

TECNOLOGIA DE FABRICAÇÃO DE LIGAS DE ALUMÍNIO PARA USO ELÉTRICO¹

Carlos Humberto Cappellotto²
Bruna Godoi Meirelles³

Resumo

O presente trabalho apresenta alguns dos aspectos relevantes para a fabricação de fios de ligas de Alumínio, empregados em condutores elétricos

Palavras-chave: Fios de liga alumínio; Trefilação ligas alumínio; Condutores alumínio; Liga alumínio uso elétrico.

ALUMINUM ALLOYS TECHNOLOGY FOR ELECTRICAL USE

Abstract

The present work features some of the main aspects for production of Aluminum alloys used in electrical conductors

Key words: Aluminum alloy wires; aluminum alloys wire drawing; Aluminum conductors; Aluminum alloy for electrical use.

¹ *Contribuição técnica ao 3º Seminário de Trefilação: Arames, Barras e Tubos de Metais Ferrosos e Não-ferrosos, 28 a 30 de novembro de 2012, São Paulo, SP.*

² *Eng. Metalurgista. Votorantim Metais.*

³ *Eng. Metalurgista. Votorantim Metais.*

1 INTRODUÇÃO

O trabalho apresenta alguns dos principais aspectos da tecnologia de fabricação de liga de Alumínio para uso em condutores elétricos

2 MATERIAL E MÉTODOS

Material originário de outros trabalhos, referenciados ao longo deste texto, versando sobre temas correlatos e da experiência do autor, colhida durante mais de 20 anos no segmento de condutores elétricos

3 MATÉRIA PRIMA – LIGA AL – MG – SI , LIGA 6201, CONFORME ASTM B398

3.1 Composição Química

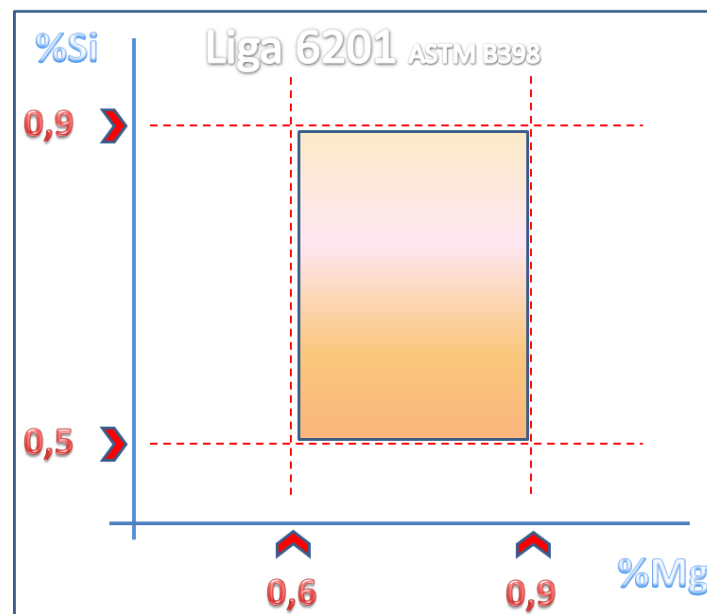


Figura 1.

Conforme podemos verificar na Figura 1, os limites especificados na norma original de referência, são de Si = 0,5% a 0,9% e Mg = 0,6% a 0,9%.

