

TENSÕES RESIDUAIS GERADAS NA FUNDIÇÃO EM AREIA VERDE DA LIGA DE ALUMÍNIO 6063

Maria Cindra Fonseca¹, mcindra@vm.uff.br
Mateus Campos Martins¹, mateuscamos@id.uff.br
Ivan da Costa Figueiredo¹, ivanf@id.uff.br
Victor Tarouquella da Silva do Espirito Santo¹, tarouqs@gmail.com
Cássio Barbosa², cassio.barbosa@int.gov.br

¹UFF – Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, e-mail: mcindra@vm.uff.br

²INT – Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro-RJ.

Resumo: Durante o processo de fabricação por fundição, a combinação dos efeitos gerados pelo gradiente de temperatura na solidificação do material vazado e pelas restrições mecânicas impostas pelo molde, com relação à variação de volume e transformações de fase, são os principais responsáveis pelo surgimento das tensões residuais e definição das propriedades mecânicas finais da peça. Entretanto, poucos são os estudos na literatura que propõem uma avaliação mais detalhada sobre como o tipo e as variáveis do processo empregado influenciam as propriedades do material e a formação de tensões residuais. Dessa forma, o presente trabalho tem como objetivo analisar a influência do emprego de moldes de areia verde aberto e fechado, sob condições idênticas, nas tensões residuais oriundas da fundição por gravidade da liga de alumínio 6063, por difração de raios-X, usando o método do $\sin^2\psi$. Análises microestruturais complementaram o presente trabalho. Os resultados mostraram tensões residuais homogêneas e predominantemente compressivas nas superfícies das amostras fundidas em molde fechado, enquanto que as amostras fundidas em molde aberto apresentaram tensões residuais heterogêneas, com predominância de tensões trativas na superfície superior e compressivas na inferior. Nas amostras em molde fechado a microestrutura se apresentou mais refinada e homogênea, enquanto nas amostras em molde aberto formou-se uma microestrutura mais grosseira.

Palavras-chave: Fundição em areia verde, moldes aberto e fechado, tensões residuais, difração de raios-X, liga de alumínio 6063

1. INTRODUÇÃO

O alumínio é um dos metais mais abundantes na Terra e mais utilizados na indústria devido à sua baixa densidade, boas propriedades mecânicas e fácil reciclagem. A adição de elementos às ligas de alumínio resulta em boas propriedades mecânicas, permitindo grande aplicabilidade em diversos setores, tais como nas indústrias automobilística, aeronáutica, naval, metalúrgica, na construção civil e em diversos outros seguimentos (Kaufman, 2000).

As ligas de alumínio Al-Mg-Si (série 6xxx), largamente utilizadas nesses setores, permitem tratamentos térmicos e possuem boa resistência mecânica e à corrosão, além de boa usinabilidade, sendo a boa resistência mecânica conferida pela formação do composto intermetálico Mg_2Si , responsável pelo endurecimento da liga quando tratada termicamente por meio de solubilização e envelhecimento artificial controlado, provocando crescimento e distribuição uniforme do composto na matriz rica em alumínio (Birol, 2005; Zhong *et al.*, 2014 e Kaufman, 2000).

Muitos dos componentes de alumínio empregados nas indústrias metal-mecânica e aeroespacial são fundidos e, assim sendo, as diversas variáveis do processo de fundição tais como a temperatura, o tempo de solidificação, a geometria das peças e o material dos moldes, assim como a própria escolha do processo e da liga, encontram-se diretamente relacionados às propriedades mecânicas e microestruturais do componente fundido, podendo resultar em trincas e/ou outros defeitos e comprometer a qualidade e a vida em serviço do mesmo.

As tensões residuais (TR) são intrínsecas a todos os processos de fabricação e poucos ainda são os estudos que abordam o surgimento de tensões residuais no processo de fundição. As tensões geradas nesses processos podem se somar as tensões em serviço do material, causando falha prematura dos componentes, caso essas sejam trativas ou ainda garantir uma maior vida em serviço, caso sejam compressivas, principalmente em componentes que trabalham sob regime de fadiga (Withers *et al.*, 2008; Pedrosa *et al.*, 2011). Dessa forma, o conhecimento das tensões residuais se faz necessário para evitar possíveis defeitos e falhas, assegurando uma boa vida em serviço do componente fundido.

