

Análise de reoxidação por simulação numérica do processo de fundição em projetos de sistemas de enchimento fundidos por gravidade

Reoxidation analysis by number simulation of the foundry process in gravity fused filling systems projects

DOI:10.34117/bjdv7n3-834

Recebimento dos originais: 08/02/2021

Aceitação para publicação: 31/03/2021

Nilo Fuchter Junior

Eng. Nilo Fuchter Junior – UniSATC, Criciúma, SC, Brasil

E-mail: n.fuchter@gmail.com

Daniel Fritzen

Prof. Dr. Daniel Fritzen – UniSATC, Criciúma, SC, Brasil

E-mail: daniel.fritzen@satc.edu.br

Anderson Daleffe

Prof. Dr. Anderson Daleffe – UniSATC, Criciúma, SC, Brasil

E-mail: anderson.daleffe@satc.edu.br

Gilson de March

Prof. Gilson de March – UniSATC, Criciúma, SC, Brasil

E-mail: gilson.march@satc.edu.br

Marcio Afonso de Souza

Aluno de Eng. Mecânica Marcio Afonso de Souza – UniSATC, Criciúma, SC, Brasil

E-mail: marcio.afonso@satc.edu.br

RESUMO

Inclusões geradas por reoxidação são oriundas da exposição do metal líquido ao oxigênio durante o processo de enchimento em fundição por gravidade, e podem levar a indicações superficiais, contaminação da matriz metálica, e conseqüentemente fragilização mecânica do componente final. Este estudo visa validar a análise de reoxidação por meio da simulação numérica utilizando a tecnologia de simulação numérica do processo de fundição de metais (SNPFM), adaptando um estudo proposto por Majidi [1] com a implantação da avaliação de superfície de metal exposta ao ar (Max Free Surface) entre sistemas de enchimento e peça em software dedicado (MAGMASOFT®). Posteriormente um corpo de prova foi projetado a fim de permitir a comparação entre diferentes conceitos de sistemas de enchimento realizados através de geometrias disponíveis em manilhas refratárias. Foram realizadas SNPFM de 7 (sete) diferentes modelos de sistema de enchimento, onde o valor adimensional da superfície de metal exposta ao ar foi analisado, indicando uma diferença de grandeza de 62% entre resultados extremos.

Palavras-chave: Tecnologia SNPFM, fundição por gravidade, inclusões de reoxidação, sistemas de enchimento.

ABSTRACT

Inclusions generated by reoxidation come from the exposure of liquid metal to oxygen during the gravity casting process, and can lead to surface indications, contamination of the metal matrix, and consequently mechanical weakening of the final component. This study aims to validate the analysis of reoxidation through numerical simulation using the metal casting process numerical simulation technology (MCPNS), adapting a study Majidi [1] with the implementation of the metal surface exposed to air (Max Free Surface) between filling systems and part in dedicated software (MAGMASOFT®). Subsequently a specimen is designed in order to allow the comparison between different concepts of filling systems realized through geometries available in refractory shackles. MCPNS of 7 (seven) different models of filling system were carried out, where the dimensionless value of the metal surface exposed to the air was analyzed, indicating a difference of 62% in magnitude between extreme results.

Keywords: Technology MCPNS, gravity casting, reoxidation inclusions, filling systems.

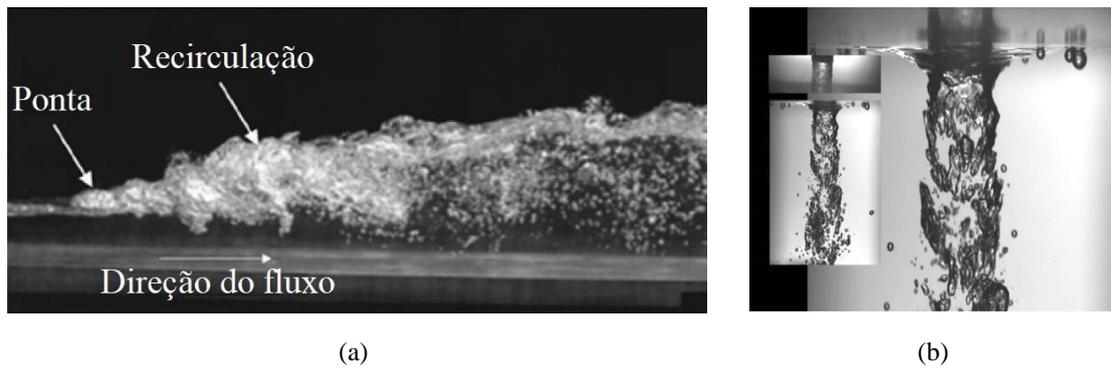
1 INTRODUÇÃO

A indústria de fundição de metal suporta cerca de 90% do total de produtos manufaturados e espera-se que atinja um mercado de 40 bilhões de dólares até 2025. A fundição em areia é o processo de fundição com maior disseminação, com limitações no controle do processo em sistemas de alimentação, como também altas taxas de refugo [2]. Estudos da *Steel Founder's Society of America* (SFSA) em 1987 cuja análise foi realizada em 350 amostras e validadas por Marquardt [3] em 2018, sobre a origem de macroinclusões em peças fundidas de aço, demonstraram que 83% dos defeitos de fundição eram originados pela reoxidação, 14% material do molde, 2% escória e 1% de desoxidação.

Inclusões de reoxidação ocorrem quando o aço desoxidado entra em contato com o oxigênio durante o preenchimento do molde na etapa de vazamento. Portanto, para minimizar as inclusões de reoxidação se faz necessário limitar a exposição do aço ao oxigênio [4].

O arraste de ar é a principal fonte de formação de inclusão de reoxidação durante o vazamento do metal líquido. Nos fluxos de superfície livre, o ar é arrastado quando o líquido sofre turbulência. Tais descontinuidades superficiais são criadas, por exemplo, por um salto hidráulico (Figura 1a) ou em mergulho de um jato líquido (Figura 1b) [4].

