



CARACTERIZAÇÃO DE DEFEITOS EM PEÇAS FUNDIDAS DE ALUMÍNIO AA6063

Duarte, A.C.^{1(*)}, De Oliveira, D.F.², Guimarães, M.², Araújo, O.², Gatamorta, F.¹, De Campos, J.B.¹, Cardoso, P.C.B.¹, Almeida, I.C.S.³, Peripolli, S.B.¹

¹UERJ - Universidade do Estado do Rio de Janeiro

²UFRJ - Universidade Federal do Rio de Janeiro

³IME - Instituto Militar de Engenharia

*acdcoutinho@gmail.com

RESUMO

Os processos de fundição por gravidade são processos já consolidados onde os defeitos estão associados aos parâmetros utilizados e às características envolvidas no preenchimento do molde. Desse modo, os problemas encontrados podem estar relacionados à porosidade, aos vazios de contração e eventuais trincas por tensões. O presente trabalho visa contribuir para a avaliação de defeitos metalúrgicos encontrados em amostras fundidas da liga de alumínio AA6063. As amostras foram produzidas a partir de um lingote da liga que foi fundida e vazada por gravidade em moldes de areia verde com duas diferentes configurações, caracterizadas como molde aberto e molde fechado. Foram realizadas uma simulação termodinâmica, uma microtomografia computadorizada e, avaliações por microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX). Como resultado, o trabalho apresenta para cada configuração de molde os tipos de defeitos associados.

Palavras-chave: AA6063, Simulação, Microtomografia, Difração de Raios X.

INTRODUÇÃO

Os processos de fundição se destacam na indústria metalúrgica por produzir peças com uma grande variedade de formas e dimensões. Eles podem ser empregados com diferentes técnicas para a fabricação de matérias-primas, produtos semiacabados ou produtos finais. As etapas envolvem o aquecimento do material até o estado líquido, que é posteriormente vazado em um molde que contém a geometria do produto que se deseja obter. O material sofre resfriamento até a completa solidificação. No processo, a temperatura do metal fundido e as condições de operação e escoamento influenciam no preenchimento do molde e na formação dos defeitos pontuais. [3]

Em todo processo de fundição, a solidificação é o fator que promove maior influência sobre as características finais do fundido. A forma de solidificação é responsável, por exemplo, pelos defeitos de fundição, com a formação dos rechupes e vazios no interior da peça. Um dos fatores que interferem na solidificação é o material com que são confeccionados os moldes. Os moldes de areia verde diferem dos metálicos por não terem boa propriedade térmica na extração de calor e a solidificação ocorre de forma mais lenta. Neste trabalho, foram utilizados moldes de areia verde com configuração aberta e fechada. O molde fechado possui canais de alimentação, enquanto que o aberto, a alimentação de forma direta na cavidade. [2]

O processo de fundição é responsável pelo controle sobre a microestrutura da peça fundida. A morfologia dos grãos está relacionada, entre outros fatores, com a velocidade durante a solidificação e a direção do fluxo de calor. O material do molde interfere diretamente nas velocidades de solidificação, pois os coeficientes de extração de calor são diferentes para os metais e cerâmicos. De maneira correlata, as geometrias direcionam a solidificação caracterizando sua morfologia.

