento inicial da pesquisa, e para a construção do mapa mental relacionando à relação entre a gestão da tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais e a competitividade das empresas no Brasil.

De uma lista de setenta empresas usuárias de um mesmo *software* de SNPFM, foram selecionadas oito, que, consultadas, concordaram em participar da pesquisa.

As empresas foram escolhidas com base nos seguintes critérios: diferentes processos de fabricação; pelo menos uma empresa de cada liga metálica, entre as principais utilizadas em fundição (ferro, alumínio e aço); empresas de diferentes regiões geográficas e estados; tempo e experiências distintas no uso da tecnologia de simulação numérica.

Após o aceite das empresas, foi realizada uma visita a cada uma das oito empresas, onde se realizaram entrevistas. Os tópicos abordados foram orientados pela *survey*, com o objetivo de construir o conhecimento necessário.

Nas oito empresas pesquisadas, dezesseis profissionais foram entrevistados. Do total de entrevistados, 60% são gestores de área e 40%, responsáveis pela utilização do *software*.

Realizou-se também uma análise sobre documentos disponibilizados por algumas das empresas, como forma de validar as entrevistas: gráficos, tabelas, figuras, entre outros.

Com relação ao resultado das entrevistas, adotou-se a análise de conteúdo do material coletado (Bardin, 1977; Sá-Silva, Almeida e Guindani, 2009).

As visitas e a observação foram importantes para identificar e compreender o jargão específico de cada empresa, com diferentes descrições para as etapas do processo produtivo. Nota-se, por exemplo, nos relatos dos entrevistados que quando eles mencionam a palavra “item” se referem às “peças”. O “projeto” é a determinação do sistema de moldagem, composto de cálculo de canais, massalote, uso de resfriador e luvas no processo, entre outros elementos.

Na *survey*, os dados foram classificados em três categorias: usuário, com informações como idade, formação, tempo na empresa, experiência em fundição e tempo de uso do *software*; aplicação, destacando temas como o objetivo do uso, o setor da empresa em que está localizado o *software*, tempo médio de projeto e materiais simulados; benefícios, apontando a satisfação da diretoria da empresa quanto aos resultados e as reduções obtidas no tempo de ciclo de desenvolvimento de produto.

Quando questionados sobre o tempo de experiência de trabalho na área de fundição, 77% responderam possuir mais de seis anos de experiência em fundição, enquanto 50% dos respondentes possuem mais de dez anos de experiência.

Em relação ao tempo de experiência no uso do *software*, 30% dos entrevistados afirmaram ter entre três e cinco anos, um período considerado bom para se obter um comparativo do antes e do depois do uso. O uso por menos de três anos (35% das respostas) pode dificultar a análise comparativa dos resultados com e sem simulação; da mesma forma, empresas que a utilizam há mais de cinco anos (30% das respostas) podem não ter mais o registro de projetos sem simulação.

Solicitou-se ao usuário que fizesse uma análise comparativa entre projetos com e sem simulação, no que diz respeito ao tempo de desenvolvimento. A maioria (54% dos usuários) respondeu que essa não é a preocupação principal da empresa, uma resposta não conclusiva; porém, um percentual significativo (37% dos usuários) afirmou que o tempo é menor quando se aplica a tecnologia SNPFM, enquanto 9% dos usuários afirmaram que o tempo pode ser maior.

A consideração sobre o tempo é relativa à execução completa do projeto: a pergunta tinha por objetivo entender se usar a simulação ou não interferiria no tempo total de projeto, até que fosse entregue ao cliente uma peça com qualidade adequada. Caso a produção das primeiras peças, lote piloto, fosse aprovada com o nível de qualidade requerido, não haveria a necessidade de produzir um novo lote, com ajustes.

Numa estratificação da pergunta de comparação do produto que não tivesse sido simulado com um produto similar que tivesse sido simulado, solicitando-se que fosse apontado o que melhor representaria o tempo de desenvolvimento do projeto, as respostas, em concordância com o estudo de Ravi (2010), apontaram para uma redução média de 30% no tempo de desenvolvimento do projeto. A diferença pode estar associada ao universo das empresas pesquisadas, em que são diversos os processos, as ligas metálicas e a dimensão das peças, o que interfere com a relação de ganhos no tempo de execução do projeto. Uma empresa que fabrica um produto seriado, em liga de alumínio, cujo peso seja de alguns quilogramas, pode ter um percentual de ganho de tempo de ciclo, diferente de outra que fabrica de maneira não seriada, a partir de uma liga de aço com dezenas de toneladas.

Na *survey* foi também explorada a avaliação dos resultados do uso do *software*, o que melhor poderia ser dito com relação à aplicação da tecnologia de SNPFM, do ponto de vista da direção da empresa. Para 93% dos que responderam ao questionário, os resultados do uso do *software* nas empresas de fundição são satisfatórios e atendem à expectativa da diretoria.

Os dados obtidos permitiram construir um estudo a respeito dos possíveis ganhos de competitividade, comparativamente, para casos de: utilização da SNPFM para metais ferrosos e não ferrosos; grandes e médias empresas; diferentes tempos de uso; influências da localização.

Os itens observados foram os seguintes: o processo produtivo; como a empresa utiliza a tecnologia de SNPFM; o número de pessoas envolvidas desde o projeto na engenharia até a execução do lote piloto; os tipos de peças produzidas.

As empresas pesquisadas estão localizadas nas regiões Sul e Sudeste. Aqui serão identificadas pelas letras A, B e C as que se encontram na região Sul, enquanto as da região Sudeste serão chamadas de D, E, F, G e H.

O Quadro 1 apresenta o tempo de uso do *software* e as principais características das empresas pesquisadas, enquanto o Quadro 2 traz informações sobre formação e função dos entrevistados, identificando-os como sujeito (S).

Quadro 1 – Caracterização das empresas pesquisadas.

Empresa	Tempo de uso do software	Principais características da empresa
Empresa A	6 anos	Alumínio. Fundição em coquilha e alta pressão. Cativeira
Empresa B	1,5 anos	Ferro fundido. Fundição em areia. Agrícola e automotivo
Empresa C	2 anos	Ferro fundido. Fundição em areia. Agrícola
Empresa D	4 anos	Aço. Fundição em areia. Ferroviário
Empresa E	6 anos	Ferro fundido. Fundição em areia. Agrícola
Empresa F	10 anos	Alumínio. Fundição em coquilha e alta pressão. Automotivo
Empresa G	8 anos	Ferro fundido. Fundição em areia. Automotivo
Empresa H	19 anos	Aço e ferro fundido. Fundição em areia. Geração de energia

Fonte: Os Autores, com base nos dados da pesquisa.

Quadro 2 – Caracterização dos entrevistados.

Denominação	Formação / Função na empresa	Experiência em fundição
S1	Administrador de empresas / Chefe da qualidade	10 anos
S2	Engenheiro de produção / Chefe da engenharia	20 anos
S3	Engenheiro mecânico / Responsável pela simulação	14 anos
S4	Mestrando em Engenharia / Chefe da melhoria contínua	12 anos
S5	Engenheiro mecânico / Chefe da engenharia	14 anos
S6	Tecnólogo em processo / Responsável pela simulação	30 anos
S7	Engenheiro / Chefe da engenharia	34 anos
S8	Tecnólogo / Chefe da engenharia	20 anos
S9	Administrador de empresas / Assessor da diretoria	3 anos
S10	Estudante de engenharia / Responsável pela simulação	3 anos
S11	Engenheiro / Responsável pela melhoria contínua	5 anos
S12	Tecnólogo / Supervisor da engenharia	29 anos
S13	Engenheiro mecânico / Engenharia de produto	10 anos
S14	Estudante de engenharia / Responsável pela simulação	7 anos
S15	Estudante de engenharia / Responsável pela simulação	4 anos
S16	Engenheiro metalurgista / Responsável pela simulação	10 anos

Fonte: Os Autores, com base nos dados da pesquisa.

A seguir, fragmentos das entrevistas são analisados e confrontados com o referencial teórico.

1. Uso da tecnologia de SNPFM

Nos trechos das entrevistas aqui reproduzidos os sujeitos da pesquisa apontam como se dá o emprego da tecnologia de SNPFM em sua empresa.

- S1: Simular peças em desenvolvimento e correntes de produção (50%-50%), construção da ferramenta e fichas de processo, auxiliar em ganhos de rendimento metálico e redução de refugos.
- S2: Análise do fundido: projeto, fabricação de amostras, análise do comportamento do produto em relação às falhas, e definição de processos. Cerca de 90% do uso é para produtos novos e 10% para otimização de processos.
- S3: Desenvolvimento de novos produtos, redução de custo e melhoria de processo.
- S4: Economiza tempo e recursos, tem boa assertividade. Permite o desenvolvimento em tempo menor, de forma virtual, aproveitam-se melhor os recursos, e evita-se o processo de tentativa e erro. Também é utilizada para aprimorar os processos de fundidos já em produção.
- S5: Em pesquisa e desenvolvimento, na simulação inicial, elaboração de projetos, especificações de ferramental para empresas terceirizadas.
- S6: São três os objetivos: na produção, o projeto é validado pela simulação, e a partir daí se inicia a fabricação do ferramental ou do modelo, principalmente as peças de maior responsabilidade; em reengenharia quando se faz a reanálise dos parâmetros, adequação do ferramental de peças correntes com problemas; e no desenvolvimento, antes de iniciar a fabricação do produto.
- S7: Não é exclusivo para um único uso, mas é aplicado no cálculo do sistema de canais de enchimento e massalotes; no desenvolvimento dos produtos novos, em um bem variado conjunto de produtos: pás de rotores de 1.000 a 2.000 kg até *hubs* de 60.000 kg ou camisa de cilindro com 75 toneladas.
- S8: Para o desenvolvimento de produtos e na melhoria de produtos correntes em produção na proporção 70%-30%.
- S9: As decisões passaram a ser tomadas com base na simulação. Antes da simulação uma ferramenta podia ser modificada até vinte vezes. Com a simulação isso não é mais do que uma ou duas vezes.

- S10: Primeiramente se tinha como objetivo utilizar a tecnologia para resolver os defeitos de fundição, tais como porosidades e bolhas. Com o tempo, é possível trabalhar a rentabilidade do item, analisando os processos e averiguando o que pode ser melhorado.
- S11: O desenvolvimento dos itens novos e alguma aplicação de melhoria de produção, visando o aumento de rendimento metálico, o uso de luvas e filtros.
- S12: Identifica-se o potencial de melhoria, analisa-se junto ao pessoal de custo a possibilidade de uso de uma nova situação para filtros, luvas e outros componentes; e mediante isso se faz um projeto de melhoria.
- S13: Em 2006 era utilizada com o objetivo de melhorar a qualidade do produto, e reduzir refugos e conseqüentemente os custos. A partir de 2007 conseguiu-se atingir níveis de qualidade excelentes no ferramental; o nível de refugo passou a ser de 10.000 ppm, enquanto no passado (sem simulação) era da ordem de 50.000 a 60.000 ppm.
- S14: Desenvolver produtos e melhoria daqueles em produção que não foram desenvolvidos com esta tecnologia. Aproximadamente 80% do tempo é dedicado a produtos novos e 20% para melhoria de produtos já em produção.
- S15: Desenvolvimento de produto e melhoria contínua. Atualmente aproximadamente 50% do tempo dedicado a produtos novos e 50% para melhoria de produtos correntes de produção.
- S16: São dois objetivos distintos: desenvolvimento do produto (ferramental, sistema de canais, refrigeração e estimar os tipos de possíveis problemas); resolver os problemas antigos, compreender as causas das falhas.

