

AVALIAÇÃO DO TEMPO DE ESPERA PARA ENVELHECIMENTO ARTIFICIAL SOBRE A DUREZA ATINGIDA EM LIGA DE ALUMÍNIO¹

Josiane Aparecida da Silva – josianeap.silva@live.com
Gisele Szilágyi (Orientadora) – gisele.szilagyi@mackenzie.br

RESUMO

Neste estudo, o efeito do tempo de espera para o envelhecimento artificial foi avaliado para a liga de alumínio 6060, muito utilizada para a fabricação de perfis extrudados. O material foi submetido a ciclos de tratamentos térmicos característicos do processo de extrusão. Foram conduzidas análises quanto a microestrutura e dureza obtida após diferentes tempos de intervalo entre solubilização e envelhecimento artificial. Os resultados foram relacionados com os mecanismos e sequências de precipitação sugeridos na literatura e mostraram que o envelhecimento natural pode ter tanto efeito positivo quanto negativo no envelhecimento artificial para uma liga com baixa concentração de Mg e Si. Por fim, os dados obtidos dão uma orientação prática de qual intervalo de tempo de espera pode ser favorável ou prejudicial ao ganho de dureza.

Palavras-chave: Envelhecimento artificial. Envelhecimento Natural. Liga 6060

EVALUATION OF THE WAITING TIME FOR ARTIFICIAL AGING ON THE HARDNESS ACHIEVED IN ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

In this study, the effect of waiting time for artificial aging was evaluated for aluminum alloy 6060, which is widely used in the manufacture of extruded profiles. The material was subjected to cycles of heat treatments specific to the extrusion process. Analyzes were carried out for the microstructure and hardness obtained after different times between solubilization and artificial aging. The results were related to the precipitation mechanisms and sequences suggested in the literature and showed that natural aging can have both positive and negative effects on artificial aging for an alloy with low Mg and Si concentration. Finally, the data obtained provide a practical guidance of which waiting time interval can be favorable or harmful to the hardness gain.

Keywords: Artificial aging. Natural aging. Alloy 6060.

¹ Artigo do Trabalho de Conclusão de Curso, Graduação em Engenharia de Materiais, EE, UPM, São Paulo, 2020.

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é um metal de extrema versatilidade e apresenta características como leveza, durabilidade, resistência à corrosão, elevada condutividade elétrica e térmica, podendo ser utilizado em diversos setores da indústria, desde embalagens até veículos aeroespaciais (ABAL, 2019).

As ligas da série 6XXX, que contêm magnésio e silício como principais elementos de liga, combinam muitos aspectos favoráveis, incluindo média-alta resistência mecânica, facilidade de conformação e boa resistência à corrosão (HATCH, 1984); mas, é após o tratamento térmico que são obtidas as melhores propriedades mecânicas para as aplicações estruturais e arquitetônicas (SOARES, 2009). Graças a descoberta do mecanismo de envelhecimento das ligas de alumínio, o desenvolvimento de muitas aplicações atuais na engenharia tornou-se possível (ABAL, 2019).

Os tratamentos térmicos de envelhecimento, aplicados nas ligas de alumínio para extrusão, são procedimentos de grande importância. No entanto, a execução destes tratamentos demanda muita energia para a realização dos aquecimentos e conservação da temperatura, às vezes por longos períodos, o que acarreta aumento do custo do produto. As condições de tratamento, por sua vez, estão diretamente ligadas com o atingimento ou não das propriedades finais desejadas.

Na indústria do alumínio, muitas vezes o envelhecimento artificial não é realizado logo após o resfriamento na saída da prensa de extrusão, havendo um certo tempo em que a liga permanece em temperatura ambiente; nesse período de espera, já há a possibilidade de se iniciar o envelhecimento natural que modifica a microestrutura da liga e a ação do tratamento subsequente (SOARES, 2009).

Sendo assim, é interessante uma investigação da influência dos parâmetros de tratamentos térmicos, principalmente o tempo, para que seja possível atingir uma maior eficiência nos processos e melhor utilização dos recursos.

Este trabalho tem como objetivo geral apresentar de que forma o tempo de espera em envelhecimento natural da liga de alumínio 6060 influencia a eficiência do envelhecimento artificial posterior e determinar como é afetada a dureza de perfis tratados termicamente.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A liga de alumínio 6060 é uma liga tratável termicamente e uma das mais utilizadas da série 6XXX. Os limites de composição química para esta liga encontram-se na tabela 1. As aplicações típicas são na forma de perfis extrudados para janelas, portas, fachadas, móveis, iluminação, e outras aplicações em arquitetura e construção civil. Sua versatilidade deve-se ao fato de combinar diversas propriedades, como boa resistência à corrosão, boa soldabilidade e média resistência mecânica. Além disso, é altamente apropriada para o processo de anodização, o que é benéfico em aplicações que exigem um acabamento de maior qualidade (ALCOA, 2010; HYDRO, 2019).

Tabela 1 – Limites de composição química para a liga 6060

Designação	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	outros
6060	0,30 a	0,10 a	0,10%	0,10%	0,35 a	0,05%	0,15%	0,10%	0,05%
	0,60%	0,30%			0,60%	(máx)	(máx)	(máx)	(cada)

Fonte: ABAL (2011)

São consideradas ligas tratáveis termicamente as ligas que podem ser endurecidas pela precipitação controlada das fases presentes e melhoram suas propriedades mecânicas através da aplicação de um ciclo térmico, que inclui, basicamente, o tratamento de solubilização, o *quench* (resfriamento rápido) e a precipitação (SILVA, 2016).