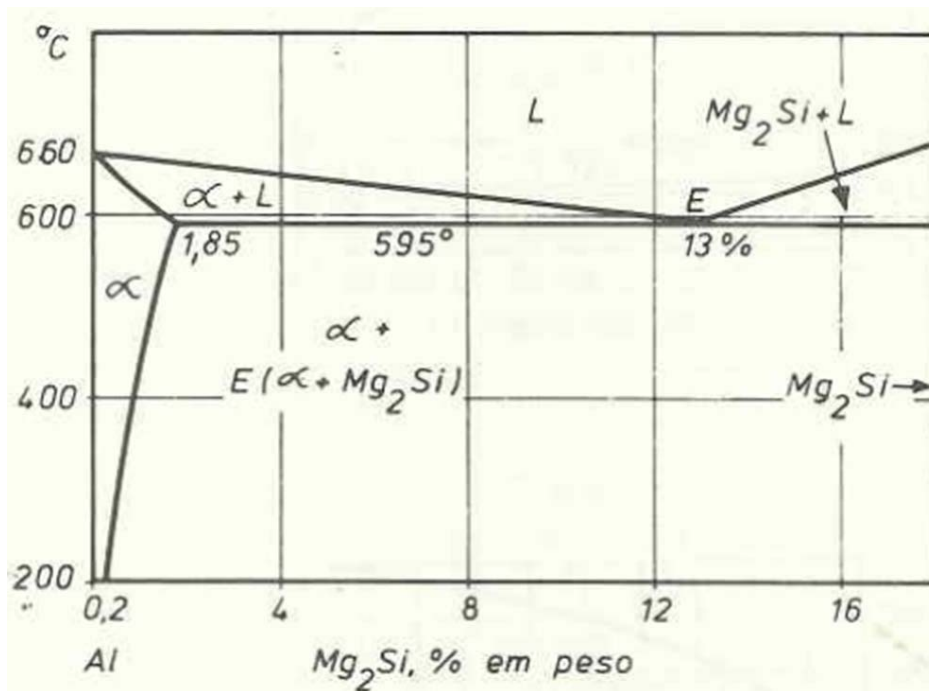


Figura 2. Diagrama de Equilíbrio quase Binário Al- Mg_2Si .⁽¹⁾

O composto formado é o intermetálico Mg_2Si e sua proporção estequiométrica resulta numa relação $Mg/Si = 1,73$.

Teores de Mg que resultem em $Mg/Si > 1,73$ reduz fortemente a solubilidade de Mg_2Si no reticulado fase α , interferindo na resposta do material ao envelhecimento. Já o Si, combina-se com Fe, para formar $AlFeSi$. Por isso deve-se adicionar excesso de Si, aproximadamente 1%Fe se combina com 0,5%

Entretanto, é prática normal de vários fabricantes estabelecer limites diferenciados de forma a permitir melhor processamento, conforme o diâmetro do fio.

3.2 Vergalhão de Fundição/Laminação Contínua

O adequado processo de obtenção do Vergalhão da Liga 6201 é, com certeza, determinante para o bom andamento da trefilação posterior. A liga fornece seu desempenho diferenciado pelo mecanismo de endurecimento por precipitação. Duas das principais etapas, deste processo, acontecem nas fronteiras da linha de fundição e laminação contínuas, que são a solubilização e, em seguida, o resfriamento brusco (*quenching*). Resultando numa SSSS (solução sólida super saturada) do Mg_2Si na matriz de fase α .

Não é, obviamente, escopo deste trabalho analisar em detalhes a fundição, nem laminação. Porém alguns pontos merecem ser visitados.

3.2.1 Metal líquido

Atenção especial deve ser reservada a correta dissolução e homogeneização de Si e Mg, após adição das ante-ligas. Não é raro observar, quando da ocorrência de má dissolução, flutuações importantes de composição química ao longo de uma mesma carga de metal líquido.

3.2.2 Formação da barra

Condição de resfriamento no molde anelar (Roda de Moldagem) é particular para a liga 6201. A extração de calor, em relação ao 1350 por exemplo, deve ser menor, principalmente nas regiões iniciais. A não observância destes aspectos pode resultar em defeitos na barra como trincas, “gotas frias”, exsudações, asperezas etc.⁽²⁾

Na Figura 2, temos esquemático das duas primeiras zonas de resfriamento na Roda de Moldagem. Zona A, o metal líquido resfria apenas pelo contato com o molde. Zona B, Super crítica para resfriamento, início da formação do *skin* sólido. Extração de calor deve ser gradual, crescente e homogênea

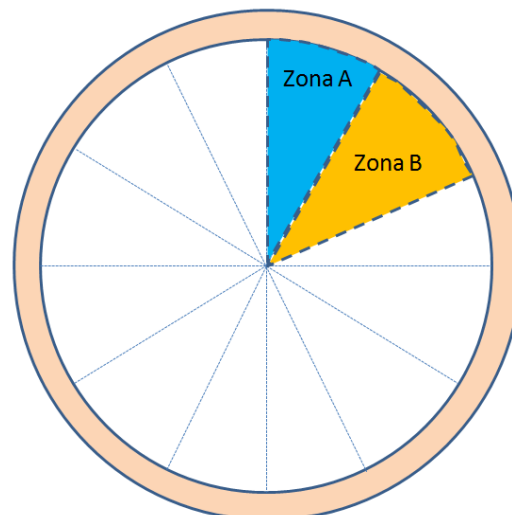


Figura 2. Roda moldagem.