As empresas pesquisadas pertencem a mercados variados e produzem peças fundidas por diferentes processos de fabricação, como mostrado também no Quadro 1. Pode-se observar, como no relato do S7, que as peças de

metal fabricadas chegam a possuir peso de 75 toneladas. Esse tipo de peça não é produzido várias vezes por dia; assim, num caso como esse, a empresa faz uso da simulação para cálculo do sistema de canais de enchimento e massalotes, com o objetivo de produzir com qualidade na primeira tentativa. A preocupação principal é com a qualidade da peça, mais do que com o rendimento metálico, por se tratar de um produto de tão grandes dimensões.

O sujeito S13 relatou que a aplicação da tecnologia de SNPFM foi útil para melhorar a qualidade do produto e para reduzir refugo. São citados números, apontando que o refugo antes da adoção do uso da ferramenta de simulação atingiam 50.000 a 60.000 ppm (partes por milhão) e, após a simulação, foi reduzido para 10.000 ppm. Além de redução do refugo e da melhoria da qualidade, nota-se o uso em peças com alto volume de produção, para melhorar os custos de fabricação.

Todas as empresas pesquisadas adquiriram a tecnologia de SNPFM quando já possuíam o processo produtivo em operação. Com base nos conceitos teóricos e na experiência dos usuários, foram desenvolvidas as primeiras disposições dos canais e massalotes ou outros recursos dos projetos para fabricação da peça. Quando a empresa adquiriu a tecnologia de SNPFM, pôde revisar os projetos existentes com o objetivo de melhorar a qualidade e diminuir os custos de produção, como relatou S16, ou melhorar os índices de produtividade, conforme afirma S13.

O sujeito S9 citou na entrevista que as decisões passaram a ser tomadas com base na simulação, e não mais no método da “tentativa e erro”, sem a certeza de que a peça seria produzida com qualidade. A modificação do modelo de fundição é um fator que se reflete nos custos e no tempo total da produção da peça. O mesmo entrevistado relatou que antes da simulação uma ferramenta de fundição chegava a ser modificada até vinte vezes; a simulação permitiu, assim, a diminuição dos custos e menores tempos de fabricação.

Observam-se relatos de que o uso da tecnologia de SNPFM pode contribuir para a melhoria da qualidade das peças em produção. O percentual de uso da simulação em peças de produção varia de

acordo com os objetivos de cada empresa, entre 10% e 50%, conforme destacaram S2, S14, S8 e S15. O sujeito S16 relatou que os objetivos de sua utilização são estimar os defeitos antes que o ferramental seja produzido, diminuir os custos de fabricação e eliminar a necessidade de ajustes na etapa posterior. O entrevistado S10 citou que, à medida que a empresa passou a ter mais experiência no uso da simulação, obteve ganhos com a melhoria da lucratividade no produto fundido.

O emprego da tecnologia de SNPFM para peças correntes de produção ou peças novas depende da realidade de cada empresa. O sujeito S13 relatou que a empresa em que trabalha fez uso da simulação por um ano, com o objetivo de melhorar a qualidade do produto e reduzir refugo. Atualmente, a utiliza para a definição do projeto antes de iniciar a produção.

O entrevistado S6 relatou diferentes aplicações da tecnologia de SNPFM: para validar o projeto; para iniciar a fabricação do ferramental de fundição nas peças de maior responsabilidade técnica; em reengenharia, quando se faz toda a reanálise dos parâmetros e adequação do ferramental de peças correntes com problemas. Prahalad e Hamel (2005) descrevem como fator importante a reengenharia dos processos, para erradicar o trabalho desnecessário e fazer com que todos os processos da empresa apontem na direção da satisfação do cliente, da redução de tempo do ciclo e da qualidade total.

Observa-se que o uso da tecnologia de SNPFM tem relação com o processo da empresa, a experiência dos profissionais e o tempo de uso do *software* de simulação. Os ganhos obtidos estão relacionados com o foco da empresa.

2. Tempo para desenvolvimento de produto

Os fragmentos a seguir trazem considerações dos entrevistados a respeito do impacto da tecnologia de SNPFM sobre o tempo para desenvolvimento dos produtos.

- S1: É possível prever a falha e simular várias versões até que se chegue numa condição ideal. Investe-se tempo simulando, mas no projeto como um todo existe redução de 25% a 30% do tempo.
- S2: Existe uma influência positiva no tempo, há necessidade de se planejar melhor o projeto de produto e processo, coletar dados e informações, porém ganho de tempo é um diferencial.
- S3: Redução do tempo de projeto entre 10 e 20%.
- S5: De 90 a 120 dias para nosso tipo de peça.
- S6: A tecnologia traz certos benefícios em velocidade de cálculo, em velocidade de determinação de sistema. O cálculo completo de um processo de fundição sem a utilização da tecnologia dá para fazer, mas o tempo de projeto com certeza seria mais do que o dobro.
- S7: O ganho de tempo é um dos fatores positivos, mas temos outros ganhos.
- S8: Antes do uso da simulação levávamos muito mais tempo, quase o dobro, para desenvolver um projeto. Os ganhos são enormes, não precisamos fazer mais tantas tentativas na prática, resolvemos tudo na simulação.
- S9: Comparando com o desenvolvimento da peça sem a simulação, neste caso, ganhamos mais de uma semana no tempo de desenvolvimento.
- S10: Até que o ferramental esteja pronto na fábrica, entre duas e três semanas. A tecnologia foi um divisor, o antes e o depois são altamente perceptíveis.
- S11: Algum tempo atrás o tempo de desenvolvimento de um projeto era de 45 dias. Atualmente, com as novas exigências do cliente e demanda em alta, a empresa tem que desenvolver em no máximo quinze dias um novo projeto.
- S12: Com base na simulação e nos resultados da mesma, isso nos permite um ganho de tempo de quase 30 dias, em média.

- S13: Paramos de fazer uso da metodologia da “tentativa e erro”, hoje em dia somos muitos mais assertivos.
- S15: A parte virtual, algo em torno de dois meses, em média, e em torno de quatro meses até a construção do ferramental.
- S16: Um produto leva em torno de 1,5 a 2 anos. No desenvolvimento, o piloto, levamos de três semanas a um mês para poder avaliar, simular e propor melhorias.

Pela análise das respostas, verifica-se que nessas empresas há redução do tempo de desenvolvimento de produto quando se usa a tecnologia de SNPFM; S3 fala de 10% a 20%, S1, de até 25% ou 30%. O sujeito S9 relata que com a simulação a empresa recentemente reduziu em determinada peça mais de uma semana no tempo de desenvolvimento. Segundo S7, o ganho de tempo é um dos fatores positivos para a empresa.

Outro ponto que se observa é a quantidade de peças necessárias a serem fundidas, para teste, até que se obtenha uma peça aprovada. Para Ravi (2008), os testes em produção não só elevam o custo, como também desviam recursos de produção regular. O S3 destaca que sem o uso da simulação na etapa de projeto são necessárias pelo menos três peças, até que se obtenha uma peça boa. Já quando se aplica a simulação, produz-se uma ou no máximo duas, diminuindo os custos de fabricação de amostras e o tempo final para entrega da peça no cliente.

Nota-se pelo que foi descrito por S10 que a tecnologia de SNPFM foi um divisor de águas. A fala de S13 afirma que a empresa parou de utilizar o método de “tentativas e erros”, tornando-se mais assertiva. Para Mendes, Visconti e Rondet (1993), o desenvolvimento de uma peça fundida por tentativa e erro é lento, e apresenta um custo elevado em razão das diversas mudanças necessárias no ferramental. Para S13, o uso da tecnologia de SNPFM contribuiu como um diferencial competitivo para a empresa.

Ganhar tempo no desenvolvimento e agilizar a entrega permite à empresa se diferenciar de seus concorrentes. Para Prahalad e Hamel

(2005), a empresa precisa ser capaz de ser diferente. Algumas respostas sobre as vantagens do uso da tecnologia de SNPFM evidenciaram a melhora da assertividade das decisões quando se usa a simulação numérica.

3. Resultados obtidos com o uso da tecnologia de SNPFM

Nas passagens selecionadas e reproduzidas a seguir, os sujeitos da pesquisa mencionam resultados do emprego da simulação numérica.

- S1: Melhorar imagem, maior confiabilidade, redução do tempo do projeto, maior competitividade, atingir maior complexidade nos produtos, redução de custos (matéria-prima e insumos).
- S2: Antecipar possíveis dificuldades na produção e tornar mais rápida a solução dos problemas.
- S3: Em torno de 30% a 35% de redução de custo.
- S4: Economia de recursos, redução de tempo de desenvolvimento, melhor qualidade.
- S5: Melhor imagem frente ao cliente, maior confiabilidade.
- S6: Tivemos a experiência que, sem simulação, as peças apresentavam problemas que poderiam ter sido evitados.
- S7: Redução de mais de 50% no tempo total do ciclo.
- S8: Redução de refugo de 15% para 1%. Melhor serviço prestado aos clientes informando-os previamente da necessidade de alterações.
- S9: Nossos clientes ao invés deles solicitarem ensaios (raios X), o que eles exigem são as simulações, para análise e aprovação.
- S10: Conseguimos alterar o peso da árvore (sistema de canais + massalotes); com a diminuição do peso aumenta-se o rendimento metálico.
- S11: A empresa conseguiu reduzir em 1/3 o tempo de ciclo de desenvolvimento de um novo item.

- S12: Melhora de 3% a 12% no rendimento metálico.
- S13: Maior competitividade, redução do tempo para validação junto aos clientes.
- S14: Menor tempo de *setup*, redução do tamanho do lote de testes. Redução do prazo de entrega.
- S15: O diferencial não é só a redução do tempo, mas sim a qualidade.
- S16: Custos menores em torno de 40%.

Para Alves (2009), uma das maneiras mais efetivas de diminuir o impacto do custo do metal na peça é por meio do aumento do rendimento metálico, que é a relação entre o peso líquido da peça e o peso bruto ou total de metal para produzi-la. Segundo S12, a empresa já conseguiu melhorar em 12% o rendimento metálico, em relação às peças inicialmente desenvolvidas sem o uso da tecnologia de SNPFM.

