

Avaliação da Moldabilidade do Bronze C95300 em Fundição de Precisão por Centrifugação Usando Prototipagem Virtual com o Software ProCAST®

Carlos Eduardo da Silva Albuquerque

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF – R. Antônio Figueira Sampaio, 134 - Nossa Sra. de Graças, Salgueiro - PE, 56000-000

e-mail: carlos.albuquerque@univasf.edu.br

Carlos Jose de Araújo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830

e-mail: carlos.araujo@ufcg.edu.br

Resumo. A simulação numérica para previsão de defeitos em fundições se tornou uma ferramenta muito viável e vantajosa em comparação com os testes de fundição reais, pois apresenta um tempo de solução menor, com custos reduzidos e uma maior facilidade de modificação dos parâmetros de projeto. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma análise via simulação numérica usando o software ProCAST de um processo de fundição centrífuga, avaliando a moldabilidade do bronze de alumínio C95300, com foco no tempo de solidificação e na formação de porosidades. Para esse fim, foi definida uma peça com geometria no formato de rede tendo por base a metodologia proposta por Hinman et al. (1985). O processo de fundição foi simulado usando 2 posições da rede (horizontal e vertical) e 3 velocidades de rotação diferentes com os mesmos parâmetros para cada posição da rede. Como resultados principais, o estudo identificou que a posição vertical apresenta uma moldabilidade ligeiramente melhor em relação a posição horizontal e que as regiões mais críticas, em relação a presença de porosidade são os canais de alimentação da rede. No geral, para as condições simuladas a moldabilidade variou entre 74% e 100%.

Palavras chave: Simulação numérica. Fundição centrífuga. Moldabilidade. Detecção de Defeitos. Porosidade

1. INTRODUÇÃO

Registros históricos indicam que a obtenção das primeiras peças metálicas fundidas ocorreu no período compreendido entre 5000 e 3000 a.C., ou seja, no período imediatamente anterior à idade do Bronze. Desde então e progressivamente, a fundição passou a estar cada vez mais presente na história da evolução da humanidade (Garcia, 2007).

O processo de fundição consiste no vazamento do metal líquido no interior de um molde contendo uma cavidade com dimensões muito próximas as da peça ou das peças que se deseja obter (Casotti, 2011). Dependendo das particularidades do processo de fundição, o mesmo pode ser denominado de diversas formas: de gravidade, sob pressão, ou, por centrifugação. Seja qual for a classificação do processo de fundição todos estão sujeitos a erros de projeto e de processamento em alguma etapa do processo, porém a correta identificação dos defeitos na fase inicial reduz de forma expressiva a probabilidade de falha do produto. Existem diversas maneiras de analisar os fenômenos que ocorrem no processo de fundição e reduzir a formação de defeitos, dentre as quais se destacam os testes de fundição reais e a simulação de processos de fundição com auxílio de computadores. Por ser muito mais rápido e mais barato do que os testes de fundição reais, a análise do processo de fundição via simulação numérica se tornou uma abordagem alternativa muito viável e vantajosa. Por meio da simulação numérica os processos de enchimento, solidificação, formação de defeitos e características de distribuição durante o processo de fundição podem ser previstos antes da realização de experimentos reais.

Dou, et al. (2019) desenvolveram uma abordagem de simulação numérica baseada no software de fundição por elementos finitos ProCAST, avaliando o fluxo de fluido, solidificação e formação de defeitos durante cada estágio do processo de fundição por alta pressão: vazamento, injeção e resfriamento. Aprisionamento de ar e distribuição de porosidade na peça fundida foram previstos nas simulações realizadas.

Pisarek, et al. (2016) apresentaram resultados de simulação computacional do processo de fundição por gravidade de uma liga de bronze de alumínio (Cu-Al-Fe-Ni-Cr), bem como solidificação e o resfriamento no molde no formato de uma árvore de fundição de paredes grossas. Como resultado da simulação do processo de fundição dessa árvore, identificaram-se regiões críticas para formação de defeitos.

Karwiński, et. al. (2014) analisaram, via simulação numérica, o campo de velocidades e de pressão gerada pela força centrífuga durante o processo de fundição por centrifugação de uma liga de titânio concluindo ao fim que os moldes de cerâmica de fundição em camadas podem ser usados com segurança.

Khan e Sheikh (2018) realizaram um estudo comparativo entre os principais softwares de simulação de fundição usados na atualidade. No total, oito softwares de simulação de fundição foram analisados. Os softwares são comparados em termos de processos de fundição simulados, módulos adicionais (se houver), métodos de solução usados, previsão de defeitos, clientes / usuários típicos e capacidade de simulação avançada. Analisando o estudo de Khan e Sheikh (2018) é possível afirmar que o ProCAST está entre os 3 softwares de simulação mais adequados para uso em análise de defeitos de fundição mais detalhada, pois possui a capacidade de simular diversos processos de fundição, de identificar a maioria dos defeitos que surgem em uma fundição de maneira confiável e rápida.

