

INFLUÊNCIA DO TRATAMENTO TÉRMICO DE HOMOGENEIZAÇÃO SOBRE A MICROESTRUTURA E DESEMPENHO DURANTE EXTRUSÃO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO 6060*

Margareth Almeida Dellamore Pacheco¹

Geraldo Lúcio de Faria²

Fernanda Martins Sousa Dias¹

Resumo

Devido à carência de tarugos de alumínio 6060 com boa qualidade e baixo custo de produção no mercado de extrusão do Brasil, surge a necessidade de encontrar soluções práticas que resultem em um melhor desempenho das ligas na indústria da extrusão. Este trabalho, portanto, tem o objetivo de estudar a influência do tratamento térmico de homogeneização e da taxa de resfriamento pós-tratamento na microestrutura de uma liga de alumínio 6060, assim como as suas implicações na indústria de extrusão. Tarugos cilíndricos da liga de alumínio 6060, com diâmetro de sete polegadas, foram fabricados e submetidos a diferentes ciclos de tratamentos térmicos em um forno industrial do tipo *bambury* com a finalidade de dissolver e homogeneizar as partículas de segunda fase na matriz de alumínio. As variáveis de tratamento térmico investigadas neste estudo foram o tempo de residência e a taxa de resfriamento. Os tarugos termicamente tratados foram, em seguida, amostrados para caracterização microestrutural e para a execução de testes industriais de extrusão. Os resultados obtidos indicaram que existe uma significativa diferença microestrutural entre as amostras, que consistiu principalmente na variação das frações de precipitados de Mg_2Si na matriz. Foi possível concluir que a produtividade na extrusão depende fortemente da fração desses precipitados.

Palavras-chave: Ligas de alumínio 6060; Tratamento térmico de homogeneização; Taxa de resfriamento; Extrusão.

INFLUENCE OF HOMOGENIZATION HEAT TREATMENT ON MICROSTRUCTURE AND PERFORMANCE DURING EXTRUSION OF AN ALUMINUM ALLOY 6060

Abstract

Due to the low availability of aluminum billet 6060 with good quality and low production cost in Brazil market extrusion, there is a need to find practical solutions that result in improvements in extrusion performance of this alloy. This work aims to study the influence of the homogenization heat treatment on microstructure of an aluminum alloy 6060 as well its implications in the extrusion industry. Cylindrical billets of aluminum alloy 6060 with seven inch diameter were manufactured and submitted to different cycles of heat treatment in an industrial Bambury furnace in order to dissolve and redistribute the second phase particles in the aluminum matrix. The evaluated heat treatment parameters were the residence time and cooling rate. The heat-treated billets were then sampled for microstructural characterization and extrusion testing in an industrial scale. The results indicated that there is a significant difference between the microstructural samples, consisted mainly on the variation of Mg_2Si precipitates fractions in the matrix. It was concluded that productivity in extrusion strongly depends on the fraction of these precipitates.

Keywords: Aluminum alloy 6060; Heat treatment homogenization; Cooling rate; Extrusion.

¹ Engenheira Metalurgista, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), EM, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

² Físico, Dr. Professor, Depto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (DEMET), EM, UFOP, Ouro Preto, MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

As ligas de alumínio do grupo 6000 são as mais utilizadas no processo de extrusão devido à facilidade de se deformá-las plasticamente. As ligas 6060, por apresentarem boa ductilidade, são amplamente empregadas em luminárias, portas, janelas, mobília, anodização, objetos decorativos e de proteção.

O tratamento térmico de homogeneização é um processo crítico no processo de produção das ligas de alumínio do grupo 6000, o processo de difusão dos átomos de soluto é fortemente dependente da temperatura e do tempo de residência. Neste sentido, possíveis variações de temperatura no interior do forno podem causar um grande impacto na qualidade dos tarugos, promovendo a homogeneização inadequada ou a re-precipitação indesejada de precipitados intermetálicos [1].

Em escala industrial os fornos de homogeneização possuem zonas quentes e zonas frias. O aquecimento destas zonas é controlado por convecção e, em função do projeto dos fornos, costuma não ser homogêneo. Dessa forma, tarugos próximos das zonas quentes experimentarão um ciclo de tratamento térmico diferente dos posicionados próximos da zona fria. Estas diferenças nos perfis térmicos dos tratamentos podem implicar em variações microestruturais que poderão influenciar as etapas de conformação mecânica da liga. Um exemplo é a variação da fração de precipitados e fases intermetálicas que podem influenciar em processos como o de extrusão [1].

