

Estudo da Heterogeneidade de Deformação na Laminação de Ligas De Alumínio Utilizando Simulação Por Elementos Finitos

¹Adriano Amâncio Trajano; ¹Natanael Geraldo e Silva Almeida; ¹Benedito Carneiro de Andrade Júnior; ¹Alisson Duarte Silva Dr; ¹Maria Teresa Paulino Aguiar Dr^a; ¹Paulo Roberto Cetlin Dr.

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Avenida Presidente Antônio Carlos 7545. CEP. 31270-010. Bairro São Luiz, Belo Horizonte, MG.

adriano.a.trajano@gmail.com

RESUMO

Processos de conformação mecânica a frio comumente introduzem uma heterogeneidade de deformação ao longo da seção transversal do produto. Essa heterogeneidade, expressa em termos de deformação média e do coeficiente de deformação redundante, dependeria das características de encruamento do material e influenciaria a previsão do comportamento mecânico do metal após o trabalho mecânico. Neste trabalho é avaliada a heterogeneidade de deformação de chapas de Al 6351 e Cu-7,5Al, submetidas à laminação a frio com reduções de 5%, 10%, 15% e 20%, utilizando simulações computacionais por elementos finitos. Os resultados indicaram que, embora os materiais apresentem características de encruamento diferentes, o grau de heterogeneidade ao longo da seção transversal é praticamente o mesmo, assim como o coeficiente de deformação redundante.

Palavras-chave: Laminação, heterogeneidade, elementos finitos.

INTRODUÇÃO

Processos de conformação a frio normalmente introduzem heterogeneidades de deformação ao longo da secção transversal de um determinado material. Esta deformação heterogênea é produto dos esforços compressivos atuantes nas regiões mais internas, em contraste com esforços compressivos e esforços cisalhantes que atuam nas regiões mais externas do material, fazendo com que a heterogeneidade de deformação se concentre na superfície do material trabalhado⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾. A deformação heterogênea é comumente analisada através de um valor médio ε_m , calculado em função dos valores de deformação encontrados ao longo da seção transversal da região conformada. Em conjunto com a deformação logarítmica externa sofrida pelo material ($\varepsilon = \ln(A_i/A_f$, onde A_i e A_f são a área inicial e a área final da seção transversal do material, respectivamente), estes parâmetros se relacionam através do coeficiente de deformação redundante (ϕ), conforme equação A:

$$\varepsilon_m = \phi \cdot \varepsilon \quad (A)$$

onde ϕ recebe o nome de coeficiente de deformação redundante, que é a deformação que não contribui para as mudanças dimensionais do metal processado⁽¹⁾⁽⁷⁾.

São vários os métodos para o estudo da deformação heterogênea através da deformação média (ε_m). Dentre eles, destaca-se o método dos perfis de microdureza, no qual se calcula o perfil de distribuição de deformação ao longo da seção transversal do metal processado a partir do seu perfil de microdureza, tendo como base a relação da microdureza com a deformação obtida através do ensaio de tração⁽³⁾⁽⁹⁾⁽¹¹⁾. A deformação média é, posteriormente, calculada a partir do perfil de deformação, utilizando o teorema do valor médio do cálculo integral. Finalmente, determina-se o coeficiente de deformação redundante (ϕ)⁽⁹⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. Dado o coeficiente de deformação redundante (ϕ), é possível a previsão das propriedades e do comportamento mecânico do material, por meio da curva tensão-deformação do material recozido⁽¹⁾⁽⁹⁾. Essa abordagem tem sido comumente estudada em materiais

trefilados⁽¹⁾⁽⁵⁾⁽¹¹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾, porém poucos trabalhos a utilizam para o estudo da deformação heterogênea de metais laminados a frio⁽⁶⁾⁽⁹⁾.

A heterogeneidade de deformação na laminação de chapas de cobre foi estudada por Hundy e Singer⁽³⁾, que associaram a deformação redundante à geometria do processo de laminação, por meio parâmetro Δ . Este parâmetro é calculado em função da redução imposta no processo (r), da espessura inicial da chapa (h_0) e do raio do cilindro do laminador (R)⁽⁴⁾:

$$\Delta = \sqrt{\frac{h_0}{4Rr}} (2 - r) \quad (B)$$

Giosa⁽⁹⁾ mostrou que a heterogeneidade de deformação na laminação a frio ocorre quando Δ é maior que 1, o que indica que quanto maior for a espessura do material e menor a redução aplicada, maior é a heterogeneidade na deformação. Porém, Engler *et. al.*⁽⁸⁾ afirmaram que a ocorrência de heterogeneidade de deformação, para laminação de chapas, pode ocorrer ainda que Δ seja menor que 1. O mesmo pesquisador propôs uma equação que relaciona o coeficiente de deformação redundante (ϕ) ao parâmetro Δ , para chapas de aço inoxidável laminadas a frio⁽⁹⁾, conforme ilustrado na equação C.

$$\phi = 0,86 + 0,14 \Delta \quad (C)$$

Nos trabalhos encontrados da literatura há poucos estudos que relacionam a influência das características do encruamento do material na heterogeneidade de deformação, sendo que a maioria deles avalia tal efeito em barras trefiladas⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é analisar a heterogeneidade da deformação de ligas de alumínio laminados a frio, com diferentes características de encruamento, utilizando técnicas de simulação numérica pelo método de elementos finitos.