Assim sendo, o presente trabalho tem por objetivo analisar a influência do emprego de moldes de areia verde, aberto e fechado, sob condições idênticas, nas tensões residuais oriundas da fundição por gravidade da liga de alumínio 6063.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho foi estudada a liga de alumínio 6063, cuja composição química, obtida por espectrometria óptica, é apresentada na Tab. (1). A Tabela (2) apresenta as propriedades mecânicas da liga. A fundição foi realizada em um forno industrial a diesel, mantido a uma temperatura média de 750 °C, sendo o vazamento nos moldes realizado de forma lenta e manual, com resfriamento ao ar. Os moldes usados foram compostos de areia (85 %) e bentonita (15 %).

Tabela 1. Composição química da liga 6063 (% em peso).

Al	Si	Fe	Li	Mg	Co	Ti
< 96,6	1,04	0,42	0,97	0,34	0,05	0,06

Tabela 2. Propriedades mecânicas da liga 6063.

σ_{LE} (MPa)	σ_{LR} (MPa)	Alongamento (%)
70	130	8

Foram usados modelos em madeira com dimensões de 30 x 30 x 90 mm, evitando-se seções finas. Para estudo do efeito do tipo de molde na geração das tensões residuais foram fabricadas quatro amostras em molde aberto (A), Fig. (1a), e quatro amostras em molde fechado (F), Fig. (1b), totalizando 8 amostras fundidas em areia verde.



Figura 1. Amostras fundidas em (a) molde aberto e (b) molde fechado.

Para a medição das tensões residuais foi utilizado o analisador de tensões Xstress3000, mostrado na Fig. (2), por difração de raios-X. Foi empregado o método do $\sin^2\psi$, utilizando radiação $CrK\alpha$, difratando o plano (222) do alumínio, com ângulo de difração $2\theta = 156,41^\circ$, tensão de 30 kV e corrente de 6,7 mA.

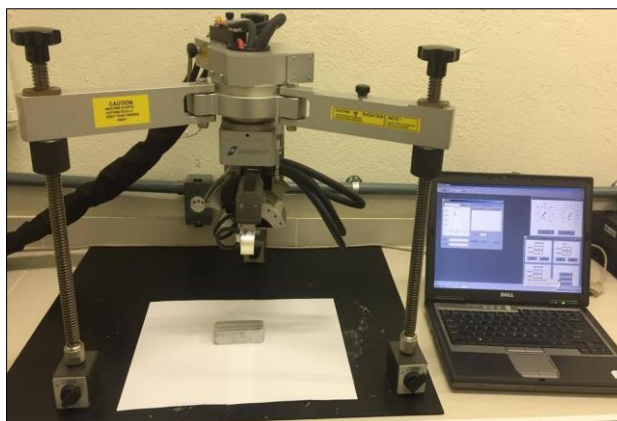


Figura 2. Analisador de tensões Xstress3000, software e amostra analisada.

Inicialmente, para eliminar as irregularidades da superfície das amostras fundidas, optou-se pelo fresamento superficial. As medições foram realizadas na parte central das superfícies superior (S) e inferior (I) de todas as amostras, nas direções longitudinal (L) e transversal (T), conforme ilustrado na Fig. (3).

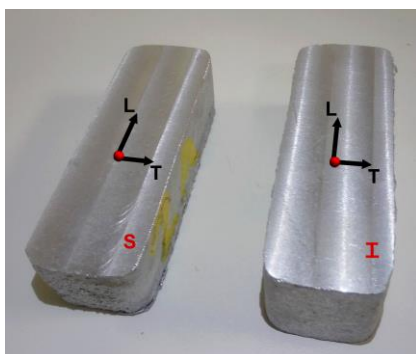


Figura 3. Local e direção das medições das tensões residuais.

A fim de complementar as análises de tensões residuais, foi usada a técnica da remoção de camadas, por polimento eletrolítico, seguido de difração de raios-X para obtenção das tensões residuais em profundidade, no centro da superfície superior na direção longitudinal, em uma amostra em molde aberto e uma em molde fechado. O eletrólito empregado no polimento eletrolítico foi composto por uma solução saturada de cloreto de sódio (NaCl), glicerina bidestilada, álcool etílico e água destilada. A espessura das camadas micrométricas foi aferida por relógio comparador digital.