Neste contexto, esse trabalho apresenta uma análise computacional de um processo de fundição centrífuga feita com o auxílio do software de simulação numérica ProCAST 2019.0. Com essa análise de prototipagem virtual foi possível avaliar a influência da velocidade de rotação e da posição da peça na moldabilidade, no tempo de solidificação e na formação de porosidade de um corpo de prova em formato de Y com uma rede de segmentos circulares ao centro, fabricada por fundição centrífuga usando o Bronze C95300 (liga de base Cu-Al).

2. METODOLOGIA

A metodologia usada nesse trabalho é apresentada no fluxograma da Fig. 1.

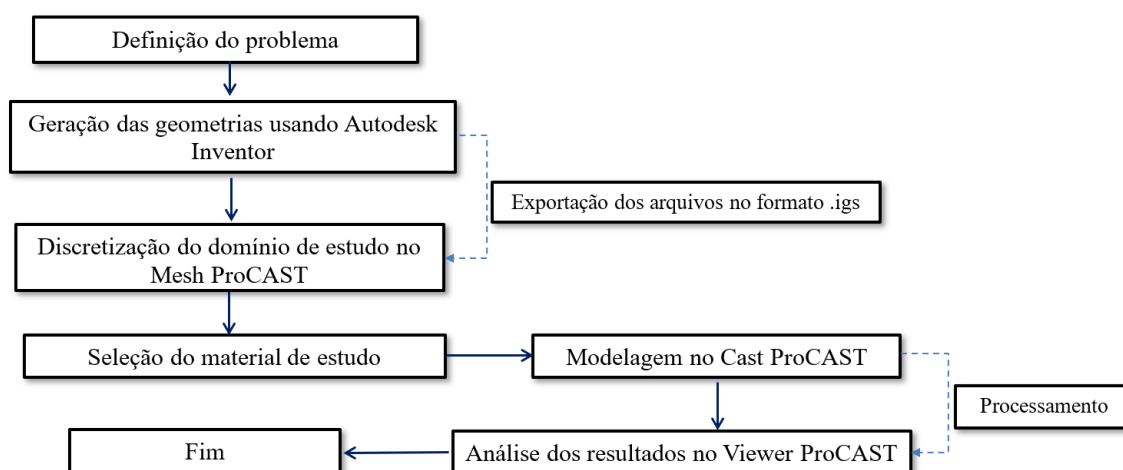


Figura 1. Fluxograma esquemático de metodologia usada (Autoria própria, 2020).

O problema abordado trata da simulação do processo de enchimento, solidificação e formação de defeitos usando o software ProCAST 2019.0. O processo de fundição escolhido para estudo é um processo que usa a força centrífuga como meio de forçar o metal fundido para o interior do molde. Um esquema ilustrativo na Fig. 2 mostra, de forma simplificada, o método de fundição simulado, usado no nosso grupo de pesquisa para a produção de componentes miniaturizados de ligas com memória de forma com a máquina Power Cast 1700 (Simões & De Araújo, 2018).

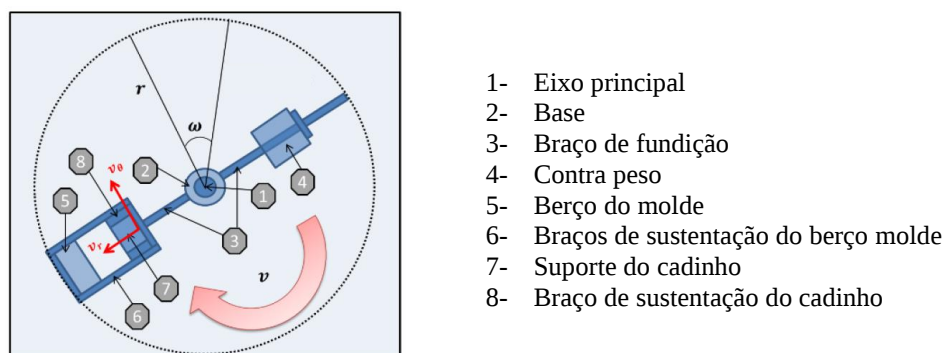


Figura 2. Ilustração do sistema da máquina centrífuga usada no processo de fundição simulado (Mun *et al.*, 2016).