De modo geral, tratamento térmico se refere às operações de aquecimento e resfriamento de materiais, com o objetivo de provocar mudanças nas propriedades mecânicas, alterar a microestrutura ou modificar o estado de tensões residuais (SOARES, 2009).

Para o processo de extrusão, é preciso realizar quatro etapas de tratamentos térmicos para atingir as propriedades metalúrgicas necessárias na liga de alumínio (MARTINS, 2008):

1. Homogeneização do tarugo
2. Solubilização
3. Resfriamento
4. Envelhecimento (natural ou artificial)

Esses tratamentos podem ser considerados complementares uns aos outros e devem ser seguidos rigorosamente. Individualmente, não garantem que as propriedades desejadas sejam atingidas, mas, se algum falhar, certamente irá prejudicar o processo como um todo (MARTINS, 2008).

A homogeneização consiste em um tratamento de condicionamento da microestrutura de tarugos e placas de ligas de alumínio, visando aumento da trabalhabilidade nos processos de conformação mecânica. A maioria dos elementos de liga presente nas ligas comerciais de alumínio tem maior solubilidade no metal líquido do que no sólido. Devido a este fato, quando o metal começa a solidificar, os elementos são “expulsos” das primeiras frações sólidas (dendritas), indo para a parte do metal que ainda se encontra líquida e, ao se acumular na interface sólido-líquido, formam o que é chamado de microsegregação. A homogeneização é feita pelo aquecimento até próximo a temperatura de fusão, para que haja a redistribuição dos elementos de liga na solução sólida (ABAL, 2011).

Durante a homogeneização das ligas da série 6XXX, ocorrem vários processos simultaneamente, relacionados aos compostos com magnésio, silício e ferro. Há a dissolução dos precipitados β -Mg₂Si e a transformação do composto β -AlFeSi (forma de lâmina) em partículas de α -AlFeSi esferoidais. Essas transformações são muito importantes para melhorar o processamento termomecânico, já que as partículas em forma esferoidais beneficiam a ductilidade, e a dissolução do

Mg₂Si poderá potencializar o efeito do envelhecimento do perfil extrudado (MARTINS, 2008; ABAL, 2011).

A solubilização, como o próprio nome já diz, visa maximizar a dissolução dos precipitados na matriz de alumínio, de forma a obter uma solução sólida supersaturada - SSSS (AGUIAR, 2016). Esse tratamento térmico é a primeira etapa do processo de endurecimento por precipitação e consiste em aquecer a liga a uma temperatura elevada entre as linhas *solvus* e *solidus* do diagrama de fases, mantendo-a nessa temperatura por um período determinado para que ocorra a difusão dos elementos (MAIA, 2012).

Uma característica interessante do processo de extrusão a quente da liga 6060 é que a temperatura atingida durante a conformação mecânica já é suficiente para promover a solubilização na própria prensa, eliminando a necessidade de uma etapa a mais em forno (ABAL, 2011).

Após atingida a solubilização, é preciso garantir que a solução sólida supersaturada seja conservada em temperatura ambiente. Para isso, é realizado um resfriamento rápido e sem interrupções. Estas são as condições ideais para o envelhecimento que irá ocorrer posteriormente (MAIA, 2012).

A última etapa de tratamento é o envelhecimento. A finalidade de se realizar este tratamento é garantir à liga uma maior dureza e resistência mecânica (LIMA, 2012). O aumento da resistência da liga se dá a partir da formação de uma distribuição de partículas de segundas fases na matriz de alumínio, constituindo barreiras à movimentação de discordâncias durante a deformação (SZILÁGYI, 2002). A diminuição de energia do sistema para chegar ao estado de equilíbrio é a força motriz para a precipitação dessas partículas de segundas fases, uma vez que, após o resfriamento rápido, a liga encontra-se num estado metaestável de elevada energia (MAIA, 2012).

Para as ligas de alumínio contendo magnésio e silício, a sequência de precipitação inclui a formação de aglomerados/co-aglomerados de Mg e Si e precipitados semicoerentes com a matriz. Esta sequência está descrita a seguir e pode ser considerada uma das sequências mais complexas de ligas endurecíveis por envelhecimento (TOTTEN; MACKENZIE, 2003):

SSSS → Aglomerados independentes/co-aglomerados de átomos de Mg e Si → zonas de Guinier-Preston (GP) → β'' → β' → β (Mg₂Si)

De acordo com Totten e Mackenzie (2003), os aglomerados são formados rapidamente logo após o resfriamento e, devido a isso, o excesso de silício nos aglomerados diminui a solubilidade do Mg₂Si, aumenta a taxa de precipitação e promove a formação das zonas GP. As zonas GP, neste caso, são formadas aleatoriamente na matriz, com uma composição de Mg:Si = 1 e são parcialmente coerentes, diferentes das zonas GP formadas na maioria das ligas de alumínio.

Os precipitados β'' têm forma de agulhas de cerca de 4 nm de diâmetro, comprimento até 300 nm e são quase que totalmente coerentes com a matriz, sendo este o precipitado mais efetivo para o aumento de dureza (SOARES, 2009).

Os precipitados β' também tem o formato de agulha, porém são maiores se comparados a β'' . São semicoerentes com a matriz e têm fraca contribuição para o endurecimento (AGUIAR, 2019; SOARES, 2009).

A fase de equilíbrio β forma os maiores precipitados, na forma de plaquetas ou cubos, o que não contribui, em qualquer morfologia, para o endurecimento (AGUIAR, 2019; SOARES, 2009).