Após as medições das tensões residuais em profundidade, essas amostras tiveram a superfície superior preparada para análise microestrutural. As superfícies foram lixadas com lixas de 200 a 1200 e posteriormente polidas com pasta de diamante de granulometria 6, 3 e 1 μm , respectivamente. O ataque foi feito com uma solução de ácido fluorídrico (2 %) com água destilada (98 %), pelo tempo de 20 segundos.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela (3) e a Figura (4) mostram os valores das tensões residuais médias nas superfícies das amostras. Pode-se observar que a região superior transversal (ST) das amostras em molde aberto apresentaram tensões trativas de baixa magnitude, em torno de 12 MPa, possivelmente devido ao rechupe formado pela contração de volume na fundição.

Tabela 3. Tensões residuais médias (MPa).

Região	Molde Aberto	Molde Fechado
Superior Longitudinal (SL)	-37	-3
Superior Transversal (ST)	12	-10
Inferior Longitudinal (IL)	-33	-18
Inferior Transversal (IT)	3	0

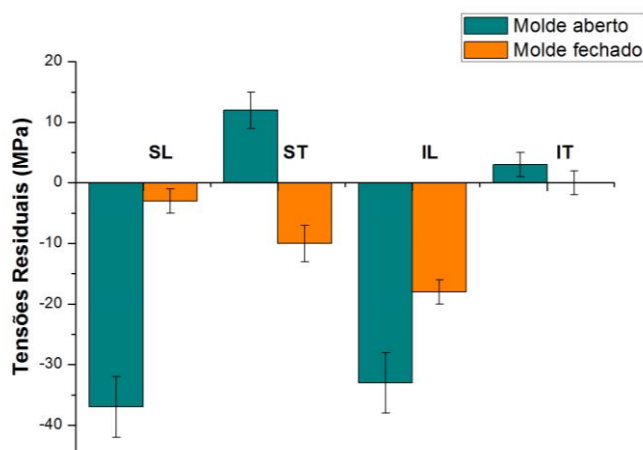


Figura 4. Tensões residuais médias.

A Figura (5) mostra que as médias das tensões residuais longitudinais estão coerentes com os estudos de Keste *et al* (2015) quanto à expectativa da geração de tensões compressivas próximas às superfícies durante a solidificação. As médias das tensões residuais transversais, por sua vez, tendem a apresentar um comportamento trativo, também em concordância com Keste *et al* (2015), devido a uma maior sensibilidade à contração de volume na direção transversal, sendo esse efeito acentuado nas amostras em molde aberto, devido ao rechupe, como já citado.

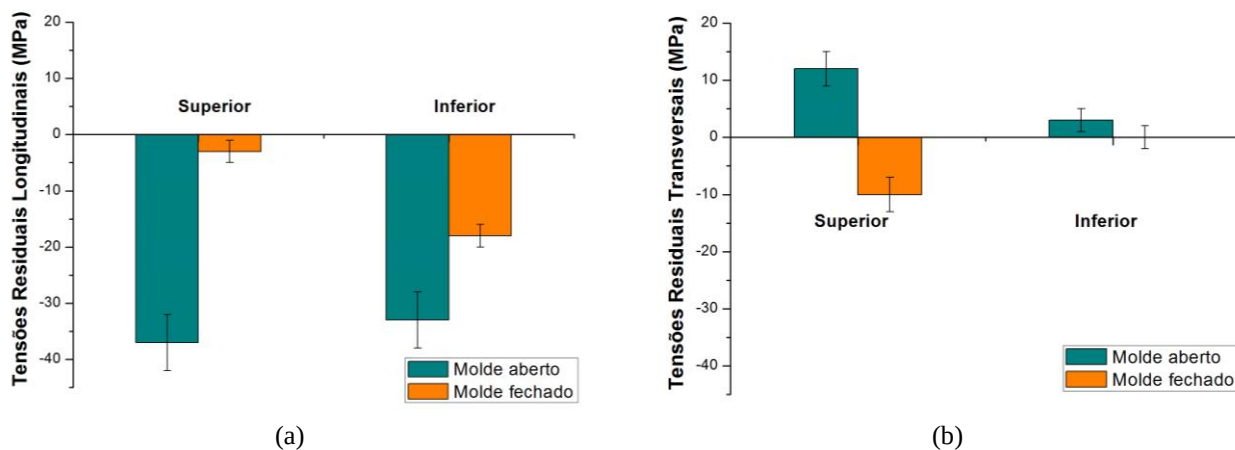


Figura 5. Tensões residuais médias: a) longitudinais e b) transversais.