Para as análises de prototipagem virtual foi definida uma peça com geometria no formato de malha ou rede, tendo por base a metodologia proposta por Hinman *et al.* (1985) para avaliar a moldabilidade. Utilizando o software Autodesk Inventor, a peça foi modelada de duas formas, uma com a rede na posição horizontal e outra na posição vertical, como pode ser visto na Fig. 3

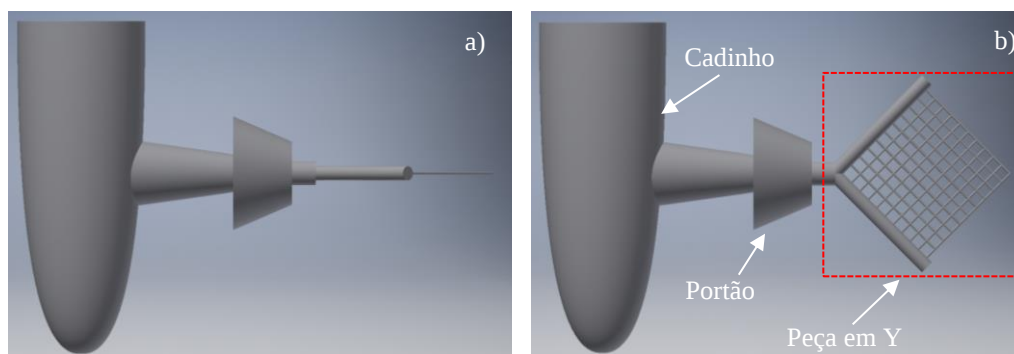


Figura 3. Formato definido para peça com rede em Y a ser fundida. (a) Rede na posição horizontal. (b) Rede na posição vertical com descrição dos elementos que compõem a geometria (Autoria própria, 2020).

O modelo CAD da Fig. 3 é composto por três partes: cadinho, portão de entrada e peça em formato de Y que contém a rede com 200 segmentos. Após produzidas as geometrias elas são importadas no formato “.igs” para o Mesh do ProCAST, com a finalidade de confecção da malha que discretiza o domínio. Para as duas geometrias foram criadas duas malhas idênticas usando a mesma metodologia e parâmetros. A Fig. 4 exibe um exemplo de uma das malhas criadas para o conjunto completo (cadinho, molde e peça).

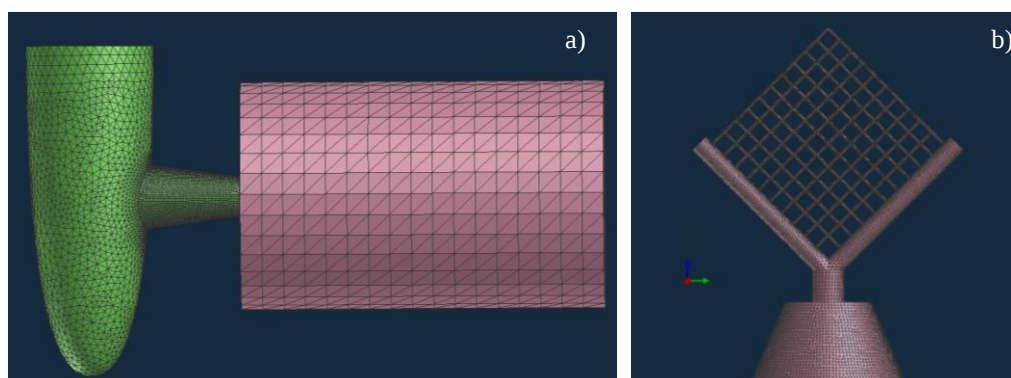


Figura 4. Malha confeccionada para as análises. (a) Conjunto completo incluindo molde. (b) Detalhe do refinamento da malha da peça (Autoria própria, 2020).

Essa malha possui 2.530.891 elementos do tipo 3D com refinamento maior na região da peça em Y. A liga selecionada para desenvolver esse trabalho foi a liga de bronze ao alumínio C95300 e o material do molde escolhido foi o gesso.

Os dados usados na simulação computacional são apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Dados de entrada usados na modelagem do processo (Autoria própria, 2020)

Propriedades	Valores
Velocidade de rotação (rpm)	200, 300 e 400
Tempo de rotação (s)	5
Temperatura de entrada (°C)	1073
Temperatura Solidus (°C)	1031
Temperatura Liquidus (°C)	1063
Temperatura de molde (°C)	120
Coefficiente de troca de calor entre o molde e ambiente (W/m ² .K)	10
Coefficiente de troca de calor entre peça e molde (W/m ² .K)	750
Massa da liga fundida (kg)	0,024
Distância entre a entrada do molde e o centro de rotação (mm)	166

Ressalta-se que o bronze C95300 foi escolhido por ser uma liga de base Cu-Al que pode ser modificada com adição de elementos de liga, como o Ni e/ou o Mn, para obter propriedades funcionais de memória de forma e superelasticidade (Araújo et al, 2017).

A análise dos resultados ao fim das simulações foi feita através de gradientes, gráficos e ilustrações geradas no Viewer do ProCAST 2019.0. Além das ferramentas oferecidas pelo Viewer também foi feito o uso da metodologia de Whitlock modificada, para determinar o valor de moldabilidade. Essa metodologia foi apresentada inicialmente no estudo de Hinman *et al.* (1985) e posteriormente citada também no trabalho Qiu *et al.* (2015). Após a fundição, o número de segmentos incompletos foi contabilizado e inseridos na Eq. (1) para determinar a porcentagem de moldabilidade.

$$M(\%) = \frac{(N_T - N_i)}{N_T} \times 100 \quad (1)$$

Sendo M a moldabilidade, N_T o número de segmentos total da peça e N_i o número de segmentos incompletos após a fundição. Nesse trabalho, a rede produzida forma uma grade com 100 quadrados abertos e 200 segmentos. O segmento foi considerado completo ou incompleto de acordo com a ilustração da Fig. 5, na qual todos os segmentos apontados como “I” são considerados incompletos.

