

## **SIMULAÇÃO NUMÉRICA PARA MINIMIZAR DEFEITOS NO PROCESSO DE FUNDIÇÃO DOS METAIS**

MENEZES, Valcir Marques de<sup>1\*</sup>, KACH, Sirnei Cesár<sup>2</sup>, SOUZA, Joici Cristiani de<sup>3</sup>,  
DALCIN, Rafael Luciano<sup>4</sup>

<sup>1</sup> FAHOR Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Horizontina, Campus Arnaldo Schneider, Avenida dos Ipês, 565, Horizontina, RS, Brasil.

<sup>2</sup> FAHOR Curso de Engenharia de Produção, Faculdade Horizontina, Campus Arnaldo Schneider, Avenida dos Ipês, 565, Horizontina, RS, Brasil.

<sup>3</sup> FAHOR Curso de Ciências Econômicas, Faculdade Horizontina, Campus Frederico Jorge Logemann, Rua Buricá, 725, Horizontina, RS, Brasil.

<sup>4</sup> UFRGS Curso de Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Campus do Vale, Avenida Bento Gonçalves, 9500, Porto Alegre, RS, Brasil.

\*Autor Correspondente: vm001875@fahor.com.br.

### **RESUMO**

Nos últimos anos, as indústrias de fundição têm sofrido grandes mudanças quanto ao aumento de produtividade, diminuição de índices de refugo e especificações das propriedades físicas e mecânicas das peças. Com a exceção dos produtos produzidos por técnicas de metalurgia do pó, todas as peças e componentes metálicos durante a sua manufatura passam pelo menos uma vez pelo processo de fundição. O processo de fundição de metais é de grande complexidade, onde muitas variáveis influenciam diretamente nas características finais do produto. Este artigo tem como objetivo solucionar a falha, denominada porosidade, ocorrida em peças fundidas, através da utilização de um software de simulação numérica voltado para o processo de fundição de metais. As simulações realizadas neste trabalho juntamente com as alterações feitas no ferramental de fundição possibilitaram a eliminação do problema de porosidade, garantindo a produção de novos lotes de peças sem o surgimento de novas falhas.

**Palavras chave:** Processo de fundição, Simulação numérica, Porosidade.

### **NUMERICAL SIMULATION TO MINIMIZE DEFECTS IN THE PROCESS OF METAL FOUNDRY**

## ABSTRACT

In recent years, foundry industry has undergone an increase on productivity, decrease in scrap rates and specifications of the physical and mechanical properties of the parts. All parts and metallic content go through a foundry process at least once during their manufacturing, with exception of the ones produced by powder metallurgy processes. The process of foundry metals is of great complexity, where many variables directly influence the final characteristics of the product. This paper aims to solve the failure called porosity that occur in foundry parts, through the use of a numerical simulation software of metal casting.

The simulations carried out in this research along with the changes made in casting tooling allowed to eliminate the porosity problem, ensuring the production of new part batches without the emergence of new failures.

**Key words:** Foundry process, Numerical simulation, Porosity.

## 1 INTRODUÇÃO

A manufatura de peças através do processo de fundição representa o menor caminho entre a matéria prima e o produto final, sua importância na economia da indústria nacional se confirma perante dados da ABIFA (2018) que informam que a indústria brasileira de fundição empregou cerca de 53.128 trabalhadores, sendo só na região sul 19.859 empregados, com uma produção de 160.746 toneladas de ferro fundido. Destas 36.644 toneladas foram destinadas à exportação no qual se obteve um faturamento de cerca de US\$ 83.555.400 no mês de março de 2018.

A engenharia assistida por computador abrange uma grande variedade de programas de computador que auxiliam na tomada de decisões desde as análises físicas mais básicas de um produto até a sua produção em larga escala. Dentre as principais aplicações destes softwares pode-se citar a redução do tempo de desenvolvimento de produtos e a melhora no desempenho de componentes ou de seu processo de fabricação, onde para se obter resultados satisfatórios se faz indispensável a capacidade de transformar componentes em um modelo computacional adequado (IDAGAWA, 2013).

