

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI  
MARCELLO VAN MOORSEL

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE  
SOLUBILIZAÇÃO, LAMINAÇÃO EM TEMPERATURA CRIOGÊNICA E  
ENVELHECIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024**

São Bernardo do Campo

2017

MARCELLO VAN MOORSEL

**DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE  
SOLUBILIZAÇÃO, LAMINAÇÃO EM TEMPERATURA CRIOGÊNICA E  
ENVELHECIMENTO DA LIGA DE ALUMÍNIO 2024**

Projeto de Iniciação Científica apresentado ao Centro Universitário FEI, como parte dos requisitos do Programa PIBIC-FEI. Orientado pelo Prof. Dr. Júlio César Dutra.

São Bernardo do Campo

2017

## INTRODUÇÃO

O alumínio é largamente utilizado em aplicações estruturais, principalmente nas indústrias automobilística e aeroespacial, devido à sua boa resistência, peso, trabalhabilidade e resistência à corrosão. No entanto, para que o seu uso seja ampliado, as suas propriedades mecânicas devem ser aprimoradas.

As ligas de alumínio da série 6000 têm sido extensivamente estudadas devido ao seu menor custo, quando comparadas às séries 2000 e 7000. No entanto, as ligas da série 2000 apresentam valores superiores de resistência à fadiga, módulo de elasticidade, alongamento, limite de escoamento, resiliência, dureza e razão resistência sobre peso.

Os tratamentos de envelhecimento artificiais são procedimentos comuns para o desenvolvimento das propriedades mecânicas das diversas ligas de alumínio. No entanto, a magnitude das melhorias obtidas apenas pela precipitação é insuficiente.

Com o intuito de se atingir um aprimoramento significativo nas propriedades mecânicas, diversas técnicas envolvendo deformação plástica severa (SPD) têm sido estudadas. Esses processos visam produzir nanoestrutura homogênea ou grãos ultrafinos (grãos com menos de 1  $\mu\text{m}$ ), o que confere ao material maior resistência e ductilidade.

Um dos processos que tem sido identificado com potencial rota para produção de estrutura de grãos ultrafinos é a laminação em temperatura criogênica, ou criolaminação. Apesar de esse processo diminuir a ductilidade do material conforme ocorre o aumento da resistência, espera-se que a combinação da criolaminação com o tratamento térmico por precipitação seja capaz de resultar em altos valores de resistência e dureza sem que a ductilidade seja severamente comprometida.

O presente projeto tem como objetivo o estudo da evolução da dureza em uma liga de Al 2024 por duas diferentes rotas de processamento: solubilização seguida de laminação e envelhecimento (artificial e natural) e solubilização seguida de criolaminação e envelhecimento (artificial e natural). Em seguida, essas amostras serão cortadas e avaliadas no que diz respeito à dureza e ao ensaio de tração para a amostra que tenha atingido o máximo de dureza.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Boa parte dos métodos SPD não são economicamente aplicáveis, já que apresentam limitações quanto ao tamanho da peça fabricada, envolvem etapas demasiadamente demoradas, incluem produtos que podem deteriorar as propriedades mecânicas finais, entre outros motivos.

A laminação em temperatura criogênica, ou criolaminação, é um processo de laminação a frio cuja temperatura (-196 °C) é mantida por nitrogênio líquido. É um dos processos SPD economicamente viáveis, pois é capaz de produzir chapas longas com microestrutura ultrafina continuamente (Panigrahi & Jayaganthan, 2011), o que permite a produção em larga escala, além de não gerar nenhuma poluição ambiental (Yu, et al., 2013).

Durante a laminação em temperatura criogênica, ocorre a supressão da recuperação dinâmica no material e a formação e acúmulo de discordâncias, facilitadas pela tensão aplicada em baixa temperatura. A densidade de discordâncias atinge um patamar estável alto, o que aumenta o número de sítios de nucleação durante o recozimento posterior e resulta em uma microestrutura de grãos ultrafinos (Panigrahi & Jayaganthan, 2011) (Yu, et al., 2013) (Niranjani, Kumar, & Sarma, 2009).

Combinado com processos de tratamento térmico de solubilização, têmpera e envelhecimento natural ou artificial, esse método tem se mostrado capaz de produzir ligas de alumínio não só com alta resistência e dureza, mas também com boa ductilidade (Niranjani, Kumar, & Sarma, 2009) (Yu, et al., 2013).

O estudo de Yu et al. (2013) com chapas de alumínio 6061 mostraram que a parte das discordâncias, que atingiram uma alta densidade durante a fase de criolaminação, foram aniquiladas durante o envelhecimento, o que aumentou a ductilidade das chapas. Ainda assim, a formação de precipitados nanométricos no envelhecimento ocasionou o aumento dos valores de resistência do material.