MATERIAIS E MÉTODOS

No trabalho foram realizadas simulações computacionais da laminação de chapas de ligas de alumínio (Al 6351 e Cu-75Al), com diferentes reduções e posterior cálculo da heterogeneidade de deformação, do parâmetro Δ e do coeficiente de deformação redundante (ϕ). O software utilizado foi o DEFORM 2D/3D[®], da empresa Scientific Forming Technologies Corporation. Inicialmente, foram realizados ensaios de compressão nas ligas de alumínio com o intuito de se obter as curvas tensão deformação verdadeiras dos materiais no estado inicial, que são o ponto partida da simulação. A liga Al 6351 foi adquirida na forma de barras de seção transversal quadrada de 15,8 mm de aresta. Sua caracterização permitiu classificá-la na condição T6, ou seja, a liga foi trabalhada a frio com posterior envelhecimento. Os corpos de prova para o ensaio de compressão foram, em seguida, recozidos. A liga Cu-7,5Al foi fundida em laboratório e utilizada em estado bruto para a confecção de corpos de prova de compressão. Os ensaios foram realizados em um equipamento de ensaios universal Instron 5582, com capacidade de 100KN. Os ensaios foram realizados com velocidade constante de 0,05 mm/s. Dissulfeto de molibdênio (Molycote) foi utilizado como lubrificante, sendo adicionado na interface corpo de prova - prato de compressão. A simulação do processo de laminação frio foi iniciada por meio da construção de um modelo 2D. Para tanto, foi gerada uma chapa de 100 mm de comprimento, 6,25 mm de espessura e 4000 elementos de malha, um cilindro de laminação com 200 mm de diâmetro e um empurrador para adentrar a chapa no cilindro, com dimensões de 140 x 140mm. Devido à simetria do processo de laminação, a simulação foi realizada utilizando apenas um cilindro de laminação e metade da espessura da chapa e estabelecendo-se uma linha de simetria ao modelo, com movimentos apenas na direção de laminação, conforme ilustrado na FIG. 1.

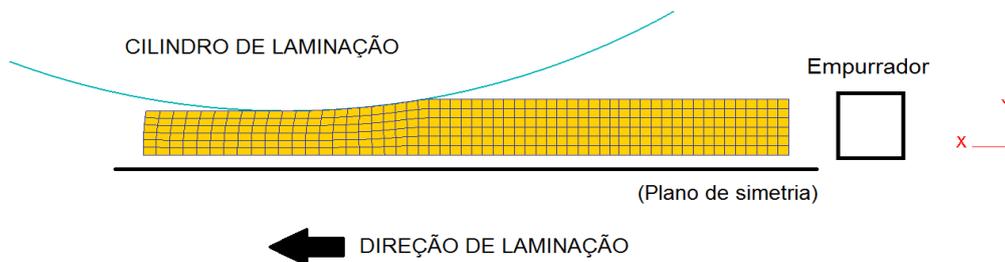


FIG. 1: Imagem ilustrativa do modelo de simulação de laminação em 2D.

Na simulação, a temperatura ambiente foi definida como 20 °C e os cilindros de laminação e o empurrador foram considerados materiais rígidos, uma vez que a deformação plástica desses componentes durante o processo é significativamente inferior se considerada as dimensões das amostras. As chapas foram submetidas a reduções de 5%, 10%, 15% e 20%, utilizando coeficiente de atrito de 0,3 e velocidade de rotação do cilindro de 4,16 rad/s, o que fornece uma taxa de deformação de 0,022 s⁻¹. Em função do comprimento da chapa, foram utilizados 530 *steps* na simulação e *time step* de 0,003 segundos. Desconsiderou-se a resposta elástica das ligas durante a laminação, visto que o objetivo do estudo é a heterogeneidade de deformação e a ocorrência do efeito elástico após a laminação poderia alterar os resultados. Após o pré-processamento do modelo construído, o mesmo foi simulado e a solução numérica foi obtida. Posteriormente, foi realizado uma análise visando testar a coerência dos resultados obtidos. Este estudo compreende a variação de parâmetros como “time step”, coeficiente de atrito e velocidade de avanço da chapa. Como não se observaram variações significativas nos resultados obtidos a simulação foi aprovada. Na fase de pós-processamento, foram interpretados os resultados obtidos pela simulação da laminação a frio, por meio da determinação da deformação sofrida ao longo da seção transversal da chapa, através de uma ferramenta do próprio software, que permite medirmos os valores das deformações desde eixo de simetria até a superfície de contato com o cilindro de laminação. Para isso, foi utilizado uma linha com 20 pontos de captação, perpendicular à direção de laminação da chapa. O esquema de medição das deformações é mostrado na FIG. 2.