A redução em torno de 30% a 35% nos custos, no relato do S3, justifica-se pela menor quantidade de peças fundidas para aprovação, por menor consumo de insumos e pela redução de ensaios de qualidade. Isso se assemelha ao relato de S4, que apontou, entre as vantagens da tecnologia de SNPFM, a economia de recursos e redução no tempo de desenvolvimento. Segundo Porter (2009), algumas empresas são capazes de obter maior aproveitamento dos insumos do que outras quando adotam tecnologias mais avançadas, pois eliminam os desperdícios. O comentário de S11 sobre a empresa ter conseguido reduzir para um terço o tempo total de desenvolvimento de uma nova peça reforça a questão do ganho de tempo no desenvolvimento já observada em outros relatos. O relato de S14 está associado ao melhor desempenho de produção. A tecnologia de SNPFM auxilia na entrega ao cliente em menor tempo, pois são menores os tempos de *setup* e o número de lotes de amostras.

Quanto à percepção do cliente da fundição em relação aos resultados nas peças que foram projetadas com o uso da tecnologia de SNPFM, S9 relata que os clientes solicitam as análises das simulações,

para aprovação das peças, em vez de raios X, enquanto, segundo S13, o uso da tecnologia de SNPFM permitiu maior facilidade na validação das peças junto ao cliente. Para Ravi (2008), muitos clientes preferem fornecedores equipados com simulação. O sujeito S8 relatou redução do refugo de 15% para 1%, ganho maior do o que foi observado por Ravi (2010) em estudo com 215 fundições da Índia, no qual apontou queda de refugos de 8,6% para 4,1%. Embora o relato do S8 diga respeito à redução de refugo em uma única empresa, nota-se já uma certa correspondência com os resultados da pesquisa de Ravi (2010). Para S15, o diferencial do uso da tecnologia de SNPFM não é só o ganho de tempo, mas inclui também a qualidade final do produto.

4. Competitividade na indústria de fundição com o uso da SNPFM

O foco dos próximos fragmentos é a influência da adoção de SNPFM sobre a competitividade da empresa.

- S1: É obvio que, além da tecnologia de processo, a simulação ajuda a prever os possíveis problemas de processo. A simulação permite fornecer itens que outros concorrentes não fornecem, e isto é um diferencial de mercado.
- S2: Existe a percepção de que o nosso material (ferro fundido) é melhor do que o da concorrência.
- S3: Agilidade na entrega
- S4: Auxilia na melhoria contínua, e aprimoramento de processos já existentes (com o uso de métricas), e maior geração de valor.
- S5: O mercado está muito competitivo e um dos fatores que impactam é o tempo de ciclo em desenvolvimento de produtos.
- S6: A simulação transmite a imagem de maior controle de processo, e maior credibilidade.

- S7: Alguns clientes discutem detalhes da simulação.
- S8: Redução de tempo. Maior credibilidade. A diminuição do refugo e a redução de custos.
- S9: Praticamente se eliminaram as paradas de máquina para ajustes de processo. Além disso, aumento do rendimento metálico.
- S10: Posso afirmar que tem contribuído para melhoria da rentabilidade, com ganhos financeiros para a empresa.
- S11: Analisando o panorama antes e após a simulação, a empresa aumentou aproximadamente 40% sua produtividade, diretamente ligado ao aumento da capacidade de desenvolvimento de novos projetos.
- S12: Aumento da competitividade, redução do ciclo de desenvolvimento de produto de 45-50 dias para desenvolver uma semana. Redução de custos com redução do peso de canais e massalotes.
- S13: A [Empresa F], que fornece para as cinco maiores montadoras do País (Ford, GM, Volkswagen, Peugeot e Fiat), não poderia arriscar a fabricação de um cabeçote sem simulação; ou gastar USD 500 mil em um conjunto de ferramentas sem simulação.
- S14: Com certeza a empresa passou a disponibilizar um produto melhor. O impacto é no custo final, é muito menor quando se aplica a simulação no projeto.
- S16: Redução de refugo, redução do ciclo térmico do ferramental e das máquinas. Melhoria de produtividade.

Segundo Porter (2009), as organizações de hoje devem competir para criar valor, para serem melhores que os concorrentes ou únicas.

A agilidade na entrega, apontada por S3, é similar ao que descreve S9, no tocante à redução de prazos.

O entrevistado S5 destacou que o mercado está mais competitivo e um dos fatores observados pelos clientes é o tempo de desenvolvi-

mento dos projetos e de entrega dos produtos. Na descrição de S1, a simulação ajudou a fornecer peças que outros concorrentes não forneciam por não dispor da tecnologia SNPFM, tornando-se um diferencial competitivo. A empresa pode oferecer maior confiabilidade aos clientes, fornecendo peças com melhor qualidade e menores custos. S14 reforçou que o uso da tecnologia de SNPFM pode ajudar a empresa a entregar um produto melhor, com menor custo final.

A agilidade no desenvolvimento, relatada pelo sujeito S12, reforça a ideia que Porter (2009) descreve como vantagem para minimizar a influência e a ameaça de substituição em muitos setores. Segundo o autor, a fabricação baseada em computador torna o processo mais rápido, mais fácil e mais barato. De fato, S12 destacou que o tempo para desenvolvimento de produto anteriormente era de 45 a 50 dias, reduzindo-se em seguida a uma semana. Ele mencionou, ainda, que antes da simulação a capacidade de desenvolvimento era de 80 peças/ano, e que atualmente passou para 200 peças/ano.

Os ganhos de competitividade observados por S16 em seu relato apontam o uso da simulação para avaliação das propostas de melhoria de produtividade. O sujeito S11 afirma que a empresa conseguiu aumentar em 40% a produtividade após a implantação da tecnologia de SNPFM. S8 também destacou o uso da simulação para diminuição do refugo e redução de custos.

De maneira mais enfática, S13 afirma que não fazer uso da simulação numérica seria “desastroso”, pois sua empresa fornece para as cinco maiores montadoras do país, um mercado altamente exigente.

5. Motivos para implantar a tecnologia de SNPFM

Nas passagens das entrevistas reproduzidas a seguir, fala-se dos motivos que levaram à adoção da simulação numérica pelas empresas.

- S1: Redução de custos de processo, com a redução dos índices de refugo, e melhor qualidade.
- S2: Melhor *feedback* do processo e melhor suporte à engenharia nos processos: moldagem, forno, laboratório, vazão, etc.
- S3: Além da redução de custo, do tempo de desenvolvimento e aumento da confiabilidade, melhor imagem perante o cliente e a obtenção de um processo mais robusto. Somos competitivos porque somos ágeis.
- S4: Diminuição do tempo de desenvolvimento, diminuição dos recursos aplicados em desenvolvimento, porque elimina os processos de tentativa e erro.
- S5: Para ser mais competitiva no mercado de fundidos. Confiabilidade do processo. Maior rendimento metálico.
- S6: A simulação numérica é utilizada para indicar a melhor geometria, compensando com o menor custo possível do sobre-metal e da usinagem, posterior.
- S7: Eu não consigo imaginar uma engenharia de fundição, no desenvolvimento de um novo projeto sem usar simulação numérica.
- S8: É simples, queríamos ganhar no tempo e no custo.
- S9: Tempo, em primeiro lugar. Rendimento metálico, outro ganho importante.
- S10: Confiabilidade no processo. Melhoria do rendimento metálico é o outro item que hoje pode ser observado como uma importante vantagem da aplicação da simulação.
- S11: A tecnologia veio para redução do tempo que se despendia em uma amostra para atender as especificações.
- S12: Anteriormente eram necessários entre quatro a cinco testes, hoje com a simulação, não mais do que um a dois testes. Uma queda de 50% no mínimo no número de testes, além da redução de tempo.
- S13: A empresa faz uso de uma metodologia [...] criada com base no PMBOK, o que permite gerenciar o projeto com as condições

exigidas para atender a ISO. A simulação permite anexar os *milestones* do sistema de gerenciamento de projetos do PMI em um sistema de APQP (*advanced product quality planning*).

S14: Refino do processo, melhoria contínua e otimização.

S15: A simulação está inserida desde a cotação.

S16: Redução de número de lotes de amostra.

Nota-se que os motivos para implantação da tecnologia de SNPFM são diversos. S8 afirma que a empresa desejava reduzir o ciclo de desenvolvimento de produtos e os custos; S16 associa os ganhos à redução do número de lotes de amostras; S12 destaca a redução de 50% no número de testes.

As diferentes percepções de objetivos estão associadas às características de produção de cada empresa, aos tipos de mercado em que atua e ao tempo de experiência com a tecnologia de SNPFM.

Do ponto de vista da aplicação da simulação em fundição, S7 comentou que não imagina um departamento de engenharia sem utilizar a simulação numérica, em razão dos ganhos observados por ele em 34 anos de experiência de trabalho na área.

Da mesma forma, foi relatado por S10 o aumento de confiabilidade no processo e do rendimento metálico. S3 observa que a empresa tem conseguido ser mais competitiva porque se tornou mais ágil. S11 destaca que a aplicação da tecnologia de SNPFM permitiu redução do tempo para fabricação de peças pilotos.

O sujeito S5 comenta que a tecnologia de SNPFM tem sido útil para a melhoria da competitividade. Segundo S4, a simulação foi implantada com o objetivo de reduzir o ciclo de desenvolvimento de produto. A diminuição do tempo de desenvolvimento permitiu a redução dos recursos aplicados nessa etapa, porque elimina os processos de “tentativa e erro” e permite à empresa melhorar o seu desempenho.

S6 destaca a oportunidade de uso da tecnologia de SNPFM para indicar a melhor geometria da peça e o menor uso de sobremetal, evi-

tar usinagem posterior e diminuir custos de fabricação na etapa de rebarbamento. Marques (2008) recomenda que por meio da simulação seja possível determinar os pontos quentes de um fundido e projetar um novo produto mais dequado. Alves (2009) indica que a utilização da tecnologia de SNPFM é uma alternativa para melhoria da confiabilidade dos processos produtivos e para obtenção de processos mais ágeis e com menores custos.

6. Como mensurar os resultados obtidos com o uso da simulação

A questão da mensuração dos resultados do uso da tecnologia de SNPFM é o aspecto destacado nos trechos das entrevistas transcritos aqui.

- S1: Conseguimos aumentar o rendimento metálico de 65% para 75%.
- S2: Existe ganho, mas com certa dificuldade de ser mensurado em um primeiro momento.
- S5: Existe uma tendência forte de o refugo estar abaixo da média.
- S6: O resultado financeiro eu não sei se conseguimos mensurar.
- S7: Os ganhos financeiros permitiram um breve retorno do investimento. Os ganhos vêm sendo contabilizados ano após ano, no desenvolvimento e no aprimoramento dos produtos.
- S9: No geral posso dizer que se ganha muito, em tempo e assertividade.
- S10: Posso relatar um caso de um “cubo de roda”, com refugo de 8%, que com a simulação o refugo é menor que 1%.
- S11: Aumento da carteira de clientes.
- S12: Nós temos um projeto antigo, sem simulação, cujo tempo de rebarbamento era de 8 minutos por peça. Nós refizemos o projeto, retirando canais e massalotes, o que além de melhorar o

rendimento metálico, de 65 para 72%, reduziu o tempo de rebarbamento para 1,5 minutos.