As propriedades obtidas após o envelhecimento dependem de algumas variáveis, tais como a quantidade de Mg_2Si , o excesso de Si na liga, condição de resfriamento após solubilização, duração do tempo de espera, taxa de aquecimento do envelhecimento artificial, bem como a temperatura e duração do envelhecimento artificial (TOTTEN; MACKENZIE, 2003).

Este estudo tem como foco o efeito da variável tempo de espera entre a solubilização e o envelhecimento. Segundo Totten e Mackenzie (2003), se a duração da espera é curta, então relativamente uma grande concentração dos elementos de liga continuam em solução sólida. Durante o envelhecimento em temperaturas mais altas, não haverá mais novas nucleações e os precipitados se formarão no local das zonas geradas durante este curto tempo em envelhecimento natural. Assim, uma distribuição fina e de muitas partículas se desenvolverá sucessivamente com o aumento do tempo de envelhecimento. Se a duração da espera for longa, aumenta-se o número de zonas e a concentração dos solutos disponíveis para o crescimento dos precipitados diminui. Como resultado, pode se considerar que esta liga permaneça subenvelhecida, pois se faz preciso um longo tempo de envelhecimento artificial para chegar tanto no tamanho de precipitado desejado, quanto na concentração de Mg adequada para o sistema. Isso porque se faz necessária a dissolução de algumas zonas, o que acontece de forma muito lenta devido à forte ligação entre os átomos de Mg e Si. Então, supõe-se que quanto maior o tempo de espera, maior a estabilidade das zonas formadas e mais difícil é dissolvê-las.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, foi reproduzida em laboratório a aplicação dos tratamentos térmicos típicos do processo de extrusão em uma amostra da liga 6060, seguida de ensaios de dureza e metalografia para verificar a eficiência dos tratamentos. O material utilizado para as análises foi um disco de alumínio da liga 6060 na condição como-fundida, retirado de um tarugo fabricado por lingotamento DC.

O estudo consiste em avaliar o tempo de espera para o envelhecimento artificial. Assim, os testes foram feitos mantendo constantes as condições de solubilização e envelhecimento, alterando apenas a duração do intervalo entre estes tratamentos.

Todos os equipamentos utilizados pertencem à Universidade Presbiteriana Mackenzie e os procedimentos foram todos realizados nas dependências dela.

O disco de alumínio se encontrava na condição bruta-de-fundição. Isso significa que a composição química não estava homogênea e havia a presença de compostos grosseiros na estrutura. Logo, assim como é feito na indústria de extrudados, foi necessário realizar os tratamentos térmicos a partir da homogeneização.

Foi cortado em serra de fita vertical aproximadamente $\frac{1}{4}$ do disco, quantidade de material suficiente para a realização de todos os procedimentos. Desta parte, uma pequena amostra foi retirada para fazer o ensaio de metalografia do material bruto-de-fundição e o restante foi tratado em forno tipo mufla, do fabricante Brasimet, a 585°C por 4 horas. Após o resfriamento ao ar, outra pequena amostra foi retirada para novo ensaio de metalografia para comprovar que houve a homogeneização.

3.1 ANÁLISE METALOGRAFICA

Os ensaios de análise metalográfica foram realizados antes e depois da homogeneização, para verificar se realmente houve a quebra e esferoidização do filme interdendrídico de composto à base de ferro na microestrutura. Estes precipitados primários presentes na estrutura bruta-de-fundição causam efeitos adversos para a conformação mecânica, como a diminuição da ductilidade a quente, aumento da tensão de deformação e aumento na pressão necessária para deformação por extrusão (SZILÁGYI, 2002).

Para o preparo das amostras, foi feito o lixamento das superfícies correspondentes à seção transversal do disco inicial, com lixas d'água de numeração 320, 600 e 1200, nesta ordem. Em seguida, foi realizado o polimento com pasta de diamante de $1\mu\text{m}$. Para revelar a microestrutura, foi feito o ataque com reagente Keller (mistura de ácido fluorídrico, ácido clorídrico, ácido nítrico e água destilada) por aproximadamente 10 segundos. As superfícies atacadas foram lavadas com água destilada e álcool etílico, secas com soprador térmico e depois observadas em microscópio óptico Olympus modelo BX 60M.

3.2 CORPOS-DE-PROVA

De modo a possibilitar a avaliação de tempos de espera diferentes entre a solubilização e o envelhecimento artificial nas próximas etapas do estudo, o material já homogeneizado foi cortado, com serra de fita, em pequenos blocos retangulares com, em média, dimensões de $1,4 \times 1,4 \times 3$ cm.

Foram designados 4 corpos-de-prova (CPs) para os tratamentos térmicos. O Quadro 1 relaciona a identificação dos CPs com a condição avaliada.

Quadro 1 – Relação dos corpos-de-prova avaliados

CP	Condição
EA-0	Sem tempo de espera
EA-2	Tempo de espera de 2 h
EA-4	Tempo de espera de 4 h
EA-6	Tempo de espera de 6 h

Fonte: a autora.