Também pode ser verificado que os valores médios das regiões inferiores (IL e IT) são semelhantes para ambas as amostras em molde aberto e fechado, o que indica condições semelhantes no fundo dos moldes abertos e fechados.

A Figura (6) mostra os resultados de tensões residuais medidos em profundidade nas amostras em molde aberto e fechado.

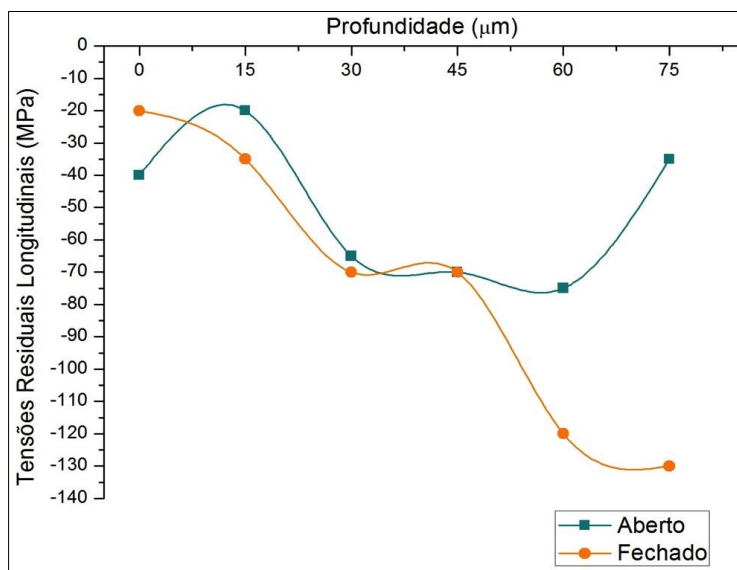
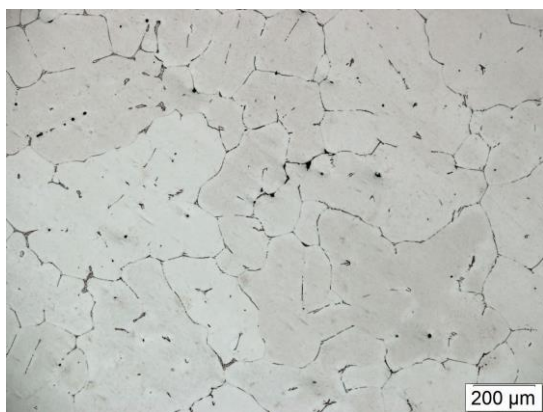


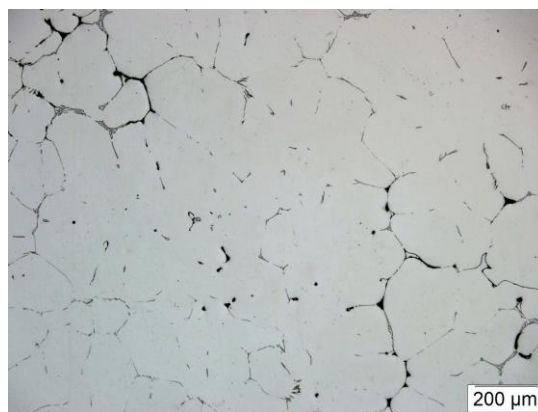
Figura 6. Tensões residuais ao longo da profundidade.

Analisando a Fig. (6) é possível perceber que a amostra em molde aberto apresentou a tendência esperada de tensões compressivas na superfície, apresentando tendência a tensões trativas conforme o aumento da profundidade a partir de 60 μm . Já amostra em molde fechado, entretanto, continuou apontando tensões compressivas crescentes com o aumento da profundidade. Possivelmente, as tensões compressivas se mantiveram até profundidades maiores nos moldes fechados devido à solidificação mais homogênea, havendo menor influência da contração do volume e evitando assim a geração de tensões trativas até as profundidades analisadas.

Com relação à microestrutura, a amostra em molde fechado apresentou, de maneira geral, uma microestrutura mais refinada e homogênea, conforme evidenciado na Fig. (7a), enquanto a amostra em molde aberto apresentou uma microestrutura um pouco mais grosseira, como mostra a Fig. (7b).



