

# MECANISMOS ENVOLVIDOS NOS PROCESSOS DE DEFORMAÇÃO DE UMA LIGA DE ALUMÍNIO 6063 <sup>(1)</sup>

Elaine Carballo Siqueira Corrêa <sup>(2)</sup>

Maria Teresa Paulino Aguilar <sup>(3)</sup>

Waldemar Alfredo Monteiro <sup>(4)</sup>

Paulo Roberto Cetlin <sup>(5)</sup>

## RESUMO

A análise e controle do trabalho a frio tem sido um dos principais problemas em Engenharia de Materiais em razão da complexidade dos processos envolvendo discordâncias e a não homogeneidade dessa operação dentro de uma microestrutura de deformação. Este trabalho apresenta os principais aspectos microestruturais resultantes da aplicação de diferentes processamentos mecânicos a frio (tração, torção, trefilação, além da combinação entre métodos) em uma liga de alumínio 6063 previamente recozida, bem como alguns mecanismos pertinentes. O principal objetivo deste trabalho é o entendimento das similaridades e as diferenças de mecanismos em cada processamento mecânico ou na combinação dos mesmos. Utilizou-se a microscopia eletrônica de transmissão (MET, tensão de aceleração: 200kV) para a análise das diversas microestruturas bem como a interação dos arranjos de discordâncias com as segundas fases, principalmente precipitados que participam ativamente nos mecanismos de deformação presentes.

Palavras-chave: caminho de deformação, microestrutura, discordância

---

(01) - Contribuição técnica a ser apresentada no 53º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de setembro de 1998, Belo Horizonte - MG.

(02) - Engenheira Mecânica, Aluna do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

(03) - Dr., Professora Adjunto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

(04) - Dr., Pesquisador do Departamento de Engenharia de Materiais, IPEN - MMM, Professor do Curso de Pós-Graduação, IPEN - USP, São Paulo.

(05) - Dr., Professor Titular do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia - UFMG, Belo Horizonte.

## INTRODUÇÃO

Uma das principais características dos metais é capacidade de serem conformados mecanicamente. As deformações plásticas introduzidas durante os processos de conformação a frio promovem mudanças dimensionais e alterações nas propriedades mecânicas do metal. As características de encruamento do material podem ser influenciadas por alterações, durante o processamento, da temperatura, da taxa de deformação e do caminho pelo qual o material é deformado (caminho de deformação). O comportamento mecânico decorrente dessas mudanças pode ser associado à microestrutura do metal deformado.

O efeito da variação da temperatura durante a deformação dos metais foi observado por LONGO e REED-HILL<sup>(1, 2)</sup>. A modificação da temperatura pode levar ao amaciamento ou ao aumento da taxa de encruamento. Os resultados obtidos estão associados ao rearranjo espacial das discordâncias em cada temperatura. Foi mostrado que a estrutura celular é determinada pela história térmica do material, ou seja, a temperatura é um fator importante na determinação da distribuição das discordâncias de um metal deformado. A densidade de discordâncias para a mesma deformação introduzida cresce à medida que a temperatura é abaixada. O início da formação de células pode ser atrasado ao se diminuir a temperatura de deformação. A baixas temperaturas a estrutura de discordâncias em geral é complexa tendendo à distribuição uniforme. A altas temperaturas, as discordâncias se apresentam menos emaranhadas e as paredes das células são mais definidas. Os mesmos pesquisadores<sup>(3)</sup> avaliaram a ocorrência de amaciamento por deformação como consequência da variação na velocidade de deformação, que, se aumentada, produz efeito análogo ao do decréscimo de temperatura. As deslocções se apresentam mais uniformemente distribuídas à medida que a velocidade de deformação é aumentada.