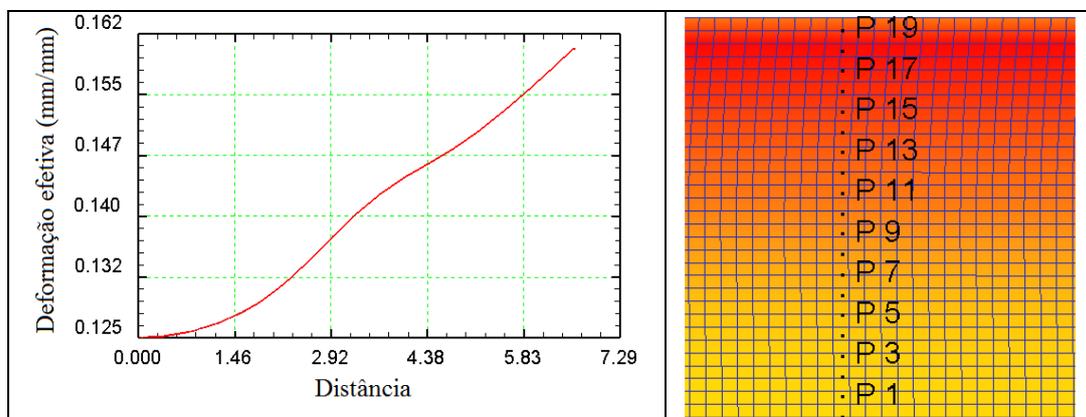


FIG. 2: Imagem ilustrativa da medição da deformação efetiva de uma chapa laminada, utilizando 20 pontos de captação.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A FIG. 3 mostra as curvas tensão-deformação das ligas Al 6351 e Cu-75Al, obtidas experimentalmente. As curvas obtidas são típicas dessas ligas no estado não deformado⁽¹⁵⁾.

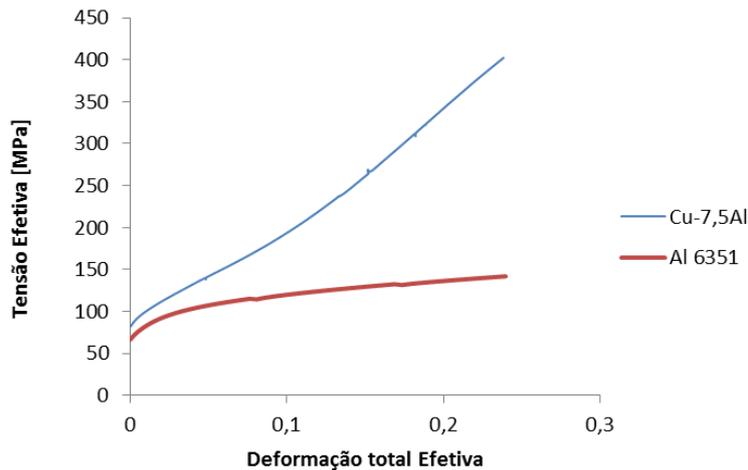


FIG. 3: Curvas tensão deformação das ligas Al 6351 e Cu-75Al.

Obtidas por meio de simulação numérica da laminação a frio, para reduções de 5%, 10%, 15% e 20%, a distribuição da deformação efetiva, ao longo da seção transversal, tanto para a liga Al 6351 quanto para a liga de Cu-75Al, foram obtidas numericamente. Observou-se que quanto maior a redução na laminação a frio maior é a deformação efetiva do material ao longo de toda a seção transversal o que corrobora com resultados obtidos em materiais com características de encruamento semelhantes apresentados na literatura⁽⁶⁾. Uma distribuição heterogênea de deformação ao longo da espessura em todas as reduções analisadas pode ser observada, com a deformação no centro sempre menor que a deformação nas bordas. Estes dados também foram observados em outros trabalhos semelhantes relacionados ao tema⁽³⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾. Este fato está diretamente relacionado à ação de tensões cisalhantes que atuam na superfície do material durante o processo de laminação, ao passo que no centro atua unicamente esforços de compressão. Na FIG. 4 está ilustrado a distribuição da deformação efetiva das ligas Al 6351 e Cu-7,5Al, laminadas a frio ao longo de suas seções transversais, com reduções de 5%, 10%, 15% e 20%.