- S13: O conjunto, pessoas mais as ferramentas de simulação numérica, nos deu uma vantagem (Brasil) em relação à Argentina. A PSA exige que nós aqui do Brasil estejamos sempre presentes na Argentina para os desenvolvimentos, eles reconhecem a nossa experiência.
- S14: Temos casos de determinados produtos em que o índice de refugo caiu pela metade após a simulação numérica. Num produto específico, o refugo caiu de 8% para menos de 1%.
- S15: Há um aumento de produtividade. No nosso caso, ganhamos algo em torno de 30% de produtividade.
- S16: Em vários casos as decisões sobre produtos permitiram o retorno do investimento.

Nota-se que algumas empresas ainda não contabilizaram diretamente os ganhos financeiros, como relatam S2, S5, S6 e S16.

Analisando o relato de S1, nota-se que a empresa conseguiu melhorar o rendimento metálico, em conformidade com o que diz Alves (2009). A melhoria observada por S1 foi de 10%. Para Ravi (2008), mesmo uma pequena melhoria no rendimento metálico pode trazer economia significativa de recursos ou maior produtividade.

O ganho com rendimento metálico, também relatado por S12, foi de 7%; o mesmo entrevistado destacou a economia de tempo na rebarbação. Para Ravi (2008), os programas de simulação aumentam o nível de confiança em uma fundição de peças mais complexas, que geralmente são as que contribuem com a maior margem de lucro.

Observa-se no relato de S14 que os ganhos podem também estar associados à redução de refugo. S11 explicou que sem o uso da simulação a empresa não teria conseguido entregar a carteira de peças aos clientes no ano de 2013. Para Ravi (2008), os programas de simulação fornecem uma base científica e documentada para a garantia da qualidade e certificação.

A simulação identifica os locais prováveis de defeitos internos, que podem ser mais bem observados por um profissional qualificado. O tempo total do projeto pode ser reduzido, na medida em que, por meio da simulação, sejam observados e corrigidos antecipadamente os problemas.

Aumentar a carteira para novos desenvolvimentos, apoiando-se na tecnologia de SNPFM para os projetos das peças, é uma das maneiras de se perceber o valor da tecnologia. Segundo relatou S16, em vários produtos a empresa já tomou decisões com base na simulação que evitaram a construção de um novo molde, com consequente redução dos custos de fabricação, gerando uma vantagem competitiva. Schmidt e Sturm (2013) descrevem que os custos podem ser reduzidos quando aplicada a simulação, na etapa de planejamento de construção do modelo. Ravi (2008) enfatiza que o custo total é maior quando o feramental necessita de várias alterações até que uma condição robusta de produção seja alcançada.

7. Geração de conhecimento com o uso da simulação

Os entrevistados abordaram também a relação entre o emprego da simulação numérica e a geração de conhecimento.

- S1: Em pouco tempo os funcionários envolvidos passaram a entender princípios básicos de fundição, é um bom treinamento.
- S2: A engenharia passou por reestruturação em termos de equipamentos e pessoas, para a nova cultura da empresa e a metodologia de trabalho.
- S3: O profissional passa a visualizar quais são as alterações realizadas, e quais os efeitos desta variação. Isto agrega conhecimento nos futuros projetos que serão desenvolvidos.

- S5: Damos oportunidade de aprendizado aos mais jovens, novas discussões levantadas pela simulação trazem conhecimento para a empresa.
- S6: Orienta a engenharia de produto, sobre como projetar um componente, de maneira mais amigável.
- S7: Minha percepção acadêmica é que a tecnologia é uma ferramenta muito importante para o ensino de fundição. Como tecnólogo de processos pelo Senai aprendi a utilizar a simulação, no curso.
- S8: As pessoas podem aumentar o conhecimento técnico.
- S9: Com a simulação é possível conhecer melhor o produto, como ele se solidifica, por exemplo.
- S10: Quando eu comecei a trabalhar em fundição eu sequer sabia o que era um filtro. A simulação me fez crescer muito, permitiu que eu compreendesse muito melhor o que é uma inoculação, qual a causa de um defeito de fundição. Cada simulação é uma nova geometria, um novo desafio, e um novo aprendizado.
- S11: O profissional tem a possibilidade de acompanhar passo a passo, item a item, em cada etapa e observar o que está acontecendo, descobrir mais facilmente a causa e atuar. Eu pessoalmente, consegui aumentar de maneira significativa o meu conhecimento em fundição.
- S12: A simulação é um aprendizado para todo mundo. Eu aprendi muito e vou continuar aprendendo.
- S13: Participei de congressos de simulação na Áustria [...] e na Alemanha, como usuário da tecnologia.
- S14: É possível visualizar problemas básicos, e como esses problemas impactam na qualidade do produto e consigo me antecipar a eles. Mesmo daquilo que se aprende no dia a dia, a simulação é que permite identificar o porquê.
- S15: Com a simulação é possível compreender muito melhor o processo.

S16: Na simulação você consegue compreender o problema e, o melhor, propor alternativas para solução. Verificar qual é a melhor solução, antes de construir o ferramental, evitando o método de tentativa e erro.

É importante para qualquer empresa que procura o melhor posicionamento no mercado que os profissionais sejam bem treinados e estejam preparados para assumir desafios. Nota-se que diversos apontamentos sobre a aplicação da tecnologia de SNPFM fazem referência a esse aspecto, tal como destaca S1.

O destaque de S7 é ainda mais focado na questão da aprendizagem, quando menciona a percepção de que a tecnologia de SNPFM é uma ferramenta muito importante para o conhecimento do processo. S12, por sua vez, refere-se à simulação como um aprendizado para ele mesmo, que pretende continuar aprendendo. Ou seja, sugere-se que tanto o conhecimento básico em fundição quanto o seu aprimoramento podem ser incorporados à medida que se adota a tecnologia de SNPFM.

Observa-se, pelo relato de S14, que o entendimento do processo por parte dos profissionais é mais completo, pois estes passam a visualizar quais são as alterações no projeto que se relacionam com os efeitos no processo, conforme também menciona S3. O que foi destacado por S11 tem relação, por exemplo, com a atuação dos profissionais de fundição, que podem, por meio da simulação, acompanhar o produto passo a passo, em cada etapa, e observar o que ocorre após cada modificação. Isso possibilita um aprendizado constante, como esse entrevistado testemunha a respeito de si mesmo.

A utilização da tecnologia de SNPFM não tem como objetivo principal o aprendizado das pessoas, mas isso acontece naturalmente e faz parte de sua utilização no dia a dia da empresa.

Para Ravi (2008), a gestão do conhecimento é um benefício importante, porém difícil de contabilizar. Uma vez que o computador armazena todas as entradas e resultados de cada ensaio virtual, pode-se

recuperar determinada informação para que seja utilizada em outros projetos. Os relatórios de projetos e apresentações também podem ser usados na melhor formação de pessoal.

S16 reforça em sua fala que na simulação é possível visualizar um problema de forma clara, compreendê-lo e propor duas ou três alternativas, antes de construir o ferramental, evitando-se o tão desastroso método de “tentativas e erros”.

8. Grau de utilização do software de simulação

Nos fragmentos destacados aqui, os sujeitos da pesquisa tecem considerações sobre a amplitude do emprego da tecnologia de SNP-FM nas organizações a que pertencem.

- S1: Em pouco tempo vai ser impossível trabalhar sem utilizar a simulação.
- S2: A demanda de itens novos é muito alta. Em torno de 70 itens em desenvolvimento geram uma demanda gigante. Com isso trabalha-se 24 horas do dia em função desta questão pontual da alta demanda de novos itens.
- S3: A orientação da direção da empresa é para que 100% dos projetos sejam simulados.
- S5: Não conseguimos, por uma questão do número de pessoas, aplicar simulação para todos os clientes, porém a simulação hoje já é exigência de alguns deles.
- S6: Em volume nós simulamos mais produtos novos, e diria que reengenharia e desenvolvimento estão iguais, mas o tempo é maior para produtos novos. Eu diria que 80% do total. Existem ainda algumas peças, que produzimos há muitos anos, que já vem com resultados positivos que ainda não passaram por processo de simulação.

- S7: Não usamos a totalidade dos recursos da tecnologia, isso para nós está claro, pois ela tem muitos outros recursos. Quanto à intensidade de utilização, nas peças de aço, todas são simuladas; já nas peças de ferro fundido são 50% delas. Quando nós sabemos que a peça terá um ensaio mais rigoroso, nós simulamos.
- S9: Eu oriento sempre o nosso pessoal a ficar o maior tempo possível que puder simulando, uma vez que aqui não estamos “travando” a máquina de produção.
- S10: Hoje temos simulado 70% de itens novos e 30% de melhoria das peças em produção. Devemos chegar aproximadamente a 50% para cada um.
- S12: Para as peças novas que não estão dentro das expectativas e metas da engenharia, logo abrimos um plano de ação para melhoria. O item corrente de produção segue a mesma regra, ou seja, conferimos junto ao setor de custos como está o desempenho de determinada peça, posteriormente seguimos com a análise com o auxílio da simulação para implantar a melhoria.
- S13: As montadoras seguem o APQP adaptado à sua realidade. [O sistema] é dividido em 9 *milestones*, que vão desde a fase “00”, que é a fase cotação, até o “09”, que é a fase de transferência da responsabilidade do desenvolvimento de produto para a produção propriamente dita. Geralmente analisamos o produto com base na simulação, a fim de estimar em quantas versões conseguiremos definir um bom projeto.
- S14: A principal é para promover qualidade do produto. Menor quantidade de retrabalho em máquina, retrabalho no ferramental.
- S15: No projeto como um todo são executadas mais de quarenta versões de simulação, desde o primeiro contato com o cliente até o projeto final e construção do ferramental e peça confirmada boa.

A afirmação de S1, de que em pouco tempo será impossível trabalhar sem a simulação, se aproxima do que é apontado por Marques

(2008), que indica a substituição do método de “tentativa e erro” pela simulação numérica com o auxílio do computador. Ravi (2008) também sinaliza para o aumento da confiança entre cliente-fornecedor.

A orientação da direção da empresa de S3 é no sentido de que 100% dos projetos sejam simulados, enquanto S9 orienta seu pessoal para o uso do maior tempo possível de simulação, com o objetivo de não “travar” a produção: ele prefere que as tentativas para o desenho de novos canais, massalotes, posição de peça na placa, uso ou não de resfriadores, entre outros elementos, sejam feitas virtualmente, sem interromper a produção para a realização de testes práticos.

Conforme Ravi (2008), os ensaios de chão de fábrica para o desenvolvimento de um novo produto não só elevam o seu custo, como também consomem os recursos de produção regular.

S13 observa que faz uso da tecnologia de SNPFM ao máximo, com o maior número de versões de simulação, com o objetivo de conseguir definir um bom projeto. Esse procedimento faz parte da metodologia de desenvolvimento de produtos da empresa.

