

ANÁLISE DO EFEITO DA TEMPERATURA EMERGENTE SOBRE A DUREZA APÓS ENVELHECIMENTO DE LIGA DE ALUMÍNIO

Vítor Guimarães Studart Maia – vitormaia1996@gmail.com

Prof^a. Me. Gisele Szilágyi (orientadora) – gisele.szilagyi@mackenzie.br

RESUMO

Neste trabalho, foi estudada a influência da temperatura emergente no processo de conformação mecânica de liga de alumínio 6060 por extrusão a quente. O processo de extrusão foi reproduzido sob aspectos térmicos, com amostras brutas-de-fusão sendo homogeneizadas e submetidas a solubilização, em diferentes temperaturas, e envelhecimento artificial. Após os tratamentos térmicos, foram medidas as durezas das amostras. Os resultados obtidos evidenciaram a importância da temperatura de saída da prensa de extrusão (temperatura emergente) na dureza do produto. Temperaturas abaixo da faixa ideal para atingimento da tempera T5 não promovem solubilização completa dos elementos de liga, resultando em precipitados que pouco contribuem para o ganho de dureza na condição envelhecida artificialmente. Por fim, os valores de dureza das amostras envelhecidas foram inferiores aos encontrados na literatura para esta condição, devido ao fato de, durante a extrusão a quente, também ocorrer o endurecimento por deformação.

Palavras-chave: Temperatura Emergente; Extrusão a quente; Liga 6060.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF EXIT TEMPERATURE ON HARDNESS AFTER AGING OF ALUMINUM ALLOY

ABSTRACT

In this work, the influence of the exit temperature on the mechanical forming process of 6060 aluminum alloy by hot extrusion was studied. The extrusion process was reproduced under thermal aspects, with as-cast samples being homogenized and subjected to solubilization, at different temperatures, and artificial aging. After the heat treatments, the hardness of the samples was measured. The results obtained evidenced the importance of the extrusion press outlet temperature (exit temperature) in the hardness of the product. Temperatures below the ideal range for reaching the T5 temper do not promote complete solubilization of the alloying elements, resulting in precipitates that contribute little to the gain in hardness in the artificially

aged condition. Finally, the hardness values of the aged specimens were lower than those found in the literature for this condition, due to the fact that, during hot extrusion, deformation hardening also occurs.

Key words: Exit temperature; Hot extrusion; Alloy 6060.

1 INTRODUÇÃO

O processo de conformação mecânica por extrusão a quente possui grande aplicação no mercado de ligas de alumínio, sendo adequado para a produção de perfis de seção transversal constante e com forma pré-determinada, a partir de um tarugo pré-aquecido, homogeneizado e forçado a fluir através do orifício de uma matriz (DALLA TORRE et al., 2018). O alumínio é o material não ferroso mais consumido mundialmente. Suas ligas despertam grande interesse nas mais diversas aplicações, devido à baixa densidade, alta condutividade térmica, resistência à corrosão, baixo ponto de fusão e elevada trabalhabilidade (SANTOS et al., 2019).

Segundo Nogueira (2012), as ligas trabalháveis e tratáveis termicamente da série 6XXX, que contém magnésio e silício como principais elementos de liga, são muito utilizadas no mercado de extrusão pois combinam facilidade de conformação e capacidade de serem extrudadas a velocidades altas, ao mesmo tempo mantendo um bom acabamento superficial. Estas ligas apresentam aumento sensível em suas propriedades mecânicas quando submetidas a tratamentos térmicos de solubilização e envelhecimento artificial, através da precipitação de partículas de Mg_2Si ao longo do perfil (OLIVEIRA, 2015).

Durante o processo de extrusão das ligas da série 6XXX, a etapa de solubilização ocorre na saída da matriz de extrusão, com resfriamento do perfil ao ar. Corrêa (2014), em seus estudos, conclui que para esta etapa ocorrer de maneira adequada, a temperatura de saída da matriz do perfil extrudado, também conhecida como temperatura emergente, deve ser suficiente para solubilizar todos os elementos de liga no perfil, sem prejudicar o acabamento superficial dele.

A importância da temperatura emergente, nem sempre medida durante o processo de conformação mecânica por extrusão a quente, desperta o interesse em sua influência na dureza do produto, bem como as possíveis não-conformidades em processos com temperatura emergente fora da especificação.

As ligas de alumínio da série 6XXX destinam-se, principalmente, para a conformação mecânica por extrusão a quente. Sob pressão e temperatura elevadas, o tarugo é forçado a fluir através do orifício de uma matriz, com formato pré-definido (DALLA TORRE et al., 2018), dando origem a um perfil. Em seguida, este passa pelo processo de solubilização do magnésio e do silício, seguido de um envelhecimento artificial em que ocorre precipitação de partículas de Mg_2Si , resultando em um grande aumento na dureza do material (OLIVEIRA, 2015). A temperatura de saída do perfil da prensa de extrusão, conhecida como temperatura emergente,

cumprir um importante papel ao longo do processo. Devido à baixa sensibilidade à temperatura deste grupo de ligas, a solubilização pode ocorrer imediatamente após a saída do perfil extrudado da prensa, desde que a temperatura emergente atinja a temperatura adequada, sem a necessidade de efetuar essa etapa em um forno específico. Neste caso, o perfil é encaminhado diretamente para o forno de envelhecimento (NOGUEIRA, 2012).