3.3 SOLUBILIZAÇÃO E ENVELHECIMENTO

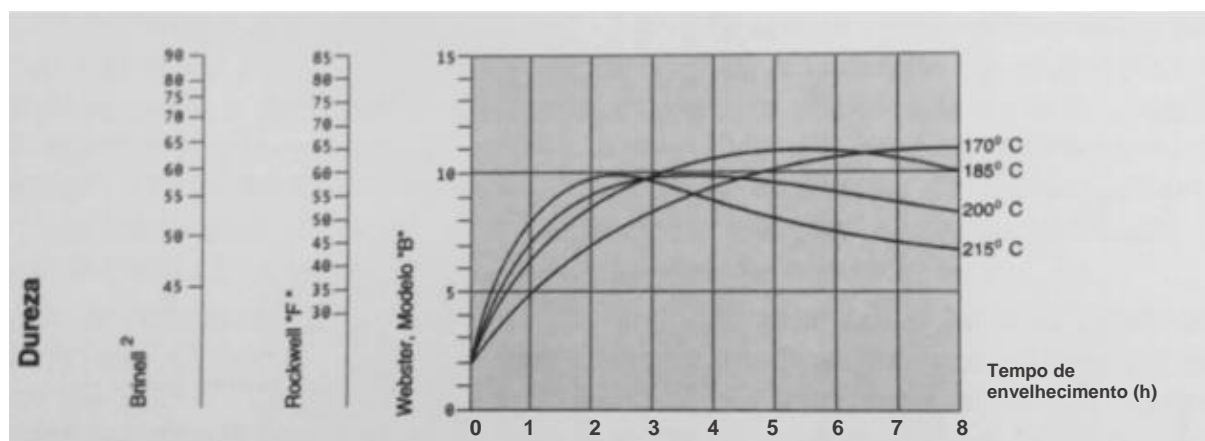
Os tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento são os pontos-chave deste estudo. As condições a que as amostras foram submetidas se enquadram em uma têmpera do tipo T6, onde o material é solubilizado e envelhecido artificialmente.

Conforme mencionado anteriormente, os parâmetros para solubilização e envelhecimento foram constantes para todas as amostras, variando apenas o tempo de espera entre um tratamento e outro.

As solubilizações foram feitas colocando a amostra em questão no forno do tipo mufla a 500°C pelo período de 1 hora. Logo após a retirada do forno, cada amostra passou por um resfriamento rápido em água para manter os elementos de liga em solução sólida supersaturada, condição necessária para ocorrer o endurecimento por precipitação. As contagens do tempo de espera de cada amostra foram iniciadas logo depois do resfriamento. Quando os tempos de espera em temperatura ambiente foram atingidos, as amostras foram transferidas para uma estufa, onde foram envelhecidas artificialmente à 185°C por 5 horas. Estes parâmetros de tratamento foram escolhidos com base nas curvas de envelhecimento da liga 6060, mostradas na Figura 1, onde nota-se que, para a temperatura de 185°C, é atingido o maior valor de dureza possível em menor tempo.

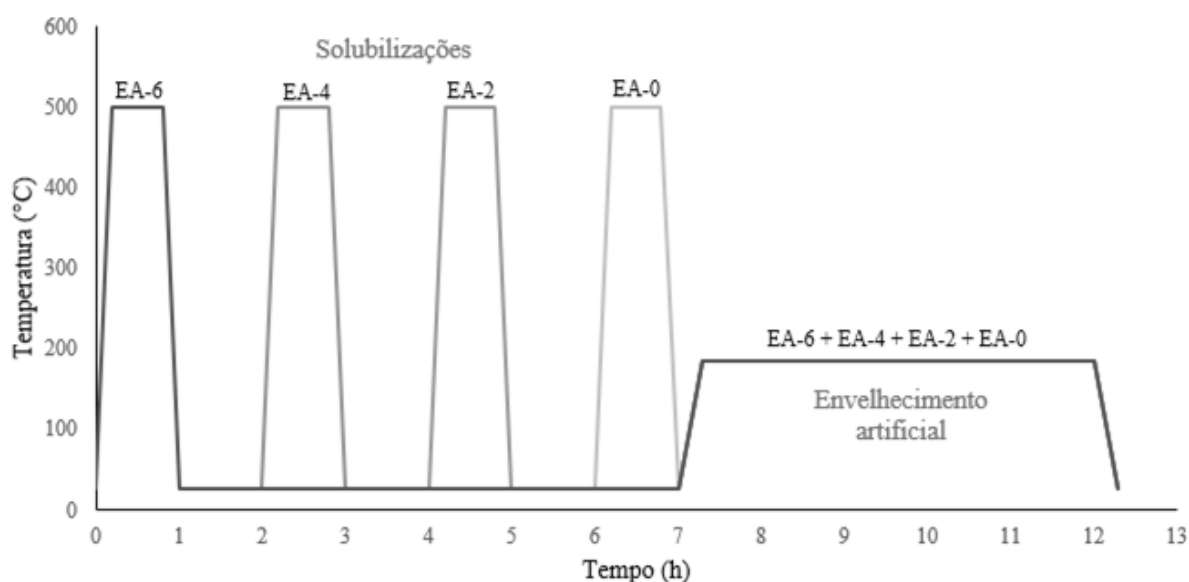
Para realização das solubilizações e envelhecimento artificial, foi definido um esquema de tempo e temperatura como guia para o início de cada solubilização, de forma a garantir que os CPs fossem colocados juntos no forno para o envelhecimento artificial. Assim, foi preciso começar pelo teste com maior duração e continuar com as solubilizações das demais amostras, enquanto o tempo da amostra anterior já estava sendo contado. O objetivo deste esquema, mostrado na Figura 2, foi de promover uma situação mais próxima da que ocorre na indústria, onde os perfis são produzidos e ficam em espera até que seja formada a carga que irá para o forno de envelhecimento.

Figura 1 – Curvas de envelhecimento da liga 6060.



Fonte: ABAL (2011).

Figura 2 – Esquema de tempo x temperatura para tratamentos dos CPs.



Fonte: a autora.

3.4 ENSAIOS DE DUREZA

De modo a avaliar o endurecimento da liga submetida a diferentes condições, foram realizados ensaios de dureza depois do tratamento de envelhecimento.

Após os CPs serem retirados do forno de envelhecimento, foram deixados resfriando ao ar até a temperatura ambiente. Em seguida, foram lixados para obtenção de superfícies planas para os ensaios.