No presente estudo, configura-se como objeto de estudo o problema em um item que possui alto índice de reprovação, devido ao surgimento de falhas no material fundido, classificadas como porosidade. Dentre os fatores que podem causar o seu surgimento chama-se atenção para o mau dimensionamento do sistema de alimentação. Desta forma, o objetivo

do trabalho é identificar o motivo do surgimento destas falhas e realizar as alterações necessárias para eliminar este defeito.

## **2 DESENVOLVIMENTO E DEMONSTRAÇÃO DOS RESULTADOS**

### **2.1 REFERENCIAL TEÓRICO**

#### **2.1.1 Fundição generalidades**

A fundição parte do aquecimento do material a fim de transformá-lo em estado líquido, após este é transferido para uma cavidade a qual permanecerá até a sua solidificação onde irá assumir a forma da mesma. Esta cavidade é denominada molde que pode ser expansível ou molde de areia, também o permanente ou molde metálico (BOLJANOVIC, 2009).

#### **2.1.2 Porosidade**

Porosidade são pequenas cavidades de aspecto rugoso que surgem durante a solidificação na forma de macroporosidades ou microporosidades, ambas ocorrem devido às contrações que o metal sofre no estado líquido e de solidificação. Normalmente estas falhas estão localizadas nas últimas regiões da peça a se solidificar (GARCIA, 2001).

A Figura 1 representa a característica de uma macroporosidade causada pelo mau dimensionamento do sistema de alimentação, onde ao final do processo de solidificação ocorre a formação de um poro devido a contração volumétrica do metal durante o processo.

Figura 1: Característica da falha (Porosidade).



Fonte: Os autores, 2018.

#### **2.1.3 Simulação numérica do processo de fundição de metais.**

A simulação é um processo com base computacional para definição de um modelo de resultado em um sistema real e conduzir experimentos com este modelo com o propósito de

entender seu comportamento e/ou avaliar estratégias para sua operação aplicada na resolução de alguma demanda (MENDEZ, 2009 *apud* PEGDEN, 1990).

A simulação permite a análise de diferentes cenários e configurações de um modelo. O suporte recebido pelos diferentes métodos de simulação, auxiliam com maior precisão na tomada de decisões em projetos. Com base nisso tem-se um aumento de maneira significativa a competitividade das empresas que fazem o uso desta tecnologia, pois a efetividade sobre os resultados é maior por consequência (VIEIRA, 2006).

O uso de simulação numérica no processo de fundição de acordo com Oliveira e Galhardi (2016) teve suas primeiras tentativas no ano de 1970, nesta época, o método não foi bem recebido pelos profissionais, que alegavam já estar produzindo seus produtos com a maior qualidade possível e não precisarem de computadores para identificar os maiores desafios de um projeto. Contudo, atualmente a simulação numérica passou a ser reconhecida como uma ferramenta de suma importância no processo de fundição, sendo utilizada no desenvolvimento de produtos e na otimização de processos.

Oliveira e Galhardi (2016) ainda destacam que as principais vantagens relacionadas com a utilização de simulações em processos de fundição são: melhoria da qualidade final dos produtos, redução do índice de refugo, aumento do rendimento metálico, redução do número de testes para a aprovação de um item fundido e o fornecimento de uma base científica e documentada para a garantia da qualidade e a certificação.

#### **2.1.4 MAGMA<sup>5</sup>**

O MAGMA<sup>5</sup> é uma ferramenta de simulação numérica desenvolvida pela empresa alemã MAGMA<sup>5</sup> *Gießereitechnologie<sup>1</sup>GmbH* que tem como objetivo melhorar a qualidade do processo de fundição, além de reduzir custos de produção. A integração do software em ambientes CAE (engenharia assistida por computador) proporciona o conhecimento sistemático de todas as variações e dependências do processo de fabricação, além de possibilitar a avaliação de riscos por meio da validação virtual de acordo com os requisitos do produto antes da aprovação do projeto (MAGMA, 2017).