Maia (2012), em seus estudos, define a temperatura de solubilização como a mínima necessária para solubilizar todo o magnésio e o silício presentes na liga, maximizando a melhoria de suas propriedades mecânicas após o envelhecimento. Entretanto, essa temperatura normalmente não é controlada na indústria, devido, em grande parte, ao alto custo do equipamento necessário para medi-la (medidores sem contato, via radiação infravermelha). Assim, o processo segue sem o controle de uma variável tão importante para a sua eficácia, o que pode resultar em um perfil envelhecido com dureza incompatível com a especificação da liga e temperatura. Caso a temperatura de saída da prensa seja menor que a temperatura de solubilização da liga, não há dissolução suficiente dos elementos de liga. Neste caso, a fração volumétrica de Mg_2Si precipitado durante o envelhecimento não será suficiente para atingir a dureza exigida. Por outro lado, se a temperatura emergente for maior que a de solubilização, o perfil terá seu acabamento superficial prejudicado e, em casos extremos, pode haver a formação de trincas. Adicionalmente, há o agravante da prática comum na indústria de aumentar a velocidade de extrusão, visando melhora na produtividade. Como o atrito gerado na extrusão a quente se reflete em aquecimento do tarugo, trabalhar com velocidade de extrusão crescente incorre em maior probabilidade de ocorrência de trincas, uma vez que a temperatura emergente será maior do que o especificado para a liga.

Diante do problema abordado, observa-se a necessidade da compreensão da influência da temperatura emergente sobre a dureza do perfil após envelhecimento artificial e de como a variação da temperatura emergente fora da faixa ideal pode comprometer o produto, gerando perda de material e, conseqüentemente, de rendimento metálico. O trabalho teve o intuito de se aprofundar nessa problemática, esclarecendo os prejuízos ao material, quando não solubilizado corretamente.

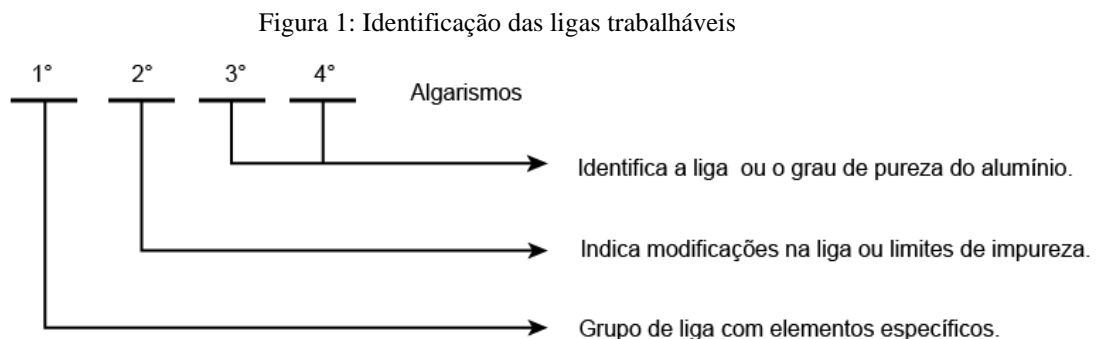
2 REVISÃO DA LITERATURA

O alumínio é um material que pode ser empregado numa diversidade de aplicações, devido à sua excelente resistência à corrosão, ponto de fusão baixo (em relação a outros metais mais tradicionalmente utilizados, como o ferro, por exemplo), boa maleabilidade, ductilidade, condutividade térmica e elétrica (BONFITTO, 2016). Entretanto, Oliveira (2015), em seus estudos, destaca que o alumínio comercialmente puro possui aplicação restrita, especialmente para usos em estruturas, pois apresenta resistência mecânica baixa. Assim, no intuito de melhorar suas propriedades, o alumínio é frequentemente trabalhado em forma de liga, contendo outros elementos que alteram as propriedades do material após seu processamento.

2.1 LIGAS DE ALUMÍNIO

As ligas de alumínio são divididas entre as ligas trabalháveis, sujeitas à conformação plástica por trabalho mecânico, e as ligas para fundição, utilizadas em seu estado vazado. A nomenclatura mais usada para classificar as ligas de alumínio, adotada pela American Aluminium Association (AAA), distingue as ligas trabalháveis das de fundição, além de dividi-las em famílias, baseando-se nos elementos de liga adicionados (NOGUEIRA, 2012).

As ligas trabalháveis são identificadas através de quatro algarismos, baseados nos elementos de liga mais abundantes. A nomenclatura é feita de acordo com a Figura 1, com as séries indicadas na Tabela 1.



Fonte: OLIVEIRA, 2015

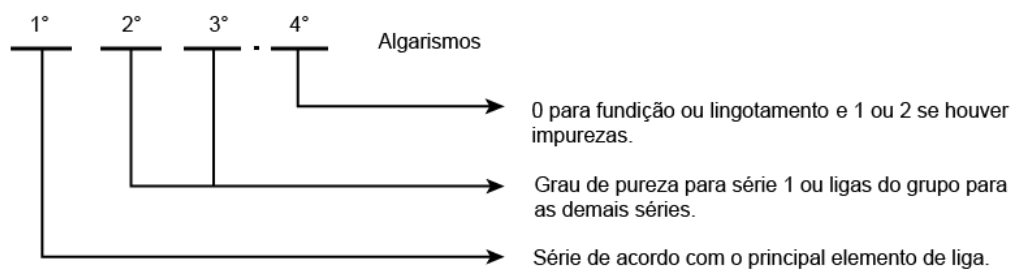
Tabela 1: Classificação e principais elementos de liga para as ligas trabalháveis

Série	Principais elementos de liga
1XXX	Alumínio com pelo menos 99% de pureza
2XXX	Cobre
3XXX	Manganês
4XXX	Silício
5XXX	Magnésio
6XXX	Magnésio e Silício
7XXX	Zinco
8XXX	Outros elementos
9XXX	Série não utilizada

Fonte: SZILÁGYI, 2018

Já as ligas para fundição são identificadas de forma similar às ligas trabalháveis. Neste caso, um ponto separa o quarto algarismo dos demais. A nomenclatura para este grupo de ligas é feita de acordo com a Figura 2, e as séries, com base nos elementos de liga mais abundantes, indicadas na Tabela 2.