S7 afirma que sua empresa não utiliza todos os recursos do *software*, pois são muitos, e também que a organização tem por objetivo o uso da simulação em toda a fabricação de aço, ao passo que a empresa emprega em 50% dos novos projetos de fabricação de ferro fundido. O tempo é um fator importante neste caso. A empresa deveria dispor de maior número de licenças de uso do *software*, e de um quadro maior de pessoal.

No relato de S10 é apontado o uso de 70% do tempo de simulação para atender à demanda por novos produtos, e dos 30% restantes para melhoria das peças correntes de produção, tendendo esse número, no futuro, a ser 50%-50%.

Na realidade da empresa de S5 não se consegue aplicar a simulação para todos os clientes, por falta de pessoal qualificado. Segundo Ravi (2008), muitos clientes preferem fornecedores equipados com simulação. Alves (2009) observa que a simulação é a alternativa para

melhoria da confiabilidade nos processos produtivos, que se tornam mais ágeis e com menores custos.

Em relação ao volume de utilização, S15 relata que são executadas mais de quarenta versões de simulação, desde o primeiro contato com o cliente até o projeto final (a construção do ferramental), para que sejam executados todos os ajustes necessários.

9. Vantagem competitiva

O uso da simulação numérica como fator de vantagem competitiva é o foco dos trechos das entrevistas reproduzidos a seguir.

- S1: Produzir de forma mais ágil, com menos percentual de defeito e peças com maior complexidade.
- S2: Pode ser definida como um diferencial quando se busca um novo cliente. Inicialmente no prazo de entrega e na qualidade do produto.
- S3: Melhora o relacionamento com o cliente.
- S5: A simulação tem dado bastante resultado; um trabalho interno em dois itens chegou a economizar um valor acima de R\$ 50 mil.
- S6: A melhoria na qualidade, entrega mais rápida, e diminui seu tempo de espera de faturamento.
- S7: Alguns clientes querem ver o resultado de simulação antes da peça pronta. Em muitos casos a simulação se torna uma exigência do cliente.
- S8: Ele passa a ver a nossa empresa com outros olhos. Dá maior credibilidade. É um diferencial perante a concorrência.
- S9: Nosso departamento comercial utiliza a simulação na prospecção de novos clientes. O caminho é esse, as fundições que não tiverem simulação vão perder mercado.

- S10: O cliente fica muito mais seguro em fechar negócio, pois, além dos profissionais qualificados, a empresa possui uma ferramenta de simulação.
- S11: Com a simulação nós conseguimos aumentar nossa capacidade de desenvolvimento e atender à demanda crescente por novos produtos.
- S12: À medida que uma modificação melhora a produtividade, reduz o refugo ou qualquer outro ganho, transmite maior confiança ao cliente.
- S13: O principal benefício é diminuir retrabalho nos ferramentais e consequentemente os custos. E, quando se tem produto confiável, isso gera uma imagem muito positiva, e isso não tem preço.
- S14: Um bloco de motor, sem o uso da simulação, levamos dois meses para colocá-lo em condições adequadas de produção, e com a simulação menos de uma semana. Quanto isso significa de economia?
- S15: A qualidade do produto: com simulação, conseguimos prever com muito mais precisão o resultado final. Em segundo lugar, o tempo de projeto reduz bastante. No processo de “fundição de alta pressão”, conseguimos definir velocidades críticas que ocasionem desgaste ou quebra do ferramental e com isso interferir na sua vida útil.
- S16: O grande benefício da simulação é de fato antecipar, produzir um lote de amostra não a custo zero, mas a um custo muito menor, em torno de 10% do custo de um processo convencional.

Igualar-se aos concorrentes é necessário, mas não transformará ninguém em líder. A empresa deverá tomar decisões para assumir a liderança de mercado (Prahalad; Hamel, 2005).

Para Porter (2009), a essência da estratégia está nas atividades, ou seja, na escolha entre executá-las de forma diferente ou concentrar-se

em atividades diferentes daquelas dos seus rivais. A empresa pode ser mais ágil na entrega. O exemplo do S14, que produz blocos de motor, é que sem o uso da simulação a empresa levaria dois meses para chegar a condições adequadas de produção, tempo que diminui para menos de uma semana quando a tecnologia de SNPFM é empregada.

O desenvolvimento de uma peça fundida passa por várias etapas, entre as quais está o teste prático, chamado de lote de amostra da coquilha ou ferramenta de fundição. À medida que a empresa investe tempo na etapa de projeto, com o uso da tecnologia de SNPFM, pode minimizar os custos com lotes de amostras, conforme relata S16, que afirma chegar a produzir um lote de amostra a um custo muito menor, em torno de 10% do custo de um processo convencional. Segundo Ravi (2008), o custo de um processo de chão de fábrica inclui a modificação de ferramentas, a fusão, o vazamento, a inspeção e alguma perda de materiais, que não podem ser recuperados.

S13 fala da diminuição do retrabalho com os ferramentais como o principal benefício do uso da tecnologia SNPFM. Ele reforça essa ideia quando diz que a empresa deixou de produzir protótipos iniciais defeituosos e reduziu o custo com a mão de obra e a matéria-prima na produção de peças defeituosas.

S8 comenta sobre a satisfação do cliente quando a empresa utiliza a tecnologia SNPFM em seus projetos, passando a ser vista como digna de maior credibilidade, o que se torna um diferencial perante a concorrência.

Experiência semelhante é apontada por S10, mencionando que o cliente se sente muito mais seguro ao fechar um negócio, sabendo que, além de profissionais qualificados, a empresa utiliza uma ferramenta de simulação. Da mesma forma, S7 relata que o uso de simulação de fundição tem sido importante, pois o cliente quer ter uma prévia do resultado antes da peça pronta e conhecer os recursos aplicados e as melhorias obtidas. Em alguns casos a simulação é uma exigência do cliente, fato também relatado nos estudos de Ravi (2008).

O custo de não qualidade, reparos, garantia e substituições vem se tornando cada vez mais importante, e pode ser reduzido consideravelmente pelo uso da simulação (Ravi, 2008). Uma modificação que permite melhorar a produtividade e reduzir o refugo transmite maior confiança ao cliente, que aprova a alteração, num jogo de “ganha-ganha”, como expresso por S12.

10. Barreiras enfrentadas no uso da simulação

Por fim, nas passagens transcritas a seguir, os entrevistados falam dos problemas enfrentados para a adoção da tecnologia de SNPFM em sua empresa.

- S1: Estão relacionadas a custos da implantação de sistemas e com a equipe.
- S3: O corpo técnico sabe do potencial da SNPFM, e, a partir do momento que os gestores passam a visualizar os ganhos, fecha o ciclo e não há mais barreira.
- S5: É necessário evidenciar os ganhos e os possíveis diferenciais da fábrica para o mercado
- S11: Temos nos deparado com alguns problemas no uso da simulação, no que se refere às diferenças técnicas entre o simulado e a prática. Avançamos muito nos acertos.
- S13: Para quem tem visão e um bom entendimento do negócio, investir em simulação é investir no futuro da empresa.
- S16: Há dez anos, havia uma clara falta de credibilidade na simulação, sobretudo baseado em três pontos principais: a não confiabilidade nos resultados da simulação, o tempo excessivo para se conseguir os resultados e a dificuldade no uso. Ao longo do tempo, os computadores evoluíram bastante. As simulações antes levavam quatro dias para rodar; hoje, em uma noite já te-

mos os resultados, muitas vezes de até duas versões, reduzindo drasticamente o tempo de simulação. Outro ponto é que a simulação tem que fazer parte do processo; tem que haver uma integração muito forte, para que todos falem a mesma língua.

Analisando as respostas, nota-se que as barreiras, quanto ao uso, estão associadas à falta de entendimento do real potencial da tecnologia de SNPFM. Isso pode ser minimizado quando o gestor percebe o benefício da simulação numérica, como descrito por S3.

Na descrição de S16, com destaque para a experiência de dez anos com a utilização da tecnologia de SNPFM, apontam-se os desafios de implantação, baseados na falta de credibilidade, gerada, por sua vez, por três fatores: a falta de confiança nos resultados da simulação, o tempo excessivo para se conseguir esses resultados e a dificuldade de uso.

A falta de correlação da simulação com a prática, em alguns casos, como no descrito por S11, pode ser um fator que limita seu emprego. No início do uso da simulação, a empresa deverá dedicar maior tempo para se aproximar dos resultados presentes na produção. Isso permitirá a ela aumentar seu conhecimento sobre os processos associados ao uso da simulação.

Mas nos comentários de S11 se nota também um avanço, o que se assemelha ao declarado por S16, quando afirma que a falta de informação é um desafio para o usuário e que os resultados melhoram gradativamente com o tempo de uso.

Segundo Kolososky (2001), a fundição desempenha um papel importante, uma vez que permite obter peças com formatos complexos. Para Bonollo e Odorizzi (2001), a indústria de fundição está constantemente confrontada com desafios: atender às demandas técnicas relacionadas com a qualidade do produto, com a documentação e com o tempo de entrega.

Um dos desafios para as empresas de fundição de metais é a gestão como um diferencial de sucesso (Moraes et al., 2007). Segundo S13, para quem tem visão e um bom entendimento do negócio, investir em simulação é investir no futuro da empresa.

* * *

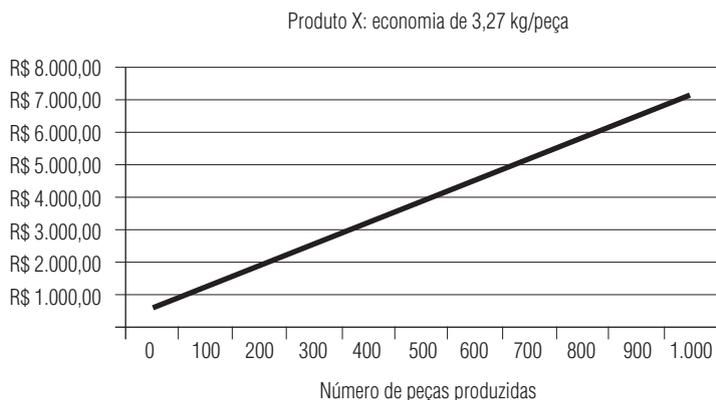
Após a realização de cada entrevista, solicitou-se aos participantes que selecionassem informações relevantes sobre o tema da pesquisa, a serem enviadas aos pesquisadores. Os entrevistados tiveram liberdade de enviar as informações que julgassem importantes, desde que fossem dados liberados pela empresa para publicação.

Os pesquisadores não tiveram influência ou participação na seleção dos dados, tabelas, gráfico e comentários enviados pelas empresas, e analisaram também os sites das empresas, com o objetivo de explorar novas informações.

A seguir as informações cedidas pelas empresas participantes do estudo são correlacionadas com as entrevistas e a literatura.

Gráfico 2 – Ganhos de escala com economia de metal em 2013.

Valor economizado



Fonte: Documentação fornecida pela Empresa C.