O tratamento térmico de homogeneização para as ligas 6060 consiste em um tratamento de 8 horas a uma temperatura de 580°C. Esse tempo é suficiente para nivelar a distribuição de Mg e Si na matriz e transformar a fase β - Al₅FeSi em placas relativamente pequenas de fase α - Al₅FeSi [2]. O Mg₂Si é o precipitado que se forma nas ligas de alumínio 6060, eles são encontrados como partículas pequenas nas regiões interdendríticas, juntamente com as outras fases (Al-Fe-Si e Al-Mn-Fe-Si). Essas pequenas partículas podem dificultar a deformação durante a extrusão [2-6].

Se a velocidade de resfriamento for muito lenta, pode implicar na re-precipitação de compostos que já foram solubilizados na etapa anterior de homogeneização, a literatura relata que os solutos silício e magnésio são retidos na matriz de alumínio para velocidades de arrefecimento maiores que 500°C/h. Para taxas de resfriamento menores que 250°C/h a precipitação de Mg₂Si é considerável e ocorre uma diminuição da dureza [7].

Neste contexto este trabalho se propôs avaliar a influência do tratamento térmico de homogeneização de resfriamento sobre a microestrutura e desempenho industrial de extrusão de uma liga de alumínio 6060.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O material objeto deste estudo consistiu em ligas de alumínio 6060, cuja especificação química está apresentada na Tabela 1. Essas ligas foram vazadas e submetidas a um tratamento térmico de homogeneização, cuja temperatura de encharque foi de 590±10°C por um período de 7 horas de tratamento.

Tabela 1. Especificação química da liga de alumínio 6060 (% em massa)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti
0,41/0,45	0,17/0,21	0,03	0,05/0,07	0,4/0,44	0,02	0,02	0,02

2.2 Procedimentos Experimentais

Todas as amostras utilizadas no trabalho foram fornecidas pela Empresa Novelis do Brasil LTDA. As mesmas foram retiradas de tarugos de alumínio da liga 6060 de diâmetro de sete polegadas. Os procedimentos experimentais consistiram em duas etapas, ambas foram realizadas industrialmente. O foco da primeira etapa foi avaliar como o tratamento térmico de homogeneização influencia as microestruturas das ligas de alumínio e definir quais parâmetros de tratamento devem ser utilizados. A segunda etapa avaliou como a taxa de resfriamento empregado nos tarugos influenciou os resultados da produtividade líquida na extrusão.

2.2.1 Influência dos tratamentos térmicos de homogeneização sobre a microestrutura

A primeira etapa do trabalho consistiu em testes industriais com o objetivo de avaliar o efeito da posição do tarugo (ciclo de tratamentos térmicos) no forno de solubilização sobre a microestrutura dos produtos. Dessa forma foi possível definir a melhor condição de tratamento térmico que resultava em microestruturas favoráveis a extrusão.

A identificação das amostras homogeneizadas industrialmente foi feita de acordo com a posição delas dentro do forno, são nove pontos distribuídos ao longo do mesmo. A Figura 1 apresenta um esquema representativo da posição dos tarugos.

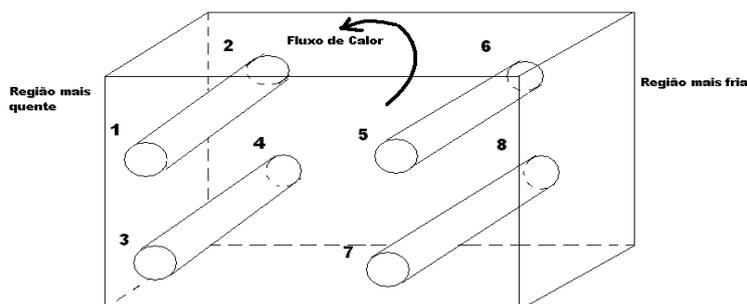


Figura 1. Esquema de distribuição de tarugos dentro do forno de homogeneização.

Os tratamentos térmicos realizados industrialmente consistiram no aquecimento das amostras desde a temperatura ambiente até a temperatura nominal de encharque da liga 6060 ($590 \pm 10^\circ\text{C}$), definida pela literatura. Os tratamentos térmicos foram realizados em fornos industriais denominados “*Bamburys*” com capacidade de 15 toneladas. Os tarugos permaneceram dentro do forno por 7 horas. Após o tratamento térmico, as amostras foram resfriadas em câmaras industriais de resfriamento com rotação de 1200rpm e as taxas de resfriamento foram medidas em cada uma das nove amostras.