Ademais, Niranjani, Kumar e Sarma (2009), ao estudarem uma liga modificada de Al 6061, constataram que o aumento na dureza e resistência durante o envelhecimento foi capaz de superar as reduções nos valores dessas mesmas propriedades mecânicas durante a recuperação. Isso é possível devido ao fato de os fenômenos de precipitação e recuperação ocorrerem simultaneamente.

A influência dos solutos e das partículas de segunda fase durante a laminação em temperatura criogênica foi o objeto de estudo de Panigrahi e Jayaganthan (2011). Nos trabalhos com a liga Al 6063, constatou-se o estado ideal para criolaminação é de apenas solubilizado e temperado. Os solutos retidos durante o processo transformam-se em precipitados coerentes

durante o envelhecimento, o que obstrui o movimento das discordâncias e resulta no aumento da dureza do material.

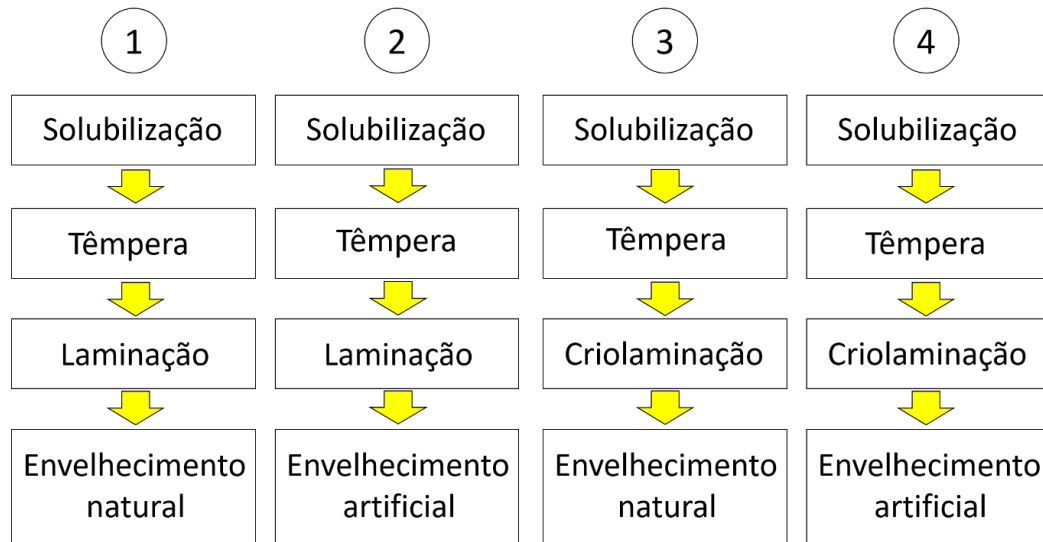
Dessa forma, conclui-se que as condições do tratamento térmico de solubilização inicial influenciam intensamente os resultados da combinação dos processos de criolaminação e envelhecimento. Panigrahi e Jayaganthan (2010) estudaram chapas de ligas Al 6063 temperadas para definir as melhores condições de solubilização pré-criolaminação. Observou-se que o aumento na dureza das amostras após o envelhecimento foi constante em temperaturas de solubilização maiores que 490 °C. Porém, a temperatura ideal não foi definida através da maior dureza atingida: as amostras que atingiram os aumentos mais expressivos na dureza foram analisadas através da Difração de Elétrons Retroespalhados (EBSD). Dessa forma, a temperatura de solubilização que obteve maior aumento de dureza e menor tamanho de grão foi definida como ideal (no caso, 520 °C).

Outro fator que influencia fortemente a criolaminação é o tempo que o material é mantido em temperatura criogênica antes de ser laminado. Panigrahi e Jayaganthan (2010) observaram que as amostras de Al 6063 apresentaram aumento na resistência e no limite de escoamento quanto maior fosse o tempo de submersão em nitrogênio líquido. No entanto, esse aumento estabilizou após 30 minutos, sendo esse o tempo definido como ideal para a otimização do processo.

## METODOLOGIA

As amostras de alumínio 2024 utilizadas neste projeto terão dimensões 230 mm de comprimento, 70 mm de largura e 1,5 mm de espessura. Elas serão cortadas de chapas de um mesmo lote, já adquiridas e que estão no estado de envelhecidas naturalmente (T3), através de jato d'água. Serão estudados quatro grupos de amostras: solubilizadas, laminadas e envelhecidas naturalmente (grupo 1); solubilizadas, laminadas e envelhecidas artificialmente (grupo 2); solubilizadas, criolaminadas e envelhecidas naturalmente (grupo 3); e finalmente solubilizadas, criolaminadas e envelhecidas artificialmente (grupo 4). Cada grupo contará com 3 amostras, totalizando em 12 amostras a serem estudadas. A Figura 1 mostra os diferentes processamentos que serão realizados nesse projeto.