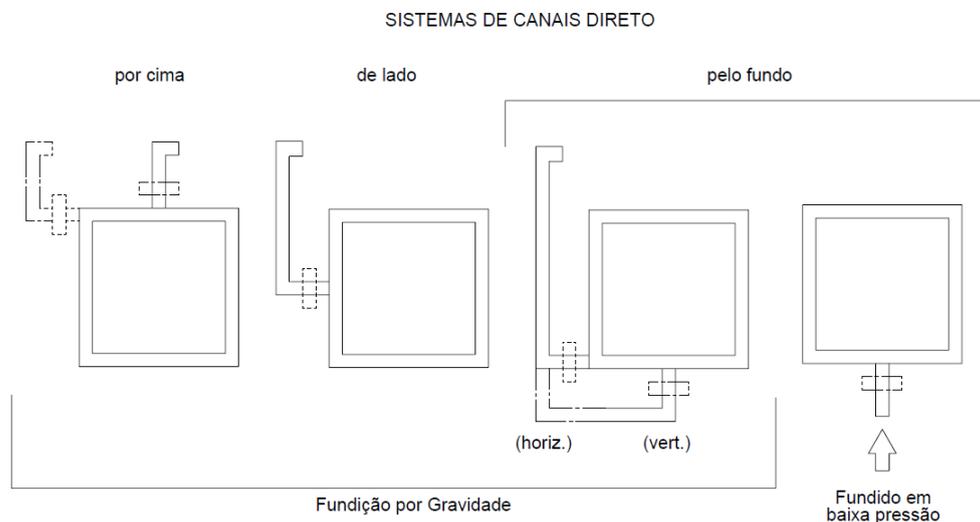
Figura 1 – Fluxo turbulento (a) estimativa de escala de comprimento de superfície livre em salto, adaptado de [5] e (b) bolhas de ar perto de um mergulho de um jato de água líquido, adaptado de [6]



Os sistemas de enchimento são projetados para reduzir a turbulência, visando reduzir a formação de filmes de óxidos, retenção de ar e de bolhas [2].

Estudos de Campbell [7] demonstraram diferentes sistemas de enchimento por gravidade, em que a base do canal se conecta com o canal de ataque (as posições de filtros são indicadas pelas linhas tracejadas). É observado também que uma solução para o enchimento turbulento é a fundição contra gravidade, também conhecido como fundição por baixa pressão. As possibilidades são demonstradas na Figura 2.

Figura 2 – Esquema de sistemas de canais por gravidade [7]



O projeto do sistema de canais afeta a entrada de ar durante o preenchimento do molde. O oxigênio arrastado reage imediatamente com o aço desoxidado para formar inclusões de reoxidação. Essas inclusões são arrastadas pelo metal líquido, o que resulta na presença de inclusões não metálicas no produto final [8].

A indústria de fundição de metais tem procurado balancear as necessidades técnicas e comerciais. Os requisitos técnicos e a amplitude de responsabilidades impostas as fundições de metais têm-se tornado cada vez mais exigentes. Para diversas fundições, a tecnologia SNPFM tornou-se uma ferramenta de avaliação do projeto e processo, aplicada a melhoria da qualidade. As ferramentas de fundição consideram o comportamento do material, a composição química, a prática de fundição, a metalurgia, entre outros fatores [9].

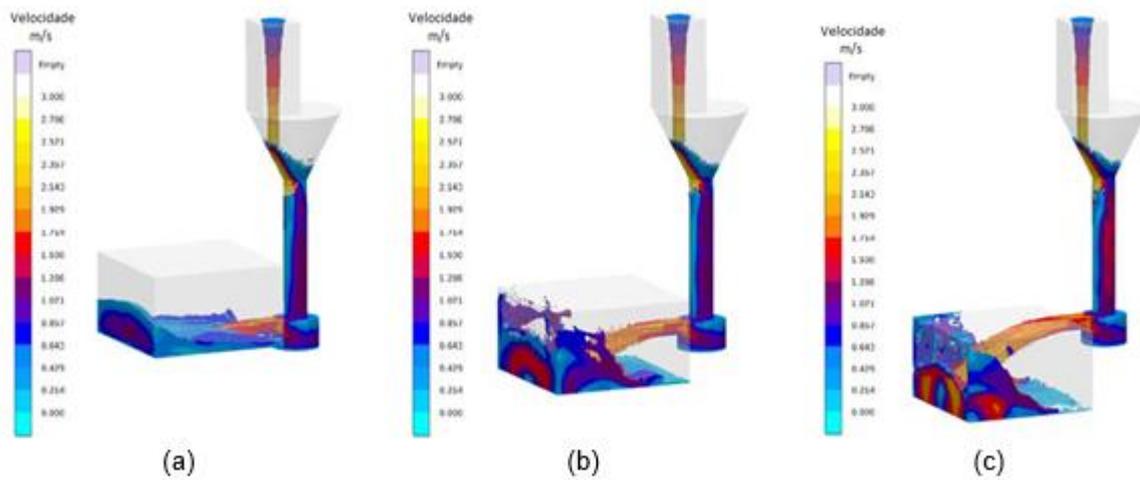
Segundo Schmidt e Sturm [10], produzir peças de forma assertiva é essencial no segmento de fundição, sobretudo no mercado de peças personalizadas, com a baixa repetibilidade de produção, o uso da tecnologia SNPFM proporciona minimizar desperdícios de tempo e dinheiro com alterações e reparos, tornando-se fundamental num cenário econômico cada vez mais competitivo.

As ferramentas de simulação são utilizadas para analisar um conjunto de parâmetros de processo selecionados e avaliar um determinado *layout* de fundição. Desta forma, são realizadas alterações destes parâmetros de processo e projeto, como sistemas de canais e geometria dos ferramentais, para se aproximar ao máximo dos objetivos pré-estabelecidos [11].