Em seguida, as amostras foram submetidas a análises microestruturais ao microscópio óptico (MO) e ao microscópio eletrônico de varredura (MEV). As amostras submetidas a estas análises foram metalograficamente preparadas e atacadas com um reativo constituído por uma solução aquosa com concentração de 0,5% de HF durante 40 segundos.

2.2.2 Testes industriais de extrusão

A segunda etapa do trabalho consistiu em monitorar nove tarugos das ligas de alumínio 6060 (Como representado na Figura 1) durante a sua extrusão. O foco

principal nessa etapa foi avaliar como o resfriamento implicaria nos resultados de produtividade líquida.

Após o vazamento dos tarugos, os mesmos foram submetidos a um tratamento térmico de homogeneização que foi realizado como descrito no item anterior. Após a homogeneização, foi feita uma alteração na câmara de resfriamento com o objetivo de aumentar a velocidade de resfriamento dos tarugos. A câmara teve sua velocidade de rotação alterada de 1200rpm para 1600rpm.

É importante salientar, e que já foi discutido anteriormente, que os tarugos de alumínio submetidos a tratamentos térmicos em fornos industriais, estão expostos a diferentes ciclos térmicos (temperaturas e tempo de encharque), dessa forma, durante o resfriamento, eles estarão também sujeitos a uma taxa de extração de calor diferente, uma vez que a temperatura inicial antes do resfriamento não é a mesma para todas as zonas térmicas do forno.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.2 Efeitos da Posição dos Tarugos no Forno de Solubilização

3.1.1 Tratamento térmico industrial de homogeneização

A Tabela 2 e a Figura 2 apresentam os tempos de encharque alcançados pelos tarugos como uma função de suas posições no interior do forno. Nove tarugos foram monitorados em nove posições diferentes, assim como os intervalos de tempo de exposição à temperatura de 590°C. Os pontos de inspeção estão relacionados com os pontos apresentados na Figura 1.

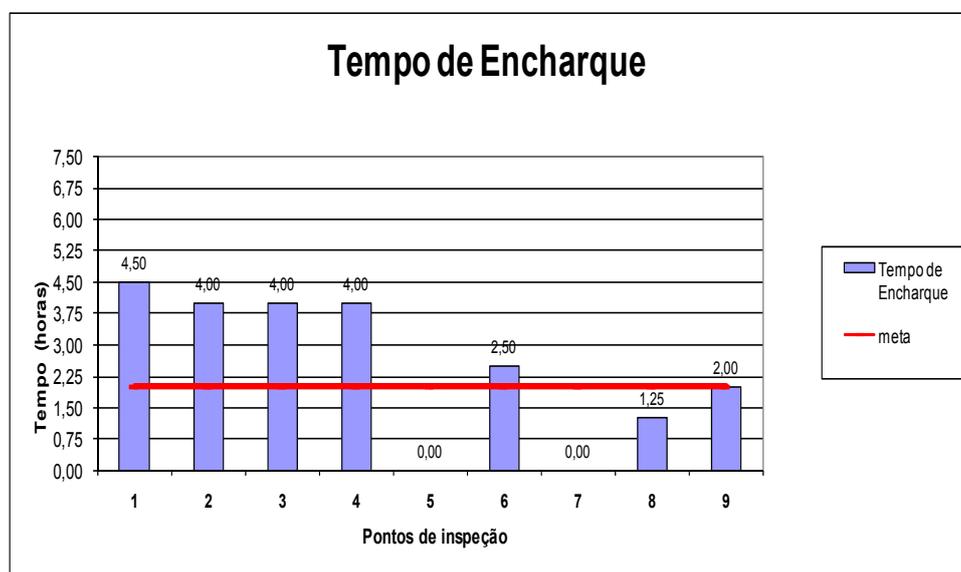


Figura 2. Tempo de encharque em função da posição do tarugo no forno de homogeneização.

Tabela 2. Taxas de aquecimento e tempos de encharque nos 9 pontos de inspeção.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taxa Aquecimento (°C/h)	70,6	72,0	71,6	72,0	70,9	72,1	74	71,1	76,0
Tempo de Encharque (h)	4,50	4,00	4,00	4,00	0,00	2,50	0,00	1,25	2,00

Os resultados obtidos comprovam que a posição dos tarugos no interior do forno tem grande influência sobre os ciclos térmicos experimentados por eles. Os tarugos 5 e 7, por exemplo, que estão em uma região onde o aquecimento é menos eficiente, não atingiram a temperatura de encharque. O tarugo 8 atingiu a temperatura de 590°C, porém permaneceu nela por apenas 1,25h. Segundo Oka et al. (1999) é importante que as partículas de segunda fase estejam completamente solubilizadas após a homogeneização para garantir que os precipitados formados durante o envelhecimento, sejam distribuídos de forma adequada na matriz. Neste contexto, espera-se que tarugos homogeneizados em diferentes regiões possuam diferenças microestruturais e de desempenho em extrusão significativas.

