

# EVOLUÇÃO DO LIMITE DE ESCOAMENTO EM FUNÇÃO DA DEFORMAÇÃO A FRIO PRODUZIDA POR LAMINAÇÃO NA LIGA DE ALUMÍNIO AA 8023

---

**Pablo Batista Guimarães**

Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPE  
Mestrado em Engenharia Mecânica pela UFPE  
Especialização em ensino de Matemática pela Universidade Católica de Pernambuco  
Graduação em Engenharia Mecânica pela Universidade de Pernambuco  
pabloguimaraes@recife.ifpe.edu.br

**Rodrigo Ferreira Silva**

Mestrado em Engenharia Mecânica - UFPE  
Graduação em Engenharia Mecânica - UFPE  
rodrigoferreira@recife.ifpe.edu.br

**Yogendra Prasad Yadava**

Doutorado em Física - University of Gorakhpur Gorakhpur  
Mestrado em Física - University of Gorakhpur Gorakhpur  
Graduação em Física Química Matemática - University of Gorakhpur Gorakhpur  
yadava@ufpe.br

**Carlos Augusto Oliveira**

Doutor em Engenharia Mecânica pela UFPE  
Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco - UFPE  
Especialização em Ensino de Matemática pela UFRPE  
Graduação em Engenharia Mecânica pela UFPE  
cano.oliveira@gmail.com

**Tiago Sousa Antonino**

Mestrado em Engenharia Mecânica - UFPE.  
Graduação em Engenharia Mecânica - UFPE  
tiagoantonino@recife.ifpe.edu.br

**Ricardo Sanguinetti Ferreira**

Pós-doutorado em Físico-química da Matéria Condensada no ICMCB - Institut de  
Chimie de la Matière Condensée de Bordeaux - França  
Doutor em Science et Génie des Matériaux Métalliques pela École des Mines de Nancy  
do Institut National Polytechnique de Lorraine - França  
ras@ufpe.br

## RESUMO

A liga de alumínio AA 8023 pertence ao sistema Al-Fe-Mn e, após reduzida a folhas finas, esta liga é utilizada em embalagens diversas e em sistemas de arrefecimento, como aletas de radiadores automotivos. Foi produzida pelo processo "Twin Roll Casting" (TRC) e em seguida laminadas para o estudo do potencial de encruamento onde foram realizados ensaios de tração para determinação do limite de escoamento para espessuras que variaram de 1,0 mm a 4,0 mm, laminadas até 80%, a uma taxa de deformação de  $1,8 \text{ s}^{-1}$  para produzir chapas com espessuras até 1,0mm (80%). Resultados mostraram que a evolução do limite de escoamento durante a deformação a frio teve um comportamento linear, contrariamente àquilo que é observado para deformações homogêneas.

## PALAVRAS-CHAVE:

Potencial de Encruamento, Liga de Alumínio, Propriedade Mecânica.

## ABSTRACT

*The aluminum alloy AA 8023 belongs to the system Al-Fe-Mn and and after reduced to you leaf fine, that alloy is used in several packings and in cooling systems, as fins of automotive radiators. It was produced by the process "Twin Roll Casting" (TRC) and soon afterwards laminated for the study of the toughened potential where strain tests were accomplished for the determination of the flow stress for thickness that varied from 1,0 mm to 4,0 mm, laminated up to 80%, at a rate of deformation of  $1,8 \text{ s}^{-1}$  to produce sheets with thickness up to 1,0 mm (80%). Results showed that the evolution of the flow stress during the cold heading had a lineal behavior, contrarily to that that is observed for homogeneous deformations.*

## KEYWORDS

*Toughened potential, Aluminium alloys, Mechanical Properties.*

## INTRODUÇÃO

O alumínio é atualmente um dos metais mais usados na indústria, com uma gama de aplicações que abrange desde uma simples embalagem de um produto alimentício até os elementos estruturais de uma sofisticada aeronave (JACK, 1989).