Nota-se por meio da análise do Gráfico 2 que a informação cedida pela Empresa C tem relação com a dada por S1, com relação aos mo-

tivos de se implantar a tecnologia de SNPFM, quando o entrevistado comenta que uma das vantagens do uso dessa tecnologia é reduzir custos de processo. O Gráfico 2, de fato, aponta uma redução de consumo de 3,27 kg de metal por lote de peça, o que permite à empresa uma economia em escala, e ressalta sua compatibilidade com a estratégia de baixo custo, presente no setor de fundição de metais.

A Empresa C utilizava a tecnologia de SNPFM havia dois anos, no momento da coleta dos dados da pesquisa. Por essa razão, pôde comparar os custos do desenvolvimento os dois sistemas. A empresa enviou, como material para a pesquisa, um comparativo entre o desenvolvimento de um projeto de fundição aplicando-se a tecnologia de SNPFM e o desenvolvimento na prática, o que se vê na Tabela 1.

Tabela 1 – Projeto de fundição: comparativo entre o uso da simulação e a prática.

Projeto de fundição	Com SNPFM	Na prática
Data inicial	21/11/2013	21/11/2013
Data final	10/1/2014	14/2/2014
Total de dias	50	85
Número de testes práticos	1	17
Rendimento metálico	78%	69%
Ferro utilizado	65 kg	1.130 kg
Horas de trabalho por operador	66 h	340 h
Custo total	R\$ 1.838,96	R\$ 15.840,00

Fonte: Documentação fornecida pela Empresa C.

Ravi (2008) afirma que o uso da tecnologia de SNPFM permite que a empresa obtenha como resultado final menores custos, mais rapidez, possibilidade de realizar mais ensaios virtuais, melhor qualidade e maior rendimento metálico. No final, um número menor de testes práticos é necessário.

Comparando o estudo realizado por Ravi (2008) nas fundições da Índia com os resultados apresentados pela Empresa C, nota-se uma grande semelhança. O uso da tecnologia de SNPFM permitiu à empresa obter ganhos em diversos produtos, quando comparado o desenvolvimento com e sem a simulação, com destaque para o custo final, que é quase nove vezes maior quando sem simulação. O custo total é menor com o uso da SNPFM, pois foi realizado um número menor de testes, consumiu-se menos material e o rendimento metálico foi maior. Esses três aspectos se relacionam com a literatura, tanto com Alves (2009), que se refere ao rendimento metálico, que deve ser sempre o maior possível, quanto com Martins' (2008), com destaque para o custo total.

A Empresa G, que fazia uso da tecnologia de SNPFM havia oito anos, no momento da pesquisa, apresentou os dados de refugo para produtos aqui identificados como X e Y, ambos fornecidos para o mercado automotivo.

A diminuição do índice de refugo para as peças X e Y entre os anos de 2011 e 2013, com o uso da tecnologia de SNPFM, é o destaque. Para a peça X, o percentual de refugo em 2011 era de 3,28%, passando a 1,23% em 2013. Já para Y foi de 3,39%, no ano de 2011, para 0,91%, em 2013.

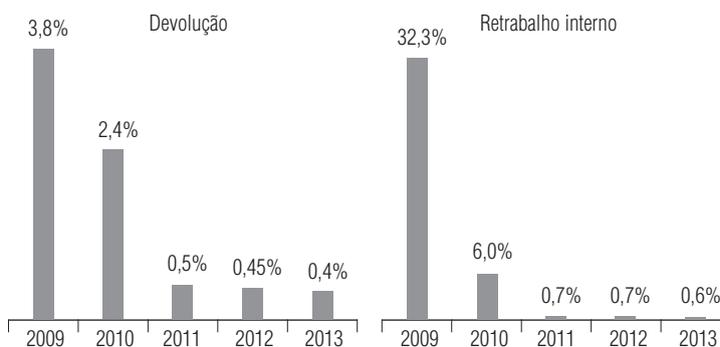
S8, entrevistado na empresa Sada, relatou que o uso da tecnologia de SNPFM foi fundamental para que se obtivessem esses ganhos de produtividade, com a redução do refugo, melhorando os custos finais de fabricação. O uso da tecnologia de SNPFM permitiu que fossem tomadas decisões no campo virtual, buscando-se propostas de melhoria, sem que a empresa utilizasse o processo de “tentativa e erro”, que ocasiona maiores custos de fabricação.

Os apontamentos de melhoria e ganhos com a aplicação da tecnologia de SNPFM na Empresa F são descritos no Gráfico 3. A informação do entrevistado S14 é que as reduções até o ano de 2011 se devem essencialmente às simulações, enquanto as que ocorreram nos anos posteriores são atribuídas ao processo produtivo. Os dados se referem a um produto específico, e não a todos os cabeçotes da fábrica.

Tabela 2 – Dados de refugo da Empresa G.

2011	Produto X	Número de peças usinadas	123.185	Produto Y	Número de peças usinadas	219.680
		Número de peças reprovadas	4.042		Número de peças reprovadas	7.452
		% de refugo	3,28%		% de refugo	3,39%
2012	Produto X	Número de peças usinadas	58.950	Produto Y	Número de peças usinadas	149.488
		Número de peças reprovadas	901		Número de peças reprovadas	1.204
		% de refugo	1,53%		% de refugo	0,81%
2013	Produto X	Número de peças usinadas	58.340	Produto Y	Número de peças usinadas	154.401
		Número de peças reprovadas	719		Número de peças reprovadas	1.399
		% de refugo	1,23%		% de refugo	0,91%

Fonte: Documentação fornecida pela Empresa G.

Gráfico 3 – Controle de refugo da Empresa F.

Fonte: Documentação fornecida pela Empresa F.

A informação do Gráfico 3 confirma o que foi relatado por S14 no tocante a como mensurar os resultados obtidos com a simulação. A melhoria no índice de refugo permite à empresa entregar um número maior

de peças boas, em menor tempo, o que também foi relatado por S15, da mesma empresa. Nesse caso específico, a vantagem do uso da simulação está associada ao aumento da produtividade da ordem de 30%. A empresa passou a produzir mais rápido um número maior de peças boas.

A redução do retrabalho interno, apontada por S13, é destaque também no Gráfico 3. Por seus números verifica-se que em 2009 o índice de retrabalho era de 32,3%, reduzindo-se para 0,7% em 2011 com o uso da tecnologia de SNPFM.

Um dos desafios relatados pelas empresas de fundição de metais é o desenvolvimento dos projetos dentro do prazo estabelecido pelos clientes. Muitas vezes esse prazo é curto, o que não permite que sejam cometidas falhas de produção dos lotes iniciais. Segundo relatado por S8, a Empresa B levava quase o dobro do tempo para desenvolver um projeto. Já com a simulação os tempos são menores, pois reduziu-se o número de tentativas para a obtenção das amostras em conformidade.

Tabela 3 – Percentual de projetos desenvolvidos dentro do prazo em 2012 e 2013.

Mês/ano	2012	2013
Janeiro	60%	56%
Fevereiro	33%	41%
Março	47%	50%
Abril	0%	56%
Maiο	25%	0%
Junho	32%	50%
Julho	33%	90%
Agosto	0%	63%
Setembro	24%	69%
Outubro	50%	89%
Novembro	40%	44%
Dezembro	32%	61%
Média sem simulação		34%
Média com simulação		67%
Número de projetos controlados		168

Fonte: Documentação fornecida pela Empresa B.

S9 e S10 relataram ganhos de mais de uma semana no tempo de desenvolvimento de um projeto. Segundo S11, antes que a tecnologia de SNPFM fosse implantada o tempo de desenvolvimento do projeto de uma peça era de 45 dias, e, no momento da pesquisa, o prazo para o desenvolvimento de projeto similar na empresa passou a ser de no máximo quinze dias, o que vai ao encontro da crescente exigência dos clientes por prazos menores.

A análise da Tabela 3 permite observar que os relatos dos entrevistados da Empresa B possuem relação com o indicador da empresa sobre os projetos desenvolvidos dentro do prazo. Esse controle teve início em janeiro de 2012, quando a empresa não utilizava a tecnologia de SNPFM, tendo sido controlados 168 projetos até dezembro de 2013.

Nota-se que o máximo que a empresa conseguiu de projetos aprovados, sem o uso da tecnologia de SNPFM, foi de 60% no mês de janeiro de 2012, ao mesmo tempo em que a média de projetos desenvolvidos dentro do prazo foi de 37%. Após a implantação da tecnologia de SNPFM, a empresa passou a desenvolver no prazo, em média, 67% dos projetos, sendo que no mês de julho de 2013, segundo de uso da simulação, a empresa obteve 90% de êxito, entregando quase que a totalidade dos projetos dentro do prazo.

Nota-se, pela análise da Tabela 4, que a média das peças aprovadas na primeira produção com o uso da simulação (88%) é maior do que a média das peças aprovadas na primeira produção sem o uso da simulação (64%). Após o início dos trabalhos com a simulação (junho de 2013), percebe-se uma maior estabilidade das amostras aprovadas na primeira produção, com percentual que varia entre 75% e 100%.

Antes desse período do uso da tecnologia de SNPFM, a empresa obteve aprovação de 100% das amostras na primeira produção em dois meses (fevereiro e março de 2013), mas notam-se períodos com percentuais bem abaixo desses, como nos casos dos meses de março e abril de 2012, com percentuais de 33% e 35%, respectivamente, o que demonstra uma variação superior a 40% quando a aprovação é feita pelo método prático.

Tabela 4 – Amostras aprovadas na primeira produção, nos anos de 2012 e 2013.

<i>Mês/ano</i>	2012	2013
Janeiro	50%	89%
Fevereiro	70%	100%
Março	33%	100%
Abril	35%	38%
Maiο	68%	93%
Junho	54%	91%
Julho	33%	86%
Agosto	78%	83%
Setembro	68%	100%
Outubro	55%	75%
Novembro	50%	96%
Dezembro	80%	85%
Média sem simulação		64%
Média com simulação		88%
Número de projetos controlados		108

Fonte: Documentação fornecida pela Empresa B.

Segundo o relato de S9, antes do uso da tecnologia de SNPFM na empresa uma ferramenta (modelo) de fundição chegou a ser modificada até vinte vezes e, com a simulação, não passa por mais de duas modificações, o que permitiu reduzir o tempo do projeto (Tabela 3) e da aprovação do primeiro lote de produção (Tabela 4). Para Ravi (2008), os ensaios de chão de fábrica, para desenvolvimento de um novo produto, não só elevam o custo como também desviam os recursos de produção.

