

ESTUDO DO ENDURECIMENTO POR PRECIPITAÇÃO DE LIGAS ALUMÍNIO-MAGNÉSIO-SILÍCIO EXTRUDADAS¹

Beatriz de Pádua Severino²

Andréia Karabolad²

Kaísa Bortone Salles Couto Machado³

Antonio Augusto Couto⁴

Resumo

Ligas Al-Si-Mg possuem baixo peso específico, com uma relativamente elevada resistência mecânica e alta resistência à corrosão sob a maioria das condições de trabalho. Estas características tornam as ligas de alumínio adequadas à utilização nos mais diversos perfis extrudados. Neste trabalho foram investigadas as melhores condições de endurecimento por precipitação de dois perfis de três das principais ligas de alumínio-magnésio-silício extrudadas. As ligas Al-Mg-Si 6060, 6463 e 6063 foram extrudadas em temperaturas próximas à de solubilização destas ligas, de maneira que após a extrusão os perfis encontravam-se no estado solubilizado. A parte experimental do trabalho consistiu no envelhecimento das ligas Al-Mg-Si 6060, 6463 e 6063 nas temperaturas de 170, 185, 200 e 215 C com tempo variando de 30 minutos a 24 horas. Os resultados do envelhecimento foram obtidos por meio de medidas de dureza Vickers das amostras envelhecidas. As melhores condições de envelhecimento obtidas foram: 185 C por 3 h para os perfis da liga 6060; 185 C por 2 h para os perfis da liga 6463 e 170 C por 4 h para os perfis da liga 6063.

Palavras-chave: Al-Mg-Si; Extrusão; Alumínio; Endurecimento por precipitação.

STUDY OF PRECIPITATION AGING OF ALUMINUM-MAGNESIUM-SILICON EXTRUDED ALLOYS

Abstract

Al-Mg-Si alloys present low specific weight, relatively high strength, and high corrosion resistance under the majority of the work conditions. These characteristics become the adequate aluminum alloys to use in the most diverse of extruded profiles. In this work, the best conditions of precipitation hardening from of two profiles had been investigated of the three main extruded aluminum-magnesium-silicon alloys. The 6060, 6463 and 6063 Al-Mg-Si alloys had been extruded at temperatures near to the solution temperature of these alloys, thus after this procedure the profiles are in the solution condition. The experimental of the work consisted of the aging of the 6060, the 6463 and 6063 Al-Mg-Si alloys at temperatures of 170, 185, 200, and 215 C with time varying of 30 minutes to 24 hours. The results of the aging had been obtained by means of measures of Vickers hardness of the aged samples. The best conditions of aging had been: 185 C for 3 h for the profiles of 6060 alloy; 185 C for 2 h for the profiles of 6463 alloy and 170 C for 4 h for the profiles of 6063 alloy.

Key words: Al-Mg-Si; Extrusion; Aluminum alloys; Precipitation aging.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

² Graduada em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

³ Mestre em Engenharia Metalúrgica e Pesquisadora do Instituto de Pesquisas Tecnológicas e Consultora da Associação Brasileira do Alumínio.

⁴ Professor Doutor da Escola de Engenharia da Universidade Presbiteriana Mackenzie e Pesquisador do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares.

1 INTRODUÇÃO

Uma excepcional combinação de propriedades faz do alumínio um dos mais versáteis materiais na engenharia e em construções. Baixo peso específico, embora algumas de suas ligas tenham resistência superior à do aço estrutural. Alta resistência à corrosão sob a maioria das condições de trabalho. Estas características tornam as ligas de alumínio adequadas à utilização nos mais diversos perfis extrudados. O aumento da utilização de perfis de ligas de alumínio em estruturas estáticas tem aumentado continuamente, principalmente devido à ilimitada variedade de seções transversais que podem ser obtidas. Devido às estruturas de aço ter um custo inicial substancialmente menor, alumínio é somente usado onde baixo peso ou custo de manutenção forem os principais fatores a serem considerados.^[1]