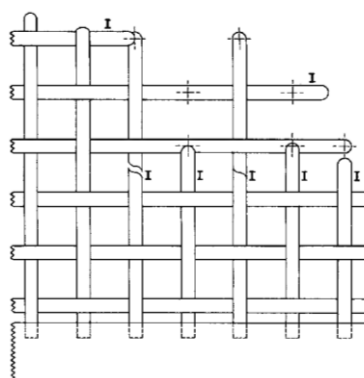


Figura 5. Ilustração do método para contagem de segmentos considerados completos (Hinman *et al.*, 1985).

3. RESULTADOS

3.1 Moldabilidade

A Tabela 2 mostra o valor de moldabilidade da liga C95300 em 3 situações distintas de rotação do braço da máquina (Fig. 2). Os cálculos de percentual apresentados foram realizados conforme a metodologia de Whitlock (Hinman *et al.*, 1985).

Tabela 2. Valores de moldabilidade dos casos estudados (Autoria própria, 2020).

Velocidade Rotação (rpm)	Moldabilidade (%)	
	Rede na posição horizontal	Rede na posição vertical
200	74,50	75,00
300	83,00	84,00
400	99,50	100,00

Analisando os dados dessa tabela é possível observar que a rede na posição vertical apresentou uma moldabilidade ligeiramente melhor, da ordem de 0,5 a 1,0 %, em relação a rede na posição horizontal. Uma outra conclusão baseada nesses dados é que a condição menos favorável a moldabilidade da peça é a que apresenta velocidade de rotação de 200 rpm, com a rede na posição horizontal. Nessa situação a rede apresentou 51 segmentos incompletos de um total de 200 segmentos, gerando assim o percentual de moldabilidade de apenas 74,50%, inferior a todos os casos analisados nesse trabalho.

Visualmente, os valores apresentados na Tab. 2 podem ser analisados nas imagens da Fig. 6. Avaliando essas imagens é possível verificar que na velocidade de rotação de 200 rpm, e com a peça na posição horizontal (Fig. 6a), a falta de preenchimento está mais concentrada na região central da rede. Nessa condição de simulação a peça apresentou 51 segmentos incompletos. Com a mesma rotação de 200 rpm, porém com a peça na posição vertical, foram verificados 50 segmentos incompletos e uma distribuição distinta da anterior, como pode ser visto na Fig. 6(b). Na Fig. 6(c) é exibida a falta de preenchimento gerada pela condição de rotação de 300 rpm e posição horizontal da peça. Nessa situação a peça apresentou 34 segmentos incompletos, diferente da condição apresentada na Fig. 6(d) para qual a peça na posição vertical apresentou 32 segmentos incompletos. Nessas condições a liga apresentou um maior percentual de moldabilidade, porém a peça na posição vertical ainda apresentou 1 segmento incompleto, como pode ser visto em maiores detalhes na Fig. 7.