Assim como a temperatura e a taxa de deformação, o caminho de deformação também influencia as características de encruamento do material. Apesar de ser comum associar à deformação plástica o fenômeno de encruamento, dependendo do caminho pelo qual o material é deformado, esse pode amaciar ou ter a taxa de encruamento aumentada. POLAKOWSKI e PALCHOU DHURI<sup>(5)</sup> mostraram que o comportamento mecânico de metais trabalhados inicialmente a frio e posteriormente submetidos a esforços alternados não está associado ao encruamento progressivo. COFFIN e TAVERNELLI<sup>(6)</sup>, através de deformação cíclica por tração/compressão, verificaram que o alumínio pré-deformado ao ser submetido a esforços cíclicos pode encruar ou amaciar, dependendo da amplitude, número de ciclos e da natureza da pré-deformação. ARMSTRONG<sup>(7)</sup>, também utilizando alumínio, verificou que a curva tensão-deformação dependia não só da magnitude da pré-tração, mas também do caminho seguido para deformá-lo.

Uma evidência de que a trajetória de estados de deformação influencia as características de encruamento do material é o Efeito Bauschinger<sup>(4)</sup>, onde a inversão total no sentido de aplicação de esforços tem como consequência o amaciamento do metal. Este comportamento está relacionado ao arranjo geométrico das discordâncias que, na mudança do sentido de deformação, movem-se com mais facilidade do que se não tivesse havido esta mudança.

Neste trabalho foram avaliados os principais aspectos microestruturais resultantes da variação do caminho de deformação em uma liga de alumínio 6063. Para tal, o material foi processado por trefilação e/ou torção e/ou tração. Foi observado o comportamento da liga referente à resistência mecânica e à ductilidade durante os ensaios de tração. Isso se deu com a finalidade

de verificar a influência da aplicação de esforços cíclicos de torção no material recozido e trefilado em um passe e relacionar os resultados com os arranjos de discordâncias presentes.

## MATERIAL E MÉTODOS

**Material** – Foi utilizada a liga de alumínio 6063 (0,431%Si; 0,151%Fe; 0,016%Cu; 0,472%Mg; 0,068%Mn).

**Procedimento Experimental** – As etapas do procedimento experimental podem ser verificadas na figura 1. Após serem recozidos, alguns corpos de prova foram tracionados ou torcidos ciclicamente e tracionados. Outros foram trefilados em um passe e depois tracionados ou trefilados em um passe, torcidos ciclicamente e tracionados. Em todas as situações foi observada a microestrutura resultante do processamento mecânico. As taxas de deformação utilizadas foram similares em todos os processos.

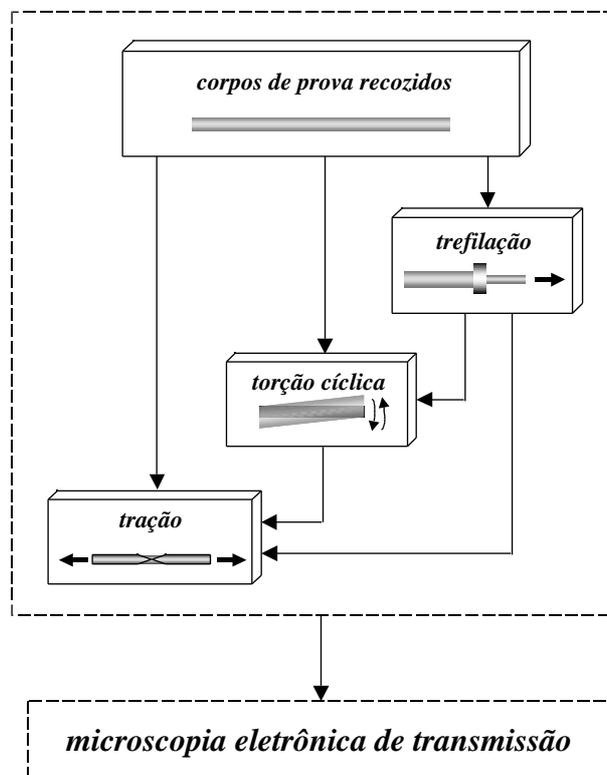


Figura 1 - Fluxograma do procedimento experimental.

**Corpos de Prova** – Para o processamento mecânico foram utilizados corpos de prova cilíndricos com diâmetro de 6,40 mm e comprimento de 390 mm, recozidos a 400°C durante 60 minutos.