(a)



(b)

Figura 7. Microestrutura das amostras (a) em molde fechado e (b) em molde aberto.

Todas as amostras apresentaram porosidades oriundas da fundição. As amostras em molde fechado apresentaram mais poros, sendo esses pequenos e bem distribuídos, conforme Fig. (8). Entretanto, as amostras em molde aberto apresentaram menos poros, porém maiores e concentrados na região central, Fig. (9a), com menos porosidade nas extremidades, Fig. (9b).

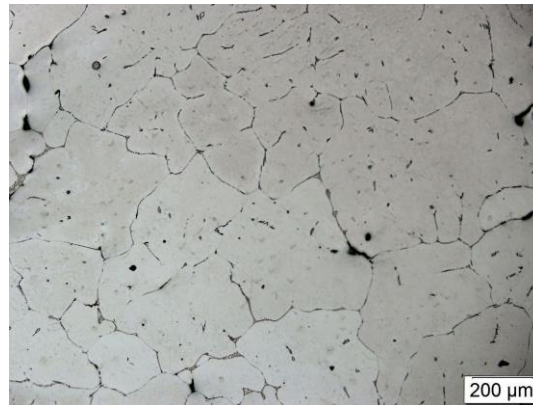
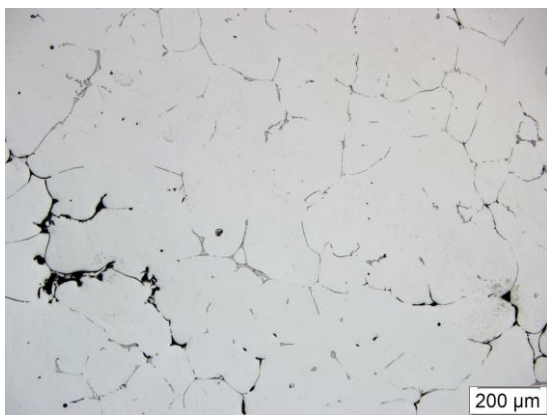


Figura 8. Poros distribuídos uniformemente na amostra em molde fechado.



(a)



(b)

Figura 9. Poros na amostra em molde aberto (a) concentrados no centro e (b) dispersos nas extremidades.

Foi observado ainda, tanto nas amostras em molde aberto como em molde fechado, a presença de algumas regiões com estrutura diferenciada nos contornos de grãos, sendo formada possivelmente por partículas de silício, conforme evidenciado na Fig. (10).

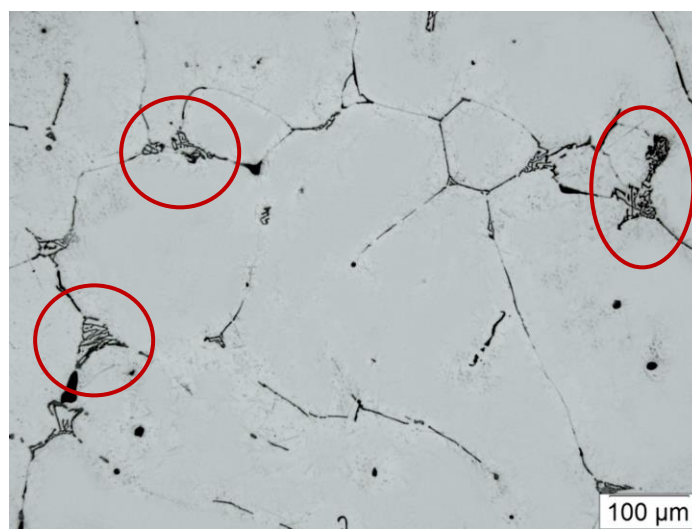


Figura 10. Contornos de grãos com possível concentração de silício.