De acordo com dados sobre o comércio internacional de alumínio e suas ligas, estima-se que de 20% a 25% em peso dos produtos são extrudados. Deste total de produtos extrudados, aproximadamente 95% são da série 6XXX, ligas alumínio-magnésio-silício.^[1] A seleção de ligas, combinada com as possibilidades de tratamento térmico, permite infinitas combinações de extrudabilidade, conformabilidade, propriedades mecânicas, dentre outras propriedades. Existem mais de 50 ligas registradas. Neste estudo serão investigadas algumas das ligas Al-Mg-Si mais comumente usadas: 6060, 6063 e 6463. A escolha das ligas Al-Mg-Si 6060, 6063 e 6463 ocorreu devido a grande importância destas ligas no mercado de perfis extrudados e ao fato de poderem ter sua resistência mecânica aumentada consideravelmente devido à precipitação decorrente dos tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento.

O alumínio comercialmente puro tem uma resistência à tração relativamente baixa. Aumentos maiores na sua resistência mecânica podem ser obtidos com pequenas adições de elementos de liga, tais como: silício, cobre, manganês, magnésio, cromo, zinco, ferro, entre outros.^[2] A utilização de perfis extrudados de alumínio praticamente iniciou-se na Segunda Guerra Mundial em componentes aeronáuticos. Atualmente, sistemas de fachada, componentes de carrocerias de ônibus e caminhões, portas e janelas, estruturas aeroespaciais e centenas de outros itens são fabricados a partir de perfis extrudados de alumínio e suas ligas.^[1-6]

Diante da importância no mercado de materiais para engenharia das ligas Al-Mg-Si 6060, 6063 e 6463, neste trabalho estudou-se o envelhecimento destas ligas, visando obter as melhores condições tecnológicas para a formação do precipitado Mg_2Si , responsável pelo aumento da resistência mecânica. Para isso, variaram-se as temperaturas e os tempos de envelhecimento para dois perfis extrudados de cada uma das três ligas investigadas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

As composições químicas das três ligas Al-Mg-Si estudadas (6063, 6463 e 6060) são apresentadas na Tabela 1. O material no estado como recebido encontra-se no formato de perfis extrudados, das três ligas a serem investigadas. Para cada composição foram recebidos dois perfis diferentes, um fechado (perfil 1) e um aberto (perfil 2). Nas Figuras de 1 a 3 são mostrados os dois perfis de cada uma das ligas estudadas. Os perfis foram extrudados em temperaturas elevadas e resfriados com jato de ar forçado ou com *spray* de água, encontrando-se já previamente solubilizados após o processo de extrusão. Os perfis das ligas de alumínio

extrudadas foram cortadas em pedaços de 2 cm de comprimento na cortadeira (“Cut-off”) da Panambra. A seguir, estes pedaços (amostras) foram tratados termicamente para obter diferentes condições de envelhecimento. Os tratamentos térmicos de envelhecimento foram feitos em estufa ao ar nas temperaturas selecionadas.

Tabela 1: Composição química das ligas de alumínio da série 6XXX investigadas neste trabalho.

Elemento	Mg[%]	Si[%]	Mn[%]	Cu[%]	Zn[%]	Fe[%]	Cr[%]	Al[%]
6063	0,45–0,9	0,2–0,6	0,10 máx.	0,10 máx.	0,10 máx.	0,35 máx.	0,10 máx.	Balanço
6463	0,45-0,9	0,20-0,6	0,05 máx.	0,20 máx.	0,05 máx.	0,15 máx.	-	Balanço
6060	0,35-0,6	0,3-0,6	0,10 máx.	0,10 máx.	0,15 máx.	0,10-0,30	0,05 máx.	Balanço

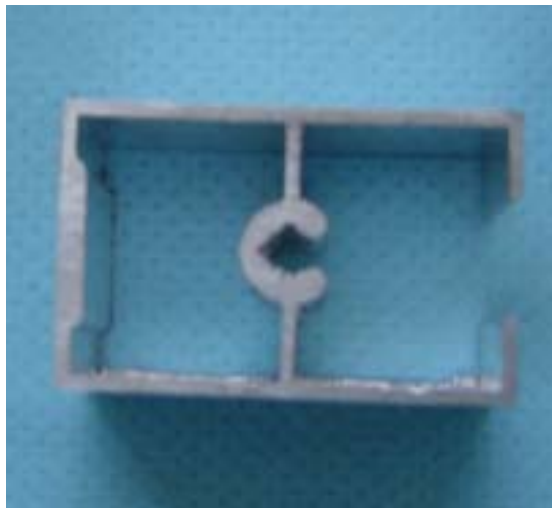


(A)



(B)

Figura 1: Perfis da liga Al-Mg-Si 6060. (A) Perfil 1 (fechado). (B) Perfil 2 (aberto).