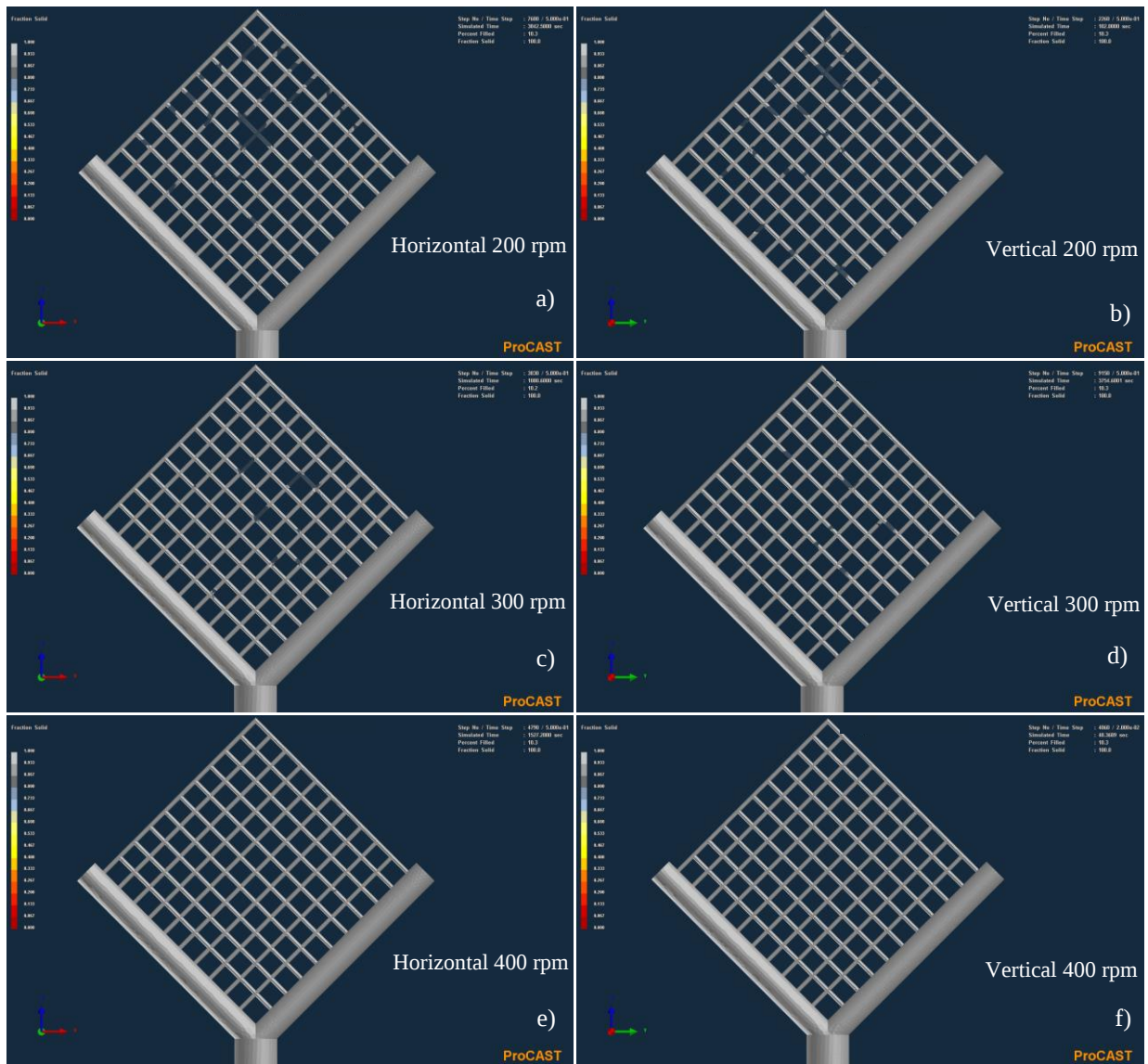


Figura 6. Imagens de prototipagem virtual das peças. (a) Rede horizontal e rotação de 200 rpm. (b) Rede vertical rotação de 200 rpm. (c) Rede horizontal e rotação de 300 rpm. (d) Rede vertical e rotação de 300 rpm. (e) Rede horizontal e rotação de 400 rpm. (f) Rede vertical e rotação de 400 rpm (Autoria própria, 2020).

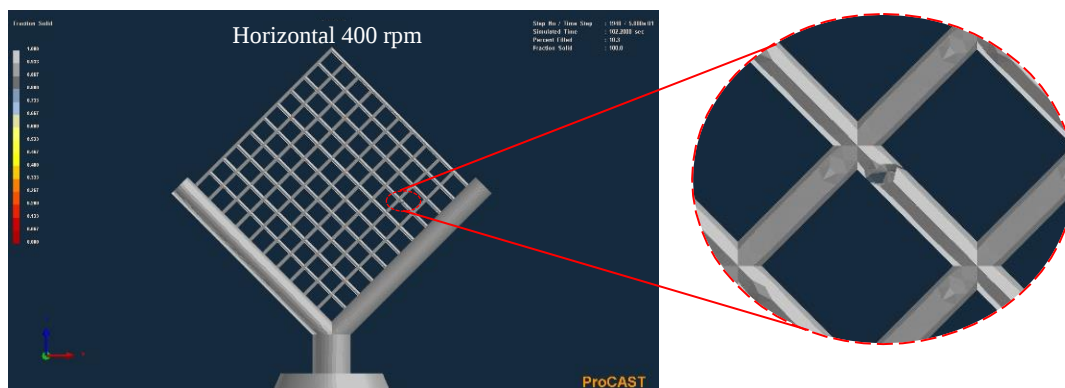


Figura 7. Detalhe do segmento falho apresentado na simulação com a rede na posição horizontal e rotação de injeção de 400 rpm (Autoria própria, 2020).

3.2 Tempo de solidificação

A Figura 8 apresenta as curvas de fração sólida versus tempo para posições distintas de medição na simulação com a peça na posição vertical e com rotação de 400 rpm. Essa figura também exibe os pontos de referência 1, 2, 3 e 4 definidos para auxiliar na análise do tempo de solidificação. Avaliando as curvas é possível notar que a peça apresenta tempos distintos de solidificação dependendo do ponto avaliado. Pontos mais próximos do portão de entrada apresentam uma taxa de solidificação menor conforme notado comparando os tempos de solidificação dos pontos extremos (ponto 1 e ponto 4), para os quais a diferença apresentada foi de 26,95 segundos.