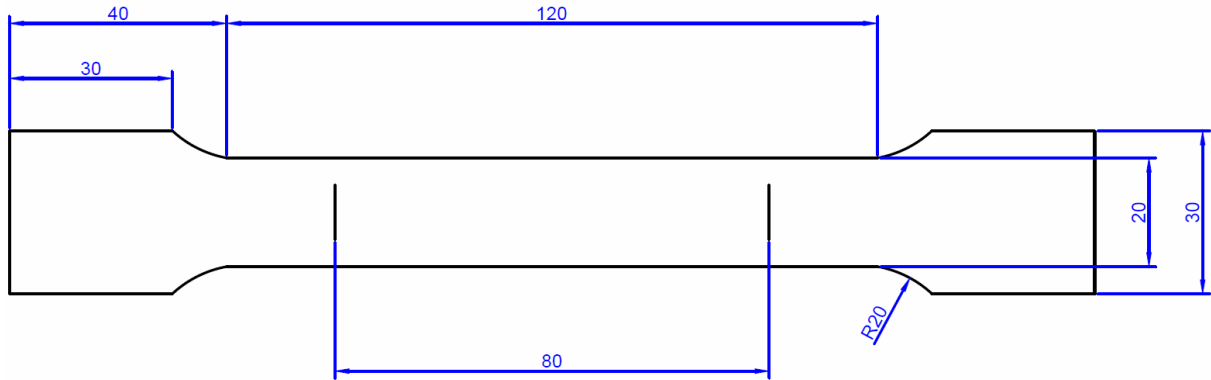
Figura 1. Grupos de processamento a serem investigados no presente projeto.



Fonte: Autor

Além dessas, uma amostra da chapa será enviada para análise química e um corpo de prova será usinado de acordo com a norma NBR ISO 6892 para ensaio de tração, o qual será realizado no laboratório de Engenharia de Materiais da FEI. A Figura 2 ilustra o corpo de prova a ser usinado.

Figura 2. Dimensões do corpo de prova para ensaio de tração.



Fonte: Autor.

Todas as amostras serão solubilizadas numa temperatura de 520 °C por 1 h e resfriadas rapidamente em água, produzindo uma solução sólida supersaturada de cobre na fase alfa. As amostras que serão criolaminadas ficarão mergulhadas por 30 minutos em nitrogênio líquido antes de cada passe no laminador. Todas as amostras serão laminadas até atingir a espessura de 1,25 mm, o que significa um grau de redução de 20% na espessura.

Após o encruamento, as amostras serão cortadas em pedaços menores, de 15 mm de comprimento, 7 mm de largura e 1,25 mm de espessura. É importante que o tempo entre a laminação e o tratamento de envelhecimento artificial seja curto para que seja evitado o efeito de envelhecimento natural. Nos grupos de amostras cujo tratamento de precipitação será artificial (grupos 2 e 4), o envelhecimento ocorrerá nas temperaturas e tempos apresentados na Tabela 1. Elas foram escolhidas com base na revisão bibliográfica realizada até o momento. Para esses grupos, o tempo entre a retirada das peças do forno e o ensaio de dureza deverá ser curto, para que o envelhecimento natural seja evitado.

Tabela 1. Temperaturas e tempos de envelhecimento a serem investigados no presente projeto.

<b>T (°C)</b>	<b>Tempo (minutos)</b>								
150	2	4	8	16	32	64	128	256	512
175	2	4	8	16	32	64	128	256	512
200	2	4	8	16	32	64	128	256	512

Fonte: Autor.

Para se mensurar o ganho de dureza nos processos cumulativos realizados, será realizado o ensaio de dureza Vickers com uma carga de 100 gf durante 15 s em todas as amostras de todos os grupos estudados. Cada pedaço de amostra será ensaiado pelo menos cinco vezes para controle estatístico dos valores de dureza lidos.

Nos grupos de amostras onde o envelhecimento será natural (1 e 3), o acompanhamento da variação da dureza será diário durante o período de quatro meses. Nos dois primeiros dias de envelhecimento natural, o acompanhamento da dureza deverá seguir o cronograma apresentado na Tabela 2, período no qual espera-se que ocorra o ganho de dureza mais significativo. Após esse período de dois dias, o envelhecimento natural será observado uma vez ao dia pelo período de 4 meses.