**Trefilação** – Os corpos de prova foram trefilados em um passe em uma banca de trefilação *Bestlé*. O processo foi caracterizado por uma redução em área de 20%, semi-ângulo de 8°, velocidade de 17 mm/s e lubrificação com bissulfeto de molibidênio.

**Torção** – A torção cíclica foi realizada em um torno mecânico especialmente adaptado para o trabalho. A deformação imposta durante a aplicação dos esforços de torção foi de 2.8%, correspondendo a ângulos de 160° e 180° para o alumínio recozido e trefilado em um passe, respectivamente. Foram aplicados 20 ciclos de torção em cada amostra.

**Tração** – Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina *Kratos* com extensômetro eletrônico *Instron*. Foram observados os resultados referentes a limite de escoamento, limite de resistência e alongamento percentual. A taxa de deformação utilizada foi similar à da trefilação.

**Microscopia Eletrônica de Transmissão** – A análise da microestrutura foi realizada com tensão de aceleração de 200kV.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela I podem ser observados os resultados obtidos no ensaio de tração referentes a limite de escoamento, limite de resistência e alongamento percentual do alumínio recozido e trefilado em um passe, torcido ciclicamente ou não. Percebe-se que de acordo com o estado de encruamento inicial do material, a aplicação de esforços cíclicos de torção pode resultar em amaciamento ou encruamento. Para o alumínio recozido, a aplicação da torção cíclica levou ao aumento dos limites de escoamento e resistência e na diminuição do alongamento percentual, fato contrário do que ocorreu com o material pré-deformado por trefilação.

Tabela I – Propriedades mecânicas à tração do alumínio recozido e trefilado em um passe.

corpo de prova	torção	limite de escoamento (MPa)	limite de resistência (MPa)	alongamento percentual (%)
recozido	–	29,40	85,06	30,83
	2,8%, 20 c	61,74	86,73	24,79
trefilado em um passe	–	93,10	108,00	14,82
	2,8%, 20 c	80,36	99,18	19,91

Na figura 2 pode ser visualizada a microestrutura do material recozido deformado por torção cíclica. Observa-se uma estrutura celular regular em cujas paredes encontram-se precipitados de  $FeAl_3$ ,  $Fe_3SiAl_{12}$  e  $Mg_2Si$ . Percebe-se que foram ativados alguns planos de escorregamento do tipo (011). A microestrutura do alumínio recozido, torcido ciclicamente e tracionado é mostrada na figura 3. Verifica-se uma estrutura de subgrãos no interior de grãos primários separados por contorno de grão. Observa-se também uma rede de discordâncias no interior dos mesmos além de precipitados finos e médios.

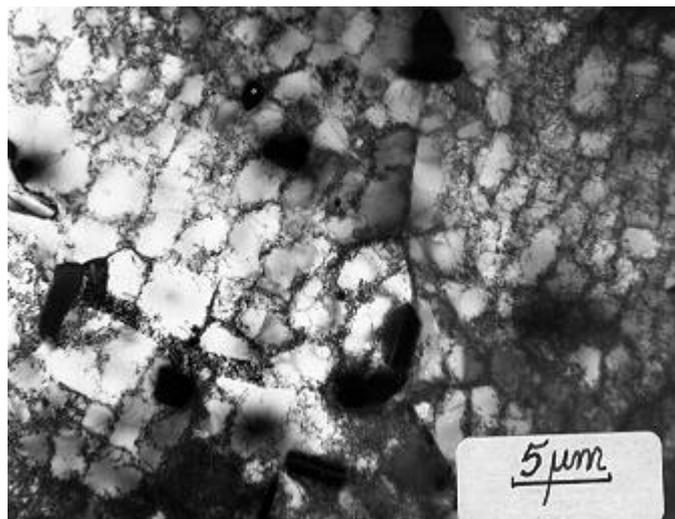


Figura 2 - Micrografia eletrônica por MET (200kV) da liga de alumínio 6063 recozida (400°C, 60 minutos) e torcida ciclicamente (2.8%, 20 ciclos).



Figura 3 - Micrografia eletrônica por MET (200kV) da liga de alumínio 6063 recozida (400°C, 60 minutos), torcida ciclicamente (2.8%, 20 ciclos) e tracionada.