(A)



(B)

Figura 2: Perfis da liga Al-Mg-Si 6463. (A) Perfil 1 (fechado). (B) Perfil 2 (aberto).

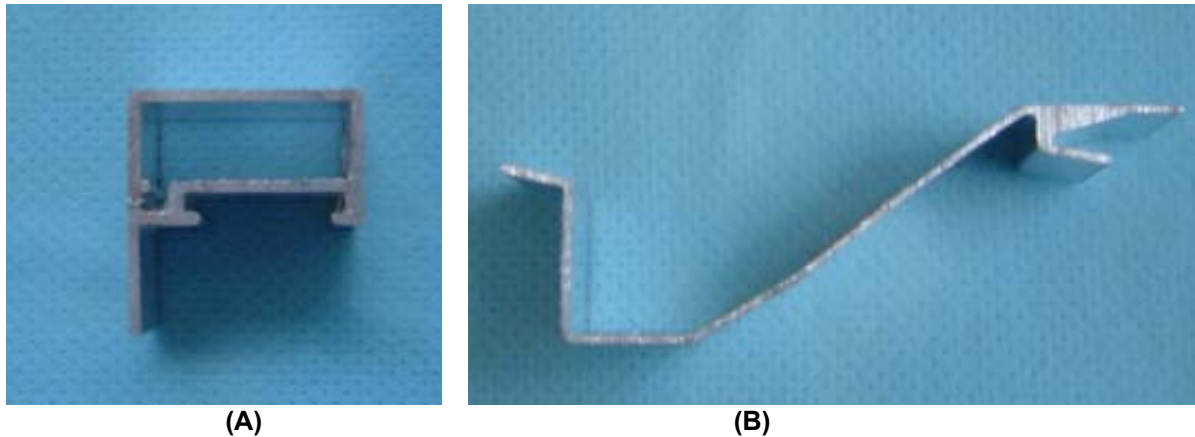


Figura 3: Perfis da liga Al-Mg-Si 6063. (A) Perfil 1 (fechado). (B) Perfil 2 (aberto).

Os tratamentos térmicos de envelhecimento foram realizados nas três ligas estudadas (6060, 6063 e 6463), nos dois perfis de cada liga. As temperaturas de envelhecimento investigadas foram: 170°C, 185°C, 200°C e 215°C, com tempos de tratamento térmico de 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 3 horas, 4 horas, 6 horas, 8 horas, 12 horas e 24 horas, para todas as ligas e perfis. Em todas as condições de envelhecimento foram feitas medidas de dureza Vickers (carga 5 kgf), utilizando para cada perfil um calço de resina para apoio das amostras para evitar erros nas medidas. Para cada amostra foram feitas 3 medidas de dureza em diferentes pontos na superfície do perfil. Nas medidas de dureza foi utilizado um equipamento da marca Wolpert. Foram também executadas medidas de dureza nas amostras solubilizadas. Os resultados obtidos de dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento para cada temperatura foram representados graficamente.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados de dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para a liga de alumínio 6060 para o perfil 1 (fechado) e 2 (aberto) são apresentados nas Figuras 4 e 5. Notam-se destes resultados que os picos de dureza variaram em função da temperatura de envelhecimento e do tipo de perfil, ocorrendo após 6 (perfil 1) e 8 h (perfil 2) de envelhecimento na temperatura de 170°C; 3 h (perfis 1 e 2) a 185°C; 2 (perfil 1) e 4 h (perfil 2) a 200°C e 4 h (perfis 1 e 2) a 215°C. Esta diferença de tempos de envelhecimento para se atingir os picos de dureza devem estar relacionadas aos diferentes posicionamentos das amostras dentro do forno. A liga envelhecida a 200°C por 12 h apresentou um valor de dureza extremamente alto quando comparado com as outras amostras desta liga, para ambos os perfis. Este valor encontrado para esta condição de tratamento térmico não foi possível ser explicado.