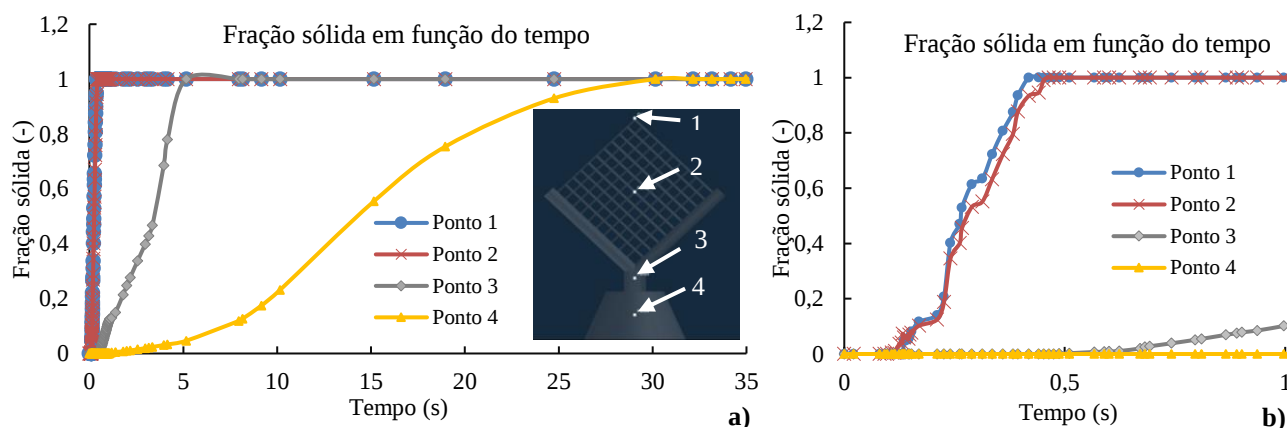


Figura 8. Curvas fração sólida versus tempo para os pontos 1, 2, 3 e 4. (a) Entre 0 e 35s e (b) Detalhamento entre 0 e 1s (Autoria própria, 2020).

Outro comportamento observado e detalhado na Figura 8b é que os pontos 1 e 2 apresentam um perfil de comportamento semelhante com uma alta taxa de solidificação. Essa alta taxa de solidificação está relacionada a baixa quantidade de massa presente nas regiões levando a uma maior facilidade perder calor e solidificar. Na Tabela 3 é possível verificar os tempos de solidificação para os pontos 1 e 3.

Tabela 3. Tempo de solidificação nos pontos 1 e 3 para os casos estudados (Autoria própria, 2020).

Velocidade Rotação (rpm)	Tempo de solidificação (s)			
	Ponto 1		Ponto 3	
	Rede na posição horizontal	Rede na posição vertical	Rede na posição horizontal	Rede na posição vertical
200	0,4422	0,4331	7,50	7,00
300	0,4104	0,4097	5,28	5,22
400	0,3877	0,3826	5,20	5,16

É possível identificar que o tempo de solidificação para as peças, tanto na posição horizontal como na posição vertical, se tornam ligeiramente menores com o aumento da rotação. Outra característica notada é que as simulações que foram realizadas com a peça na posição horizontal apresentaram um tempo maior de solidificação comparada as redes na posição vertical. A maior diferença apresentada foi de 0,50 segundos na rotação de 200 rpm no ponto 3 e a menor de 0,0051 segundos na rotação de 400 rpm no ponto 1.

3.3 Porosidade

A Figura 9 mostra a distribuição de porosidades apresentadas pelas peças nas posições horizontal e vertical simuladas. Analisando esses gradientes é possível notar que a prototipagem virtual simulada na posição horizontal com velocidade de rotação de 200 rpm revela regiões com porosidade de contração de aproximadamente 2,40% e a vertical, com mesma rotação, apresenta regiões de 2,14%. Já na condição de 300 rpm são observadas regiões que apresentam porosidade máxima de 1,8% com a rede na horizontal e 2,4% na posição vertical. Por fim, na condição de 400 rpm de rotação foram encontradas regiões com 1,9% de porosidade na posição horizontal e 2,7% na posição vertical. Na maioria dos casos a posição vertical apresentou regiões com maiores percentuais de porosidade.