Na figura 4 é mostrada a microestrutura do material recozido e trefilado em um passe. Percebe-se a presença de subgrãos em cujo interior pode-se observar pouca presença de discordâncias. Nota-se a presença de precipitados finos. A microestrutura da liga de alumínio recozida, trefilada em passe e torcida ciclicamente pode ser verificada na figura 5. Podem ser observados grãos contendo uma estrutura de subgrãos não orientados entre si, além da presença de precipitados. Nota-se um arranjo celular no interior de alguns dos subgrãos presentes. Na figura 6 é apresentada a microestrutura do alumínio recozido, trefilado em um passe, torcido ciclicamente e tracionado. Podem ser verificados subgrãos finos e emaranhados

de discordâncias em todo o interior dos mesmos, sendo que, em alguns, tem-se a presença de arranjo celular. Pouca precipitação é observada nos contornos de grãos presentes.

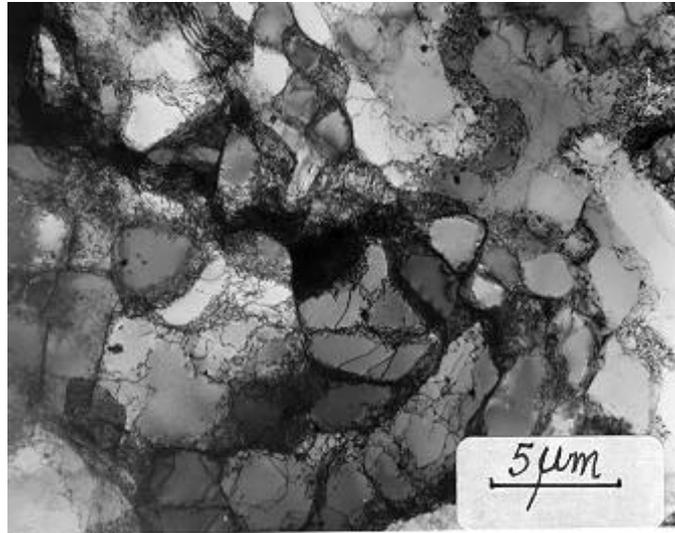


Figura 4 - Micrografia eletrônica por MET (200kV) da liga de alumínio 6063 recozida (400°C, 60 minutos) e trefilada em um passe ( $r = 20\%$ ,  $\theta = 8^\circ$ ).

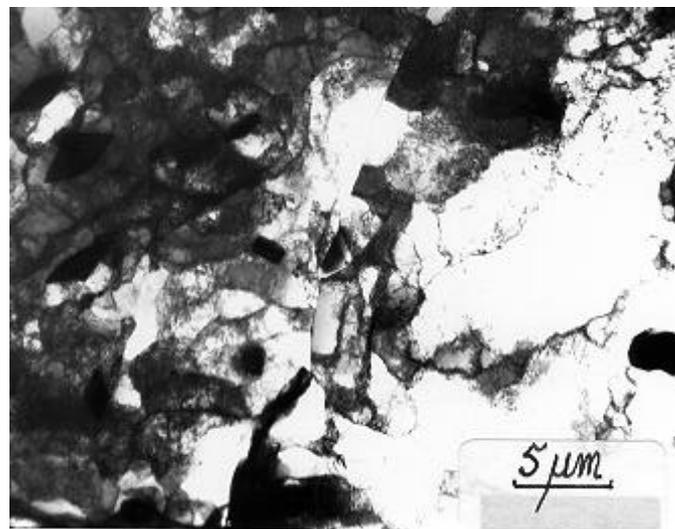


Figura 5 - Micrografia eletrônica por MET (200kV) da liga de alumínio 6063 recozida (400°C, 60 minutos), trefilada em um passe ( $r = 20\%$ ,  $\theta = 8^\circ$ ) e torcida ciclicamente (2.8%, 20 ciclos).