O comparativo para validação da metodologia aplicada/desenvolvida neste estudo visa a implantação do objetivo *Max Free Surface* (Máximo de Superfície Livre) diretamente dentro da plataforma de simulação do MAGMASOFT®. A validação foi realizada reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [1] demonstrada na Figura 3, onde o mesmo avalia a influência dos diferentes pontos do canal de ataque na admissão de ar do componente fundido.

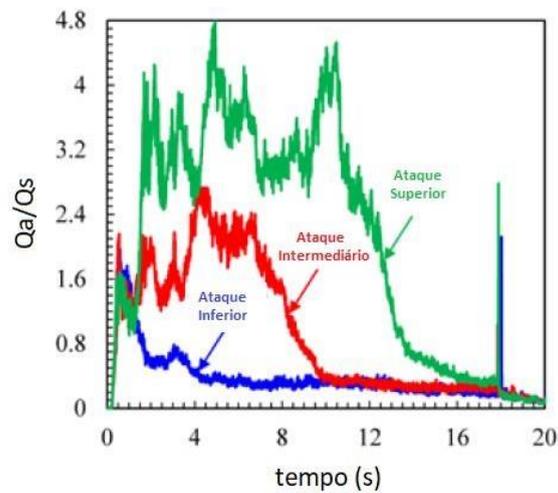
A Figura 3a demonstra o ataque lateral inferior na cavidade do molde, na Figura 3b com ataque lateral intermediário e na Figura 3c com ataque lateral superior. Os principais parâmetros para reprodução do estudo foram a geometria do corpo de prova e a altura de queda do metal líquido. O material utilizado para a reprodução do estudo foi o aço DIN G40NiCrMo4 com alta aplicabilidade em escala industrial e suscetível a reoxidação no processo de fundição.

Figura 3 – Resultado de velocidade (a) ataque lateral inferior (b) ataque lateral intermediário e (c) ataque lateral superior [1]



Após a simulação realizada em estudos de Majidi [1], demonstrada a relação entre o volume de ar incorporado (Q_a) e o volume de metal líquido vazado (Q_s), para os diferentes sistemas de enchimento em função do tempo (s) de vazamento (Figura 4).

Figura 4 – Taxa de admissão de ar por metal líquido (Q_a/Q_s) dependente do tempo de enchimento [1]



Para o intervalo de tempo de 1,5 a 2,0 segundos a taxa de admissão (Qa/Qs) demonstrou comportamento similar e esperado, já que os canais possuem o mesmo dimensionamento e a alteração é dada pelo deslocamento da peça em função do canal. Após o tempo que o metal percorre o sistema de canais é observado que a admissão de ar é acentuadamente crescente para a posição do canal de ataque lateral inferior, passando pelo ataque intermediário até o superior, causando dentro do processo de fundição, o conhecido “efeito cachoeira”.

A análise aplicada neste estudo demonstrado é visual, porém, não mensurável para correlação em prática de fundição. Portanto uma abordagem “absoluta e correlata” se mostra necessária, visando uma possível posterior correlação matemática. Desta forma este estudo abordou uma metodologia com análise de números absolutos objetivados por simulação numérica dentro do software dedicado ao processo de fundição, visando assim disponibilizar uma metodologia a ser reproduzida em escala industrial para análise e desenvolvimento de produtos.

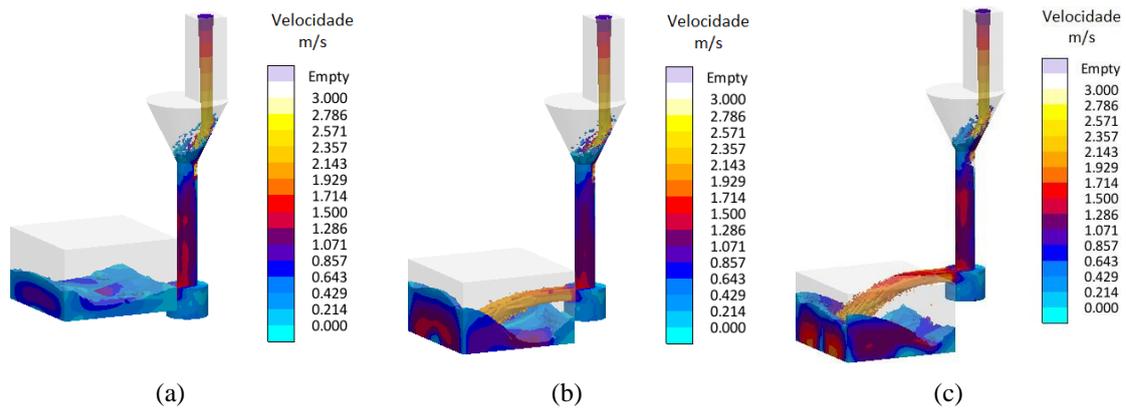
2 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

Os estudos realizados por Majidi [1] são balizadores para este trabalho, desta forma a primeira etapa constituiu-se em validar os resultados obtidos pela implantação do objetivo *Max Free Surface – Volume of Fluid* (Máximo de Superfície Livre – Volume por Fluido), abreviado para MFS – VOF, portanto, o dimensional do corpo de prova do estudo citado foi reproduzido, assim como suas variáveis implantadas, visando validar, caracterizar e possibilitar a comparação entre diferentes projetos pela metodologia desenvolvida neste estudo.

Com o objetivo de se definir os melhores sistemas de enchimento dependentes do projeto de canais, os resultados são demonstrados em caráter visual do resultado de velocidade do MAGMASOFT[®], conforme demonstrado na Figura 5, e em número adimensional da superfície de metal exposta ao ar (MFS – VOF).

O corpo de prova 01 (Figura 5a) com ataque lateral inferior, o corpo de prova 02 (Figura 5b) com ataque lateral intermediário e o corpo de prova 03 (Figura 5c) com ataque lateral superior reproduzem o estudo citado e demonstrado na Figura 3.