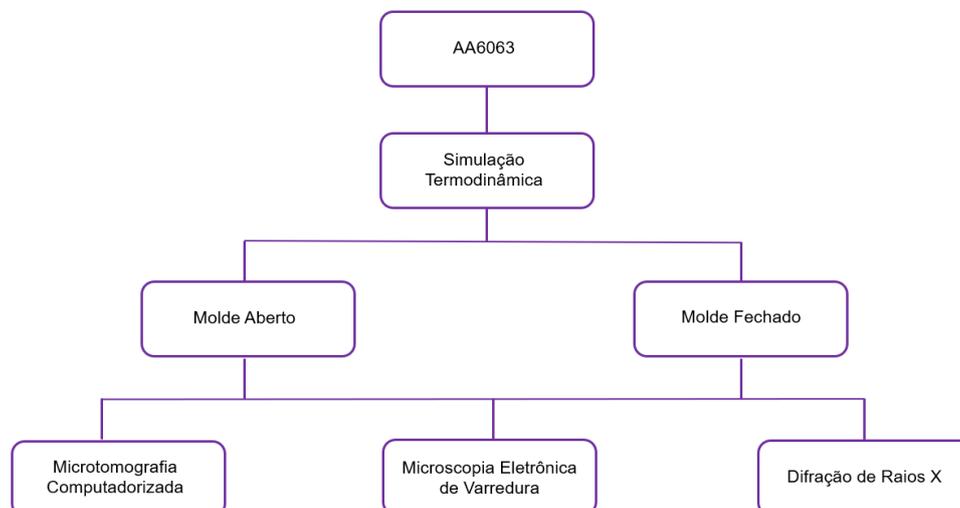
Nos moldes metálicos, a solidificação permite a formação da zona coquilhada junto à parede do molde, que são as primeiras a serem formadas pelo rápido resfriamento. Com o prosseguimento da formação dos grãos em direção ao metal líquido, pode ocorrer a existência de grãos equiaxiais na região central que se caracteriza pelo crescimento aleatório dos grãos. Após a total solidificação do metal, as variações volumétricas acarretam a formação do rechupe localizado na região da última solidificação, condicionada pelo fluxo de calor. [5]

Nos moldes cerâmicos, o efeito parede é minimizado e os gradientes de temperatura são menores, o que acaba diminuindo a influência da parede do molde na direção do fluxo de calor. Nesse caso, a direção dos fluxos de calor depende de uma configuração geométrica. Quando a solidificação é realizada em molde aberto ocorre um maior direcionamento do resfriamento por contato com o ar atmosférico, já com o molde fechado o gradiente de temperatura é mais uniforme.

MATERIAIS E MÉTODOS

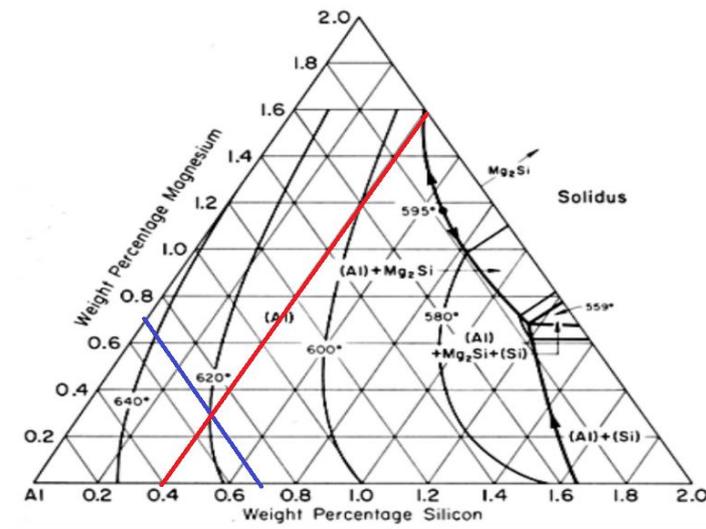
A Figura 1 apresenta o fluxograma das etapas desenvolvidas neste trabalho. Ele compreende as etapas de: seleção da liga, análise termodinâmica da liga, confecção dos moldes e vazamento para a produção das amostras. Aqui estão indicados também as técnicas e análises utilizadas para a avaliação dos defeitos das duas configurações. Foram realizadas análises para a identificação dos poros e vazios e as diferenças nas fases presentes nas amostras.