Figura 2: Identificação das ligas para fundição



Fonte: OLIVEIRA, 2015

Tabela 2: Classificação e principais elementos de liga para as ligas para fundição

Série	Principais elementos de liga
1XX.X	Alumínio com pelo menos 99% de pureza
2XX.X	Cobre
3XX.X	Silício + Cobre e/ou Magnésio
4XX.X	Silício
5XX.X	Magnésio
6XX.X	Série não utilizada
7XX.X	Zinco
8XX.X	Estanho
9XX.X	Outros elementos

Fonte: SZILÁGYI, 2018

As ligas de alumínio são divididas entre as tratáveis termicamente e as ligas não tratáveis termicamente. As ligas tratáveis termicamente têm a sua dureza aumentada por tratamento térmico, enquanto as ligas não tratáveis termicamente só apresentam aumento na dureza através do trabalho a frio (OLIVEIRA, 2015).

A Tabela 3 apresenta a classificação dos tratamentos térmicos aplicáveis a ligas de alumínio tratáveis termicamente:

Tabela 3: Tratamentos térmicos destinados às ligas de alumínio

Classificação	Definição
F	Como fabricado: Obtido por deformação plástica, sem controle de temperatura e grau de deformação no processo.
H	Encruado: Produtos endurecidos por deformação plástica, passíveis de tratamento posterior de recozimento ou estabilização. Deve ser acompanhada de um ou dois dígitos.
O	Recozido: Usado após tratamento de deformação plástica, no intuito de reduzir a dureza após tratamento ou melhorar a estabilidade dimensional de peças usinadas.
T	Tratado termicamente: Produtos que sofrem tratamento térmico, com ou sem deformação à frio, produzindo propriedades diferentes das obtidas com a tratamentos F, H e O. Deve ser seguida de um dois algarismos, os quais indicam a sequência dos tratamentos térmicos e mecânicos (se houver).
W	Solubilizado: Aplicado às ligas que envelhecem de forma natural após tratamento de solubilização. Deve ser sucedida do tempo necessário ao envelhecimento.

Fonte: OLIVEIRA, 2015

Para os tratamentos térmicos T, há uma complementação que deve ser incluída para especificar o tipo de tratamento aplicado, conforme descrito na Tabela 4:

Tabela 4: Complementações na classificação do tratamento T

Classificação	Tratamento
T1	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco e envelhecimento natural
T2	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco, encruamento e envelhecimento natural
T3	Solubilizado, encruado e envelhecido naturalmente
T4	Solubilizado e envelhecido naturalmente
T5	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco e envelhecimento artificial
T6	Solubilizado e envelhecido artificialmente
T7	Solubilizado e superenvelhecido
T8	Solubilizado, encruado e envelhecido artificialmente
T9	Solubilizado, envelhecido artificialmente e encruado
T10	Deformação plástica à quente, seguida de resfriamento brusco, encruamento e envelhecimento artificial

Fonte: OLIVEIRA, 2015

O objeto de estudo deste projeto é uma liga trabalhável, tratável termicamente, da série 6XXX submetida ao tratamento térmico T5 e, dessa forma, esta série foi abordada em maior profundidade no próximo item.

2.1.1 Série 6XXX

As ligas trabalháveis da série 6XXX são tratáveis termicamente, e seus principais elementos de liga são o silício (Si) e o magnésio (Mg). Essas ligas são soldáveis e apresentam excelente resistência à corrosão, além de boas propriedades mecânicas após o tratamento térmico de solubilização e envelhecimento (NOGUEIRA, 2012).

Devido a estas propriedades, estas ligas possuem uma vasta gama de aplicações, desde a indústria automobilística até a construção civil.

Segundo Nogueira (2012), as ligas da série 6XXX possuem grande importância no mercado de extrusão, em especial as ligas 6060 e 6063 (com teores mais baixos de Mg e Si), pois estas podem ser extrudadas a velocidades altas, mantendo um bom acabamento superficial.

A Tabela 5 apresenta as composições químicas das ligas 6060 e 6063.

Tabela 5: Composições químicas das ligas 6060 e 6063

Liga	Composição (% em peso)								
Elemento	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Outros
6060	0,30 - 0,60	0,10 - 0,30	0,10	0,10	0,35 - 0,60	0,05	0,15	0,10	0,05
6063	0,20 - 0,60	0,35	0,10	0,01	0,45 - 0,90	0,10	0,10	0,10	0,05

Fonte: NOGUEIRA, 2012

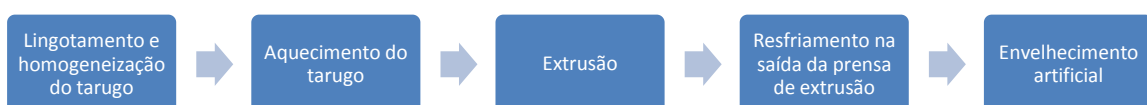
2.2 PRODUÇÃO DE PERFIS EXTRUDADOS

Extrusão é um processo de transformação termomecânica, em que um tarugo de metal tem sua seção transversal reduzida ao ser forçado a fluir através do orifício de uma matriz, sob o efeito de pressão e temperatura elevadas (DALLA TORRE et al., 2018). De acordo com Dalla Torre et al. (2018), o processo de extrusão do alumínio já era utilizado desde o final do século XIX, sendo amplamente difundido durante a Segunda Guerra Mundial, com a utilização de grandes quantidades de perfis extrudados de alumínio em componentes aeronáuticos.