Para a realização dos cálculos, o MAGMA<sup>5</sup> faz o uso do método de volumes finitos, as equações aproximadas são obtidas a partir da integração de equações diferenciais em um

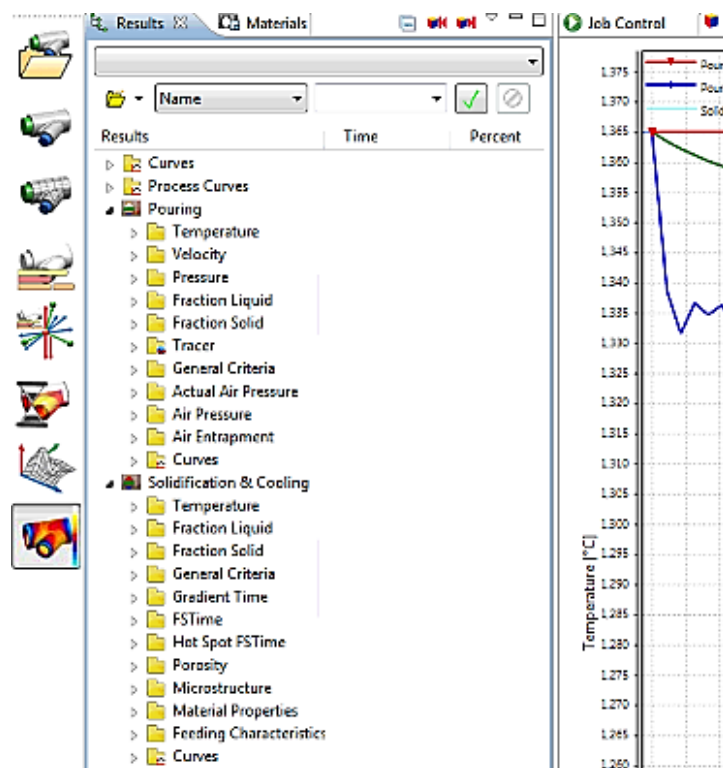
---

<sup>1</sup> *Gießereitechnologie*: Tecnologia de fundição

volume de controle de geometria conhecida, utilizando um conjunto de malhas estruturadas (VAZ, 2015).

O software pode realizar simulações de diferentes materiais, entre eles: Alumínio, cobalto, cobre, ferro, aço, magnésio, níquel, zinco entre outras ligas. Quanto aos processos, este atua nas áreas de fundição em areia, moldes permanentes e por injeção. O mesmo ainda possui um módulo exclusivo para simulações de confecção de machos. O MAGMA<sup>5</sup> ainda conta com um sistema de simulação baseado em DoE (*Design of Experiments*) que seria a realização de simulações de maneira automática a partir de restrições e objetivos designados pelo usuário, estes podem ser referentes ao processo, como por exemplo: variações na composição química, temperatura, tempo de desmoldagem, entre outros; ou geométricos como a área destinada ao fluxo do metal dentro da cavidade do molde. Os resultados gerados podem ser analisados de forma sistêmica com o auxílio de diversas ferramentas de avaliação, nos quais incluem tabelas, gráficos e diagramas. A interface do software em seu ambiente de resultados pode ser visualizada na Figura 2.

Figura 2: Interface do Software MAGMA<sup>5</sup> – Ambiente de resultados.



Fonte: Os autores, 2018.

## 2.1.5 Malha computacional

A malha computacional é uma representação do plano físico utilizado na simulação numérica. Ela é composta por linhas e pontos, estes pontos, onde as linhas se interceptam servem como orientação para os cálculos de propriedades físicas baseados em modelos matemáticos (MALISKA, 1995).

Conforme Amaral (2016) para gerar uma malha computacional de boa qualidade deve-se inicialmente importar a geometria CAD, examiná-la, e se necessário repará-la. Gerar uma malha preliminar para inspecionar a discretização. Realizar os ajustes necessários para melhorar a malha ou gerar refinamentos localizados no domínio e por fim, gerar a malha final.