O método utilizado foi o ensaio de dureza Brinell. Este ensaio consiste em pressionar uma esfera de aço endurecido sobre a superfície do corpo-de-prova, com a aplicação de uma carga por alguns segundos e medindo-se em seguida o diâmetro da impressão. O número ou índice de dureza Brinell - HB (do inglês *Hardness Brinell*) é a relação entre a carga aplicada e a área da calota esférica

impressa no material (ABAL, 2011). Como a área da calota depende da profundidade da impressão e este é um valor muito pequeno e difícil de ser medido, a dureza é obtida através de cálculo, utilizando a Equação 1:

$$HB = \frac{2F}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

onde F é a carga aplicada, D é o diâmetro da esfera e d é o diâmetro da impressão medido durante o ensaio.

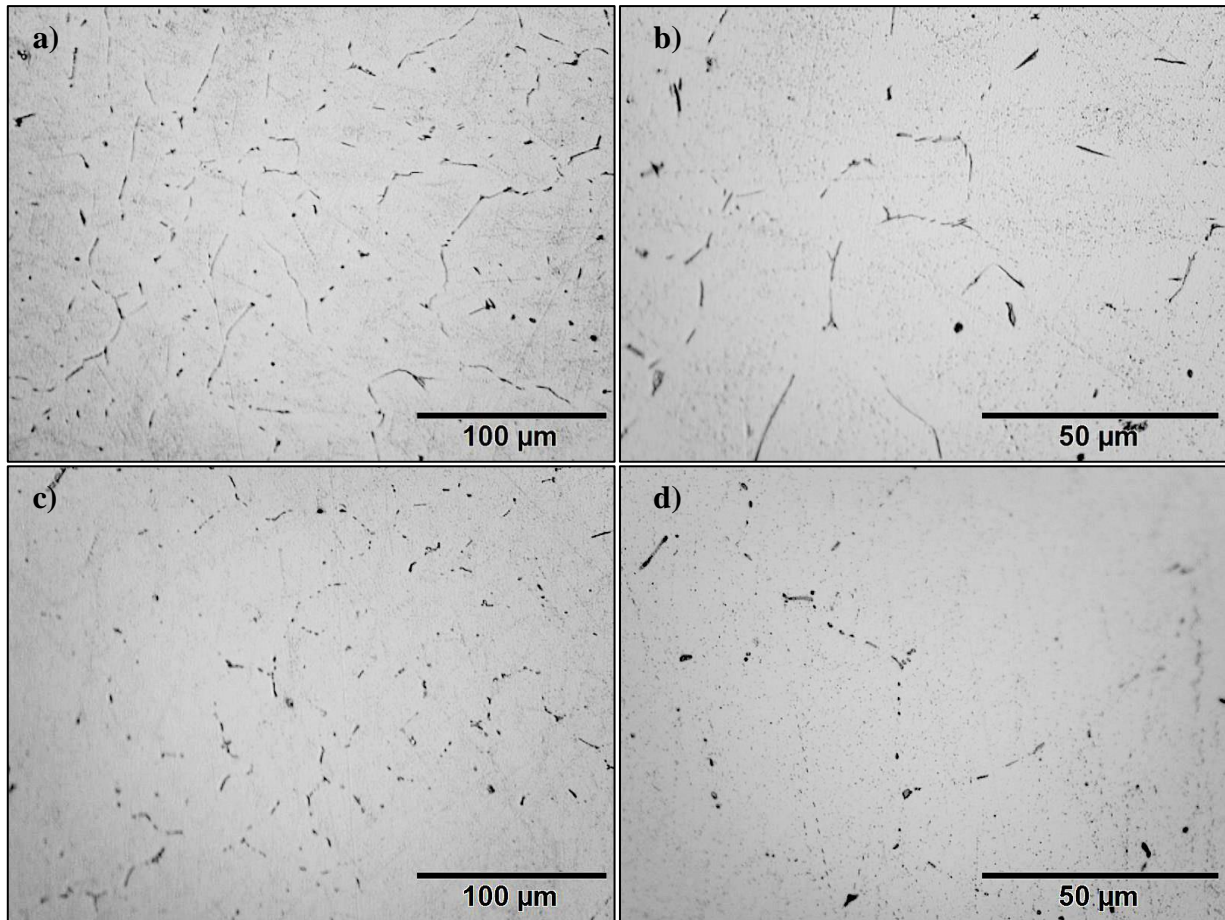
Os parâmetros do ensaio foram definidos através de um teste preliminar em que foram aplicados, na mesma liga de alumínio 6060, alguns valores de carga e observado o tamanho, profundidade e formato das impressões na superfície. O valor mais adequado foi aquele que permitiu fazer várias indentações de calotas uniformes e com uma distância mínima entre elas de duas vezes o diâmetro da impressão. Os ensaios foram então realizados com uma esfera de 2,5 mm, com carga de 15,625 kgf por 30 segundos, e foram feitas 6 medições em cada amostra para garantir a confiabilidade nos resultados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

De modo a avaliar que o material foi devidamente homogeneizado, foi realizada uma análise metalográfica. A figura 3 mostra os microconstituintes presentes no material antes e depois da homogeneização.

A partir das micrografias obtidas, é possível notar que a fase mostrada na figura como mais escura tinha um formato de filme quase contínuo e após o tratamento térmico passou a ter o formato de partículas esferoidais. Isso indica que houve a transformação estrutural dos compostos a base de ferro, que atrapalhariam a extrusão caso permanecessem como filme quase contínuo, e que os precipitados de β -Mg₂Si formados durante a solidificação do metal foram dissolvidos, ou seja, a liga se tornou mais homogênea e teve a ductilidade aumentada para o processo de conformação. Como este estudo foca nas transformações microestruturais relacionadas à temperatura, não foi necessário simular nos CPs as conformações mecânicas do processo de extrusão. Sendo assim, após a homogeneização, foram realizados os demais tratamentos térmicos e os ensaios de dureza.