3.2.3 Solubilização/resfriamento

Forno de reaquecimento da Barra deve possuir potência de sobra para, efetivamente, solubilizar completamente a barra emergente da roda de moldagem. Da mesma forma, o resfriador (*quenching*) deve ser bem dimensionado para reter o precipitado em solução.

Os problemas decorrentes da baixa capacidade de aquecimento e/ou resfriamento somente serão detectados posteriormente, pela pobre trefilabilidade e/ou não conseguir as propriedades planejadas.

4 TREFILAÇÃO

4.1 Desenrolamento do Rolo de Vergalhão

Uma das características do processamento de vergalhão de ligas, como a 6201, é sua resistência mecânica, intrinsecamente maior que o 1350. Acarreta uma maior dificuldade ao desenrolar. Aliado a isto, há uma grande variedade nas dimensões dos rolos de cada fabricante, sendo que nem sempre é possível “encaixar” rolo comprado externamente no desenrolador (*pay-off*) existente. Há casos, ainda, que o trefilador não possui desenrolador

É usual, portanto, observarmos utilização da liga 6201 conforme Figura 3c, rolo estático, tirado pelo centro, sendo necessária estrutura acima do rolo para facilitar o desprendimento das espiras.

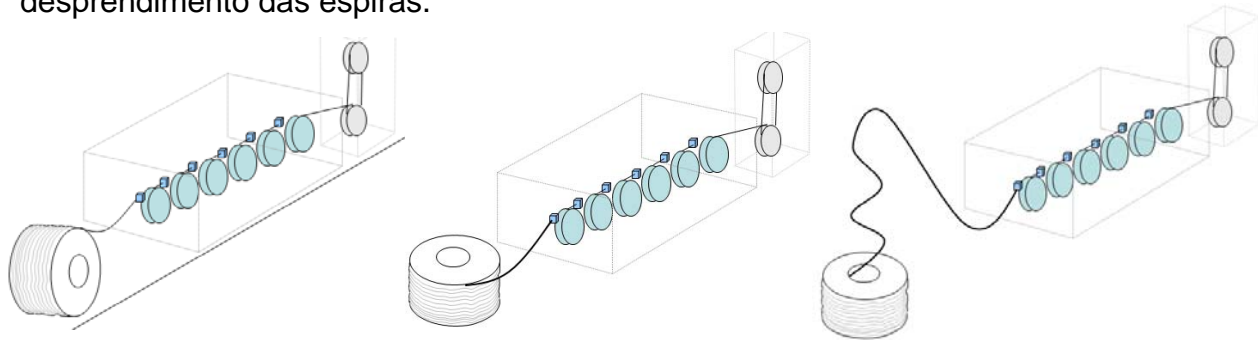


Figura 3. (a) “eye-to-site” / “derule”; (b) “eye-to-sky” / “derule”; (c) “eye-to-sky” / “defile”.

Desta última forma verifica-se já, precocemente, que o processamento terá restrição de velocidade. Voltaremos a este tema mais à frente.

4.2 Fieiras

Comentaremos, a exemplo do capítulo 3.2, brevemente sem descer a detalhes.

4.2.1 Tipo

É bastante conhecida a necessidade do uso de fieiras de materiais mais resistentes ao desgaste do que aquelas empregadas no 1350, a saber, Carbetto de Tungstênio (Widia). O de maior utilização são os núcleos de diamante policristalinos (PCD).

4.2.2 Geometria

A princípio, é função da redução em área que está sendo aplicada. Mas, já que não serão recomendáveis reduções mais severas, por regra geral o ângulo de redução (2α) de 18° é o escolhido para reduções usuais da sequência “awg” (20,7% redução em área).

4.2.3 Cálculo da série de fieiras

Assumindo a premissa do uso de equipamentos de trefilação de múltiplos passes (*tandem*).