## 2.2 MATERIAL E MÉTODOS

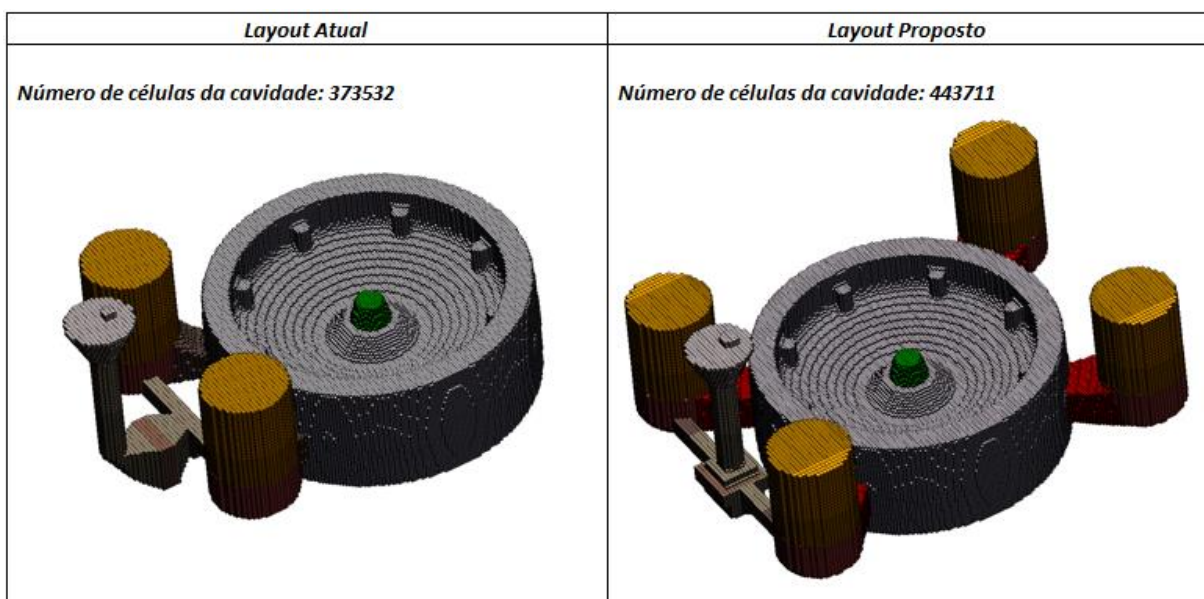
### 2.2.1 Hardware utilizado

O hardware utilizado para a realização das simulações possui processador: Intel ® Xeon ® CPU E5-1620 0 @ 3.60GHz 3.60 GHz; memória RAM: 32GB; e placa de vídeo: NVIDIA® Quadro® M2000 – 4GB GDDR5.

### 2.2.2 Geometria e malha computacional

No presente estudo as geometrias foram modeladas no software Solidworks e importadas para o MAGMA<sup>5</sup>. Uma vez representada a geometria do sistema realiza-se a identificação de cada componente do mesmo. Durante a geração da malha buscou-se descrever a geometria do item, componentes do sistema, para adquirir resultados mais precisos com as simulações, conforme identificação na Figura 3.

Figura 3: Malhas geradas para a realização das simulações.



Fonte: Os autores, 2018.

Com uma boa representação dos sistemas, os resultados obtidos com as simulações se tornam mais assertivos quanto ao que acontece na prática. Os números de elementos por cavidade estão diretamente ligados com o tempo de cálculo durante as simulações.

### 2.2.3 Definições

Após a conclusão da malha são inseridas informações sobre os materiais, coeficientes de transferência de calor entre componentes, tempos de cada etapa do ciclo, dentre outras condições de contorno. O item em análise é manufaturado em ferro fundido GJS-400, este material possui uma matriz predominante ferrítica e grafita nodular. Com o objetivo de manter uma boa correlação entre a simulação e a prática, foi utilizado a composição da Tabela 1, esta composição foi definida através de um ensaio de espectrometria. A temperatura inicial de vazamento foi 1380°C.

Tabela 1: Composição química utilizada para o processo de simulação numérica.