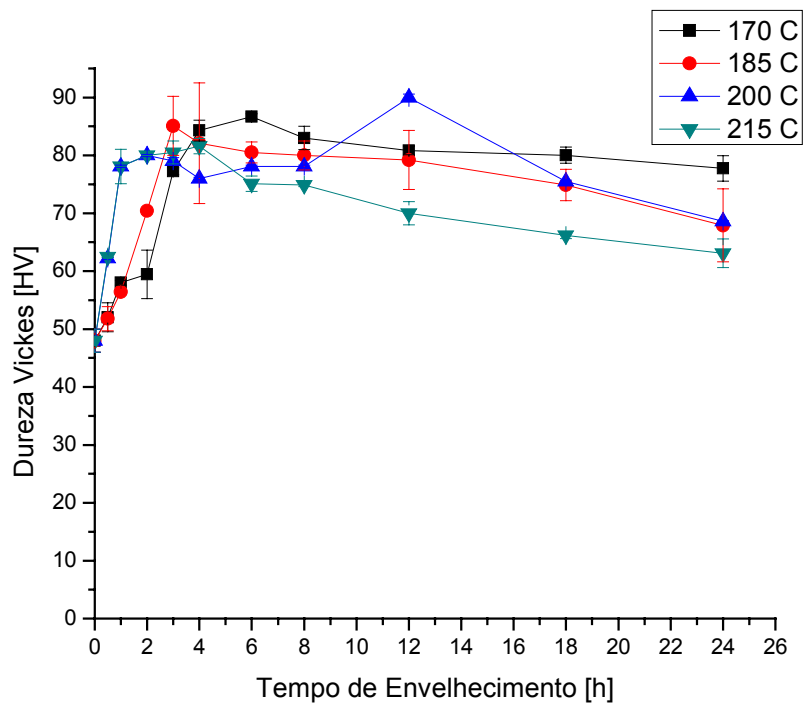


Figura 4: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para o perfil 1 (fechado) da liga de alumínio 6060.

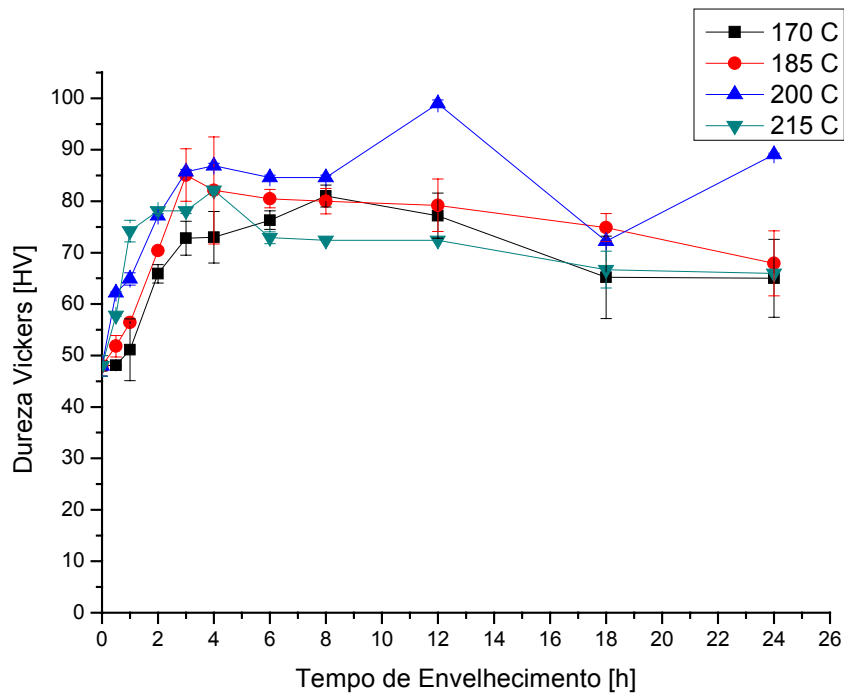


Figura 5: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para o perfil 2 (aberto) da liga de alumínio 6060.