Figura 5 - Resultado de velocidade (a) corpo de prova 01 – CP01 ataque lateral inferior, (b) corpo de prova 02 – CP02 ataque lateral intermediário e (c) corpo de prova 03 – CP03 ataque lateral superior

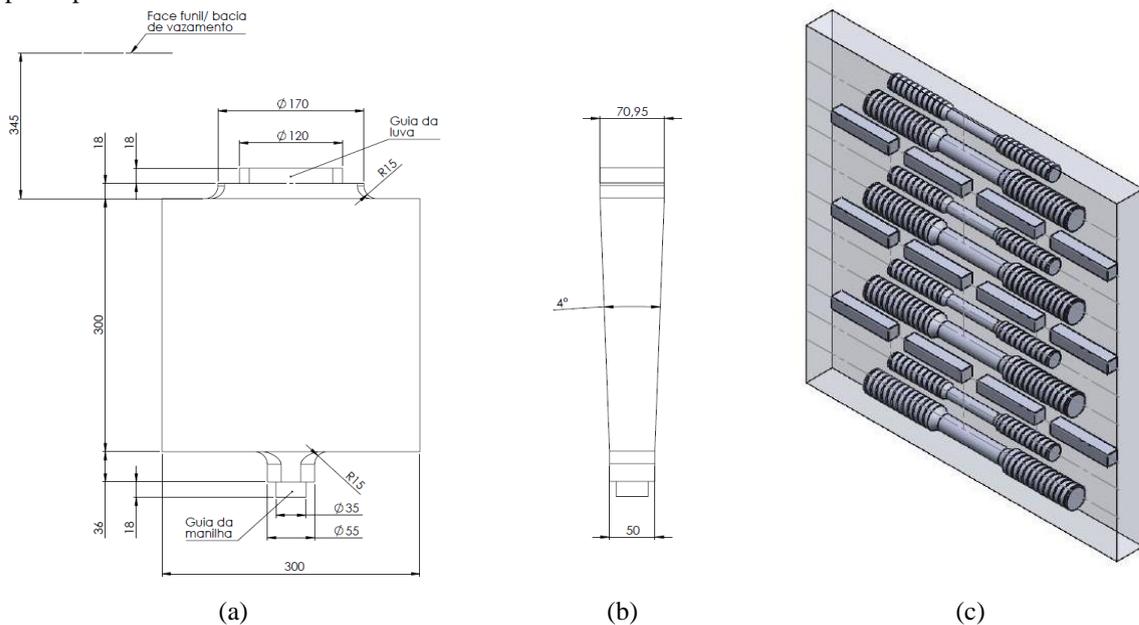


Para projeção dos gráficos dois objetivos foram delimitados no MAGMASOFT®. O primeiro é minimizar o MFS – VOF para o sistema de canais (bacia de vazamento, canal de descida e canais de ataque) denominado aqui VOF – Canais. O segundo é minimizar o MFS – VOF para a peça, denominado aqui VOF – Peça, gerando assim valores absolutos após a realização do processo de simulação.

O MFS – VOF é uma relação adimensional que caracteriza a relação entre o total da superfície de metal exposta ao ar dependente do volume de fluido durante o processo de enchimento, onde, quanto maior o valor resultante, maior será a turbulência no sistema. Por conseguinte, quanto menor o valor obtido, menor será a reoxidação do metal no processo de preenchimento da cavidade do molde, demonstrando a eficiência do sistema de enchimento empregado.

Com a validação da metodologia de análise um corpo de prova foi projetado (Figura 6a e Figura 6b), a fim de possibilitar a comparação entre diferentes conceitos de sistemas de enchimento realizados por manilhas refratárias, que possuem alta aplicação em escala industrial e viabilizando a posterior retirada dos corpos de provas para ensaios mecânicos (tração e impacto), conforme demonstrado na Figura 6c.

Figura 6 - Dimensionamento do corpo de prova (a) vista frontal, (b) vista lateral e (c) disposição dos corpos de prova para ensaios mecânicos

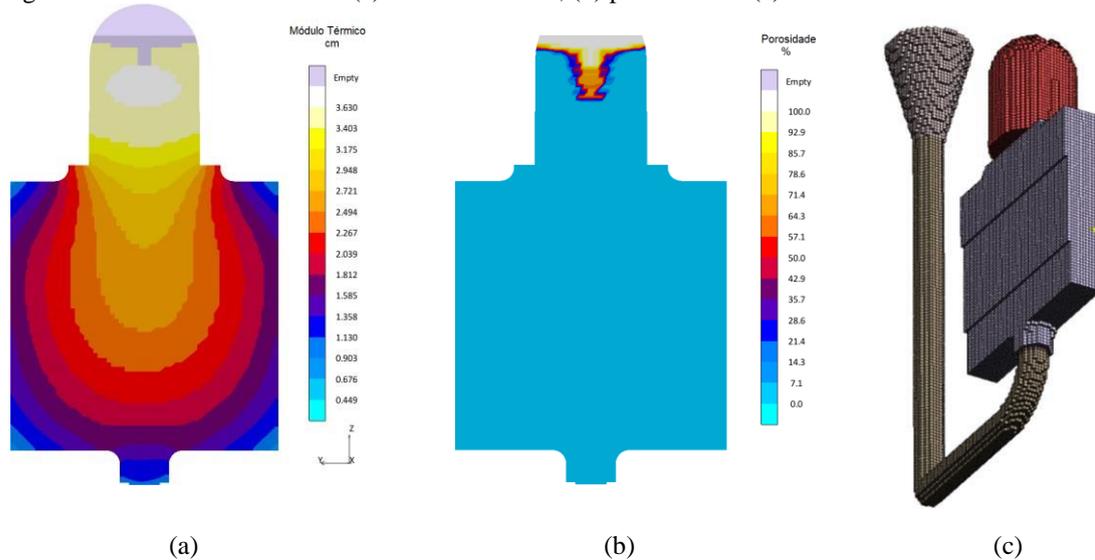


Conforme Hartmann [12] o corpo de prova deve atender alguns requisitos a serem considerados no seu dimensionamento:

- A. A geometria do corpo de prova não deve influenciar os resultados;
- B. O sistema de alimentação (massalote) deve ser corretamente dimensionado e posicionado, para não ocorrer defeitos de fundição como rechupes e microrechupes na peça.
- C. O posicionamento do sistema de alimentação não deve influenciar o sistema de enchimento;
- D. O projeto do corpo de prova deve viabilizar os ensaios sem utilização excessiva de material ou requerer processamento posterior complexo;

Além destes requisitos, uma malha computacional foi realizada a fim de não influenciar os resultados obtidos na utilização da tecnologia SNPFM. O resultado de módulo térmico é demonstrado na Figura 7a, o resultado de porosidade na Figura 7b e a Figura 7c a malha computacional realizada pelo Método de Volumes Finitos (MVF), com arestas de cubo de 4,0 (quatro) milímetros de comprimento.

Figura 7 – Análise de resultados (a) módulo térmico, (b) porosidade e (c) dimensionamento de malha



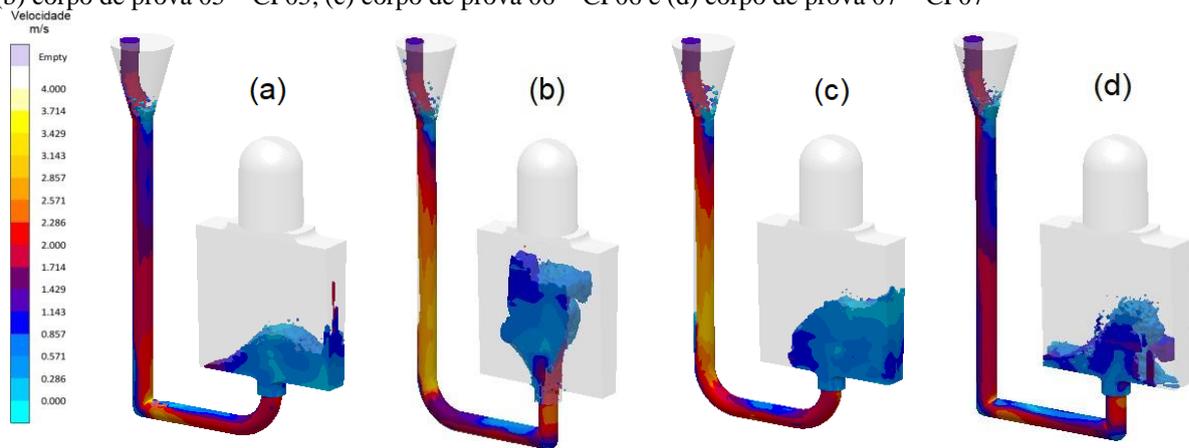
A fim de desenvolver conceitos avançados e determinar o sistema de enchimento, possível de ser realizado na prática com a utilização de manilhas refratárias, foi estabelecido o projeto base do sistema de canais de descida (com ataque por baixo). Esse é constituído por um funil de vazamento cônico e manilhas retas com Ø40 milímetros (na queda vertical), até as possíveis configurações de utilização de manilhas refratárias tipo curva longa 90° e tipo cotovelo (na mudança do fluxo vertical para horizontal), comumente utilizadas em fundição por gravidade.

Dessa forma, se tem 04 (quatro) configurações para a fundição por gravidade com ataque pelo fundo, conhecido também como sistema de enchimento tipo “cachimbo”. São elas: cotovelo e curva, curva e cotovelo, curva e curva, cotovelo e cotovelo.

A Figura 8 demonstra os resultados de velocidade obtidos pelo MAGMASOFT® com 25% do enchimento realizado, neste percentual é possível observar uma fase crítica de enchimento (entrada inicial metal líquido na cavidade do molde) em que podem ocorrer picos de superfície de metal exposta ao ar.

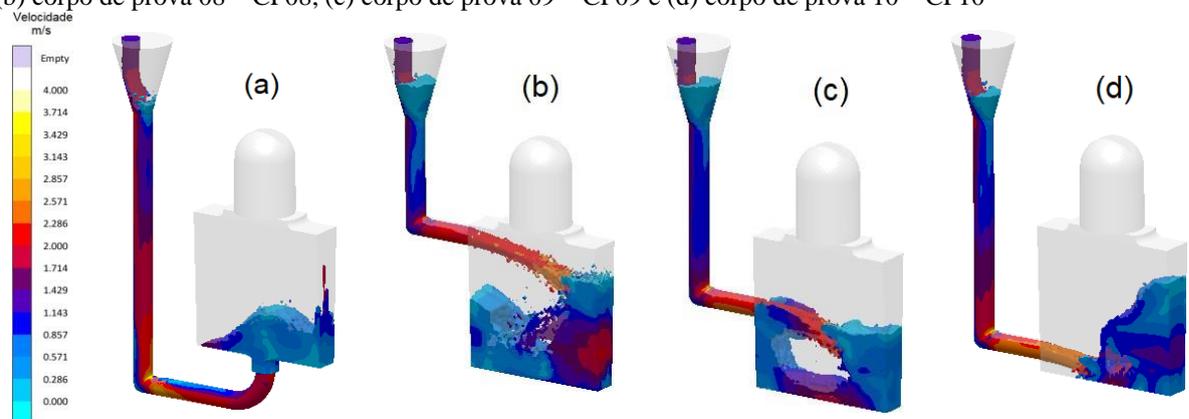
A Figura 8a demonstra uma configuração de projeto com funil de vazamento tipo cônico, sistema de canais retos com Ø40 milímetros e utilização de cotovelo e curva longa respectivamente (Corpo de Prova 04 – CP04), a Figura 8b demonstra a mesma configuração invertendo o posicionamento entre curva e cotovelo (Corpo de Prova 05 – CP05), a Figura 8c demonstra a utilização de curva e curva (Corpo de Prova 06 – CP06), a simulação da Figura 8d demonstra a utilização de cotovelo e cotovelo (Corpo de Prova 07 – CP07).