S12, por sua vez, mencionou que a empresa tem conseguido aumentar o rendimento metálico em torno de 3%. Os dados fornecidos pela empresa indicam, para três produtos distintos, valores similares aos descritos na entrevista, para a melhoria no rendimento metálico. Seguem os dados:

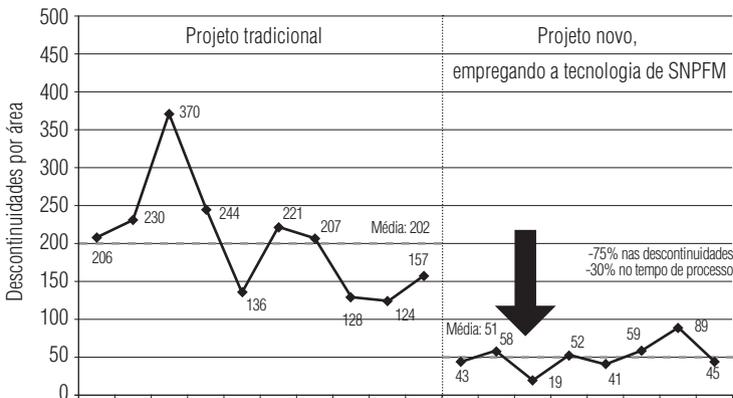
- a) para o produto CRC 023, o rendimento metálico era de 83,53% e aumentou para 86,12%;

- b) para o produto CRC 011, o rendimento metálico era de 85,61% e aumentou para 87,17%;
- c) para o produto CQ 48561, o rendimento metálico era de 76,89% e aumentou para 78,16%.

Segundo Alves (2009), uma das maneiras mais efetivas de diminuir o impacto do custo do metal na peça é por meio do aumento do rendimento metálico. Custo é o gasto utilizado na produção de bens ou serviços (Martins, 2008a); para um mesmo valor de venda do produto, quanto menor o custo, maior será a margem de lucro da empresa.

Na Empresa H, o destaque é com relação às características das peças, entre as quais se notam grandes dimensões, complexidade geométrica, rigor do controle de qualidade e forte competição com o mercado externo. Entre as informações cedidas pela empresa, as indicações de defeitos apontam para a diminuição de 75% nas discontinuidades encontradas nas peças e a redução de 30% no tempo de processamento. Consequentemente a empresa obteve menor tempo de ciclo, como ilustrado pelo Gráfico 4.

Gráfico 4 – Descontinuidades encontradas após a usinagem.



Fonte: Documentação fornecida pela Empresa H.

As melhorias aplicadas ao processo com a utilização da tecnologia de SNPFM em pás de turbina Francis refletiram-se de forma positiva nos ganhos observados pela empresa, com a diminuição dos defeitos após o processo de acabamento com usinagem, o que permitiu uma redução nos custos de fabricação. O tempo de processamento da peça em produção é menor, levando também à antecipação do faturamento.

Com a experiência no uso da tecnologia de SNPFM, a Empresa H passou a usar o *software* na fase de desenvolvimento do produto para orientar o projeto de um componente. Segundo os relatos de S6, o procedimento já está bem generalizado no grupo e apresenta resultados positivos na redução dos custos de fabricação dos componentes.

Os ganhos descritos na entrevista foram de 15%. As principais razões seriam a diminuição do peso das peças e vantagens na etapa de usinagem, em razão da retirada de menor quantidade de material (o sobremetal).



CONSIDERAÇÕES FINAIS

A pesquisa que deu origem ao presente volume explorou o uso da simulação numérica do processo de fundição de metais como um diferencial competitivo. Como descreve a literatura, é possível agregar valor sendo diferente, superando o desempenho dos concorrentes, sendo mais eficaz em custo, sendo mais competente na utilização dos insumos de fabricação e estabelecendo diferença preservável em relação aos concorrentes.

Para um sistema industrial de qualquer natureza, é fundamental diminuir os custos e agregar valor ao que é oferecido aos clientes. Segundo os estudos de Porter (1989), o que melhor se enquadra como estratégia competitiva para o setor de fundição é a competição com estratégia de baixo custo. Portanto, todo esforço que permita uma análise dos processos, com redução de perdas e desperdícios, resultando em uma manufatura enxuta, é considerado relevante perante a concorrência.

Os resultados observados na pesquisa mostram que a aplicação da tecnologia de simulação numérica permite que as empresas reduzam o refugo de produção e o tempo de desenvolvimento de projeto, aumentem o rendimento metálico, sejam mais produtivas e diminuam o número de lotes de amostra ou testes.

Perdas e desperdícios não agregam valor e resultam em maiores gastos de tempo, dinheiro e recursos. Atividades que não agregam valor podem ser eliminadas sem que haja perda de desempenho da empresa. A tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais é utilizada pelas empresas com o objetivo de compreender melhor as variáveis do processo e, por meio da análise dos resultados, propor soluções para os problemas observados no mundo virtual, antes de produzir a peça pelo método de tentativas e erros.

Quanto ao uso da tecnologia de simulação numérica, observou-se, pelos resultados, que na maioria das vezes são satisfatórios e atendem

às expectativas das diretorias. Uma vantagem observada com o uso da tecnologia de simulação é a melhoria da produtividade, graças ao aumento do rendimento metálico, à redução do refugo e à diminuição dos ciclos de produção. Outro aspecto observado é a redução do tempo de desenvolvimento de um novo projeto, em até 50%. Tudo isso permite à empresa agregar valor ao cliente, no sentido de oferecer peças com qualidade e baixo custo.

Como descrito por Porter (2009), não é suficiente à empresa dispor da tecnologia, se não somar outras iniciativas ao bom uso do *software* e não agregar valor ao cliente. É importante que os profissionais que utilizam a simulação tenham conhecimento técnico na área de atuação e saibam aplicar corretamente a ferramenta de simulação nos projetos e processos, no dia a dia da empresa. A vantagem competitiva de baixo custo, parte dela obtida pelo emprego correto da simulação numérica, pode ser momentânea e não sustentável, quando imitada pelos concorrentes. É importante explorar o conteúdo estratégico do uso da simulação numérica e as competências essenciais, a fim de tornar sustentável o baixo custo como vantagem competitiva.

As diferenças entre as empresas, em termos de custo ou preço, derivam de centenas de atividades necessárias para criar, produzir, vender e distribuir seus produtos ou serviços. A vantagem nos custos surge ao se executarem atividades específicas com maior eficiência do que os concorrentes. O diferencial competitivo, relatado pelas empresas pesquisadas, destaca que a partir da aplicação da simulação numérica em seus projetos e processos consegue-se operar com maior eficiência que os concorrentes que não tenham acesso a essa tecnologia de simulação ou não façam uso tão apurado dela. Quem consegue reduzir mais seus custos é competitivo.

Entre outros fatores pelos quais os clientes comparam as empresas fornecedoras de peças fundidas, estão a capacidade de fornecimento de produtos complexos, o tempo de entrega, o preço e a qualidade. O uso da simulação permite à empresa ser mais competitiva, e a tecnolo-

gia transmite maior confiabilidade ao cliente. No Brasil, porém, uma das preocupações é que a indústria, por motivos diversos, deixou de investir em novas tecnologias, perdendo competitividade no cenário global.

A busca da vantagem competitiva está na essência da formulação da estratégia. Na luta por participação de mercado, a competição não ocorre apenas em relação aos concorrentes, mas em toda a cadeia de relações da empresa. A vantagem competitiva pode ser maximizada na medida em que a empresa a emprega em condições estratégicas, a fim de explorar ao máximo os benefícios que ela propicia.

As pesquisas internacionais sobre as vantagens do uso da tecnologia de simulação reforçam a tese central deste livro. São semelhantes às observações e relatos das empresas de fundição de metais pesquisadas. O menor tempo de desenvolvimento, a redução dos custos de fabricação, a diminuição do refugo e o aumento do rendimento metálico são os principais pontos concordantes.

O uso da tecnologia de SNPFM pode contribuir para a competitividade de uma empresa como ferramenta para obtenção de vantagem competitiva baseada em baixo custo e agregação de valor.



REFERÊNCIAS

ABIFA, Associação Brasileira de Fundição. *Guia Abifa de fundição*. São Paulo: Abifa, 2014.

AKABANE, G. K. *Gestão estratégica da tecnologia da informação: conceitos, metodologias, planejamento e avaliações*. São Paulo: Atlas, 2012.

ALVES, L. H. D. *Utilização do método de Taguchi na modelagem e otimização de vazios relacionados à solidificação em processo de fundição de aço ABNT 1030*. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Unesp, Guaratinguetá, 2009.

ANFAVEA, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Produção, vendas, exportação: dados relativos a 2014. 2015. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas2014.html>>. Acesso em: 1 fev. 2015.

BABBIE, E. *Métodos de pesquisas de survey*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 1999.

BALLESTERO-ALVAREZ, M. E. *Gestão de qualidade, produção e operações*. 2. ed. São Paulo: Atlas, 2012.

BARDIN, L. *Análise de conteúdo*. Lisboa: Edições 70, 1977.

BETHELL, L. (org.). *História da América Latina*. Vol. V: de 1870 a 1930. Brasília, DF: Edusp; Imprensa Oficial, 2002.

BIOLO, S. M. *Reúso do resíduo de fundição areia verde na produção de blocos cerâmicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

BONOLLO, F.; ODORIZZI, S. *Numerical simulation of foundry processes*. Padova: Servizi Grafici Editoriali, 2001.

BRAGA, R. S. *Marketing de produtos industriais: um enfoque para o mercado de fundição*. São Paulo: Atlas, 1992.

BRANDENBURGER, A.; STUART, H. W. Value-based business strategy. *Journal of Economics & Management Strategy*, v. 5, n. 1, p. 5-24, Spring 1996.

BRITO, R. P.; BRITO, L. A. L. Vantagem competitiva e sua relação com o desempenho: uma abordagem baseada em valor. *Revista de Administração Contemporânea*, Curitiba, v. 16, n. 3, p. 360-380, jun. 2012.

CAMPBELL, J. *Castings*. Oxford: Butterworth Heinemann, 1991.

COFF, R. W. The coevolution of rent appropriation and capability development. *Strategic Management Journal*, v. 31, n. 7, p. 711-733, 2010.

COSTA, R. S.; JARDIM, E. G. M. *Os cinco passos do pensamento enxuto (lean thinking)*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://trilha-projetos.com.br/home/sites/default/files/plean.pdf>>. Acesso em: 12 set. 2016.

DENNIS, P. *Produção lean simplificada*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

DENZIN, N. K.; LINCOLN, Y. S. *The american tradition in qualitative research*. Thousand Oaks, California: Sage Publications, 2001. vol. 2.

DRNEVICH, P.; MADSEN, T.; NEWBERT, S. Competitive advantage: theoretical challenges & insights from value-price-cost approaches. *Proceedings of the Academy of Management*, Montreal, Sept. 2010.

FRANCO, H. *A contabilidade na era da globalização*. São Paulo: Atlas, 1999.

FREITAS, H.; OLIVEIRA, M.; SACCOL, A. Z.; MASCAROLA, J. O método de pesquisa survey. *Revista de Administração da USP*, v. 35, n. 3. jul./set. 2000.

GAMBLE, J. E.; THOMPSON JR., A. A. *Administração estratégica: a busca pela vantagem competitiva*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2012.

GONDKAR, V. S.; INAMDAR, K. H. Optimization of casting process parameters through simulation. *International Journal of Application or Innovation in Engineering & Management (IJAIEEM)*, v. 3, n. 6, June 2014.