Reduções ao longo da série dependem, obviamente, do tipo de trefila disponível, se é com acionamento único ou se há o recurso de variar velocidade de cada volante individualmente. Assumindo o primeiro caso como o mais freqüente, as reduções deveriam ser limitadas no máximo para obter-se escorregamento = zero. Somente no 1º e 2º passes poder-se-ia “forçar” algo em torno de 30% e 25%, respectivamente.

4.3 Temperatura

A temperatura do fio trefilado é, talvez, o fator de maior importância no processo de trefilação, no geral e, em especial, no caso das ligas de Alumínio, devido seu, relativo, baixo ponto de fusão.

Praticamente toda a energia de deformação, após o processo ter atingido seu equilíbrio, é convertida em calor, transmitido imediatamente para aquecimento do fio trefilado.

Segundo Wright,⁽²⁾ para fios de alumínio 1350, considerando-se reduções de 20,7% em área e tensão de trefilação $\sigma_t = 85$ MPa, o aumento de temperatura, somente em um passe é de cerca de 35°C, com temperatura ambiente de 20°C.

$$T_{eq} \sim T_{amb} + \sigma_t / (C/\rho) \quad \text{Eq.1}$$

Este aumento de temperatura é expresso pela Eq.1, onde

T_{eq} = temperatura de equilíbrio

T_{amb} = temperatura ambiente

σ_t = Tensão de Trefilação

C = Calor específico do fio

ρ = Densidade do fio

Por sua vez, a tensão de trefilação (σ_t) é função da tensão de escoamento σ_e . Teremos, portanto, para o 6201 condições de maior geração de calor, a cada passe, na proporção do incremento de sua tensão de escoamento em relação ao 1350.

O aquecimento cumulativo, durante os vários passes, não adequadamente dissipado, pode levar o fio atingir níveis próximos ao range de temperatura de envelhecimento (140°C a 160°C), interferindo na própria trefilação e no atingimento das propriedades do produto final.

4.4 Velocidade

Na modelação teórica referente aos esforços de trefilação, verificamos que todos seus componentes, conforme Wright,⁽²⁾ Trabalho Uniforme, Trabalho Redundante e Trabalho de Atrito, são função direta da Tensão de Escoamento.

Por outro lado, nenhuma destas componentes dependem da velocidade de trefilação, para um dado passe. Como vimos em 4.3, o aquecimento é função da tensão de trefilação, ou seja o calor gerado, quer pela deformação uniforme, deformação redundante ou atrito, em regra geral, não variam com a velocidade.

Por outro lado, o calor dissipado é diferente. O gradiente de calor, originado na região de contato fieira/fio, flui primeiramente da periferia do fio para o seu interior, mais frio. Uma parcela, menor, deste calor flui através da carcaça da fieira. A seguir, ambos componentes são envolvidos pelo lubrificante, transferindo calor para este.

A transferência de calor é dependente do tempo decorrido entre passes e do tempo de contato fio / lubrificante

O calor gerado terá menores oportunidades de ser dissipado com o aumento da velocidade.

Em velocidades mais altas, este processo não tem tempo hábil para acontecer.

Na prática das operações industriais, os sistemas, os quais foram originariamente dimensionados para trefilação do 1350, não tem capacidade de reserva para absorção do calor adicional gerado pelo 6201.

* excessão para os casos onde ocorra variação na tensão de escoamento pela taxa de deformação

Apesar dos cuidados diferenciados com relação a lubrificantes e fieiras as operações de trefilação de 6201, invariavelmente, acontecem com redução de velocidade.

4.5 Lubrificação

O propósito da lubrificação, de maneira geral, é prover um filme contínuo de lubrificante entre ambas as superfícies do fio e da fieira, afim de prevenir que as duas superfícies venham a entrar em contato. Condição esta conhecida como **lubrificação hidrodinâmica**.