Na sua forma mais pura (99,9%), o alumínio apresenta baixa resistência e dureza; em contra-partida, apresenta alta formabilidade, soldabilidade, resistência à corrosão, além de ser excelente condutor de eletricidade (ABAL, 1994). Com alto grau de pureza, o alumínio pode ser utilizado em muitas aplicações como equipamentos químicos, irradiadores de calor, refletores, catalisador na produção da gasolina e na forma de componentes eletrônicos. Entretanto, são as ligas de alumínio que apresentam propriedades mecânicas bem superiores ao alumínio puro, por isso elas são largamente utilizadas, principalmente em aplicações especiais num universo muito grande de produtos. Através da adição de outros elementos metálicos ao alumínio, torna-se possível a produção de diversos tipos de ligas.

A liga de alumínio AA 8023 pertencente ao sistema Al-Fe-Mn foi produzida pelo processo “Twin Roll Casting” (TRC) que obtém chapas diretamente do metal fundido (GRAS, 2005). Após reduzida a folhas finas pelo processo de laminação, esta liga é utilizada em embalagens diversas e em sistemas de arrefecimento, como aletas de radiadores automotivos (ALVES, 2000). Quando a deformação em um processo de conformação plástica a frio se aproxima da condição de deformação homogênea, pode-se estabelecer com razoável aproximação uma função para a tensão de escoamento ( $\sigma$ ). Geralmente, a lei potencial do encruamento (FERREIRA, 2006; CALLISTER, 2008) é dada por:

$$\sigma = \sigma_o^i + K\varepsilon^n \quad (1)$$

Na Equação (1),  $\sigma_o^i$  é a tensão de escoamento no início do intervalo que está sendo analisado,  $K$  é a constante de tensão,  $\varepsilon$  é a deformação no intervalo e  $n$  é o expoente de encruamento.

As constantes  $K$  e  $n$  são determinadas experimentalmente, calculadas com o auxílio de um aplicativo comercial. Após aplicar logaritmo natural a ambos os membros da Equação (1), obtém-se:

$$\ln(\sigma - \sigma_o^i) = \ln(K) + n \ln(\varepsilon) \quad (2)$$

A partir da Equação (2) é traçado o diagrama  $\ln[(\sigma - \sigma_o^i)]$  versus  $\ln(\varepsilon)$  e obtido uma reta cuja declividade é igual ao expoente  $n$  e sua interseção com o eixo  $\ln[(\sigma - \sigma_o^i)]$  é igual a  $\ln(K)$ , conforme mostrado na Figura 1.

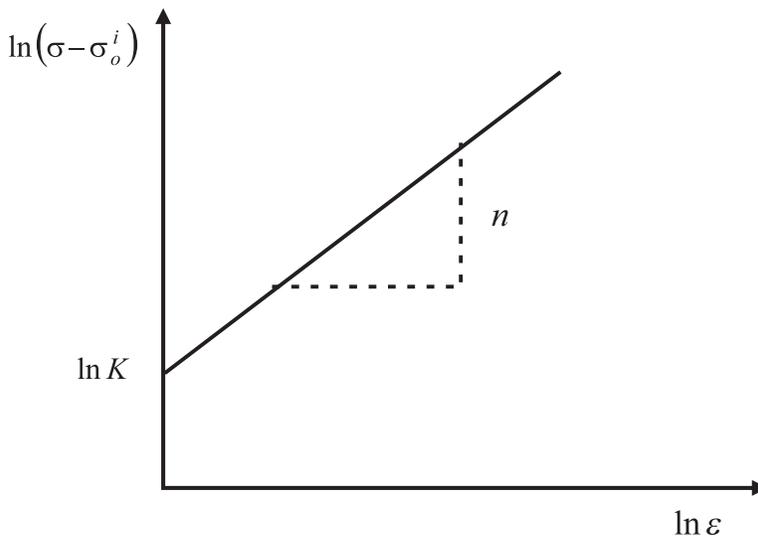


Figura 1 – Diagrama  $\ln[(\sigma - \sigma_o^i)]$  versus  $\ln(\varepsilon)$  para determinação das constantes da lei potencial de encruamento.