Figura 3 – Micrografias obtidas para a liga 6060 a) bruta-de-fundição com aumento de 200x, b) bruta-de-fundição com aumento de 500x, c) homogeneizada a 185°C/4h com aumento de 200x e d) homogeneizada a 185°C/4h com aumento de 500x.



Fonte: a autora.

Os dados obtidos nas medições de diâmetro das calotas impressas nos CPs nos ensaios de dureza e os valores calculados estão apresentados na tabela 2.

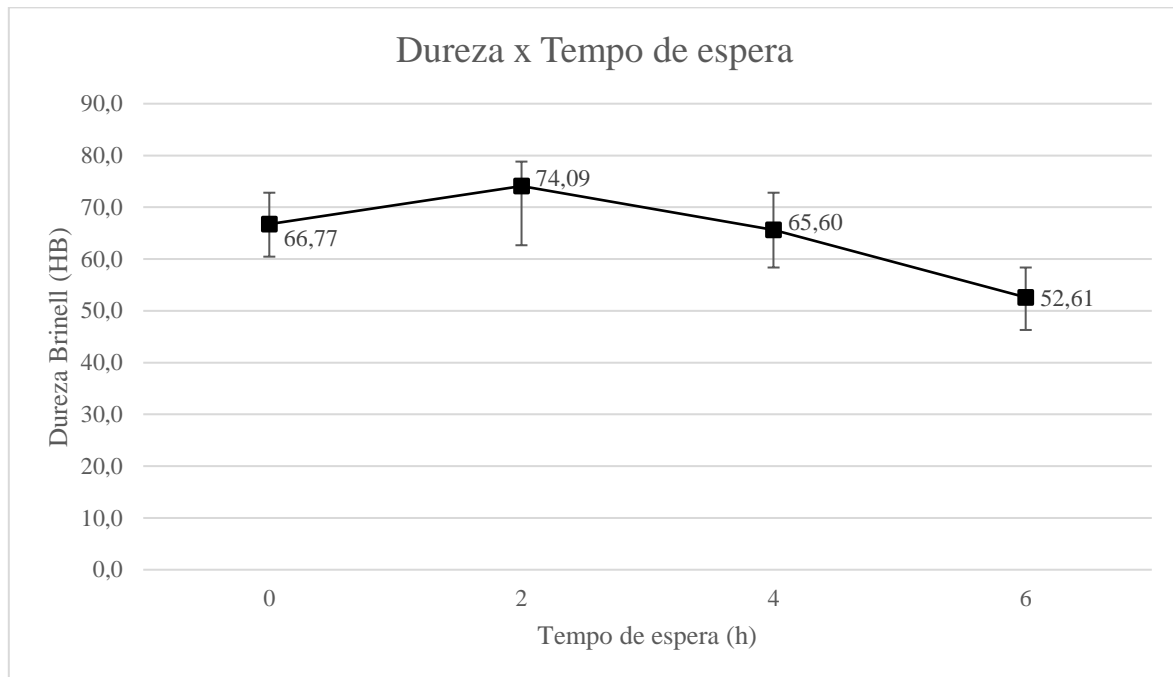
Tabela 2 – Dados dos ensaios de dureza Brinell

	EA-0		EA-2		EA-4		EA-6	
	d (mm)	Dureza (HB)	d (mm)	Dureza (HB)	d (mm)	Dureza (HB)	d (mm)	Dureza (HB)
Medida 1	0,52	72,81	0,52	72,81	0,55	64,99	0,58	58,36
Medida 2	0,54	67,45	0,51	75,72	0,58	58,36	0,60	54,48
Medida 3	0,54	67,45	0,51	75,72	0,54	67,45	0,60	54,48
Medida 4	0,54	67,45	0,56	62,66	0,55	64,99	0,65	46,30
Medida 5	0,57	60,46	0,50	78,81	0,52	72,81	0,63	49,34
Medida 6	0,55	64,99	0,50	78,81	0,55	64,99	0,61	52,68
Média	0,54	66,77	0,52	74,09	0,55	65,60	0,61	52,61
Desvio Padrão	0,016	4,021	0,023	6,036	0,019	4,666	0,025	4,257

Fonte: a autora.

Para melhor visualização dos dados, foi plotado o gráfico 1 com as médias das durezas obtidas com o envelhecimento artificial em função do tempo de espera, e com a indicação dos valores máximos e mínimos medidos em cada condição. De modo geral, os resultados se mostraram bastante coerentes, principalmente para as amostras EA-0 e EA-4, que apresentaram valores bem próximos ao esperado de 65 HB, conforme indicado pela curva de envelhecimento a 185°C escolhida para o tratamento mostrada na figura 1.

Gráfico 1 – Dureza obtida em função do tempo de espera.



Fonte: a autora.

A amostra EA-2 apresentou a maior média de dureza, sugerindo que 2 horas em envelhecimento natural contribuiu para o ganho desta propriedade. Um estudo realizado por Lai *et al.* (2017) demonstrou que o envelhecimento natural tem um efeito positivo no envelhecimento artificial posterior em uma liga Al-Mg-Si com baixo teor de soluto ($Mg + Si < 1\%$), assim como a 6060. Os pesquisadores afirmam que este efeito está relacionado com uma reversão na sequência de precipitação, onde o β' precipita diretamente sem a formação de β'' , devido a matriz ter baixa concentração de Si. Especulou-se, também, que os aglomerados formados no envelhecimento natural podem atuar como locais de nucleação para precipitados e, ainda, que os precipitados β'' e β' se formariam simultaneamente no envelhecimento artificial, contribuindo para o aumento de dureza. Isso indica que a sequência de precipitação está fortemente correlacionada com teor de soluto na liga e aglomerados de envelhecimento natural.