3.1.2 Caracterização microestrutural

a) Microscopia eletrônica de varredura

Para que se possa entender o impacto dos precipitados e fases intermetálicas na extrudabilidade da liga 6060, três das amostras homogeneizadas foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura. A Figura 3 apresenta as micrografias dos tarugos 2, 5 e 8.

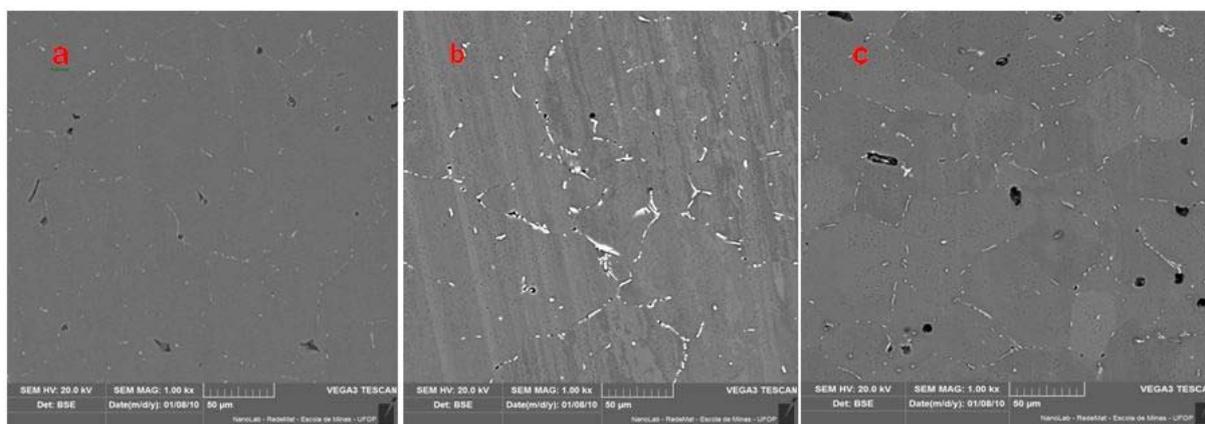


Figura 3. Micrografias (a) do tarugo 2, (b) do tarugo 5, (c) do tarugo 8 - Ataque com solução aquosa de 0,5% de HF - MEV.

As micrografias apresentam uma distribuição bem diferente de segunda fase (precipitados e intermetálicos) entre os tarugos 2, 5 e 8. Pôde-se verificar de forma geral que as amostras situadas em regiões mais quentes do forno (tarugos 1, 2, 3 e 4) apresentaram uma menor fração de precipitados do que as amostras situadas em pontos frios do forno (tarugos 5, 6, 7, 8 e 9). Segundo Couper et al. (1998) a microestrutura de ligas do grupo 6000 consiste basicamente de intermetálicos contendo ferro ao longo dos contornos de grãos e magnésio e silício, não uniforme, distribuído ao longo da matriz. O tratamento térmico de homogeneização é aplicado justamente para reduzir essa não uniformidade nos contornos de grãos contendo esses intermetálicos de ferro, transformando-os em fases mais desejáveis (ex. fase β de Al-Fe-Si em fases α de Al-Fe-Si) e reduzindo a micro segregação, redistribuindo os elementos de liga como Mg e Si em todo o grão.

Os resultados da análise por EDS (*energy dispersive x-ray detector*) apontaram presença de ferro, manganês, magnésio, silício, dentre outros elementos químicos. A Figura 4 apresenta os resultados obtidos para o tarugo 5. Observa-se a presença de ferro e manganês.