Figura 1 - Fluxograma das etapas realizadas



A liga de trabalho foi a AA6063, que é muito utilizada devido às suas excelentes propriedades mecânicas. Além disso, permite receber tratamento térmico e pode ser facilmente anodizada. É amplamente usada na área da arquitetura e na indústria por essas características. [7] A Figura 2 apresenta o diagrama de fases gerado para o sistema Al-Mg-Si com a temperatura e a composição de trabalho. [8]

Figura 2 - Diagrama de fases Al-Mg-Si



A liga pertence à família da série 6XXX cujos elementos principais são Mg e Si. A tabela 1 apresenta a composição química analisada da liga AA6063 [6]:

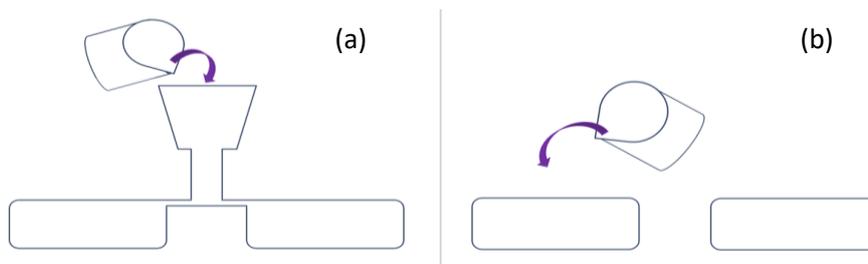
Tabela 1 - Composição química da liga AA6063 [6]

Código	Composição Wt%							
AA	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
6063	0,2 - 0,6	0,35	0,1	0,1	0,45 - 0,9	0,1	0,1	0,1

Inicialmente foi realizada uma análise termodinâmica. O objetivo dessa análise se concentrou na avaliação das variações volumétricas e na previsão de formação das fases. Para a análise foi utilizado o *software ThermoCalc®*.

Para a fabricação das amostras foram confeccionados os moldes cerâmicos dentro das configurações que se propôs o estudo: um molde cerâmico em areia verde aberto e um molde cerâmico fechado. A configuração objetivou a possibilidade de produção de amostras com diferentes direções de solidificação para a verificação dos tipos de defeitos característicos e da influência na formação das fases. A Figura 3 mostra a configuração dos moldes utilizados.

Figura 3 - Molde fechado (a) e Molde aberto (b)



Após a preparação dos moldes o material foi fundido e vazado. As etapas envolveram o aquecimento do material até o estado líquido na temperatura de 750 °C, que foi vazado em um molde com a geometria do corpo de prova: um prisma de dimensões 90 x 30 x 30 mm. Foram produzidas duas amostras por vazamento, totalizando em oito vazamentos por configuração de molde. Alguns desses vazios são caracterizados como rechupes e ocorrem em virtude de variações volumétricas na transformação líquido-sólido. As amostras foram então desmoldadas e preparadas para as etapas posteriores.

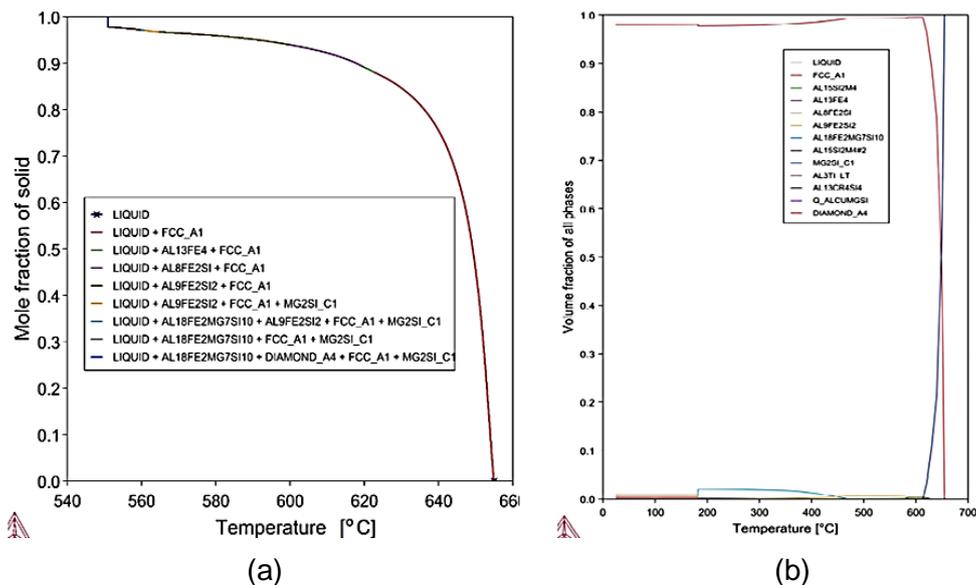
Com a finalidade de verificar o volume dos poros, tamanhos médios e distribuição nas diferentes configurações as amostras foram analisadas através do ensaio de microtomografia computadorizada. A técnica consiste em emitir o Raios X sobre uma amostra que ao atravessá-la, gera uma imagem tridimensional de forma digital. Foi utilizado um tomógrafo modelo Phoenix V|tome|x M300, um detector do tipo DXR-250, voltagem 150 kV e corrente 150 μ A.