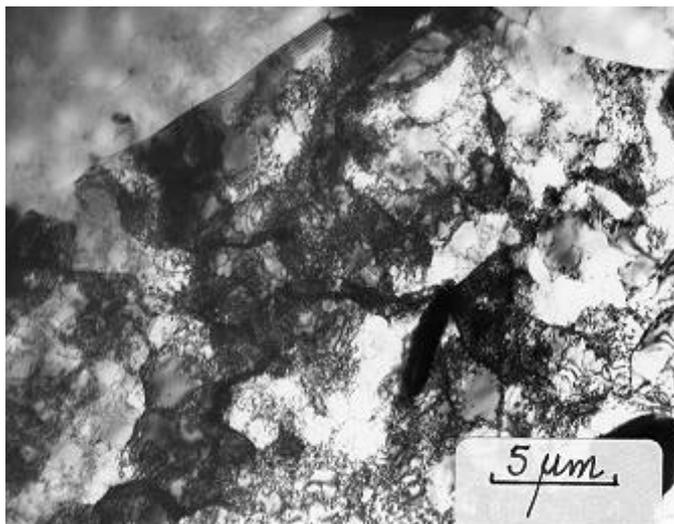


Figura 6 - Micrografia eletrônica por MET (200kV) da liga de alumínio 6063 recozida (400°C, 60 minutos), trefilada em um passe ( $r = 20\%$ ,  $\alpha = 8^\circ$ ), torcida ciclicamente (2.8%, 20 ciclos) e tracionada.

## CONCLUSÃO

Os resultados sugerem que a forma pela qual o material é deformado altera a morfologia das discordâncias ou seja, a alteração das propriedades mecânicas do material devido a variação no caminho de deformação é devida a modificações microestruturais relacionadas com rearranjo de discordâncias.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Companhia Siderúrgica Belgo Mineira - Divisão Trefilaria pela doação das feiras utilizadas, ao CDTN/CNEN pelo recozimento dos corpos de prova, ao PRONEX, ao CNPQ e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) LONGO, W.P., REED-HILL, R.E. Work Softening in Dynamic Strain Aged Low Carbon Steel. **Scripta Metallurgica**, v. 6, nº 9, p. 833-836, 1972.
- (2) LONGO, W.P., REED-HILL, R.E. An Analysis of Work Softening in Polycrystalline Nickel. **Metallography**, v. 7, p. 181-201, 1974.
- (3) LONGO, W.P., REED-HILL, R.E. Work Softening in Polycrystalline Metals. **Scripta Metallurgica**, v. 4, nº 10, p. 765-770, 1970.
- (4) DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2a Edição. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1981. 653 p.
- (5) POLAKOWSKI, N.H., PALCHOUDHURI, A. Softening of Certain Cold-Worked Metals under the Action of Fatigue Loads. **Proc. ASTM**, v. 54, p. 701-716, 1954.

- (6) COFFIN, L.F., TAVERNELLI, J. F. The Cyclic Straining and Fatigue of Metals. **Trans. Met. Soc. AIME**, v. 215, p. 784-807, 1959.
- (7) ARMSTRONG, P.E., HOCKETT, J.E, SHERBY, O.D. Large Strain Multidirectional Deformation of 1100 Aluminum at 300 K. **Journal of the Mechanics and Physics of Solids**, v. 30, p. 37-58, April 1982.

## **MECHANISMS INVOLVED IN THE DEFORMATION PROCESSES OF AN ALUMINUM 6063 ALLOY <sup>(1)</sup>**

### **ABSTRACT**

The analysis and control of cold working have been one of the main problems in Materials Engineering due to the complexity of the processes involving dislocations and the non homogeneity of that operation inside a deformation microstructure. This paper presents the main microstructural aspects resulting of the application of different mechanical processes (tension, torsion, drawing, besides the combination of methods) in an aluminum 6063 alloy previously annealed. The main objective of this work is the understanding of the similarities and the differences of mechanisms in each mechanical processing or in the combination of the processes using the technique of electronic microscopy transmission (TEM, acceleration tension: 200kV), by means of analysis of the several microstructures as well as the interaction of the arrangements of dislocations with the second phases, mainly precipitate that participate actively in the deformation mechanisms.

Key-words: strain path, microstructure, dislocation