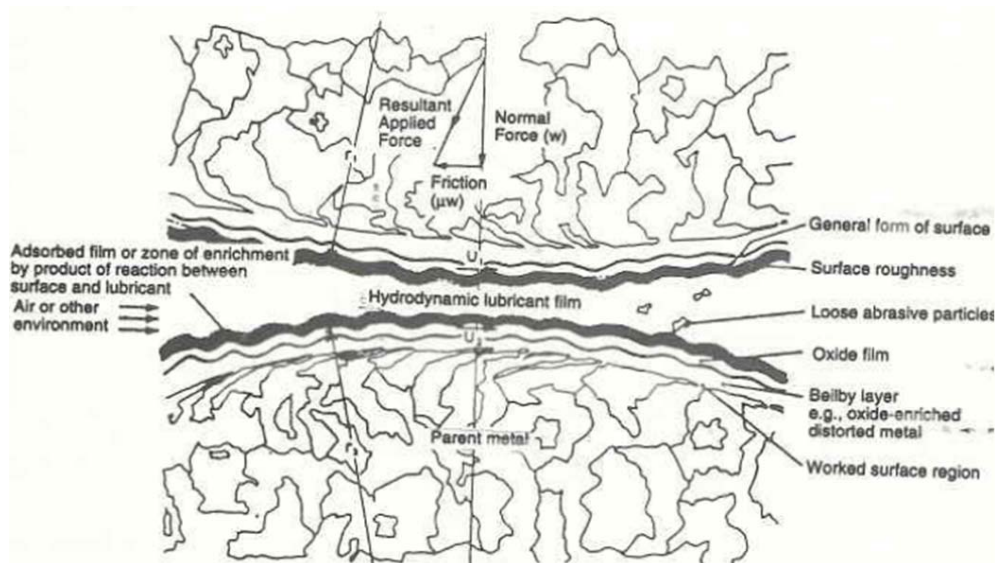


Figura 4. Esquemático de Lubrificação Hidrodinâmica.⁽⁴⁾

Além da criação deste filme tenaz entre duas superfícies, os lubrificantes devem apresentar algumas propriedades, como:

- capaz de suportar altas pressões e temperaturas, minimizando atrito e desgaste;
- não deve ser afetado negativamente por contaminantes metálicos e/ou diferentes óleos de contaminação do sistema; e
- deve prover efetiva refrigeração para remover o calor gerado pela deformação e atrito.

Com relação ao último fator, seria esperado para o Al e, em especial, para 6201, que o sistema lubrificante fosse composto de uma emulsão, para maximizar a extração de calor.

Infelizmente isto não é possível, por dois fatores:

- a baixa tensão do filme emulsionável; e
- óxidos de alumínio são facilmente hidrolisados e dissolvidos em água. Acumulam-se nas regiões de redução das fieiras, bloqueando sua entrada.

Como vimos anteriormente, busca-se a condição hidrodinâmica como condição ideal de lubrificação mas, na prática, devido a fatores como altos esforços, movimentos irregulares das superfícies, desalinhamentos, resfriamento inadequado, etc, a espessura do filme separando as duas superfícies torna-se cada vez mais reduzida, a ponto de ser inferior a altura das asperezas superficiais.

Neste ponto teremos a **lubrificação limite** e o lubrificante deve prover proteção às superfícies deslizando em sentidos opostos para evitar ou reduzir a solda das protuberâncias, na ausência do filme hidrodinâmico.

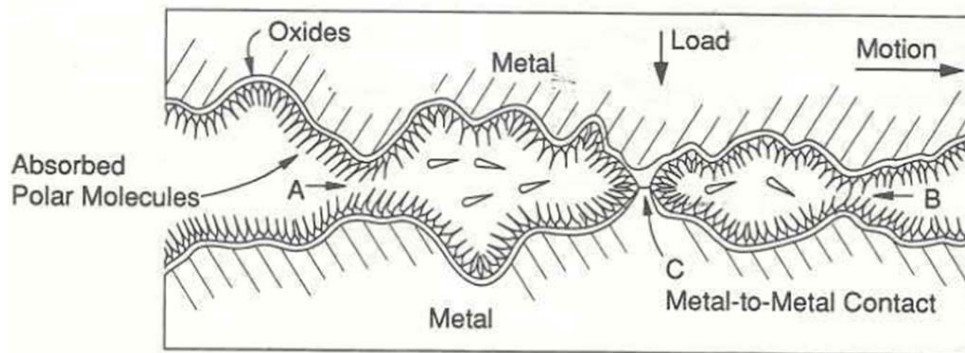


Figura 5. Esquemático de Lubrificação Limite.⁽⁴⁾

5 Pontos de Melhoria

5.1 Vergalhão de Fundição Contínua

Introdução / ampliação na automação dos controles do processo, de forma a integrar um maior número de variáveis