Atualmente, a extrusão ocupa um espaço importante no mercado de alumínio. Segundo a Associação Brasileira do Alumínio - ABAL (2019), o consumo de perfis de alumínio extrudados em 2019 foi de 234,3 mil toneladas, o equivalente a 15,8% do total da indústria do alumínio no Brasil. Foi o segundo produto de alumínio mais consumido no período, atrás apenas das chapas. Os perfis extrudados são semiacabados, de forma longa e reta e com seção transversal constante (barras, seções sólidas e ocas, tubos, arames e tiras).

O processo de produção de perfis extrudados é composto por 4 principais etapas, de acordo com a Figura 3:

Figura 3: Principais etapas do processo de produção de perfis extrudados



Fonte: SZILÁGYI, 2018

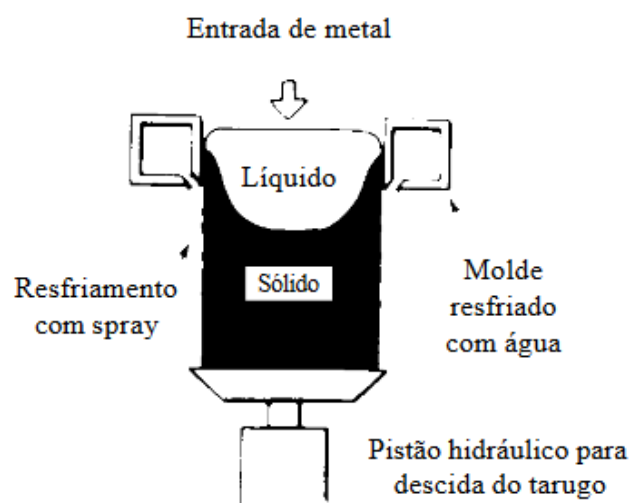
2.2.1 Lingotamento e homogeneização do tarugo

Os tarugos em liga de alumínio para o processo de extrusão a quente são produzidos por lingotamento DC, sendo o método de lingotamento VDC (“vertical direct chill”) o mais comumente usado (SANTOS et al., 2019). As principais vantagens do uso do lingotamento DC são as elevadas capacidade de produção e velocidade de solidificação, tornando este processo extremamente atrativo nos sistemas de produção de metal (BEIL, 2015).

Segundo Corrêa (2014), o processo de lingotamento DC consiste na solidificação contínua do metal líquido em moldes refrigerados à água, seguido por resfriamento com cortina de água. O metal fundido é solidificado na forma de um produto semiacabado, que pode ser um tarugo, placa ou bloco, dependendo do processo a que este será submetido na sequência.

Durante o processo, o metal líquido é vazado no cadinho que alimenta a cavidade do molde cilíndrico. A solidificação ocorre dentro do molde, onde há a formação de uma casca espessa o suficiente para suportar a pressão do metal líquido e as tensões provenientes da descida do tarugo no processo VDC. Após o resfriamento primário, no qual o molde é refrigerado à água, se dá o resfriamento secundário, com uma cortina de água incidindo na superfície do tarugo (SANTOS et al., 2019). A representação deste processo pode ser vista na Figura 4.

Figura 4: Representação esquemática do vazamento do metal líquido no processo de lingotamento VDC



Fonte: SZILÁGYI, 2002

Antes de iniciar o processo de extrusão, a homogeneização do tarugo a ser extrudado é fundamental, uma vez que estes possuem gradientes de composição química, que se traduzem

em menor trabalhabilidade, pior acabamento superficial e baixas propriedades mecânicas no perfil produzido (CORRÊA, 2014). De acordo com Corrêa (2014), as principais variáveis do processo de homogeneização, que influenciam diretamente na microestrutura e na qualidade metalúrgica do tarugo de alumínio são a temperatura de tratamento, o tempo de tratamento e a taxa de resfriamento pós-homogeneização.

Em teoria, quanto maior a temperatura do processo, mais fácil e rapidamente ocorrerão as transformações metalúrgicas, que se dão por difusão. Porém, devido à presença de micro segregações e gradientes de composição química na estrutura bruta-de-fusão, existem regiões eutéticas no tarugo, que limitam a temperatura máxima de homogeneização.

Já o tempo de tratamento é necessário para que as transformações metalúrgicas na microestrutura dos tarugos de alumínio ocorram de forma adequada para atingir as propriedades desejadas.

A taxa de resfriamento pós-homogeneização tem influência direta na precipitação de fases de Mg_2Si . Se a taxa de resfriamento for alta, as partículas precipitadas são pequenas e são bem dissolvidas durante o pré-aquecimento do tarugo e durante o processo de extrusão. Entretanto, se a taxa de resfriamento for baixa, as partículas precipitadas são grosseiras e não dissolvem de maneira adequada nas etapas subsequentes, podendo inclusive acarretar o aparecimento de defeitos superficiais nos perfis extrudados.

A Tabela 6 mostra os valores recomendados para estas variáveis, considerando uma liga 6063.