Os resultados de dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para a liga de alumínio 6463 para o perfil 1 (fechado) e 2 (aberto) são apresentados nas Figuras 6 e 7. Notam-se destes resultados que os picos de dureza variaram em função da temperatura de

envelhecimento e do tipo de perfil, ocorrendo após 12 h (perfis 1 e 2) de envelhecimento na temperatura de 170°C; 2 h (perfis 1 e 2) a 185°C; 8 (perfil 1) e 4 h (perfil 2) a 200°C e 3 (perfil 1) e 2 h (perfil 2) a 215°C. Esta diferença de tempos de envelhecimento para se atingir os picos de dureza devem estar relacionadas aos diferentes posicionamentos das amostras dentro do forno.

Os resultados de dureza Vickers em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C e 200°C para a liga de alumínio 6063 para o perfil 1 (fechado) e 2 (aberto) são apresentados nas Figuras 8 e 9. Notam-se destes resultados que os picos de dureza variaram em função da temperatura de envelhecimento e do tipo de perfil, ocorrendo após 4 h (perfis 1 e 2) de envelhecimento na temperatura de 170°C; 6 h (perfis 1 e 2) a 185°C e 12 h (perfis 1 e 2) a 200°C. Não foi feito envelhecimento a 215°C nos perfis da liga 6063 devido à pouca quantidade de amostras disponíveis. Os resultados de dureza decorrentes do envelhecimento dos perfis da liga 6063 foram os que apresentaram maior coerência. Os tempos de pico de dureza para os dois perfis foram os mesmos para cada temperatura de envelhecimento.

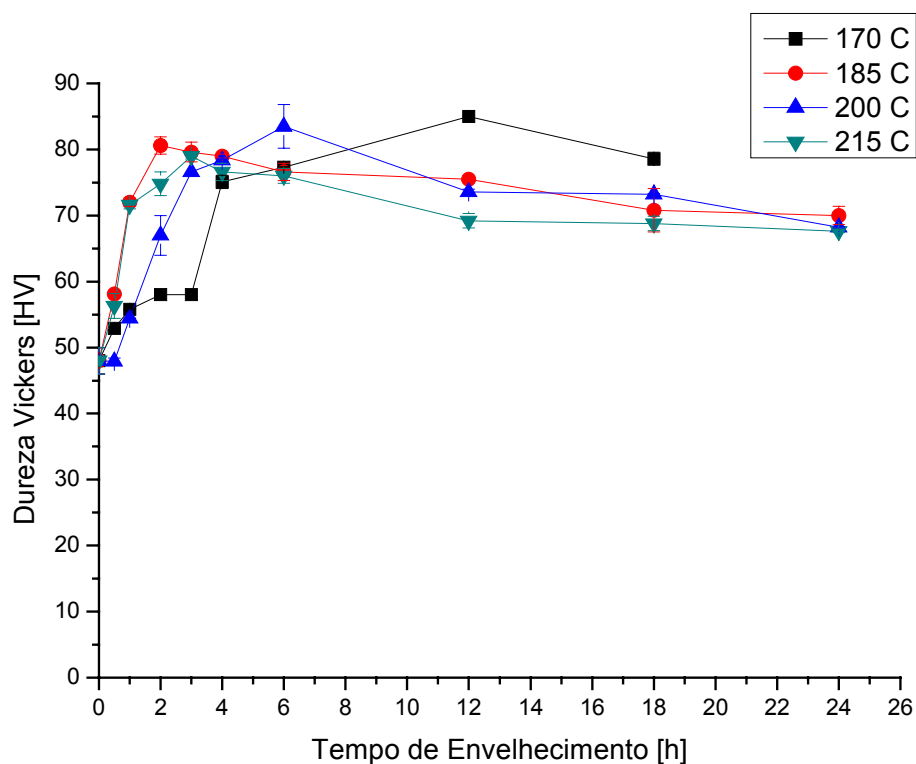


Figura 6: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para o perfil 1 (fechado) da liga de alumínio 6463.