Para identificação das microestruturas, bem como trincas de contração e dos vazios de contração intergranulares, as amostras foram observadas no MEV, com o equipamento JEOL JSM-7100F filamento FEG. As imagens foram capturadas operando na voltagem de 10 kV e em diversas magnificações. Os resultados obtidos permitem a observação de defeitos cujas magnitudes não puderam ser identificadas nas análises de microtomografia. A caracterização da formação de fases foi realizada utilizando técnicas de DRX. Essa técnica é possível devido a interação atômica que ocorre na amostra quando um feixe de radiação é emitido sobre ela e é difratado. Um detector posicionado nesse sistema capta os Raios X difratados que serão posteriormente analisados de acordo com suas propriedades. As medições de DRX foram realizadas nestas amostras usando um difratômetro Panalytical X'PERT PRO com radiação Co ($\lambda = 1.789 \text{ \AA}$), um passo de varredura de 40°-120°, voltagem do tubo de 40 kV e corrente do tubo 40 mA. Cálculos quantitativos dos Parâmetros Fundamentais de Rietveld [9], foram realizados para determinação de fases. Para esses cálculos, parâmetros de rede, tamanho cristalino e escala foram ajustados e o valor do primeiro parâmetro indicou a porcentagem de fase em peso.

RESULTADOS

A figura 4a apresenta as variações líquido-sólido durante a solidificação obtidas pela simulação termodinâmica através do *software ThermoCalc®*.

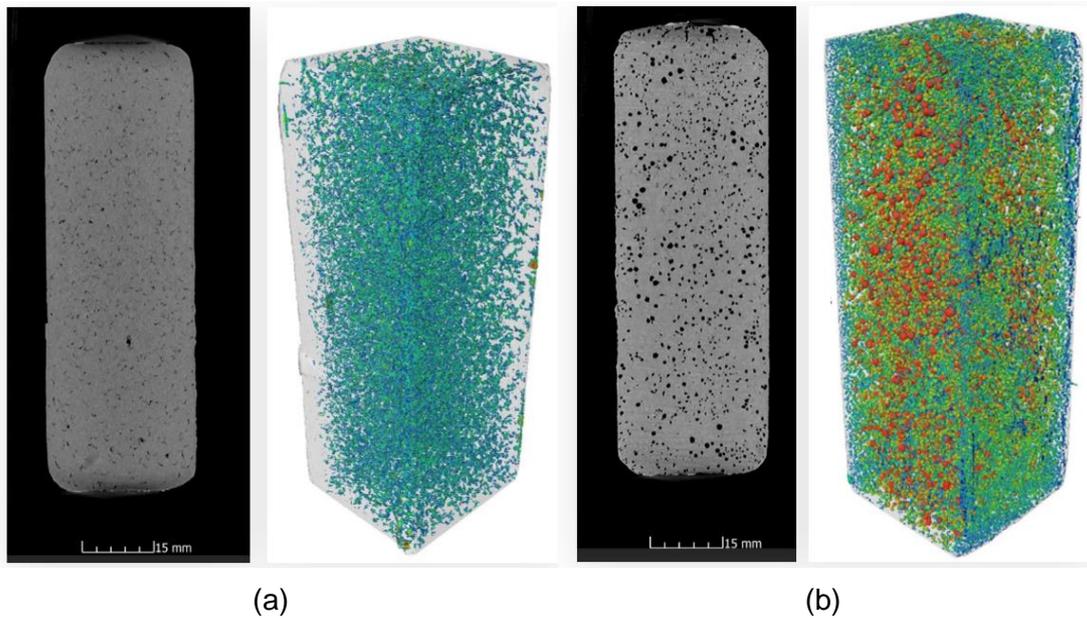
Figura 4 - (a) Composição das fases em função da temperatura e (b) volume das fases em função da temperatura obtidos por simulação termodinâmica -