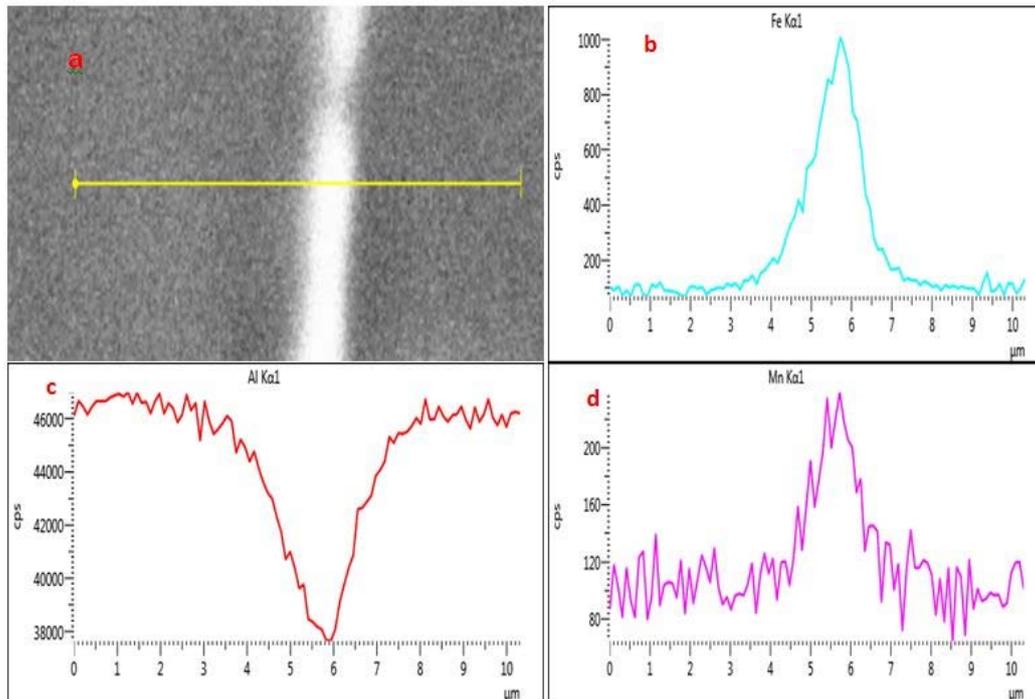


Figura 4 (a) Imagem de Microscopia eletrônica de um precipitado presente no contorno de grão do tarugo 5 - Ataque com solução aquosa de 0,5% de HF (b-d) Espectros EDS indicando presença de ferro e manganês.

É possível identificar na Figura 4, como também já foi sugerido por outros autores como Couper et al. (1998), que a microestrutura de ligas de alumínio 6060, possui intermetálicos de Ferro-Manganês e Ferro- Silício, e precipitados de Mg_2Si distribuídos ao longo da matriz de alumínio.

A Figura 5 apresenta os resultados de uma análise EDS em um precipitado no interior dos grãos do tarugo 5. Nele é possível confirmar a presença do silício.

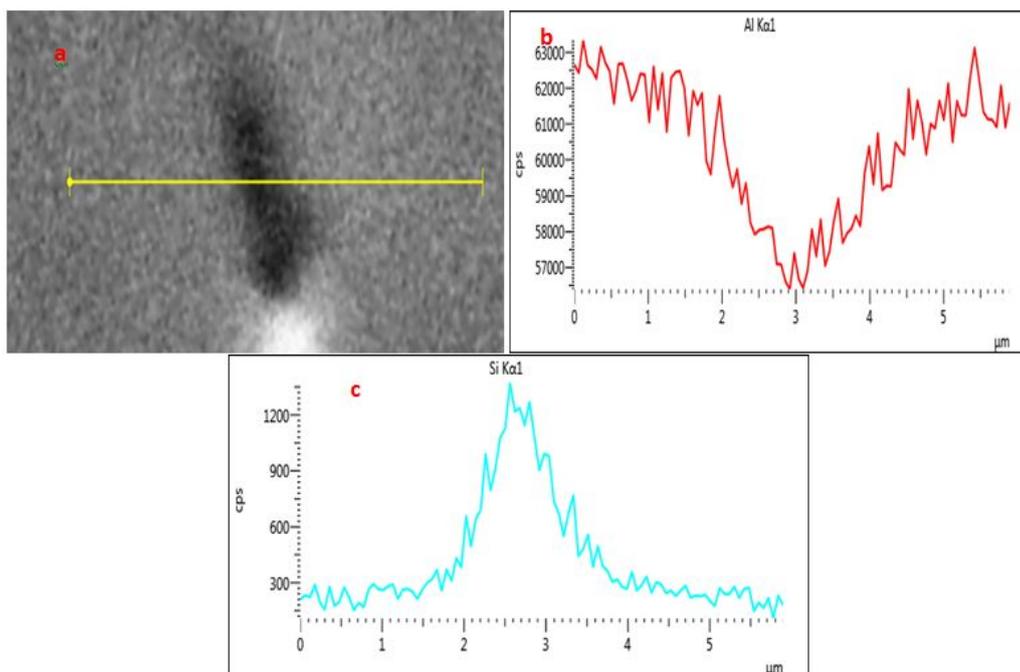


Figura 5. (a) Imagem de microscopia eletrônica de um precipitado presente no interior dos grãos do tarugo 5 (b-c) Espectros EDS indicando a ausência de Al e confirmando a presença de Si.