Figura 8 - Resultado de velocidade MAGMASOFT® em 25% de enchimento (a) corpo de prova 04 – CP04, (b) corpo de prova 05 – CP05, (c) corpo de prova 06 – CP06 e (d) corpo de prova 07 – CP07



O melhor resultado obtido na comparação entre curvas e cotovelos (Figura 8a – Corpo de prova – CP04) é novamente demonstrado na Figura 9a, a fim de ser comparado com o conceito de Campbell [7], demonstrado na Figura 2 e similar a estudos de Majidi e Beckerman [13], evidenciadas na Figura 3, ambas adaptadas para o corpo de prova projetado deste estudo. A Figura 9b indica a configuração de enchimento com ataque lateral superior, a Figura 9c com ataque lateral intermediária e a Figura 9d com ataque lateral inferior.

Figura 9 - Resultado de velocidade MAGMASOFT® em 25% de enchimento (a) corpo de prova 04 – CP04, (b) corpo de prova 08 – CP08, (c) corpo de prova 09 – CP09 e (d) corpo de prova 10 – CP10

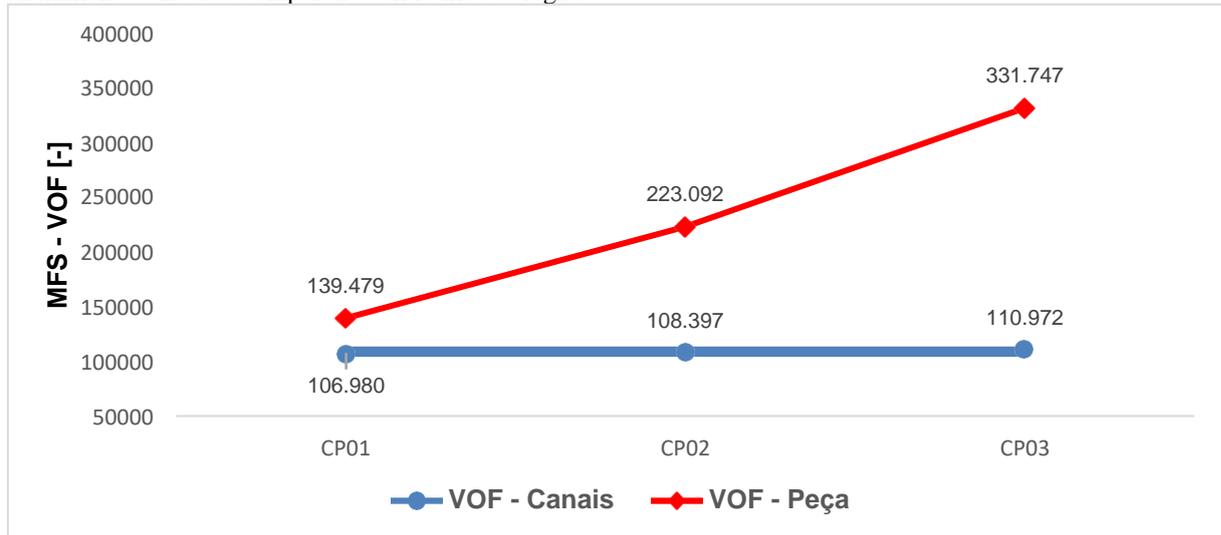


Com a validação metodológica da SNPFM realizada nos 10 corpos de provas analisados, torna-se possível definir o melhor sistema de enchimento em prática de fundição por gravidade. Os resultados obtidos nos experimentos são apresentados e discutidos a seguir.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para a validação da metodologia, utilizando os valores absolutos obtidos pelo objetivos implantados de *Max Free Surface – Volume of Fluid* (MFS – VOF), reproduzindo o estudo de Majidi [1], demonstrado na Figura 5, os resultados são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Análise gráfica dos resultados de superfície livre do metal exposta ao ar depende do projeto de enchimento – Estudo comparativo entre metodologias



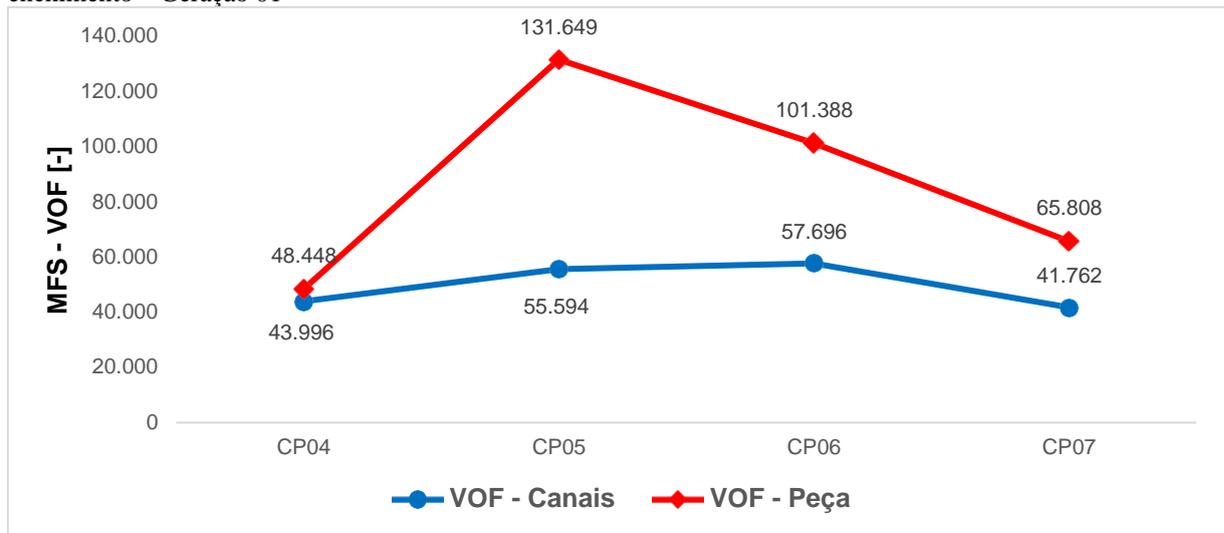
Numa análise comparativa entre metodologias aplicadas entre o estudo de Majidi [1], demonstrada na Figura 4 e a abordagem desenvolvida, demonstrada na Tabela 1, referentes as simulações da Figura 3 e Figura 5 respectivamente foi possível observar comportamentos similares, tanto para o sistema de canais, como para a peça.