A deformação ( $\delta$ ) pode ser definida em alguns casos como sendo o percentual de trabalho a frio, expresso pela redução da área da seção transversal do material deformado (VAN VLACK, 2003), conforme Equação (3).

$$\delta = \left( \frac{A_o - A_f}{A_o} \right) \times 100 \quad (3)$$

Na Equação (3),  $A_o$  e  $A_f$  são as áreas inicial e final, respectivamente.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### MATERIAIS

A liga de alumínio utilizada neste trabalho foi catalogada pela “Aluminium Association” como AA 8023, pertence ao sistema Al-Fe-Mn e apresenta composição química determinada por espectrometria de emissão, conforme mostra a Tabela 1.

**Tabela 1:** Composição Química da Liga obtida por Espectrometria de Emissão

COMPOSIÇÃO (% Atômico)										
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	V	B	outros
0,099	1,344	0,104	0,492	0,004	0,001	0,007	0,037	0,006	0,003	-

A liga de alumínio foi fornecida pela ALCOA S.A em forma de tiras com espessura de 5,0 mm, produzida pelo processo “Roll Casting”. Estas tiras foram laminadas a uma taxa de deformação de  $1,8 \text{ s}^{-1}$ , para produzir chapas com espessuras de até 1,0mm (80%). Foram utilizadas as espessuras de 4,0mm; 3,0mm; 2,0mm e 1,0 mm para estabelecimento da lei potencial de encruamento.

### TRATAMENTOS TERMOMECÂNICOS

Foram realizados recozimentos na temperatura de  $310^\circ\text{C}$ , pico da análise térmica diferencial, seguido de resfriamento em água (GUIMARÃES *et. al*, 2008). Foram utilizadas três amostras com 2,0 mm de espessura durante 120 min para determinação do limite de escoamento do material sem deformação.

Nos ciclos termomecânicos, a deformação plástica foi produzida em um laminador, com taxas médias de deformação de  $1,8 \text{ s}^{-1}$ . Os tratamentos térmicos foram feitos em um forno tipo mufla, monitorado com termopares do tipo cromel-alumel com incerteza de medição  $\pm 3^\circ \text{K}$ .

## PROPRIEDADES MECÂNICAS

Foram realizados ensaios para determinação das propriedades mecânicas obtidas por tração uniaxial nos materiais deformados e tratados em diferentes condições. Os ensaios mecânicos foram feitos segundo norma ASTM-E8M-89B, e obtidos valores para o alongamento e limite de escoamento (0,2%).

Para cada condição de tratamento foram realizados três ensaios de tração uniaxial, conforme previsto pela norma ASTM-E8M-89B e, para cada ponto da curva *propriedade versus tempo*, foi tirada uma média dos três valores obtidos.

O ensaio de tração foi realizado no sentido longitudinal à laminação devido ao maior nível de encruamento, favorecido pelo efeito direcional da deformação nessa direção em relação ao sentido transversal.

## LEI POTENCIAL DE ENCRUAMENTO

Os valores da tensão do limite escoamento ( $\sigma_e$ ) a 0,2% foram plotados em função do nível de deformação a frio, produzido previamente por laminação. A lei potencial foi definida utilizando cinco condições de deformação por laminação (0%, 20%, 40%, 60% e 80%), a partir das quais foram gerados cinco pontos na curva *tensão de escoamento versus deformação* ( $\mathcal{E}$ ).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

A evolução da tensão de escoamento durante a deformação a frio, mostrada na Figura 2, teve um comportamento linear, contrariamente àquilo que é observado para deformações homogêneas, conforme sugerido pela equação  $\sigma = 151,15 + 101,15\epsilon$ . O valor da constante de tensão (K) e do expoente de encruamento (n) foram respectivamente 101,15 e 1,0. Normalmente para deformações homogêneas temos uma curva exponencial com expoente de encruamento próximo de  $\frac{1}{2}$  (FERREIRA, 2006).