Na simulação a formação dos primeiros sólidos ocorre pouco acima de 654 °C e a sua completa solidificação se dá próximo a temperatura de 550°C. Durante este intervalo de temperatura ocorrem as maiores variações volumétricas. O perfil de variação do volume das fases presentes é apresentado na figura 4b. Essas variações podem acarretar na formação de tensões residuais após a solidificação. A simulação apresenta também uma pequena variação volumétrica abaixo de 460 °C relacionada à formação de fases já no estado sólido.

Os resultados da microtomografia visto na Figura 5 das amostras mais representativas do molde aberto (A) e fechado (F) são apresentados. Nas reconstruções tridimensionais é possível observar que nas amostras produzidas no molde fechado, existe uma maior irregularidade na distribuição dos poros que possuem tamanhos relativos maiores.

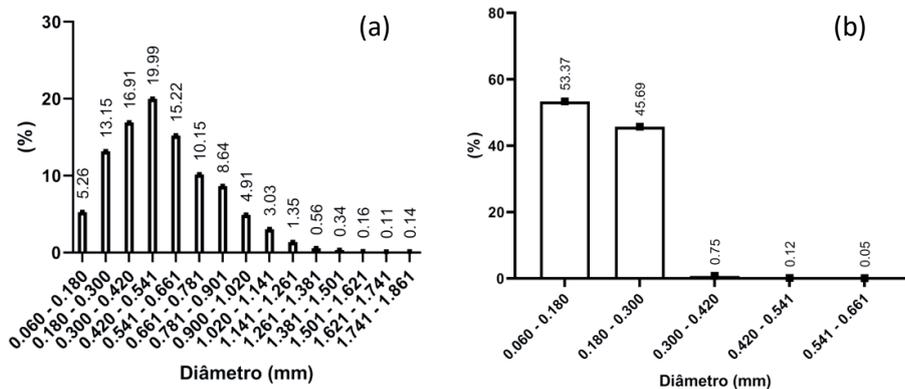
Figura 5 - Análise da porosidade das amostras (a) A e (b) F



A figura indica que nos moldes abertos os poros são mais alongados, com uma distribuição mais homogênea dos poros, em sua maior parte concentrado na região central da amostra. Também é possível notar que a média dos diâmetros, em milímetros, dos poros para a amostra fundida em molde fechado é maior, quando comparado ao de molde aberto. Foi constatada também uma distribuição mais heterogênea dos poros nesta configuração de molde.

Através do *software* foi possível determinar o perfil da média dos diâmetros dos poros. A Figura 6 mostra esse perfil de distribuição dos valores de porcentagem de tamanhos das amostras nas duas configurações. É possível observar uma maior variação de tamanho nas amostras obtidas no molde aberto.