Tabela 6: Valores recomendados para a homogeneização de um tarugo de alumínio na liga 6063

Variável	Valor recomendado
Temperatura máxima de tratamento	590°C
Tempo mínimo de tratamento	2h15min
Taxa mínima de resfriamento	40°C/h

Fonte: CORRÊA, 2014

2.2.2 Aquecimento do tarugo

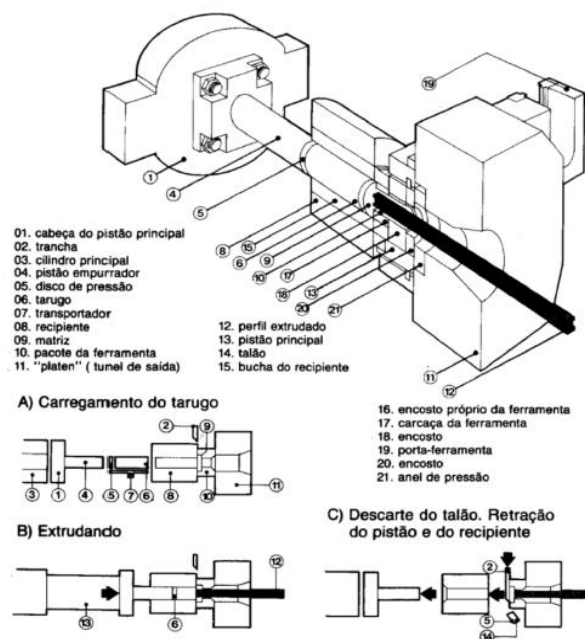
É necessário garantir um aquecimento homogêneo no diâmetro do tarugo e um gradiente de temperatura ao longo de seu comprimento, para que o tarugo seja convenientemente extrudado a quente. O atingimento desses requisitos influencia diretamente na qualidade superficial e nas propriedades mecânicas dos perfis extrudados, assim como em sua extrudabilidade (CORRÊA, 2014).

Segundo Corrêa (2014), a temperatura de pré-aquecimento do tarugo deve ser o mais baixa possível para a maior velocidade de extrusão. Porém, esta precisa ser suficientemente alta para assegurar o bom fluxo do material, além de ultrapassar a temperatura mínima de solubilização do Mg e do Si presentes na liga.

2.2.3 Extrusão

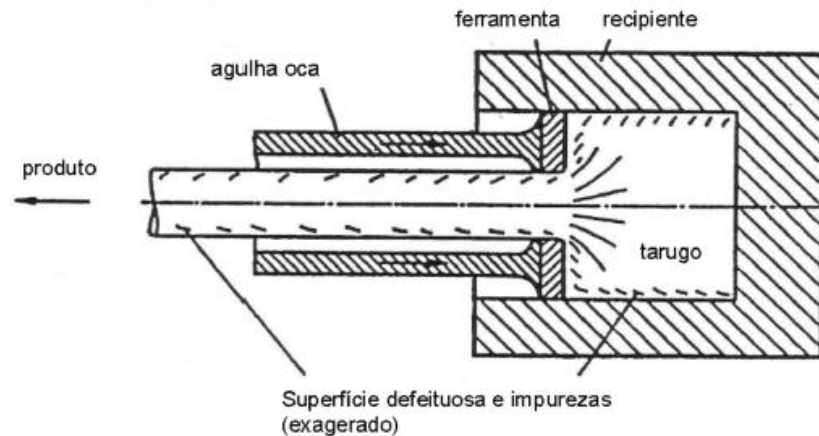
Segundo Dalla Torre et al. (2018), há dois tipos principais de processos de extrusão, a extrusão direta e a indireta (vide Figuras 5 e 6). A principal diferença entre os processos de extrusão direta e indireta se encontra no deslocamento do tarugo e ferramenta. Enquanto na extrusão direta é o tarugo que se movimenta (no mesmo sentido de movimentação do pistão), na extrusão indireta é a ferramenta que se movimenta (em sentido contrário ao de movimentação do pistão) (BONFITTO, 2016). Segundo Bonfitto (2016), a principal vantagem da extrusão direta é o bom acabamento superficial do perfil. Porém, o elevado atrito gerado entre o tarugo e o recipiente é uma desvantagem relevante do processo. Já na extrusão indireta, a principal vantagem é a ausência do atrito entre a parede do recipiente e o tarugo, diminuindo a pressão de pico. Sua grande desvantagem é a qualidade superficial do perfil, pois as impurezas presentes na superfície do tarugo são passadas para o perfil.

Figura 5: Desenho esquemático dos componentes de uma prensa de extrusão direta



Fonte: CAMPANA, 2008

Figura 6: Fluxo do material dentro do recipiente de uma prensa de extrusão indireta



Fonte: CAMPANA, 2008

Diversos fatores podem influenciar no produto do processo de extrusão, entre eles a temperatura de aquecimento do tarugo para extrusão, a homogeneização do tarugo, o fator de transformação (FT), a velocidade de extrusão e a temperatura emergente (CORRÊA, 2014). O tarugo precisa se manter em uma faixa de temperatura adequada ao longo do processo, podendo formar trincas se superaquecido, ou comprometer o funcionamento da prensa se sua temperatura for muito baixa. O fator de transformação, também conhecido como relação de extrusão, é a razão entre a área da seção transversal do recipiente e a área da seção transversal do perfil. Quanto maior o FT, menor a espessura do perfil, maior a dificuldade de extrusão, a pressão de extrusão e a velocidade do pistão. Quanto maior a velocidade de extrusão, maior a taxa de deformação, o calor gerado e a temperatura. Portanto, para aumentar a velocidade de extrusão, é necessária uma diminuição na temperatura do tarugo, visando evitar defeitos de acabamento. De acordo com Corrêa (2014), a temperatura emergente, ou a temperatura do perfil extrudado na saída da prensa de extrusão, é a principal temperatura a ser medida no processo de extrusão. Ela é um fator determinante das propriedades do produto, como acabamento superficial, grau de solubilização e dureza pós-tratamento térmico de envelhecimento.

Para ligas de Al-Mg-Si, a temperatura emergente ideal é aquela em que todo o Mg e o Si estão em solução sólida no Al, propiciando o desenvolvimento completo das propriedades mecânicas da liga.