Baseado nos trabalhos de Couper et al. (1998) e Oka et al. (1999) e nos resultados obtidos no MEV, acredita-se que existam precipitados de Mg_2Si distribuídos ao longo de toda a matriz de alumínio da liga 6060 e intermetálicos nos contornos de grão.

Os precipitados de Mg_2Si apresentam uma morfologia mais arredondada em forma de “pontos pretos” espalhados por toda a matriz de alumínio, podendo também estar presentes nos contornos de grão. Os intermetálicos de ferro estão presentes nos contornos de grão, indicando um processo de nucleação heterogênea [5].

A caracterização microestrutural feita para o tarugo 5, também foi realizada em todas as outras 8 amostras e os resultados obtidos foram semelhantes em relação a presença de fases, porém cada tarugo apresentou quantidades de precipitados e fases intermetálicas diferentes, o que estava diretamente relacionado com sua posição no forno de homogeneização. Tarugos localizados próximos da zona quente apresentaram menores quantidades de precipitados e intermetálicos, enquanto tarugos próximos da zona fria apresentaram maiores quantidades. Isso pode ser verificado de forma mais clara no item a seguir.

b) Microscopia óptica

Os tarugos tratados termicamente nos testes industriais apresentaram três situações distintas em relação à exposição ao calor. A primeira situação é aquela onde os tarugos próximos aos pontos de inspeção do forno industrial (1, 2, 3 e 4), ficaram entre 4 e 4,5 horas na temperatura de encharque. Amostras representativas deste tarugo foram analisadas ao microscópio óptico e a Figura 6 apresenta suas micrografias.

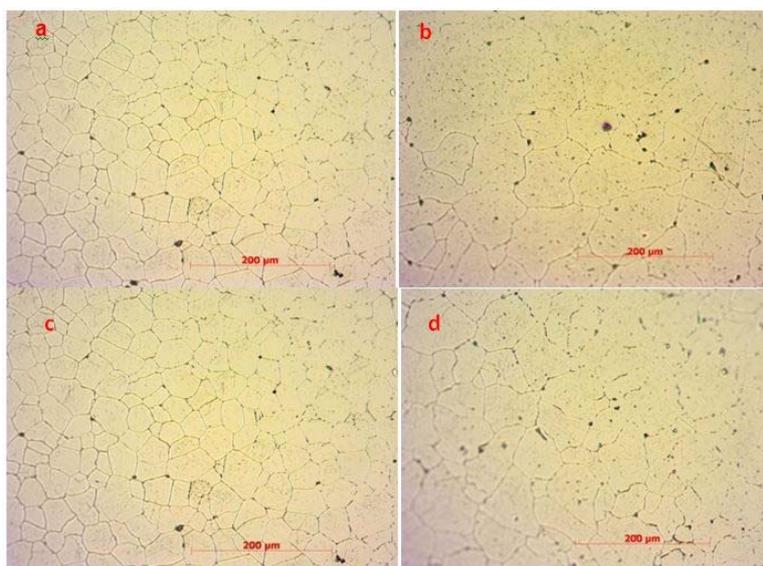


Figura 6. Micrografias (a) do tarugo 1 ; (b) do tarugo 2 (c) do tarugo 3 d) do tarugo 4 - Ataque com solução aquosa de 0,5% de HF - MO -200X.

A segunda situação de análise está relacionada com os pontos de inspeção 6, 8 e 9, onde os tarugos permaneceram na temperatura de encharque entre 1 e 2,5 horas. A Figura 7 apresenta as micrografias desses tarugos.

A terceira situação é referente aos pontos de inspeção 5 e 7 que não atingiram sequer a etapa de encharque. Os tarugos localizados nestas regiões não alcançaram a temperatura de $590 \pm 10^\circ C$. A Figura 8 apresenta as micrografias desses pontos.