O estudo de Martinsen *et al.* (2012) sobre a reversão do efeito negativo do envelhecimento natural em ligas de Al-Mg-Si também utilizou a liga 6060 para os experimentos. Os resultados mostraram que a dureza aumenta para tempos de envelhecimento natural menores que 2 horas e que

o efeito é muito dependente do tempo. Observou-se que, para tempos maiores que 2 horas, a dureza se estabiliza ou pode até mesmo cair ligeiramente antes de aumentar novamente para tempos de envelhecimento natural bem mais longos. Estas informações se correlacionam com as obtidas neste trabalho, onde é possível observar que com o aumento do tempo de espera em envelhecimento natural a dureza aumenta para as primeiras horas, volta para o valor esperado em EA-4 e diminui em EA-6 após 6 horas.

O efeito negativo do envelhecimento natural nas ligas Al-Mg-Si, segundo Torsæter *et al.* (2010), é provável que esteja ligado a formação de aglomerados com composições diferentes da estequiometria 1:1 da primeira fase de precipitação e, assim, não podem atuar como locais de nucleação benéficos. Na pesquisa realizada por esses autores, a presença desses aglomerados foi observada apenas em condições naturalmente envelhecidas. Com o aumento do tempo em temperatura ambiente, ainda há a redução na densidade de aglomerados o que, por sua vez, reduz o número de aglomerados úteis que podem atuar como núcleos para fases mais desenvolvidas. Há, também, a possibilidade de que os aglomerados formados alcançam uma estabilidade considerável, tornando-os difíceis de dissolver no tratamento subsequente e, conseqüentemente, deixando menos soluto disponível para precipitação.

Sendo assim, com os dados obtidos é possível afirmar que 6 horas em envelhecimento natural para a liga 6060 já é suficiente para que os aglomerados formados causem um efeito negativo no ganho de dureza por envelhecimento artificial. Porém, vale ressaltar que o comportamento de agrupamento dos elementos do soluto, tanto para composição quanto quantidade, depende também do histórico de tratamento térmico da liga e da temperatura do envelhecimento natural, que podem deixar o efeito positivo ou negativo mais pronunciado (TORSÆTER *et al.*, 2010; MARTINSEN *et al.*, 2012; POZNAK; THOLE; SANDERS, 2018).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste estudo, foi feita uma avaliação do efeito do tempo de espera na dureza obtida com envelhecimento artificial, tendo como base os tratamentos térmicos realizados num processo de extrusão a quente.

As amostras foram homogeneizadas, solubilizadas, envelhecidas artificialmente após diferentes tempos de espera e avaliadas quanto à microestrutura (nas condições bruta-de-fusão e homogeneizada) e dureza (nas condições solubilizada e envelhecida artificialmente). Os resultados obtidos se mostraram bem coerentes com os encontrados na literatura.

O envelhecimento natural, que ocorre durante o tempo de espera, é um processo complexo que depende de muitos fatores, como tempo, temperatura, composição da liga e tratamentos térmicos

realizados. Estes parâmetros influenciam diretamente a formação de aglomerados na estrutura, que por sua vez determinam como os precipitados endurecedores são formados.

O efeito do envelhecimento natural no tempo de espera para a liga 6060 pode ser considerado como dual. Dependendo da duração, pode ter efeito positivo ou negativo no mecanismo de precipitação do envelhecimento artificial.

Com base nos dados obtidos, é possível afirmar que a partir de 6 horas em espera já há uma perda de 21% na dureza obtida. Porém, este efeito negativo pode ser contornado diminuindo-se o tempo em que os perfis ficam em espera na indústria de extrudados.

Por fim, considerando as limitações deste estudo, foram levantadas algumas sugestões para futuros trabalhos. Como foi avaliada uma faixa curta de tempos de espera, seriam interessantes estudos mais aprofundados, com mais amostras e tempos mais longos, análise com microscopia eletrônica de transmissão para visualização dos precipitados formados e avaliação de correlações com outras variáveis, como a temperatura de espera, por exemplo, a fim de obter alternativas para uma maior eficiência no ganho de dureza com envelhecimento artificial nas ligas de Al-Mg-Si.

REFERÊNCIAS

ABAL (Brasil). **Alumínio: História do alumínio.** Disponível em: <<http://abal.org.br/aluminio/historia-do-aluminio/>>. Acesso em: 25 nov. 2019.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio: Tratamento Térmico do alumínio e suas ligas.** 2. ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2011. 151 p.

AGUIAR, Filipe Miguel Necho Monteiro de. **Controlo do forno de envelhecimento de perfis de alumínio da sapa extrusion.** 2016. 80 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metaúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2016. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/83134/2/122877.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2019.

ALCOA. **Ligas e têmperas de extrusão: perfis extrudados de alumínio.** Disponível em: <http://www.aluminiosaojose.com.br/industria/10_ligasetemperas.pdf>. Acesso em: 24 nov. 2019.

ALUMINUM ASSOCIATION. **History of aluminum.** Disponível em: <<https://www.aluminum.org/aluminum-advantage/history-aluminum>>. Acesso em: 21 nov. 2019.