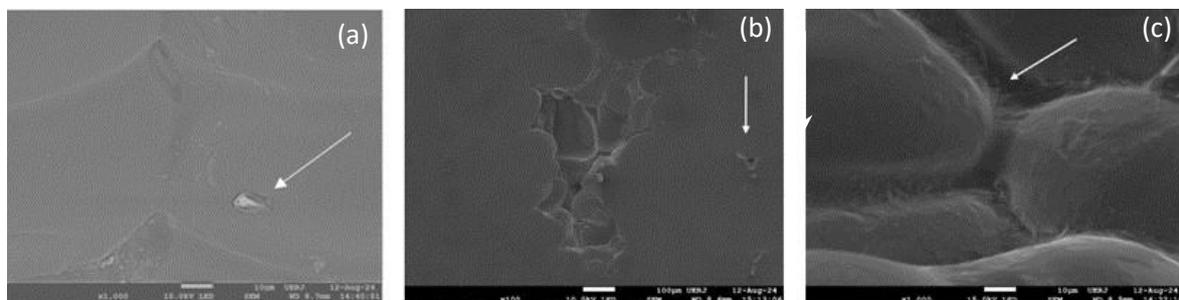
Figura 6 - Distribuição de tamanho de poros das amostras (a) A e (b) F



A partir de todas as microtomografias realizadas foram calculados os valores dos diâmetros médios de poros e porcentagem de vazios para cada configuração. Nos moldes abertos, o diâmetro médio de poros é da ordem de 0.16 mm (desvio padrão de 0.02 mm) e com um percentual médio de porosidade das amostras de 1.73% (desvio padrão de 0.425 mm). Os valores encontrados nas microtomografias apresentam uma variação menor do que nos valores encontrados nos moldes fechados. Nos moldes fechados o diâmetro médio de poro é da ordem de 0.49 mm (desvio padrão de 0.08 mm) e com percentual de 6.76% (desvio padrão de 1.29 mm).

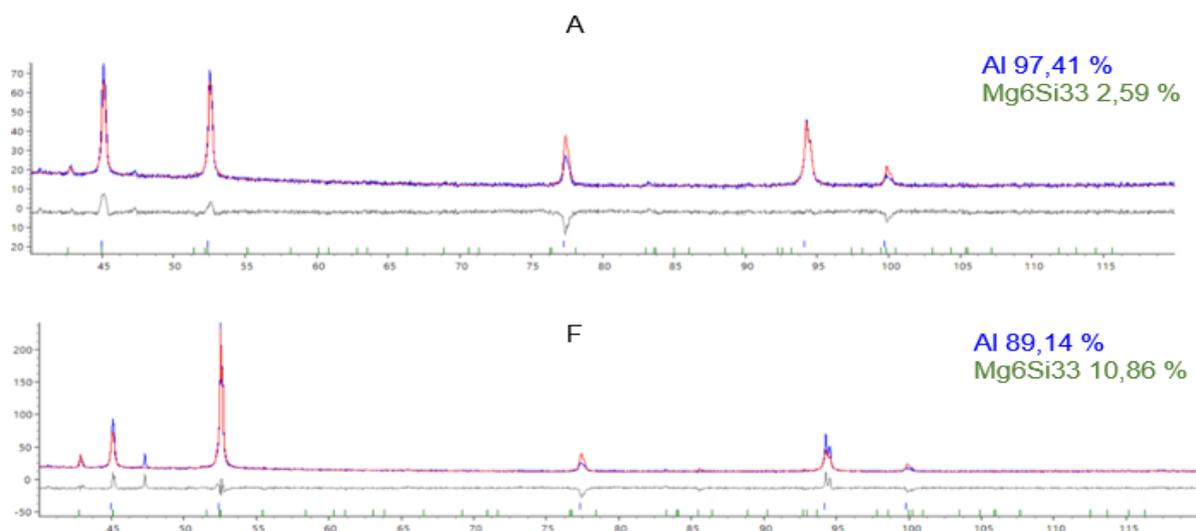
A Figura 7 apresenta as imagens realizadas por MEV. Em a) é possível observar a morfologia típica dos vazios encontrados que possuem uma geometria irregular característica de vazios de contração. Em b) o interior de um poro nas amostras na configuração de molde aberto a região de contorno de grãos com aspecto não uniforme, rugoso, com presença de pequenas ranhuras e, em c) o vazio de um molde na configuração fechado a presença de uma fase destacada no interior do poro. Para identificação das fases esse resultado foi associado às análises de DRX.