HAGUENAUER, L; FERRAZ, J. C.; KUPFER, D. S. *Competição e internacionalização na indústria brasileira: o Brasil e a economia global*. Rio de Janeiro: Campus, 1996.

HARRISON, J. S; BOSSE, D. A; PHILLIPS, R. A. Managing for stakeholders, stakeholder utility functions, and competitive advantage. *Strategic Management Journal*, v. 31, n. 1, p. 58-74. 2010.

HEISSER, C.; FLENDER, E.; STURM, J. C. The history of casting process simulation. In: SHAPE CASTING: THE 4TH INTERNATIONAL SYMPOSIUM. *Proceedings...* Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2011.

HITT, M. A.; IRELAND, R. D.; HOSKISSON, R. E. *Administração estratégica: competitividade e globalização*. São Paulo: Pioneira Thomson Learnig, 2003.

JOÃO, B. N.; FISCHMANN, A. A. Estratégias baseadas no conhecimento na Embraer: um estudo de caso. Work paper n. 4/11, FEA-USP, p. 2-17, 2004.

KHADE, U.; SAWANT, S. Riser design optimization based on feeding rules using 3D CAD modeling and casting simulation. In: IRF INTERNATIONAL CONFERENCE. *Proceedings ...* Chennai. India, IRF, 2014.

KOLOSOSKY, J. *Estudo de sistema de canais para fundição de ligas de alumínio por gravidade*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

KONDIC, V. *Princípios metalúrgicos de fundição*. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1973.

LEONE, G. S. G.; LEONE, R. J. G. *Dicionário de custos*. São Paulo: Atlas, 2004.

LIMA, J. *A gestão em empresa familiar de fundição: obstáculos e estímulos à profissionalização*. Dissertação (Mestrado em Administração). Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Fundação Dom Cabral, Belo Horizonte, 2004.

LIMA, J.; PALMA, E. S.; SALES, W. F. Avaliação do uso de simulação computacional para produção sob encomenda de peça fundida em aço. *Revista Tecnologia*, Fortaleza, v. 32, n. 2, p. 209-220, 2011.

LINDGREEN, A.; WYNSTRA, F. Value in business markets: what do we know? Where are we going? *Industrial Marketing Management*, v. 34, n. 7, p. 732-748, 2005.

LOPER, J. R. Cast iron-essential alloys for the future. In: LXV WORLD FOUNDRY CONGRESS. *Proceedings...* Foundryman. V.96. Parte 11. Gyengju, Korea, 2002. p. 169-179.

MALAVAZI, J. *Área de fundição: processo de fundição sob pressão*. Osasco, SP: Senai, 2005.

MALINOWISKI, P.; SUCHY, J. S. Database for foundry engineers – simulationDB: a modern database storing simulation results. *AGH University of Science and Technology*. Kraków, Poland, n. 23, p. 30-59, 2010.

MARAMALDO, D. *Teoria da competitividade total: conceituação e prática*. Campinas, SP: Alínea, 2000.

MARQUES, A. I. G. C. *Diagnóstico de um defeito de fundição: aplicabilidade da simulação numérica em FLOWCast para previsão e resolução de defeitos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade do Porto, Porto, 2008.

MARTINS, E. *Contabilidade de custos*. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2008a.

MARTINS, G. A. Estudo de caso: uma reflexão sobre a aplicabilidade em pesquisas no Brasil. *Revista de Contabilidade e Organizações*, FE-ARP/USP, v. 2, n. 2, jan./abr. 2008b.

MASSUQUETO, K.; FREITAS, M. C. Conceitos convergentes para obtenção da vantagem competitiva: visão baseada em recurso, no conhecimento e engenharia da informação. *Administração de Empresas em Revista*, v. 13, n. 14, p. 93-101, 2014.

MENDES, J. A. C.; VISCONTI, C. E. C.; RONDET, L. M. Otimização do processo de fundição através de simulação matemática da solidificação. In: CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO. *Anais...* São Paulo, 1993.

MENEGHETTI, A. R. Marketing estratégico e vantagem competitiva. *Revista de Administração e Contabilidade, IESA*, v. 1, n. 1, 2002.

MENNE, R. J.; WEISS, U.; BROHMER, A.; EGNER-WALTER, A.; WEBER, M.; Implementation of casting simulation for increased engine performance and reduced development time and costs: selected examples from Ford R&D engine projects. In: INTERNATIONALS WIENER MOTORENSYMPIOSIUM. *Proceedings...* Viena, 2007.

MILES, M. B.; HUBERMAN, A. M. *Qualitative data analysis*. London: Sage Publications, 1994.

MODERN CASTING. 48th Census of World Casting Production: Steady Growth in global output. *Modern Casting*, Dec. 2014.

MONTICELLI, C. A. *A competitividade da indústria brasileira de fundição*. Dissertação (Mestrado em Economia). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 1994.

MORAES, C. A. M.; ELY, E. E.; ROCHA, L. K.; SIMON, J.; KESSLER, S.; SILVEIRA C.; GARCIA, A. C. A.; LORSCHHEITTER, G.; BERTI, M.; COPETTI, M. A. Avaliação da gestão empresarial, tecnológica e ambiental em empresas de fundição como ferramentas para aumento de competitividade no setor: o caso do projeto Fundi-RS. In: CONAF – CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO. *Anais...* São Paulo, 2007.

MOTTA. R. A busca da competitividade nas empresas. *Revista de Administração de Empresas*, São Paulo, v. 35, n. 1, p. 12-16, 1995.

MURLI, J. Trabalho padrão do líder: uma das chaves para sustentar os ganhos de desempenho. 27 fev. 2014. Disponível em: <http://www.lean.org.br/comunidade/artigos/pdf/artigo_253.pdf>. Acesso em: 2 mar. 2014.

NAKAGAWA, M. *ABC: custeio baseado em atividades*. São Paulo: Atlas, 1994.

OLAVE, M. E. L.; AMATO NETO, J. Redes de cooperação produtiva: uma estratégia de competitividade e sobrevivência para pequenas e médias empresas. *Gestão & Produção*, São Paulo, v. 8, n. 3, p. 289-303, dez. 2001.

OLIVEIRA, C. G.; GUESSER, W. L.; BAUMER, I. O uso da simulação do processo de fundição no desenvolvimento de peças em ferro fundido nodular. In: IV SEMINÁRIO DE FUNDIÇÃO. *Anais...* Volta Redonda, Rio de Janeiro, 2003.

OLIVEIRA, P. H.; GONÇALVES, C. A.; DE PAULA, E. A. M. A visão baseada em recursos da inteligência competitiva. *Revista de Ciências da Administração*, v. 15, n. 35, p. 141-151, 2013.

PORTER, M. *Vantagem competitiva: criando e sustentando um desempenho superior*. Rio de Janeiro: Campus, 1989.

_____. *Estratégia competitiva: técnicas para análise de indústrias e da concorrência*. Rio de Janeiro: Elsevier, 2004.

_____. *Competição*. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: Campus, 2009.

PRAHALAD, C. K.; HAMEL, G. The core competence of the corporation. *Harvard Business*, v. 3, P. 79-91, 1990.

_____. *Competindo pelo futuro: estratégias inovadoras para obter o controle do seu setor e criar os mercados de amanhã*. 12. reimpr. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

RAVI, B. Casting simulation and optimization: benefits, bottlenecks, and best practices. *Indian Foundry Journal*, special issue, Jan. 2008.

_____. Casting simulation: best practices. In: 58TH IFC. *Proceedings...* Mumbai, 2010.

_____. A holistic approach to zero defect castings. In: 59º INDIAN FOUNDRY CONGRESS. *Proceedings...* Mumbai, 2011.

RIBEIRO, R. A. C. *Desenvolvimento de novos materiais cerâmicos a partir de resíduos industriais metal-mecânicos*. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

RIOS, C. T. *Correlação entre parâmetros térmicos e microestrutura dendrítica e sua aplicação na simulação da fundição de ligas de alumínio*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

ROSSITTI, S. M. *Processos e variáveis de fundição*. São Paulo: Grupo Metal, 1993.

SANTOS NETTO, J. P.; SANTOS S. A.; KUNYOSHI, M. S. O processo de institucionalização da gestão do conhecimento nas empresas atuantes no Brasil: estudo de casos múltiplos. In: CONTECS. INTERNATIONAL CONFERENCE ON INFORMATION SYSTEMS AND TECHNOLOGY MANAGEMENT. *Anais ...*, 2012. vol. 9.

SÁ-SILVA, J. R.; ALMEIDA, C. D.; GUINDANI, J. F. Pesquisa documental: pistas teóricas e metodológicas. *Revista Brasileira de História & Ciências Sociais*, v. 1, n. 1, jul. 2009.

SCHMIDT, J.; STURM, J. C. Desenvolvimento de ferramentais dimensionalmente corretos sem try-out. In: 16° CONGRESSO DE FUNDIÇÃO – CONAF. *Anais...* São Paulo, 2013.

SHINGO, S. *O Sistema Toyota de Produção do ponto de vista da engenharia de produção*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 1996.

SOARES, G. A. *Fundição: mercado, processos e metalurgia*. Rio de Janeiro: Coppe, 2000.

SOUZA, T. N. F.; AGUILAR, M. T. P.; NOGUEIRA, R. A. Avaliação por simulação da microestrutura e propriedades mecânicas obtidas no ferro fundido nodular em função da adição de diferentes elementos de liga. In: 3º INTERNACIONAL CONFERENCE ON ENGINEERING OPTIMIZATION. *Anais...* Rio de Janeiro, 2012.

STUEWE, L.; UBEDA, V. Guia de defeitos de fundição de alumínio sob pressão: Parte I – Defeitos internos. In: CONGRESSO NACIONAL DE FUNDIÇÃO. *Anais...* São Paulo, 2013.

TEIXEIRA, R. M. M. *Estudo numérico do efeito dos principais parâmetros de fundição na formação de rechupes em peças fundidas*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Instituto Politécnico de Bragança, Portugal, 2013.

VERONESE, G. S. Métodos para captura de lições aprendidas: em direção à melhoria contínua na gestão de projetos. *Revista de Gestão e Projetos*, v. 5, 2014.

VERRAN, G. O.; REBELLO, M. A.; OLIVEIRA, C. G. Influência da velocidade de enchimento sobre a formação de defeito em peças de alumínio: simulação numérica vs. resultados experimentais. In: 14º CBECIMAT – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIA DOS MATERIAIS. *Anais...* 2000.

VIANNA, H. M. *Pesquisa em educação: a observação*. Brasília, DF: Plano Editora, 2003.

VIEIRA, G. E. Uma revisão sobre a aplicação de simulação computacional em processos industriais. In: XIII SIMPEP. *Anais...* Bauru, SP, 2006.

WOMACK, J.; JONES, D. *A mentalidade enxuta nas empresas*. Rio de Janeiro: Campus, 2004.

YIN, R. K. *Estudo de caso: planejamento e métodos*. 3. ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.





Simulação numérica
e a fundição de metais do Brasil

Reinaldo José de Oliveira
Antonio César Galhardi