4. CONCLUSÃO

O presente trabalho, que teve por objetivo analisar a influência do emprego de moldes de areia verde, aberto e fechado, nas tensões residuais oriundas da fundição da liga de alumínio 6063 permite as seguintes conclusões:

1. As amostras fundidas em moldes abertos revelam a influência do rechupe na geração de tensões residuais tratativas ao longo das seções transversais, o que pode contribuir para a abertura e a propagação de trinca de fadiga.
2. Os moldes fechados, por sua vez, mostram melhores resultados, com maior presença de tensões residuais compressivas, que são benéficas para a vida em fadiga do componente fundido.
3. A fundição em molde fechado mostrou ser um processo mais homogêneo, não apresentando tensões residuais tratativas na superfície e até a profundidade de 75 μm analisada.
4. As tensões residuais estudadas descrevem, de maneira geral, tensões compressivas nas superfícies e tratativas nas regiões interiores, provavelmente devido aos fenômenos de solidificação e contração de volume.
5. As tensões residuais longitudinais apresentam resultados mais homogêneos, em todas as medições.
6. As tensões residuais transversais, por sua vez, apresentam resultados heterogêneos, provavelmente devido à restrição imposta pelas paredes transversais do molde durante a solidificação.
7. A microestrutura da amostra em molde fechado mostrou-se mais homogênea e refinada, apresentando, no entanto, maior presença de poros, dispostos uniformemente. De forma contrária, a amostra em molde aberto apresentou uma microestrutura mais grosseira e com menos poros, porém maiores e concentrados no interior.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, à CAPES e à FAPERJ pelo apoio financeiro e à Fundição Barrufão pela fundição das amostras.

6. REFERÊNCIAS

- Birol, Y., 2005, "Pre-aging to Improve Bake Hardening in a Twin-roll Cast Al-Mg-Si Alloy", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 391, pp. 175-180.
- Kaufman, J.G., 2000, "Introduction to Aluminum Alloys and Tempers", Ed. ASM International, Ohio, United States, 243 p.
- Keste, A.A., Gawande, S.H. and Sarkar, C., 2015, "Design Optimization of Precision Casting for Residual Stress Reduction", *Journal of Computational Design and Engineering*, Vol. 3, pp.140-150.
- Pedrosa, P.D., Rebello, J.M.A. and Cindra Fonseca, M.P., 2011, "Residual Stress State Behaviour Under Fatigue Loading in Duplex Stainless Steel", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, Vol. 46, pp.298-303.
- Whiter, P.J., Turski, M., Edwards, L., Bouchard, P.J. and Buttle, D.J., 2008, "Recent Advances in Residual Stress Measurement", *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, Vol. 85, pp. 118-127.
- Zhong, H., Rometsch, P. and Estrin, Y., 2014, "Effect of Alloy Composition and Heat Treatment on Mechanical Performance of 6xxx Aluminum Alloys", *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, Vol. 24, pp. 2174-2178.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

RESIDUAL STRESSES IN GREENSAND CASTING OF 6063 ALUMINUM ALLOY

Maria Cindra Fonseca¹, mcindra@vm.uff.br

Mateus Campos Martins¹, mateuscampos@id.uff.br

Ivan da Costa Figueiredo¹, ivanf@id.uff.br

Victor Tarouquella da Silva do Espirito Santo¹, tarouqs@gmail.com

Cássio Barbosa², cassio.barbosa@int.gov.br

¹UFF – Universidade Federal Fluminense - Departamento de Engenharia Mecânica/PGMEC, Rua Passo da Pátria, 156, São Domingos, Niterói, RJ, Brasil, e-mail: mcindra@vm.uff.br

²INT – Instituto Nacional de Tecnologia, Rio de Janeiro-RJ.

Abstract: Within casting process, the combination of effects driven by the temperature gradient on the solidification of the pouring material and by the mechanical constraints imposed by the mold are the main features in the generation of residual stresses. These effects are related to the volume variation and phase transformations and directly impact on the mechanical properties of the final product. However, very few researches have been concerned with more detailed study of how the type and variables of the casting process influence the material properties and the emergence of residual stresses. Thus, the present work aims to analyze the influence of the use of both opened and closed greensand casting molds, under identical conditions, on the residual stresses formation by gravity casting of 6063 aluminum alloy by X-rays diffraction technique using the $\sin^2\psi$ method. A microstructural characterization complemented the study. The results revealed homogeneous and essentially compressive values of residual stresses in surfaces of closed mold samples, whereas open model samples showed heterogeneous values, with tensile stresses on the upper surface and compressive in the lower ones. In closed mold samples, the microstructure was finer and more homogeneous, whereas in the open cast samples the microstructure was coarser.

Palavras-chave: Greensand casting, open mold casting, residual stresses, X-ray diffraction, 6063 aluminum alloy