2.2.4 Resfriamento na saída da prensa de extrusão

Após o processo de extrusão, o perfil extrudado sai da prensa e é resfriado com ar, ar-forçado, spray de água ou água, na mesa de saída e de transferência (CORRÊA, 2014). As ligas da série 6XXX submetidas à têmpera T5 não passam por fornos de solubilização; então, esta etapa costuma ocorrer imediatamente após a saída da prensa de extrusão. Para se obter a resistência mecânica desejada ao final do processo, a temperatura emergente deve estar acima da temperatura de solubilização do Mg_2Si no Al. Caso a temperatura não seja atingida, nem todo o Mg_2Si no perfil irá solubilizar, resultando em um produto com resistência mecânica abaixo da especificada.

2.2.5 Envelhecimento artificial

Como passo final do processo de extrusão de ligas de alumínio, tem-se o envelhecimento. De acordo com Rodrigues (2015), o princípio fundamental do envelhecimento de ligas de alumínio consiste na formação de precipitados finos e homogeneamente dispersos na matriz de alumínio, constituídos por elementos que entraram em solução sólida durante solubilização. Este processo pode ocorrer em qualquer temperatura abaixo da temperatura *solvus*, e é classificado como natural, quando ocorre à temperatura ambiente, ou artificial, quando se dá em temperaturas mais elevadas (MAIA, 2012).

Após a solubilização, a liga encontra-se metaestável, na forma de uma solução sólida supersaturada. Segundo Rodrigues (2015), o endurecimento por envelhecimento ocorre devido à interação entre os campos de tensão associados às discordâncias e aos precipitados, onde ocorre uma "neutralização" dos efeitos dos campos de tensão entre discordância e precipitado, diminuindo a energia interna do sistema e gerando um aumento na dureza do perfil.

3 METODOLOGIA

Para alcançar os objetivos deste trabalho, amostras homogeneizadas da liga de alumínio 6060 foram solubilizadas em diferentes temperaturas e envelhecidas artificialmente. As amostras envelhecidas tiveram suas durezas medidas, de forma a verificar o efeito da

temperatura de solubilização, que reproduz a temperatura emergente dos perfis após extrusão a quente, sobre a dureza após envelhecimento artificial.

O material de partida para as análises foi um quadrante de disco em liga de alumínio 6060 na condição bruta-de-fusão, retirado de um tarugo fabricado por lingotamento DC. Todo o trabalho experimental foi conduzido utilizando a infraestrutura de laboratórios da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

3.1 MATERIAL

O material utilizado consistiu em um quadrante de disco de um tarugo em liga de alumínio 6060, produzido por lingotamento DC. Inicialmente, o quadrante foi homogeneizado a uma temperatura de 585 °C, por 2 horas, no forno do tipo mufla do Laboratório de Fundição da Universidade Presbiteriana Mackenzie. Em seguida, o quadrante foi resfriado ao ar.

Após homogeneização, o quadrante foi cortado em “cut off” no Laboratório de Metalografia da Universidade Presbiteriana Mackenzie, de maneira a se produzir as seis (6) amostras de seção transversal de 1 cm de lado, necessárias para a realização dos tratamentos térmicos de solubilização e de envelhecimento.

3.2 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE SOLUBILIZAÇÃO

De maneira a reproduzir a temperatura emergente dos perfis após extrusão a quente, bem como a condição de resfriamento destes na saída da prensa de extrusão, cada uma das seis amostras obtidas foi tratada termicamente em temperaturas distintas, por 30 minutos, seguidos de resfriamento ao ar. A Tabela 7 relaciona as amostras e as temperaturas nas quais as solubilizações foram feitas.

As temperaturas de solubilização foram escolhidas considerando-se que, segundo o Guia Técnico do Alumínio - Extrusão (ABAL, 2014), as temperaturas emergentes para atingimento da têmpera T5 na liga 6060 estão entre 460 e 520 °C. A têmpera T5 foi a condição reproduzida neste trabalho experimental, uma vez que ela envolve a solubilização na prensa de extrusão, seguida de envelhecimento artificial.

Tabela 7: Temperaturas de solubilização das amostras

Amostra	Temperatura de Solubilização (°C)
1	440
2	460
3	480
4	500
5	520
6	540

Fonte: do autor

O tempo de solubilização foi estabelecido em 30 minutos, uma vez que os fornos a gás, utilizados no aquecimento de tarugos para extrusão a quente, levam de 15 a 30 minutos para aquecer os tarugos à temperatura de extrusão (SZILÁGYI, 2012).

O forno utilizado para os tratamentos térmicos de solubilização foi o tipo mufla, localizado no Laboratório de Fundição da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

3.3 TRATAMENTOS TÉRMICOS DE ENVELHECIMENTO

As seis amostras solubilizadas foram envelhecidas artificialmente por 3 horas a 180 °C, seguidas de resfriamento ao ar (ABAL, 2014).

O forno utilizado para o tratamento térmico de envelhecimento artificial foi do tipo mufla, localizado no Laboratório de Fundição da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

3.4 MEDIDA DE DUREZA BRINELL

A dureza das seis amostras, após solubilização e envelhecimento artificial, foi medida na escala Brinell, utilizando o durômetro disponível no Laboratório de Metalografia da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

Este ensaio consiste em pressionar uma esfera de aço endurecido sobre a superfície da amostra, aplicando uma carga por alguns segundos e medindo o diâmetro da impressão. A dureza Brinell é a relação entre a carga aplicada e a área da calota esférica impressa no material (ABAL, 2011). Como a área depende da profundidade da impressão, a dureza é obtida através de cálculo, utilizando-se a seguinte equação:

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

sendo F a carga aplicada, D o diâmetro da esfera e d o diâmetro da impressão.