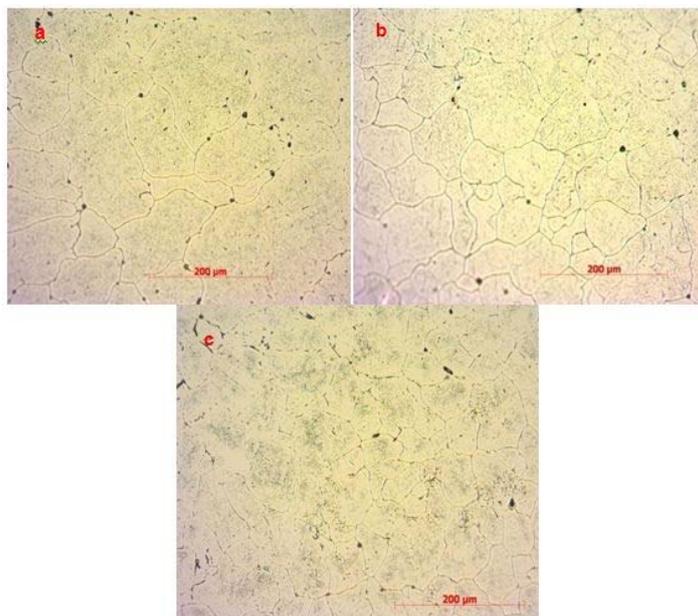


Figura 7. Micrografias (a) do tarugo 6 ; (b)do tarugo 8 (c) do tarugo 9 - Ataque com solução aquosa de 0,5% de HF - MO -200X.

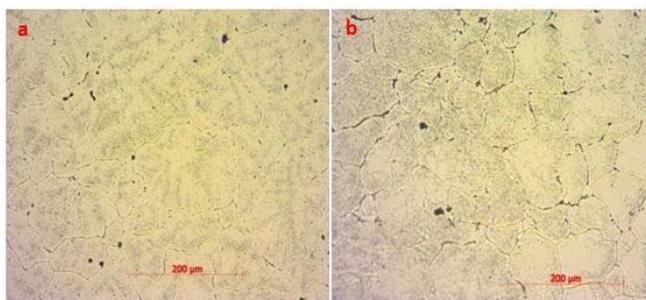


Figura 8. Micrografias (a) do tarugo 5 ; (b)do tarugo 7 - Ataque com solução aquosa de 0,5% de HF - MO -200X.

A partir das análises das micrografias apresentadas, pode-se perceber que as amostras referentes aos pontos 1 a 4, que ficaram entre 4 e 4,5 horas expostas ao encharque, apresentaram pequenas quantidades de Mg_2Si quando comparadas às amostras 5 a 9, que ficaram expostas ao encharque por 2 horas ou menos.

Dessa forma, pode-se concluir que a melhor condição para o tratamento térmico de homogeneização é aquela que oferece condições para que menores frações de precipitados, com maior dispersão na matriz, sejam alcançadas. Esta condição está associada a um tempo mínimo de encharque de 3,5h na temperatura de $590 \pm 10^\circ C$.

3.2. Efeito da Taxa de Resfriamento

Com o objetivo de avaliar o efeito da taxa de resfriamento sobre o desempenho em extrusão da liga de alumínio 6060, nove tarugos foram submetidos a novos tratamentos térmicos de homogeneização em um forno "Bambury". Cada tarugo foi posicionado em diferentes regiões do forno e conseqüentemente submetido a diferentes ciclos de aquecimento. Posteriormente eles foram submetidos a uma câmara de resfriamento com velocidade de rotação de 1600rpm. As Tabelas 3 e 4 apresentam os dados referentes ao tratamento térmico e resfriamento respectivamente.

Tabela 3. Taxas de aquecimento e tempos de encharque nos 9 pontos de inspeção para avaliação do efeito da taxa de resfriamento.

Amostra	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Taxa de Aquecimento (°C/h)	77,7	75,9	78	79,4	76,4	73,1	75,6	71,0	78,4
Tempo de Encharque (h)	1,5	3,5	3,5	3,5	0,00	1,50	0,00	0,00	1,5

A partir das análises da Tabela 3 pode-se perceber que os tarugos 2, 3 e 4 atingiram 3,5 horas de encharque. É importante destacar que não houve tarugos amostrados do ponto 9, e devido a uma falha do equipamento durante o tratamento térmico e resfriamento, não se conseguiu registrar os dados referente ao ponto 8. Os resultados da produtividade do ponto 4 tiveram que ser excluídos, pois o tarugo se encontrava empenado, condição tal que, prejudica a extrusão, diminuindo a produtividade.

A Tabela 4 apresenta os resultados da produtividade líquida e da taxa de resfriamento dos pontos 1, 2, 3, 5, 6 e 7 monitorados durante a extrusão.

Tabela 4. Produtividade líquida e taxa de resfriamento dos pontos 1,2,3,5,6 e 7 monitorados durante a extrusão.