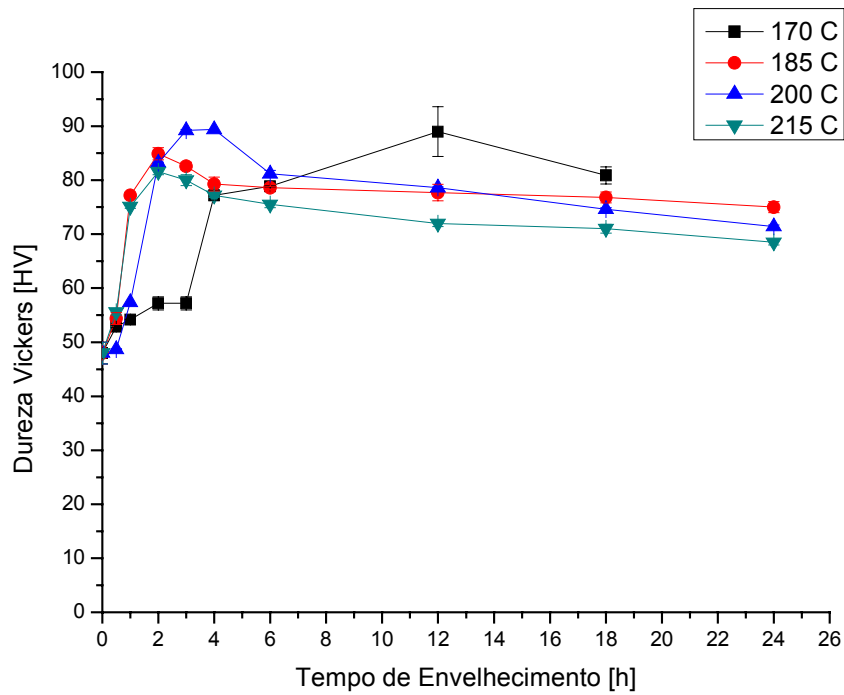


Figura 7: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C, 200°C e 215°C para o perfil 2 (aberto) da liga de alumínio 6463.

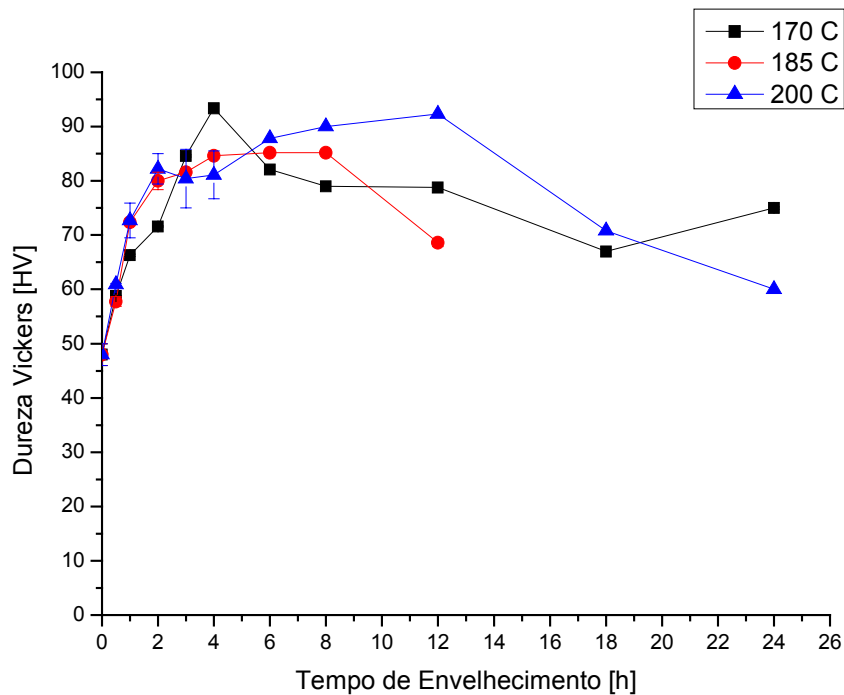


Figura 8: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C e 200°C para o perfil 1 (fechado) da liga de alumínio 6063.