Figura 7 - Imagens de MEV indicando a morfologia e microestrutura da superfície das amostras (a), (b) e (c)



As medições de DRX foram realizadas em todas as amostras das duas diferentes configurações para avaliação semiquantitativa de fases. O Método de Rietveld foi aplicado para quantificação de fases, conforme mostrado na figura 8. A curva azul indica os dados experimentais e a vermelha os dados calculados. A linha cinza indica a diferença entre os dados experimentais e calculados. Como pode ser notado, as diferenças numéricas são menos significativas com baixo desvio padrão na quantificação das fases.

Figura 8 - Difratoograma das configurações A e F



A fase Al foi identificada e nitidamente ocorre um aumento da concentração de uma segunda fase, a Mg₆Si₃₃, de uma amostra para outra. O mesmo deve ocorrer para as demais amostras. A figura 9 apresenta uma comparação realizada entre os difratogramas das duas configurações. A Tabela 2 mostra as quantificações de fases para todas as amostras.

Figura 9 - Comparação dos difratogramas entre as amostras dos moldes (a) 3A, (b) 3F, (c) 4A e (d) 4F

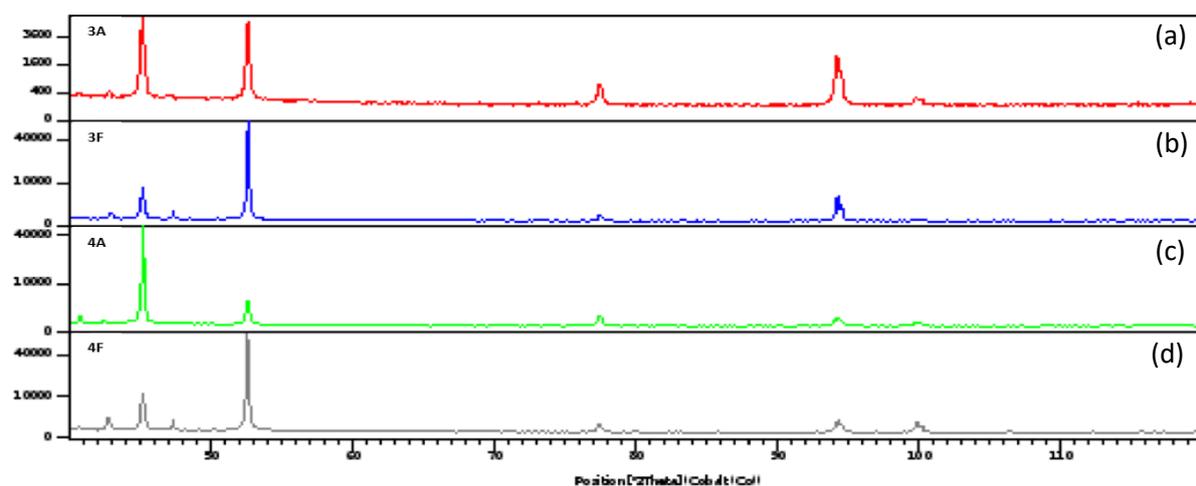


Tabela 2 - Comparação dos difratogramas

Configuração	Al (%)	Mg ₆ Si ₃₃ (%)
Molde aberto	97,41	2,59
Molde fechado	89,14	10,86

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos é possível afirmar que:

- A técnica de microtomografia computadorizada se mostrou adequada na identificação dos defeitos e na quantificação dos valores nas amostras. As que foram produzidas em molde fechado mostraram possuir maiores porcentagens de porosidade com poros de diâmetro na ordem de 0.49 mm. Enquanto, as amostras produzidas em molde aberto possuem uma média de diâmetro de 0.16 mm.
- A presença de uma maior porosidade encontrada nos moldes fechados provavelmente está ligada a existência dos canais de alimentação, que se solidificaram precipitadamente e inibiram nas amostras a formação de uma direção preferencial. Nos moldes abertos a presença de direcionalidade acarretou na formação dos poros alongados de menor tamanho e em menor quantidade.
- A análise de MEV revelou a presença de vazios de contração intergranular e a presença de diferentes microestruturas e morfologias nas amostras analisadas. Na amostra de molde aberto verifica-se a ausência de imperfeições e porosidade na superfície. Na amostra de molde fechada, os grãos possuem uma superfície rugosa e identificam-se inclusões nos contornos de grãos.
- Foi constatado por DRX, a presença majoritária da fase Al nas duas configurações e a presença de uma segunda fase, Mg₆Si₃₃. Para a amostra de molde aberto e fase se encontra em menor concentração, em torno de 76% menor, sugerindo que a velocidade de solidificação foi maior nesse caso, o que implica em uma menor segregação de soluto.
- A diferença entre as duas configurações para o processo de fundição ocasiona em diferenças na morfologia e microestrutura da amostra, o que impacta nas propriedades mecânicas e na finalidade para seu uso. A configuração de molde aberto apresentou ser menos porosa, com presença de poros mais alongados e uma baixa formação da segunda fase, Mg₆Si₃₃, enquanto que, a configuração de molde fechado se apresentou ser mais porosa, em que seus poros são mais esféricos e uma alta porcentagem de aparição da segunda fase Mg₆Si₃₃.

REFERÊNCIAS

- [1] Dieter, Felipe Baptista et al. **Análise dos efeitos da adição de alumina (Al₂O₃) na microestrutura e dureza do Zamac 5 fundido por gravidade**. Tecnologia em metalurgia, materiais e mineração. São Paulo, SP. V.17, n.4 (2020), Art. e-1963, 8 p., 2020.
- [2] Duarte, A. C. **Caracterização de defeitos em peças fundidas de alumínio AA6063**. Tese (Bacharel em Engenharia Mecânica) – Universidade do Estado do Rio de Janeiro, UERJ – RJ, Rio de Janeiro. 2024.
- [3] Fernanda, Thais, et al. **“A Influência das Condições Ambientais na Porosidade de rodas de ligas leves”**. Anais do X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, ABCM, 2018. DOI.org (Crossref).
- [4] Figueredo, Ivan da Costa; Espírito Santo, Victor Tarouquella da Silva do. **Análise das tensões residuais em liga de alumínio 6063-T5 fundida em molde de areia verde**. 2017
- [5] Garcia, A. **Solidificação: Fundamentos e Aplicações**. São Paulo: Editora da Unicamp, 2001, 279-313p
- [6] Laurito, D. F. et al. **Comportamento em fadiga de baixo ciclo das ligas de alumínio AA6005, AA6063 E AA6351**.
- [7] Luz, Eduardo Rivelino da et al. **Uma nova técnica de otimização multiobjetivo de modelos probabilísticos multivariados de um processo de soldagem MIG em tubos de alumínio AA6063**. 2021
- [8] MatWeb - **The Online Materials Information Resource**. Acesso em 23 de agosto de 2024.
- [9] R.W.Cheary and A. Coelho, **Journal of Applied Crystallography** **25** (1992) 109-121

CHARACTERIZATION OF DEFECTS IN AA6063 ALUMINUM CAST PARTS ABSTRACT

Gravity casting processes are well-established processes where defects are associated with the parameters used and the characteristics involved in filling the mold. In this way, the problems encountered can be related to porosity, shrinkage voids and possible stress cracks. This work aims to contribute to the evaluation of metallurgical defects found in cast samples of the AA6063 aluminum alloy. The samples were produced from an ingot of the alloy which was cast and poured by gravity into green sand moulds with two different configurations, characterized as an open mould and a closed mould. Thermodynamic simulation, computerized microtomography and evaluations by scanning electron microscopy (SEM) and X-ray diffraction (XRD) were carried out. As a result, the work shows the types of defects associated with each mold configuration.

Keywords: AA6063, Thermodynamic simulation, Microtomography, X-ray diffraction.