Analisando a Tabela 1 foi observado que o sistema de enchimento demonstrou resultados com baixa variação percentual para VOF – Canais, mesmo comportamento observado no gráfico da Figura 4, que no intervalo de tempo de 1,5 a 2,0 segundos (tempo estimado de enchimento dos canais) observou-se alta similaridade do perfil gráfico para Q_a/Q_s .

Após enchimento do sistema de canais é possível observar nos dois gráficos o resultado crescente para exposição de metal líquido ao ar, dependente do ponto de ataque, fazendo com que quanto maior a elevação do mesmo, maior a exposição do metal líquido ao ar.

Resultados de MFS – VOF, para os diferentes projetos de sistema de enchimento demonstrado na Figura 8 são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Análise gráfica dos resultados de superfície livre do metal exposta ao ar depende do projeto de enchimento – Geração 01



A análise da Tabela 2 revelou que apesar de todos os sistemas estarem na configuração de fundição por gravidade com ataque por baixo, existe uma discrepância considerável entre os resultados obtidos (dado a diferença encontrada ser superior a 100% entre resultados extremos).

O melhor resultado para a primeira geração (CP04, CP05, CP06 e CP07), foi obtido para o corpo de prova 04 (CP04) pois, a quebra de fluxo brusca, ocasionada pela geometria do cotovelo na queda vertical do metal líquido, faz com que o sistema de canais seja rapidamente preenchido, evitando a exposição de superfícies de metal exposta ao ar, pela pressurização do sistema. O formato subsequente (curva longa 90°), faz com que o metal entre com maior suavidade na cavidade do molde.

O corpo de prova 05 (CP05), com o formato de curva longa e cotovelo, promoveu um fluxo de metal líquido acelerado na queda inicial (vertical) como também uma mudança brusca no sentido do fluxo ocasionada pelo cotovelo, mudança essa que leva a um jato de metal líquido no sentido vertical (de baixo para cima) na entrada do metal líquido na cavidade do molde, elevando a turbulência no processo de preenchimento da cavidade do molde

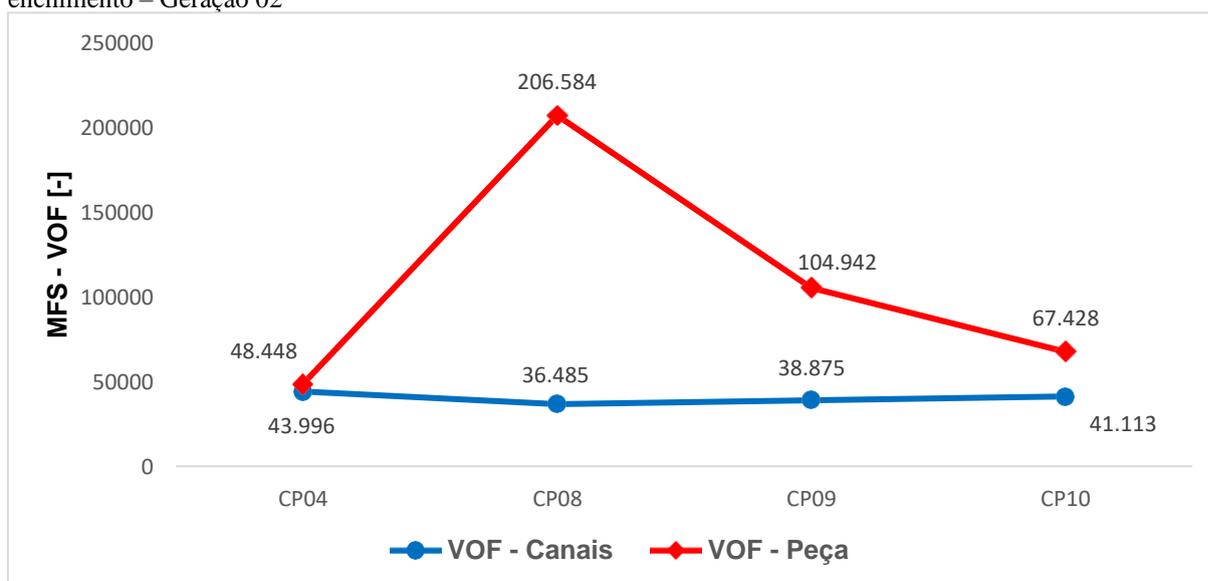
Para o corpo de prova 06 (CP06), composto por duas curvas longas, não ocorreu nenhum tipo de restrição de fluxo, resultando na pressurização do canal, obtendo assim um maior valor para VOF – Canais comparados com sua geração, mas não proporcionando tamanha turbulência se comparada ao CP05 para VOF - Peça.

Analisando o corpo de prova 07 (CP07), foi observado um melhor resultado de VOF – Canais, já que o formato de cotovelo nas duas geometrias faz com que o sistema de

canais se preencha mais rapidamente se comparado ao CP04, mesmo que com significância relativamente pequena para os canais, a alteração dessa segunda geometria eleva consideravelmente o resultado de superfície de metal exposta para a peça (VOF – Peça), devido a mudança brusca logo abaixo da cavidade da peça.