Composição química (%)						
C (Carbono)	Ce (Cério)	Cr (Cromo)	Cu (Cobre)	Mg (Magnésio)	Mn (Manganês)	Mo (Molibdênio)
3,42	0,0087	0,029	0,025	0,031	0,338	0,0009
N (Nitrogênio)	Ni (Níquel)	P (Fósforo)	S (Enxofre)	Sb (Antimônio)	Si (Silício)	Sn (Estanho)
0	0,01	0,02	0,0043	0	2,17	0,0045

Fonte: Os autores, 2018.

Todas as versões simuladas do item fazem uso de massalotes com luvas exotérmicas, estas possuem a função de manter os massalotes quentes por um maior intervalo de tempo durante a solidificação, suas propriedades podem ser visualizadas na Tabela 2.

Tabela 2: Propriedades das luvas exotérmicas utilizadas no processo de simulação.

Propriedades das luvas exotérmicas		
Temperatura de ignição	600	°C
Tempo de queima	1000	s
Calor gerado	1000000	J/kg
Permeabilidade	50	Cm <sup>3</sup> /min

Fonte: Os autores, 2018.



Referente ao molde de areia verde utilizado, suas propriedades são definidas da seguinte maneira: temperatura inicial de 32°C, permeabilidade do molde de 120 cm<sup>3</sup>/min e uma umidade percentual de 4%.

### 3.2.4 Perspectiva de simulação e resultados

A perspectiva de simulação consiste na simulação numérica propriamente dita, que é a parte onde o processador do programa irá realizar os cálculos com base nos dados informados anteriormente. A última fase de uma simulação consiste em avaliar os dados calculados na área de perspectiva de resultados. A interface do software mostra os resultados via imagens do sistema simulado e a sua avaliação pode ser realizada com a assistência de gráficos, tabelas e escalas. O software é capaz de exibir mais de trinta resultados diferentes, onde é possível prever potenciais defeitos, bem como identificar sua origem, os mesmos também podem ser utilizados para realizar comparativos entre diferentes versões, evidenciando suas diferenças. No entanto, para a avaliação da tendência de porosidade não é necessário a utilização de todos os resultados gerados.

Os seguintes resultados das simulações foram utilizados nas análises:

- Fração de líquido (*fraction Liquid*): Permite a visualização de metal líquido no intervalo de solidificação assim como o seu comportamento e os caminhos de alimentação;
- Porosidade (*Porosity*): Demonstra as porosidades geradas pela contração do metal durante a solidificação, assim como o seu tamanho e intensidade, permitindo identificá-las como primárias ou secundárias.