Os ensaios foram realizados com uma esfera de 2,5 mm, com carga de 15,625 kgf por 30 segundos. De maneira a se aumentar a confiança nas medições, foram realizadas 5 medidas por amostra.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As medições de diâmetro das calotas impressas nas amostras nos ensaios de dureza, bem como os valores de dureza calculados, estão apresentadas na Tabela 8.

Tabela 6: Dados do ensaio de dureza Brinell

Ts (°C)	440		460		480		500		520		540	
	d	Dureza (HB)	d	Dureza (HB)	d	Dureza (HB)	d	Dureza (HB)	d	Dureza (HB)	d	Dureza (HB)
Medida 1	0,70	40	0,68	42	0,78	32	0,64	48	0,69	41	0,66	45
Medida 2	0,74	36	0,66	45	0,71	39	0,68	42	0,68	42	0,68	42
Medida 3	0,74	36	0,68	42	0,71	39	0,67	44	0,67	44	0,66	45
Medida 4	0,69	41	0,68	42	0,70	40	0,70	40	0,69	41	0,67	44
Medida 5	0,66	45	0,68	42	0,76	34	0,67	44	0,69	41	0,68	42
Média	0,71	39	0,68	43	0,73	37	0,67	43	0,68	42	0,67	44
Desvio Padrão	0,031	3,538	0,008	1,059	0,032	3,151	0,019	2,588	0,008	1,010	0,009	1,184

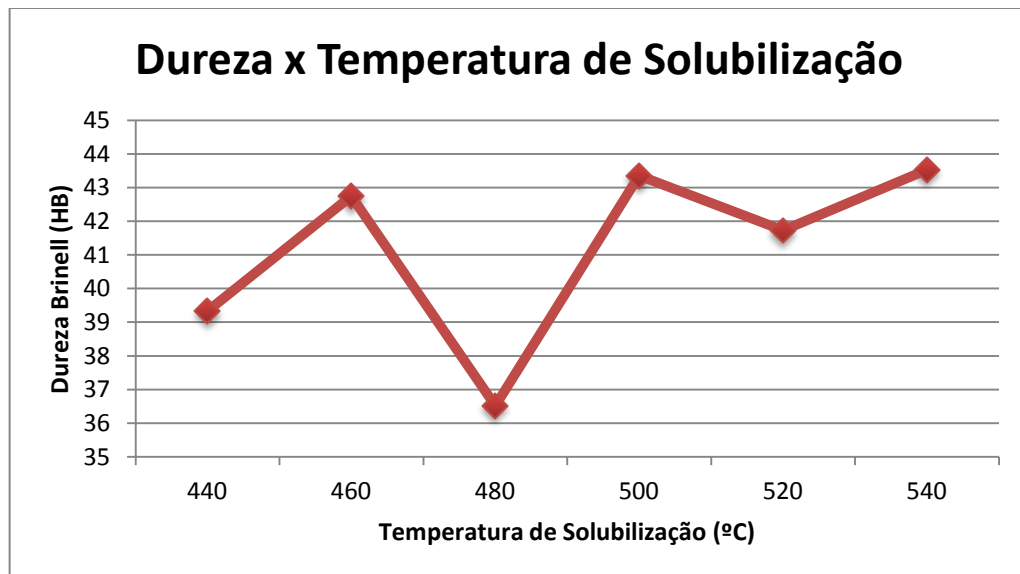
Fonte: do autor

Para melhor visualização dos resultados, o Gráfico 1 relaciona as médias das durezas obtidas na condição envelhecida artificialmente, para cada temperatura de solubilização utilizada.

Em geral, os resultados mostraram-se dentro da expectativa. Quanto maior a temperatura de solubilização, maior o potencial termodinâmico para a precipitação no envelhecimento. A solubilidade da fase Mg₂Si no alumínio aumenta com a elevação da temperatura, favorecendo a formação de precipitados finos e uniformemente distribuídos, proporcionando um aumento na dureza do material (SOUZA, 2006). A única exceção é a amostra solubilizada a 480°C, que apresentou valores inferiores à tendência. Neste caso, é provável que tenha ocorrido alguma variação de temperatura durante a solubilização, prejudicando a precipitação de Mg₂Si no envelhecimento.

Este defeito poderia ser explicitado a partir de uma análise metalográfica, utilizando um microscópio eletrônico de varredura (MEV). Entretanto, este método foi desconsiderado devido à baixa disponibilidade do MEV da Universidade Presbiteriana Mackenzie, sendo as medidas de dureza suficientes para as discussões dos resultados deste estudo.

Gráfico 1: Dureza obtida em função da temperatura de solubilização



Fonte: do autor

De acordo com o Guia Técnico do Alumínio - Extrusão (ABAL, 2014), a dureza das ligas 6060 extrudadas e envelhecidas artificialmente a 180 °C durante 3 horas é de aproximadamente 60 HB. O valor obtido nas amostras é inferior ao encontrado na literatura devido ao fato de que as amostras não foram extrudadas, reproduzindo-se apenas, nos tratamentos térmicos de solubilização, a temperatura emergente dos perfis. Nas ligas extrudadas e envelhecidas artificialmente, além do efeito do endurecimento por precipitação, há também o efeito do endurecimento por deformação na extrusão a quente.