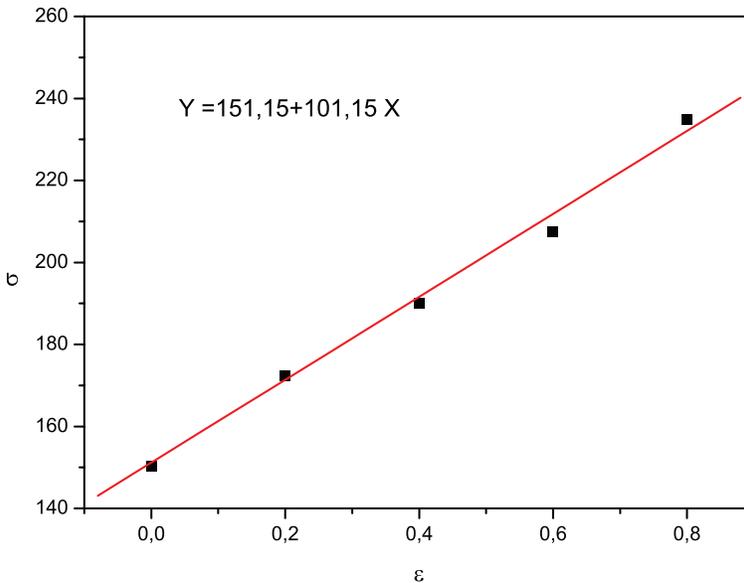


Figura 2 – Curva da tensão de escoamento em função do nível de deformação.

A função para a tensão de escoamento obtida por ensaio de tração uniaxial em função do nível de deformação plástica do processo real de laminação que combina esforços compressivos elevados com tensões de cisalhamento superficiais produziu escoamento não-uniforme do material, que por sua vez gerou deformações não-homogêneas para esta liga de alumínio (FERREIRA, 2006; CALLISTER, 2008). Seus parâmetros são mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2:** Parâmetros da lei potencial de encruamento.

K	n	Fator de correlação
101,15	1,0	0,99

## CONCLUSÕES

A evolução da tensão de escoamento durante a deformação a frio foi descrita pela lei potencial de encruamento, mostrando nesse processo um comportamento linear, descrito pela equação  $\sigma = 151,15 + 101,15\varepsilon$ , evidenciando a não-homogeneidade da deformação para esta liga de alumínio.

Através da equação da lei potencial foi possível determinar a tensão de escoamento em função do nível de encruamento do material estudado, podendo-se prever essa tensão para valores de deformações que não foram levantados nos ensaios de tração, com razoável aproximação, pois neste trabalho foi encontrado um fator de correlação de 0,99.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por tudo e, em especial, ao CNPq e a Alcoa Alumínio S.A pelo apoio dado a este projeto.

## REFERÊNCIAS

ABAL - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Guia Técnico do Alumínio – Laminação**. São Paulo, ed. ABAL, 1994. 138p.

ALVES, T.T. **Evolução Microestrutural da Liga de Alumínio AA 8023: Aspectos Cinéticos e Morfológicos**. DEMEC, Recife-PE, 2000. 51p. (Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco / UFPE).

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. LTC, Rio de Janeiro, 7ª Ed. 2008, p. 45-264.

FERREIRA, R. A. S. **Conformação Plástica; Fundamentos Metalúrgicos e Mecânicos**. Editora Universitária UFPE, Recife-PE 2006. p. 19-79; 193-218.

GRAS, C., MEREDITH, M., HUNT, J. D. Microdefects formation during the twin-roll casting of Al–Mg–Mn aluminium alloys. **Journal of Materials Processing Technology**. vol. 167. p 62–72. 2005

GUIMARÃES, P. B.; ASSUNÇÃO, T. L.; YADAVA, Y. P.; FERREIRA, R.A.S. **A Cinética de Recristalização da Liga de Alumínio AA 8023 Reconhecida em Diferentes Temperaturas**. 18º CBECiMat - Congresso Brasileiro de Ciência e Engenharia de Materiais. **Anais**, 2008. p.8917-8925.

JACK, W. B. Aluminium Mill and Engineering Wrought products – Metals Handbook Properties and Selection of Nonferrous Alloys. **ASM international**. Vol. 12 10ª Ed., 1989.

VAN VLACK, L. H. **Princípio de ciências e tecnologia dos materiais**. Campos, São Paulo, 2003. p. 205-254.