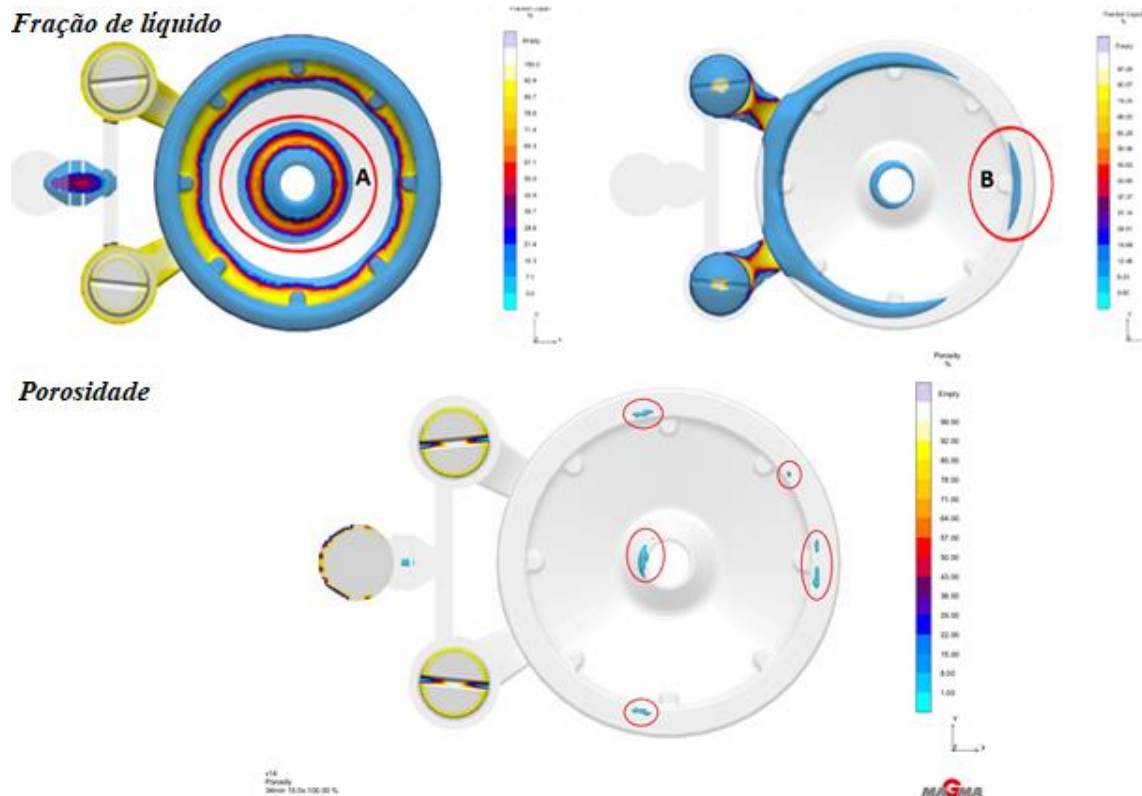
## 2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira simulação realizada foi referente ao sistema de alimentação utilizado atualmente, com o intuito de analisar o comportamento do sistema durante o processo de solidificação e identificar a causa da ocorrência do defeito porosidade. Através da análise do resultado fração de líquido pode-se evidenciar o isolamento de massa líquida nas regiões “A” e “B” da peça durante a solidificação. No resultado de porosidade pode-se identificar que os isolamentos de massa líquida durante a solidificação estão diretamente relacionados com a tendência de formação de falhas no item, conforme indicado na Figura 4. O resultado de porosidade condiz com o que ocorre no item, sendo as falhas na área externa da peça as que se manifestam durante o processo de usinagem.



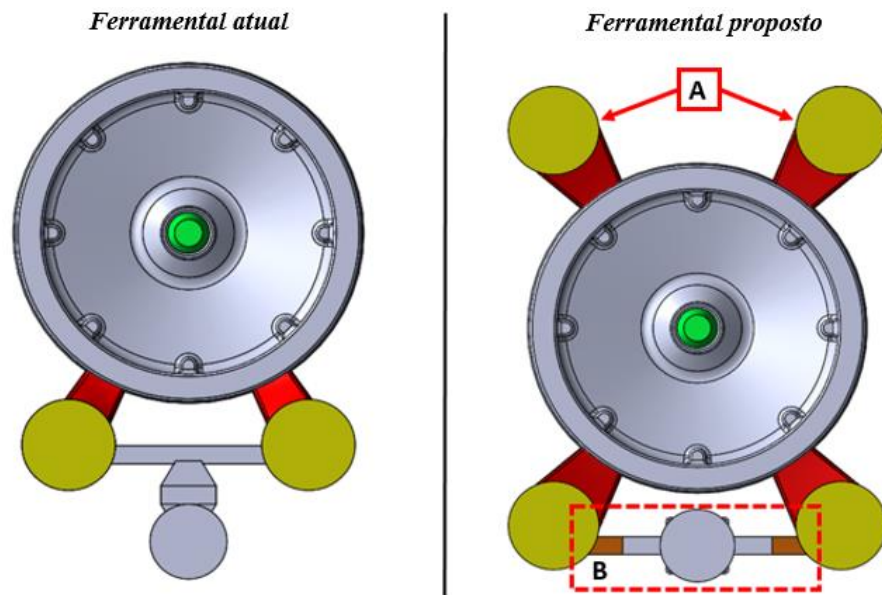
Através dos resultados da simulação realizada com base no ferramental de fundição atual, foi modelado um novo sistema. Pelo fato de ocorrer isolamentos de massa líquida durante a solidificação, adicionou-se dois massalotes com luvas exotérmicas ao sistema, a fim de suprir a necessidade de material da peça e evitar a formação de defeitos. Com a inclusão dos massalotes (A) ao sistema houve a necessidade de alteração no sistema de alimentação (B) devido a fatores geométricos do ferramental. O sistema atual e o proposto podem ser visualizados na Figura 5. Por vezes a inclusão de massalotes gera uma diminuição no rendimento metalúrgico da árvore, mas torna-se necessário para garantir a qualidade do produto fundido.