ARUGA, Yasuhiro; KOZUKA, Masaya; TAKAKI, Yasuo; SATO, Tatsuo. Formation and reversion of clusters during natural aging and subsequent artificial aging in an Al–Mg–Si alloy. **Materials Science And Engineering: A**, [S.L.], v. 631, p. 86-96, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.msea.2015.02.035>.

BONFITO, Guilherme Bruno Barroso. **Estudo do comportamento mecânico da liga Al-Mg-Si 6005A solubilizada e envelhecida**. 2016. 81 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://tede.mackenzie.br/jspui/bitstream/tede/3208/5/Guilherme%20Bruno%20Barroso%20Bonfitto.pdf>>. Acesso em: 21 nov. 2019

CAVALCANTE, Felipe Fernandes. **Comportamento mecânico e tenacidade à fratura de ligas de alumínio 2024 e 7075 submetidas a diferentes tempos de envelhecimento**. 2016. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.ufrn.br/jspui/handle/123456789/21288>>. Acesso em: 03 nov. 2019

GRACIO, J.J. *et al.* Artificial aging and shear deformation behaviour of 6022 aluminium alloy. **International Journal Of Plasticity**, [s.l.], v. 20, n. 3, p.427-445, mar. 2004. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0749-6419\(03\)00095-0](http://dx.doi.org/10.1016/s0749-6419(03)00095-0).

HATCH, John E. (Ed.). **Aluminum: Properties and Physical Metallurgy**. [s. L.]: American Society For Metals, 1984. 424 p.

HYDRO. **Liga 6060**. 2019. Disponível em: <<https://www.hydro.com/pt-BR/produtos-e-servicos/perfis-extrudados/ligas-para-perfis-extrudados/liga-6060/>>. Acesso em: 22 nov. 2019

LAI, Y.X.; JIANG, B.C.; LIU, C.H.; CHEN, Z.K.; WU, C.L.; CHEN, J.H.. Low-alloy-correlated reversal of the precipitation sequence in Al-Mg-Si alloys. **Journal Of Alloys And Compounds**, [S.L.], v. 701, p. 94-98, abr. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.095>.

LIMA, Nuno Alexandre Gonçalves. **Tratamento térmico de envelhecimento da liga de fundição AlSi10Mg(Fe)**. 2012. 70 f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Metaúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65295/2/26712.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2019.

MAIA, André Miguel Pires. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. 2012. 84 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/68324/1/000154720.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2019

MARTINS, Margarida Maria Melo. **Estudo do comportamento das ligas de alumínio 6061 e 6082**. 2008. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de Aveiro, Aveiro, 2008. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/bitstream/10773/2262/1/2008001818.pdf>>. Acesso em: 13 out. 2019

MARTINSEN, F.A.; EHLERS, F.J.H.; TORSÆTER, M.; HOLMESTAD, R.. Reversal of the negative natural aging effect in Al–Mg–Si alloys. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 60, n. 17, p. 6091-6101, out. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2012.07.047>.

POGATSCHER, S.; ANTREKOWITSCH, H.; LEITNER, H.; EBNER, T.; UGGOWITZER, P.J.. Mechanisms controlling the artificial aging of Al–Mg–Si Alloys. **Acta Materialia**, [S.L.], v. 59, n. 9, p. 3352-3363, maio 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2011.02.010>

PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.. **Phase Transformations in Metals and Alloys**. 2. ed. [s. L.]: Crc Press, 1992. 528 p

POZNAK, Alex; THOLE, Violet; SANDERS, Paul. The Natural Aging Effect on Hardenability in Al-Mg-Si: a complex interaction between composition and heat treatment parameters. **Metals**, [S.L.], v. 8, n. 5, p. 309-333, 1 maio 2018. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/met8050309>.

SILVA, Douglas da. **Estudo da cinética de envelhecimento e das propriedades mecânicas das ligas de alumínio 6061 e 7075 tratadas termicamente**. 2016. 69 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Londrina, 2016. Disponível em: <http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6174/1/LD_COEMA_2016_1_04.pdf>. Acesso em: 06 out. 2019.

SOARES, Maria Rosa Nunes. **Efeito dos ciclos de envelhecimento no comportamento de ligas de alumínio**. 2009. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade de

Aveiro, Aveiro, 2009. Disponível em: <<https://ria.ua.pt/handle/10773/2297>>. Acesso em: 30 out. 2019.

SZILÁGYI, Gisele. **Influência das variáveis de processamento termomecânico sobre a evolução microestrutural e a resposta ao envelhecimento da liga de alumínio 2014 extrudada.** 2002. 217 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

SZILÁGYI, Gisele. Tratamentos Térmicos das Ligas de Alumínio. 2019. 71 slides.

TORSÆTER, M.; HASTING, H. S.; LEFEBVRE, W.; MARIOARA, C. D.; WALMSLEY, J. C.; ANDERSEN, S. J.; HOLMESTAD, R.. The influence of composition and natural aging on clustering during preaging in Al–Mg–Si alloys. **Journal Of Applied Physics**, [S.L.], v. 108, n. 7, p. 073527-0735279, out. 2010. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.3481090>.

TOTTEN, George E.; MACKENZIE, D. Scott (Ed.). **Handbook of Aluminum: Physical Metallurgy and Processes.** New York: Marcel Dekker, Inc, 2003. 1296 p.

WERINOS, M.; ANTREKOWITSCH, H.; EBNER, T.; PRILLHOFER, R.; UGGOWITZER, P.J.; POGATSCHER, S.. Hardening of Al–Mg–Si alloys: effect of trace elements and prolonged natural aging. **Materials & Design**, [S.L.], v. 107, p. 257-268, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2016.06.014>.