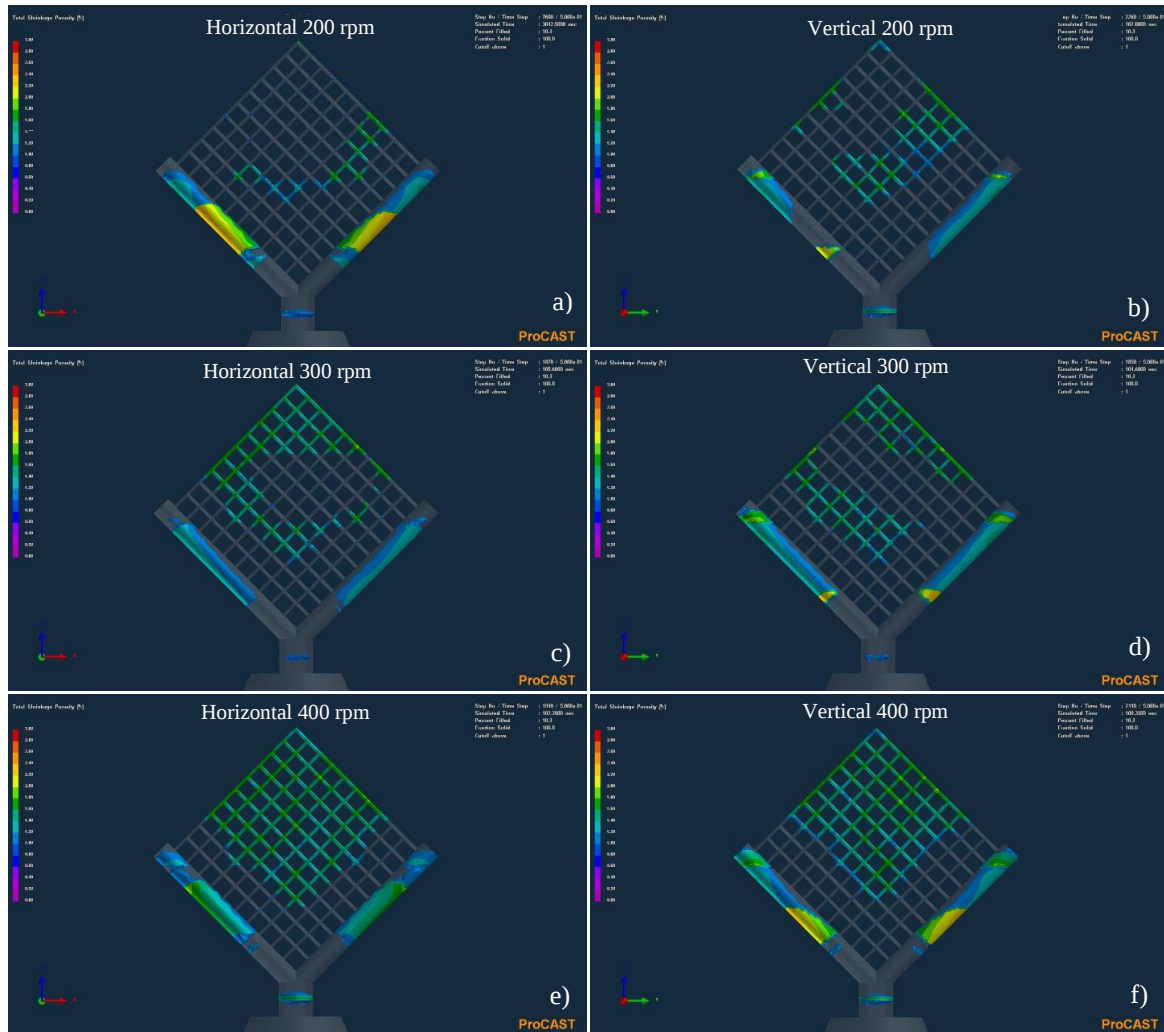


Figura 9. Distribuição de porosidade: (a) Rede horizontal e rotação de 200 rpm. (b) Rede vertical e rotação de 200 rpm. (c) Rede horizontal e rotação de 300 rpm. (d) Rede vertical e rotação de 300 rpm. (e) Rede horizontal e rotação de 400 rpm. (f) Rede vertical e rotação de 400 rpm. (Autoria própria, 2020).

Também é possível notar que as regiões mais críticas, em relação a presença de porosidade, em todas as situações simuladas, são os canais de alimentação da rede. Isto ocorre devido a grande diferença entre a taxa de resfriamento da rede e dos canais de alimentação, que concentram a formação de porosidades.

Segundo Rajkolhe e Khan (2014) e Ingle e Sorte (2017) os defeitos de contração como as porosidades, consideradas defeitos de contração fechados, ocorrem quando o metal de alimentação não está disponível para compensar a contração conforme o metal se solidifica. Na prototipagem virtual simulada nota-se que em nenhum dos casos houve presença de porosidade nas regiões próximas aos canais de alimentação, pois a contração do bronze C95300 solidificado na rede foi compensada com o material ainda fluido presente nos canais de alimentação. Já nas regiões mais afastadas, como as partes superiores e centrais da rede, não há mecanismos para compensar a contração do material da peça tornando essa região mais favorável a formação de poros. O mesmo ocorre com os canais de alimentação que se solidificam a uma taxa semelhante ao portão de entrada, não permitindo assim que os poros se concentrem apenas no portão de entrada.

4. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo financiamento dos projetos Universal 01/2016 (Proc. 401128/2016-4) e PQ 1C (Proc. 302740/2018-0), assim como ao ESI Group pela concessão da licença do programa ProCAST (Ref: CA/ARDS/RSD_2007_01BR).

5. REFERÊNCIAS

- Araujo, A. P. M., Simões, J. Brito, de Araújo, C. J., 2017. Analysis of Compositional Modification of Commercial Aluminum Bronzes to Obtain Functional Shape Memory Properties. *Materials Research*, Vol. 20(Suppl. 2), p. 331-341.
- Casotti, B. P., Bel Filho, E. D., Castro, P. C., 2011. Indústria de Fundição: Situação Atual e Perspectivas. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, n33, p. 121-162.
- Dou, K. Lordan, E., Zhang, Y.J., Jacot, A., Fan, Z. Y., 2019. Numerical Simulation of Fluid Flow, Solidification and Defects in High Pressure Die Casting (HPDC) Process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 529.
- Garcia, A., 2007. Solidificação: Fundamentos e Aplicações. 2ª Edição; São Paulo: Editora Unicamp.
- Hinman, R.W. Tesk, J.A., Whitlock, R.P., Parry, E.E., Durkowski, J.S., 1985. Technique for Characterizing Casting Behavior of Dental Alloys. *Journal of Dental Research*. Vol. 64, n2, p.134-138.
- Ingle, V., Sorte, M., 2017. Defects, Root Causes in Casting Process and Their Remedies: Review. Vaibhav Ingle. *Int. Journal of Engineering Research and Application*. Vol. 7, n3, p.47-54.
- Khan, M. A. A.; Sheikh, A. K., 2018. Comparative Study of Simulation Software for Modelling Metal Casting Processes. *International Journal of Simulation Modelling*. Vol.17, n2, p. 197-209.
- Karwiński, A., Lesniewski, W., Wieliczko, P., Malysza, M., 2014. Casting of Titanium Alloys in Centrifugal Induction Furnaces. *Archives of Metallurgy and Materials*, Vol. 59, n1, p. 403–406.
- Mun, J., Ju, J., Thurman, J., 2016. Indirect Fabrication of Lattice Metals with Thin Sections Using Centrifugal Casting. *Materials Science, Medicine Journal of visualized experiments: JoVE*, Vol. 111, p. e53605.
- Pisarek, B. P.; Kolakowski, D.; Pacyniak, T., 2016. Analysis of the Causes of Cracks in a Thick-Walled Bush Made of Die-Cast Aluminum Bronze. *Archives of Foundry Engineering*, Vol. 16, n4, p. 119–124.
- Qiu, K.J.; Liu, Y.; Zhou, F.Y.; Wang, B.L.; Li, L.; Zheng, Y.F.; Liu, Y.H., 2015. Microstructure, mechanical properties, castability and in vitro biocompatibility of Ti–Bi alloys developed for dental applications. *Acta Biomaterialia*, Vol. 5, p. 254–265.
- Rajkolhe, R., Khan, J. G., 2014. Defects, Causes and Their Remedies in Casting Process: A Review. *International Journal of Research in Advent Technology*, Vol.2, n3, p. 375-386.
- Simões, J.B.; De Araújo, C.J., 2018. Nickel-Titanium Shape Memory Alloy Mechanical Components Produced by Investment Casting. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, v. 29, n.19, p. 3748-3757.

5. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.

Assessment of Castability of Bronze C95300 in Centrifugal Investment Casting Using Virtual Prototyping with ProCAST® Software

Carlos Eduardo da Silva Albuquerque

Universidade Federal do Vale do São Francisco – UNIVASF– R. Antônio Figueira Sampaio, 134 - Nossa Sra. de Gracas, Salgueiro - PE, 56000-000

e-mail: carlos.albuquerque@univasf.edu.br

Carlos Jose de Araújo

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG – R. Aprígio Veloso, 882 - Universitário, Campina Grande - PB, 58428-830

e-mail: carlos.araujo@ufcg.edu.br

Abstract. Numerical simulation for casting defect prediction has become a very viable and advantageous approach compared to the actual foundry tests, as it presents a shorter solution time, with reduced costs and an easier modification of the design parameters. This work aims to present an analysis via numerical simulation using the ProCAST software of a centrifugal casting process, evaluating the castability of C95300 aluminum bronze, focusing on the solidification time and the formation of porosity. For this purpose, a square grid shaped piece was defined based on the methodology proposed by Hinman et al. (1985). The casting process was simulated using 2 positions (horizontal and vertical) and 3 different rotation speeds with the same parameters for each piece position. As main results the study identified that the vertical position presents a slightly better castability in relation to the horizontal position and that, the most critical regions, in relation to the presence of porosity, are the feeding channels of the square grid shaped piece. In general, for the simulated conditions the castability varied between 74% and 100%.

Keywords: Numerical simulation. Centrifugal casting. Castability. Defect Detection. Porosity.

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.