Figura 4: Resultados de solidificação do ferramental atual.



Fonte: Os autores, 2018.

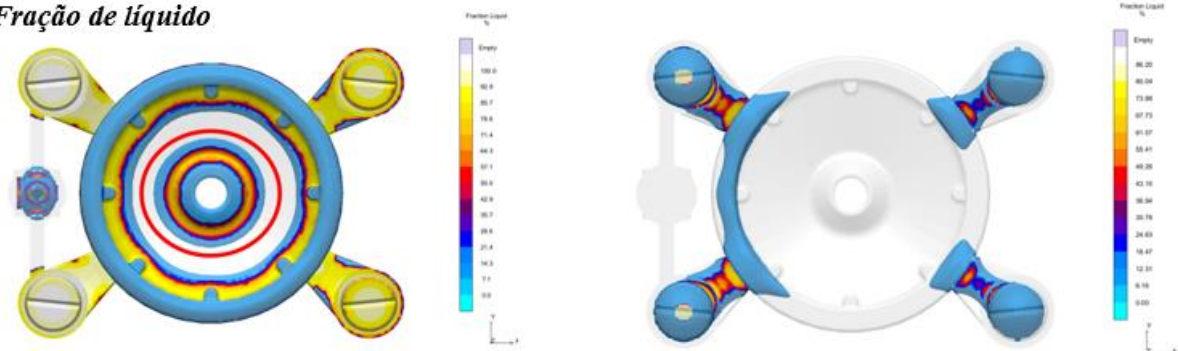
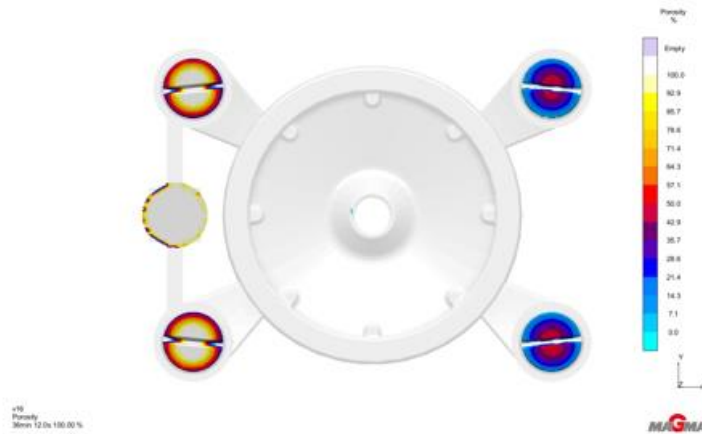
Figura 5: Ferramental de fundição atual e proposto.



Fonte: Os autores, 2018.

Com as alterações realizadas executou-se uma segunda simulação referente ao ferramental de fundição proposto. Na Figura 6, ainda pode ser visualizado um isolamento de massa líquida na região central do item, que ocorre devido a geometria da peça. Porém, a solidificação da região externa do item se demonstrou direcionada para os massalotes, o que impediu a ocorrência de isolamentos de massa líquida na região. No caso de ocorrer isolamento de fração líquida, a possibilidade de falha aumenta pois em função da contração natural do metal, este ponto ao não ter suporte de um massalote, pode vir a formar uma porosidade.

Figura 6: Resultado de solidificação do ferramental proposto.

**Fração de líquido****Porosidade**

Fonte: Os autores, 2018.