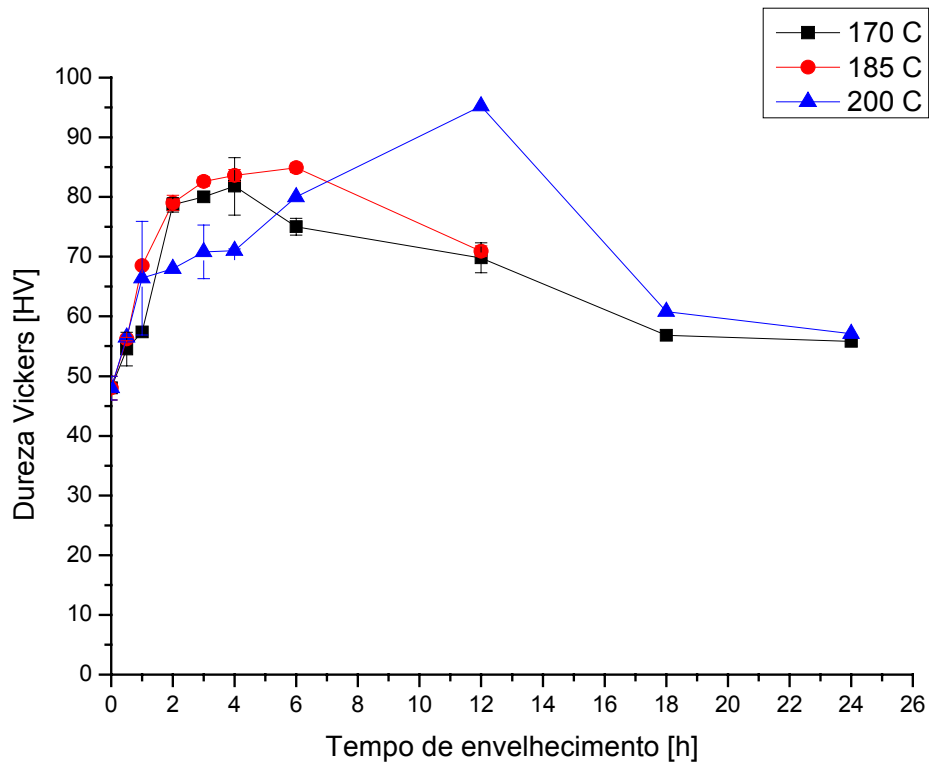


Figura 9: Representação gráfica da dureza Vickers (5 kgf) em função do tempo de envelhecimento nas temperaturas de 170°C, 185°C e 200°C para o perfil 2 (aberto) da liga de alumínio 6063.

4 CONCLUSÕES

Diante dos resultados de dureza em função do tempo de envelhecimento das ligas 6060, 6463 e 6063 pode-se concluir que as melhores condições de endurecimento destas ligas levando-se em consideração o aspecto tecnológico são:

- envelhecimento a 185°C por 3 h para os perfis da liga 6060;
- envelhecimento a 185°C por 2 h para os perfis da liga 6463;
- envelhecimento a 170°C por 4 h para os perfis da liga 6063.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq e à Universidade Presbiteriana Mackenzie pelas bolsas PIBIC das alunas Andréa Karabolad e Beatriz de Pádua Severino. Os autores também agradecem à Associação Brasileira do Alumínio - ABAL e à Alpex pelo apoio e pelo material utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 Guia técnico do alumínio: extrusão: vol. 1 – 3ª ed. – São Paulo : Associação Brasileira do Alumínio – ABAL, 2005.
- 2 ASM HANDBOOK; Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals. The Ninth Edition of Metals Handbook, v. 2, 1991.
- 3 LANGERWEGER, J.; Proceedings of the 3rd Int. Aluminum Extrusion Technology Seminar, vol. 1, p. 41 (1984).

- 4 MUSULIN, I.; DIETZ, D.; Selection of 6XXX Alloys Based on Extrudability, Properties and Final Usage. Proceedings of the Fifth International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Illinois, U.S.A., 1992.
- 5 TRAENKNER, F. O.; Factors Affeting the Physical Characteristics of Aluminum Magnesium Silicon Alloy. Proceedings of the Second International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Georgia, U.S.A., 1977.
- 6 HAINS, R. W.; Precipitation Aging. Proceedings of the Second International Aluminum Extrusion Technology Seminar, Georgia, U.S.A., 1977.