Pontos do forno	Taxa de resfriamento (°C/h)	Produtividade Líquida (Kg/h)
1	283	1260,04
2	226	959,52
3	239	941,28
5	481	1276,22
6	374	1305,36
7	292	1204,00

Por meio da análise dos dados, pode-se perceber que os pontos 2 e 3 que apresentaram a taxa de resfriamento mais baixa, apresentaram também a menor produtividade líquida entre todos os pontos. Os tarugos localizados nos pontos 1, 5, 6 e 7 que atingiram taxas de resfriamento maiores, tiveram uma produtividade também maior.

A produtividade atual de uma empresa de extrusão brasileira utilizando os tarugos da empresa parceira do projeto é cerca de 1200Kg/hora para rotação da câmara de resfriamento em 1200rpm. Com o aumento da rotação para 1600rpm uma produtividade maior foi atingida. Isso ocorre devido ao fato de que, mesmo que o tratamento térmico seja eficiente, solubilizando e homogeneizando as partículas na matriz de alumínio, se o resfriamento não for feito de forma adequada, as partículas anteriormente solubilizadas, serão re-precipitadas aumentando a dureza e diminuindo a ductilidade das ligas [7]. Nesse contexto pode-se observar que quanto menor a fração de precipitados maior a produtividade na extrusão.

4 CONCLUSÕES

A posição do tarugo no forno de homogeneização do tipo “bambury” influencia o ciclo térmico e a microestrutura dos tarugos, uma vez que se observou presença de precipitados e fases intermetálicas em maiores quantidades nos tarugos que ficaram menos tempo expostos a temperatura de encharque.

A taxa de resfriamento imposta aos tarugos após o tratamento térmico de homogeneização influencia a microestrutura e as propriedades mecânicas das ligas 6060, uma vez que o resfriamento mais lento provoca a re-precipitação de elevada fração de partículas de segunda fase. O mesmo não ocorre para resfriamentos mais rápidos. Arrefecimentos rápidos resultaram em ligas 6060 mais favoráveis a extrusão.

As melhores condições de tratamento térmico de homogeneização para as ligas 6060 favoráveis a extrusão é que todos os tarugos fiquem expostos por no mínimo 3,5 horas à temperatura de $590 \pm 10^\circ\text{C}$, e em seguida sejam resfriados rapidamente (entre 300 e 350°C/h para a liga estudada).

A produtividade do processo de extrusão foi maior para tarugos que atingiram maiores valores de taxas de resfriamento na 1ª hora. A alteração de rotação da câmara de resfriamento de 1200rpm para 1600rpm resultou em valores maiores de produtividade líquida.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Empresa Novelis do Brasil LTDA, aos funcionários do setor de Refusão: Leonardo Costa e Juliano Xavier e aos Laboratórios do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais DEMET-EM-UFOP.

REFERÊNCIAS

- 1 Couper, M. Productivity and Quality Improvements by Using Continuous Homogenization for 6000 Alloy Billet. Comalco Research & Technical Support. 1998; 212-216.
- 2 Gao, T.; Wu, Y.; Li, X. E Liu, X. Morphologies and growth mechanism of $\alpha\text{-Al(FeMn)Si}$ in Al-Si-Fe-Mn alloy. 2013; 8-12.
- 3 Korad, T.; Pearce, T. H.; Ponboon M. E Phongsophitanan, U. Quantification of Precipitated Phases in 6063 Aluminum Billet by Image Analysis for Improvement of Homogenization Condition. National Metaland Materials Technology Center.2002; 14-17.
- 4 Wang, H. Q.; Sun, W. L. E Xing, Y.Q. Microstructure Analysis on 6061 Aluminum Alloy after Casting and Diffuses Annealing Process. In: International federation for heat treatment and surface engineering. 2012; 68-75.
- 5 Wang, Y.; Liao, H.; Wu, Y.; E Yang, J. Effect of Si content on microstructure and mechanical properties of Al-Si-Mg alloys. Materials & Design. 2013; 634-638.
- 6 Daoudi, M. I.; Triki, A.; Redjaimia, A.; Eyamina, C. The determination of the activation energy varying with the precipitated fraction of β "metastable phase in an Al-Si-Mg alloy using non-isothermal dilatometry. ThermochimicaActa.2013; 5-10.
- 7 Birol, Y. Optimization of Homogenization for a Low Alloyed AlMgSi Alloy. Materials Characterization. 2013; 69-75.
- 8 Oka, T.; Yanagawa, M. E Hirano, M. The Effect of Homogenizing Heat Treatment Practice on the Productivity of Al-Mg-Si System Alloy. Kobe Steel Ltd. 1999; 157-160.