A menor dureza das amostras solubilizadas em temperaturas mais baixas, em especial a 440 °C (inferior à faixa de temperaturas emergentes para atingimento da têmpera T5 na liga 6060), evidencia a influência da temperatura emergente na dureza dos perfis extrudados. Neste caso, o Mg e o Si disponíveis na liga não foram totalmente solubilizados, diminuindo o potencial termodinâmico para a precipitação no envelhecimento e, conseqüentemente, fazendo com que a dureza na condição envelhecida fosse menor do que nas amostras solubilizadas em temperaturas mais altas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho, foi feita uma análise da influência da temperatura emergente da liga de alumínio 6060 sobre sua dureza, após envelhecimento artificial.

As amostras foram homogeneizadas, solubilizadas em diferentes temperaturas, de forma a reproduzir a temperatura de saída da prensa de extrusão, envelhecidas artificialmente e avaliadas quanto à dureza. Os resultados obtidos ficaram dentro da expectativa. Os valores de dureza foram abaixo dos valores da literatura, pois não houve o endurecimento por deformação resultante da extrusão a quente. Uma das amostras apresentou resultados fora da faixa esperada, provavelmente por não ter sido solubilizada de forma correta.

A temperatura emergente possui um papel crucial na extrusão a quente de ligas de alumínio da série 6XXX. Temperaturas abaixo da faixa para atingimento da têmpera T5 não promovem solubilização de todo o Mg e Si presentes no perfil, acarretando uma formação insuficiente de Mg_2Si na etapa de envelhecimento.

Com base nos dados obtidos, é possível afirmar que houve uma queda de 10% na dureza do material solubilizado a 440 °C (fora da faixa para atingimento da têmpera T5), em comparação ao solubilizado a 540 °C. Para que o produto esteja de acordo com as especificações necessárias, é essencial que a temperatura de saída da prensa de extrusão esteja dentro da faixa ideal para a liga em questão.

REFERÊNCIAS

- NOGUEIRA, João Sobrinho Simões Aguiar. **Recozimento de homogeneização da liga 6063 na empresa SAPA II Perfis**. 2012. 54 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade do Porto, Porto, 2012. Disponível em: <https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/65031/2/27565.pdf>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- OLIVEIRA, Mário Ulguim. **Influência da Variação no Grau de Deformação em uma Liga de Alumínio 6063 nas Propriedades Mecânico-Metalúrgicas**. 2015. 94 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande, Rio Grande do Sul, 2015. Disponível em: <http://repositorio.furg.br/handle/1/8445>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- BONFITTO, Guilherme Bueno Barroso. **Estudo do Comportamento Mecânico da Liga Al-Mg-Si 6005 A Solubilizada e Envelhecida**. 2016. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2016. Disponível em: <http://tede.mackenzie.br/jspui/handle/tede/3208>. Acesso em: 26 mar. 2021.
- SZILÁGYI, Gisele. **Processo de Fabricação de Ligas de Alumínio**. São Paulo, 2018. 110 slides.
- RODRIGUES, Gabriel Lopes. **Efeitos dos Tratamentos Térmicos em Ligas de Alumínio**. 2015. 39 f. Monografia (Especialização) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade de Rio Verde, Rio Verde, 2015. Disponível em: <https://www.unirv.edu.br/conteudos/fckfiles/files/EFEITOS%20DOS%20TRATAMENTOS%20TERMICOS%20EM%20LIGAS%20DE%20ALUMINIO.pdf>. Acesso em: 3 maio 2021.
- DALLA TORRE, Matheus Henrique et al. **Análise de Não Conformidades em uma Indústria de Extrusão de Alumínio**. 2018. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2018. Disponível em: http://www.dep.uem.br/gdct/index.php/dep_tcc/article/view/1583. Acesso em: 26 mar. 2021.
- ABAL. **Anuário Estatístico Alumínio 2019**. São Paulo: Abal, 2019. 88 p. Disponível em: <https://abal.org.br/anuario-estatistico-2019-download-pdf/>. Acesso em: 3 maio 2021

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

CORRÊA, Renan David. **Influência da redução do tempo de tratamento térmico de homogeneização contínua na microestrutura e qualidade metalúrgica de tarugos de alumínio, liga 6063 e diâmetro de 6"**. 2014. 138 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2014. Disponível em:

<https://repositorio.ufscar.br/bitstream/handle/ufscar/7350/DissRDC.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 3 maio 2021.

MAIA, André Miguel Pires. **Efeito dos ciclos de solubilização e envelhecimento no comportamento da liga de alumínio 6101**. 2012. 79 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: 26 mar. 2021.

SZILÁGYI, Gisele. **Tratamentos Térmicos das Ligas de Alumínio**. São Paulo, 2008. 71 slides.

SZILÁGYI, Gisele. **Extrusão da Série 6XXX**. São Paulo, 2012. 197 slides.

CAMPANA, Rodrigo Camargo. **Parâmetros de processo, microestrutura e textura das ligas de alumínio 6063 e AA6082 extrudadas**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-01042008-175024/publico/Dissertacao_mestrado_Rodrigo_Campana.pdf. Acesso em: 21 maio 2021.

SANTOS, Laisa Pereira dos et al. **Efeito de Variáveis de Extrusão a Quente sobre Acabamento Superficial de Liga de Alumínio**. 2019. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 2019.

BEIL, Wendel Leme. **Projeto e montagem de um sistema para lingotamento contínuo sob agitação eletromagnética para ligas de Al-Si**. 2015. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2015. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265805>. Acesso em: 21 maio 2021.

ABAL. **Guia Técnico do Alumínio**: Extrusão. 5. ed. São Paulo: Associação Brasileira do Alumínio, 2014.

SOUZA, Henrique Pedrini de. **Efeito da Temperatura de Solubilização no Envelhecimento da Liga de Alumínio 6061**. 2006. 37 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2006. Disponível em: https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2006-1_henrique_pedrini.pdf. Acesso em: 28 nov. 2021.

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.