Os resultados para os diferentes projetos de sistema de enchimento demonstrados na Figura 9 são avaliados na Tabela 3.

Tabela 3 - Análise gráfica dos resultados de superfície livre do metal exposta ao ar depende do projeto de enchimento – Geração 02



A análise da Tabela 3, para os corpos de prova CP08, CP09 e CP10 foi observada a turbulência do metal líquido dependente do ponto de ataque, a altura de queda influência na elevação da turbulência na entrada do metal líquido na cavidade do molde. Essa turbulência pode ser observada no resultado VOF – Peça, para o resultado de VOF – Canais é observado que como o metal líquido percorre um menor comprimento a superfície de metal exposta ao ar também é menor (mesmo que com baixa discrepância).

4 CONCLUSÕES

O comparativo para validação, considerando o resultado apresentado pelo *Max Free Surface – Volume of Fluid* do MAGMASOFT®, reproduzindo a simulação de “Comparativo de Ponto de Ataque - Pressurizado” do estudo de Majidi [13] se mostrou eficiente para avaliação de incorporação de ar em sistemas de enchimento. A projeção gráfica realizada após a simulação é eficaz para análise de sistemas de enchimento, com o objetivo principal de avaliação de reoxidação em peças fundidas.

O corpo de prova projetado atende as expectativas para análise de incorporação de ar em sistemas de vazamento, tendo uma altura de queda do sistema de enchimento considerável para este tipo de análise e promovendo uma posterior facilidade para remoção dos corpos de prova.

O maior módulo térmico encontrado dentro do massalote apresentou o correto dimensionamento do corpo de prova, implicando que o último metal líquido a se solidificar deve ser encontrado no mesmo. O resultado de porosidade apresentado na Figura 7 demonstra a sanidade do material, encontrando-se totalmente dentro do massalote de alimentação.

O dimensionamento da malha seguiu os critérios estabelecidos em estudos de Majidi e Beckermann [14], onde, pelo menos, quatro pontos de avaliação (na seção transversal) são necessários para resolver numericamente um jato líquido.

Sistemas de enchimento por gravidade possuem alta viabilidade no processo de fabricação de peças fundidas. Analisando a Tabela 3 percebeu-se que o conceito de Campbell [7] é viável, desde que haja um correto dimensionamento do sistema de canais, já que ampliando as comparações para diferentes sistemas de enchimento por baixo (Geração 01 – Tabela 2) percebeu-se resultados superiores aos obtidos nos corpos de prova 09 e 10.

Com os resultados obtidos deste estudo se torna necessário não somente entender o conceito de fundição por gravidade, mas também estudar as possibilidades oriundas do mesmo, a fim de se obter os melhores resultados possíveis para tal configuração.

Foi observado uma diferença de 62% na superfície de metal exposta ao ar (VOF – Peça + VOF – Canal) comparando os resultados do CP4 com o CP08, demonstrando assim a influência do sistema de enchimento em possíveis defeitos de reoxidação no produto final obtido. Estes resultados também estão de acordo com o conceito de Campbell [7] e estudos de Majidi [13].

REFERÊNCIAS

- [1] S. H. Majidi, "Modeling of air entrainment and oxide inclusion formation during pouring of metal castings," University of Iowa, Iowa, 2018.
- [2] S. R. Sama, "Investigation Into Non-conventional Mold Designs Using 3D Sand-printing in Castings," The Pennsylvania State University, Pensilvânia, 2018.
- [3] W. Marquardt, "Continuing the Conversetation - Naturally Pressurized Fill System," SFSA Technical and Operating Conference 2018, Chicago, IL, 2018.
- [4] S. Majidi e C. Beckermann, "Simulation of Air Entrainment During Mold Filling: Comparasion With Water Modeling Experiments," *Proceedings of the 71st SFSA Technical and Operating Conference*, pp. Paper No 3.2, Steel Founders` Society of America, Chicago, IL, 2017.
- [5] D. Mouaze, F. Murzyn e J. Chaplin, Free Surface Lenght Scale Estimation in Hydraulic Jumps, *Journal of Fluids Engineering*, 2005, Vol. 44, pp. 563-596, 2005.
- [6] K. Kiger e J. Duncan, Air Entrainment Mechanisms in Plunging Jets and Breaking Waves, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2012, Vol. 44, pp. 563-596, 2012.
- [7] J. Campbell, Casting Praticce - The 10 Rules of Castings, Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2004.
- [8] A. J. Melendez, K. D. Carlson e C. Beckermann, "Modelling of Reoxidation Inclusion Formation in Steel Casting," *International Journal of Cast Metal Research vol.32*, pp. 624-638, 2009.
- [9] J. Schmidt e J. C. Sturm, "Desenvolvimento de Ferramentais Dimensionalmente Corretos sem TRY-OUT," 16º Congresso de Fundição - CONAF 2013, São Paulo, 2013.
- [10] J. C. S. Ingo Hahn, Simulation evolves to autonomous optimization, Aachen, Germany: MAGMA GmbH, 2019.
- [11] S. H. Majidi, "Modeling of air entrainment and oxide inclusion formation during pouring of metal castings," Iowa Research Online, Iowa, 2018.
- [12] R. Hartmann, "Estudo do Sistema de Enchimento de Aços ao Carbono em Moldes de Areia Cuca-frio Através de Simulação Numérica," SOCIEDADE EDUCACIONAL DE SANTA CATARINA – SOCIESC / INSTITUTO SUPERIOR TUPY – IST, Joinville, 2012.
- [13] S. Majidi e C. Beckermann, "Modeling of Air Entrainment During pouring of Steel Castings," *Paper No 4.8, Steel Founder`s Society of America*, p. Proceedings of the 70th SFSA Technical and Operating Conference, 2016.