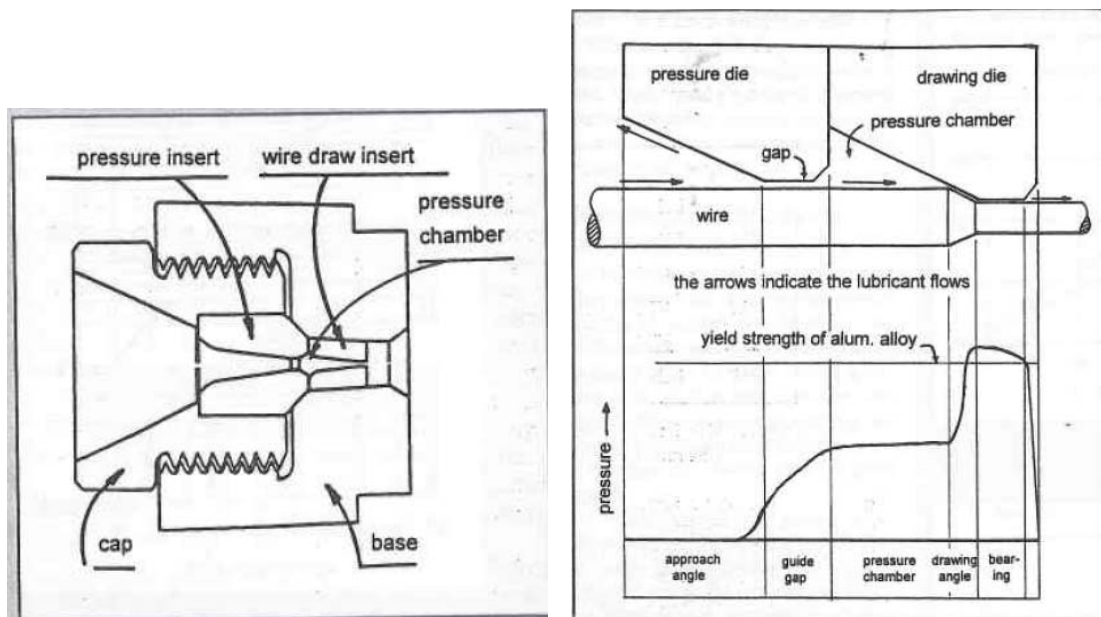


Figura 6.

5.2 Trefilação

5.2.1 Utilização de feiras pressurizadas⁽⁵⁾

Visa prover pressão adicional ao filme lubrificante de forma que este estabilize-se em condição hidrodinâmica. Minimizando atrito, reduzindo geração de calor e, por conseqüência, permitindo aumento de velocidade.

5.2.2 Upgrade de sistemas de troca térmica para lubrificantes, de forma a garantir $T_{\text{sistema}} = 40^{\circ}\text{C Max.}$

6 CONCLUSÃO

É tendência já consolidada a utilização de fios de Liga 6201 para condutores elétricos. Entretanto, verificamos que ainda há espaço para desenvolvimentos no processo de fabricação, principalmente de Trefilação.

Capturar ganhos com aumento de velocidade , através do ataque dos seus fatores condicionantes e/ou limitantes é necessidade premente.

REFERÊNCIAS

- 1 Peters, Dennis K.-“The Properzi technique for production of Non Ferrous Wire Rod” - Non Ferrous Wire Handbook-Volume 3 – pag 155 a 176 – Wire Association, 1995
- 2 Wright, Roger N. – “Wire Techology – Process Engineering and Metallurgy”- Elsevier, USA, 2011
- 3 Coutinho, Telmo de Azevedo. Metalografia de Não Ferrosos,São Paulo- 1980
- 4 Tripp, Ike. “Lubricants and Process Control for copper wiredrawing” – Non Ferrous Wire Handbook-Volume 3 – pg406, 407 – Wire Association, 1995
- 5 Matthews, Edward – “Pressure die drawing of aluminum alloys” – Wire Journal International – Março/2002