Tabela 2. Tempos de envelhecimento natural a serem investigados nos dois primeiros dias após laminação ou criolaminação.

<b>T (°C)</b>	<b>Tempo (minutos)</b>									
T <sub>ambiente</sub>	2	4	8	16	32	64	128	256	512	1024

Fonte: Autor.

Dentre as amostras de cada um dos quatro grupos, os parâmetros que apresentarem a maior dureza nesse projeto serão reproduzidos em novos corpos de prova para ensaio de tração, de modo a levantar a curva tensão-deformação para as condições identificadas como ideais.



## CRONOGRAMA

As atividades que serão desenvolvidas serão as seguintes:

Atividade 1: Elaboração da estratégia para a realização do processamento de criolaminação;

Atividade 2: Continuação da revisão bibliográfica contemplando a criolaminação de ligas de alumínio;

Atividade 3: Preenchimento do formulário FEIINF40 com vistas à compra dos insumos necessários para a realização do projeto;

Atividade 4: Conhecer as dependências dos laboratórios de materiais e das informações técnicas dos equipamentos que serão utilizados nos experimentos e treinamento dos equipamentos (laminador e fornos);

Atividade 5: Realizar um experimento completo com vistas à possibilidade de laminação e criolaminação das amostras;

Atividade 6: Realizar o processamento completo (grupos 1 e 2), ou seja, solubilização, têmpera, laminação e envelhecimento natural e artificial;

Atividade 7: Medida de dureza das amostras dos grupos 1 e 2;

Atividade 8: Realizar o processamento completo (grupos 3 e 4), ou seja, solubilização, têmpera, criolaminação e envelhecimento natural e artificial;

Atividade 9: Medida de dureza das amostras dos grupos 3 e 4;

Atividade 10: Comparação dos resultados obtidos com as diferentes rotas de processamento;

Atividade 11: Participação no Simpósio de Iniciação Científica do Centro Universitário da FEI;

Atividade 12: Comunicar-se semanalmente com o orientador, esclarecendo as etapas cumpridas, dificuldades e dúvidas a serem dirimidas;

Atividade 13: Elaboração dos relatórios parcial e final.

Todas essas atividades e sua cronologia podem ser vistas a seguir, na Tabela 3.

Tabela 3 – Cronograma de atividades a serem realizadas nesse projeto pelo candidato à bolsa de iniciação científica do Centro Universitário da FEI.

Atividade	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	■											
2	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	
3	■											
4	■	■										
5			■									
6				■	■	■	■					
7				■	■	■	■					
8					■	■	■	■				
9						■	■	■	■			
10										■		
11						■						
12	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
13						■						■

Fonte: autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBASCHIAN, Reza; ABBASCHIAN, Lara; REED-HILL, Robert E. **Physical Metallurgy Principles**. Boston: Publishing Company. 1992.
- Christian, John Wirill. The theory of transformations in metals and alloys. Oxford: Pergamon Press. 973p. 1965.
- Dye, D. (2012). *David Dye, Imperial College*. Retrieved Janeiro 25, 2017, from David Dye, Imperial College: <https://dyedavid.com/mse104/>
- Jacobs, M. H. (1999). *Precipitation Hardening: TALAT lecture 1204*. Birmingham: TALAT.
- Kim, W. J., Wang, J. Y., Choi, S. O., Choi, H. J., & Sohn, H. T. (2009, Maio 06). Synthesis of ultra high strength Al–Mg–Si alloy sheets by differential speed rolling. *Materials Science And Engineering A*, pp. 23-28.
- Niranjani, V. L., Kumar, K. C., & Sarma, V. S. (2009, Março 26). Development of high strength Al–Mg–Si AA6061 alloy through cold rolling and ageing. *Materials Science And Engineering A*, pp. 169-174.
- Panigrahi, S. K., & Jayaganthan, R. (2010, Novembro 17). Development of ultrafine-grained Al 6063 alloy by cryorolling with the optimized initial heat treatment conditions. *Materials And Design*, pp. 2172-2180.
- Panigrahi, S. K., & Jayaganthan, R. (2011, Janeiro 13). Influence of solutes and second phase particles on work hardening behavior of Al 6063 alloy processed by cryorolling. *Materials Science And Engineering A*, pp. 3174-3160.
- Porter, D. A., Easterling, K. E., & Sherif, M. Y. (2008). *Phase Transformations in Metals and Alloys*. CRC Press.
- Yu, H.-l., Tieu, A. K., Lu, C., Liu, X.-h., Godbole, A., & Kong, C. (2013, Janeiro 31). Mechanical properties of Al–Mg–Si alloy sheets produced using asymmetric cryorolling and ageing treatment. *Materials Science And Engineering A*, pp. 212-218.