O resultado de porosidade da simulação realizada com o ferramental proposto, Figura 6, demonstram a região externa da peça isenta de falhas e uma pequena tendência a defeito na região central do item. Muitas vezes esta tendência ocorre em função da distância entre os canais de ataque dos massalotes. A fluidez do metal por vezes é comprometida pela distância, temperatura e a própria composição química que depende do percentual de silício, onde quanto mais elevado for, menos denso fica o metal. Após as simulações concluídas, realizou-se as alterações necessárias no ferramental e foi manufacturado um lote teste do item onde nenhuma peça apresentou o defeito porosidade, o qual vinha ocorrendo com a utilização do antigo ferramental.

### CONCLUSÃO

Por meio dos resultados das simulações numéricas apresentados neste trabalho conclui-se que o processo de fundição de metais é de grande complexidade, onde muitas variáveis influenciam diretamente nas características finais do produto. Estas variáveis podem ser de diferentes fontes, pois sofrem interferências desde o cálculo de canais, temperatura e composição. Além disso a própria umidade da areia, compactação e tempo de vazamento

geram fatores prejudiciais. A aplicação de simulações numéricas na melhoria do desempenho de um processo de fabricação, possibilitou a eliminação do defeito decorrente do produto. Um lote piloto foi manufaturado e não se constatou o defeito de porosidade em nenhum item do mesmo.

Com a aplicação da tecnologia de simulações numéricas em sistemas industriais, as empresas podem reduzir seu índice de não conformidade, otimizar seu processo de fabricação e reduzir o tempo aplicado no desenvolvimento de projetos. A utilização adequada de softwares de simulação proporciona significativa vantagem estratégica e abre novas possibilidades para fundições com potencial sucesso econômico.

Na simulação é de extrema importância a fidelidade de informações relacionadas ao projeto do ferramental, escolha da malha e identificação correta da aplicação dos canais de ataque. Entende-se desta forma que a precisão e o detalhe na definição de todos os requisitos de preparação para simulação são o diferencial para um ótimo resultado. Planejar e organizar de forma efetiva e mais precisa possível é relevante a se obter um excelente resultado na simulação numérica do processo de fundição.

## REFERÊNCIAS

ABIFA, Índices setoriais: **Desempenho do setor de fundição março/2018**. São Paulo, 2018.

Disponível em: <[www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2018/04/03-MARCO2018.pdf](http://www.abifa.org.br/wp-content/uploads/2018/04/03-MARCO2018.pdf)>. Acesso em 01 maio. 2018.

AMARAL, L. **Preparação de modelos para geração de malhas**. Disponível em:

<<http://www.esss.com.br/blog/2016/05/preparacao-de-modelos-para-geracao-de-malhas/>>. Acesso em: 16 ago 2017.

BOLJANOVIC, V. **Metal shaping processes: Casting and molding; Particulate processing; Deformation processes; and metal removal**. New York: Industrial Press, 2009.

GARCIA, A. **Solidificação: Fundamentos e aplicações**. São Paulo: UNICAMP, 2001.

IDAGAWA, H. S. **A importância do engenheiro no desenvolvimento de simulações computacionais**. Publicado em 01/2013. Disponível em:

<<http://www.revistaintellectus.com.br/DownloadArtigo.ashx?codigo=269>>. Acesso em 13 ago. 2017.

MAGMA. **Reliable Castings and Robust Quality for Designers and Supply Chain Experts**.

Disponível em: <<https://www.magmaflow.com/en/engineering/castingbuyer/>>. Acesso em 17 ago 2017.

MALISKA, C. R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional: Fundamentos e coordenadas generalizadas**. Rio de Janeiro: LTC, 1995.

MENDEZ, T. **Simulação numérica: O que é e para que serve**. Disponível em:

<[http://www.ifsc.usp.br/~lattice/oldlattice/minicurso\\_fiscomp.pdf](http://www.ifsc.usp.br/~lattice/oldlattice/minicurso_fiscomp.pdf)>. Acesso em 05 ago. 2017.



De 04/06/2018 a 06/06/2018



OLIVEIRA, R. J.; GALHARDI, A. C. **Simulação numérica e a fundição de metais do Brasil**. São Paulo: Centro Paula Souza, 2016.

VAZ JÚNIOR, M. **Introdução ao método de volumes finitos**. 5. ed. Joinville: LAMEC, 2015.

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