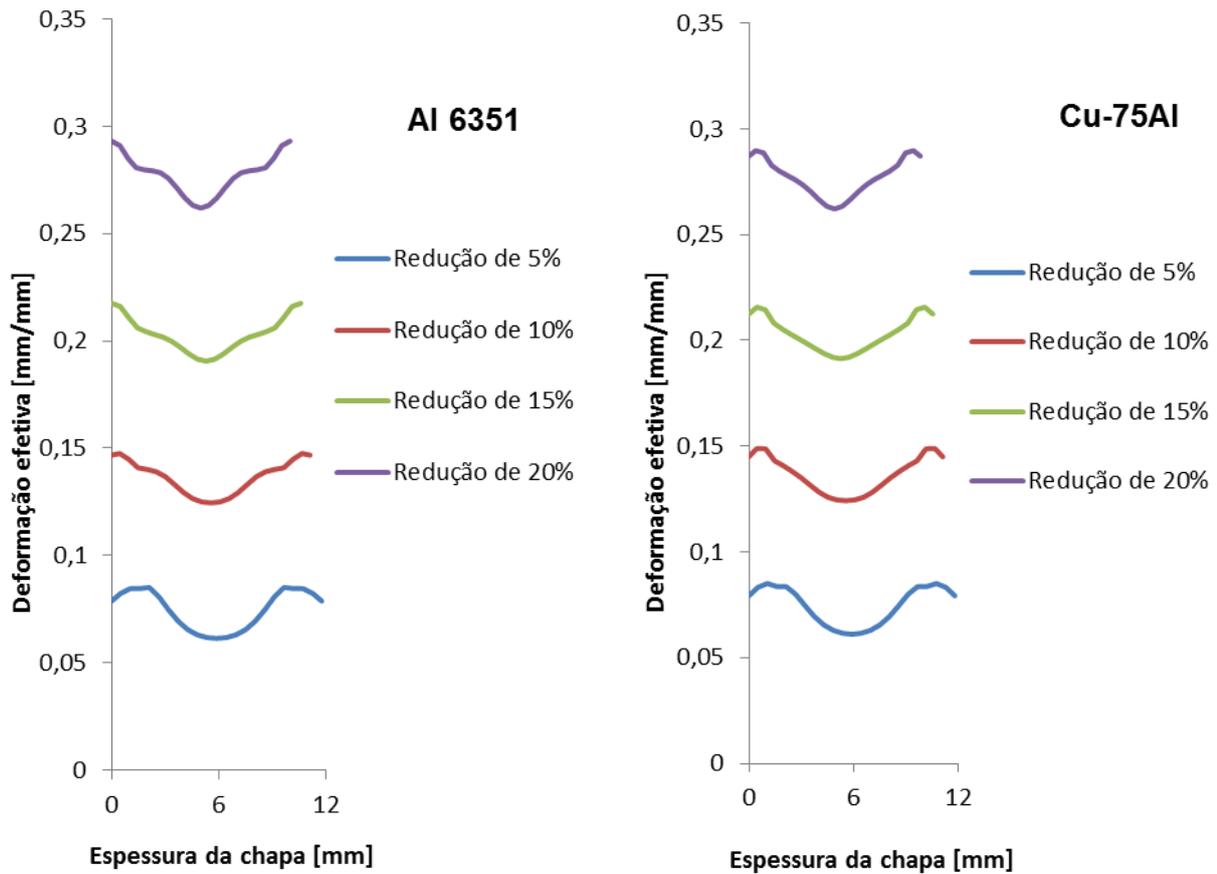


FIG. 4: Distribuição da deformação efetiva das ligas Al 6351 e Cu-75Al, laminadas a frio, medidas a partir do centro à superfície e ao longo da seção transversal, com reduções de 5%, 10%, 15% e 20%.

Com os dados da Fig. 4, foi calculada a deformação média ϵ_m para cada redução em cada liga, utilizando o teorema do valor médio (TAB. 1). Também se determinou o coeficiente de deformação redundante ϕ , para cada uma das reduções em cada um dos materiais. Observa-se que a medida que os valores de deformação média aumentam o coeficiente de deformação redundante diminui ⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾.

TAB. 1: Deformação média e coeficientes de deformação redundante para a liga Al 6351 e para liga Cu-75Al.

Redução na Laminação (%)	Al 6351		Cu-75Al	
	ϵ_m	ϕ	ϵ_m	ϕ
5	0,07464	1,2598671	0,07457	1,25863478
10	0,13613	1,11863609	0,13621	1,1192982
15	0,20257	1,07915263	0,20268	1,07973236
20	0,27722	1,07562308	0,27654	1,07299938

O coeficiente de deformação redundante foi relacionado com os parâmetros de laminação por meio do parâmetro Δ (Eq B). Os resultados obtidos são apresentados na FIG.5, a seguir:

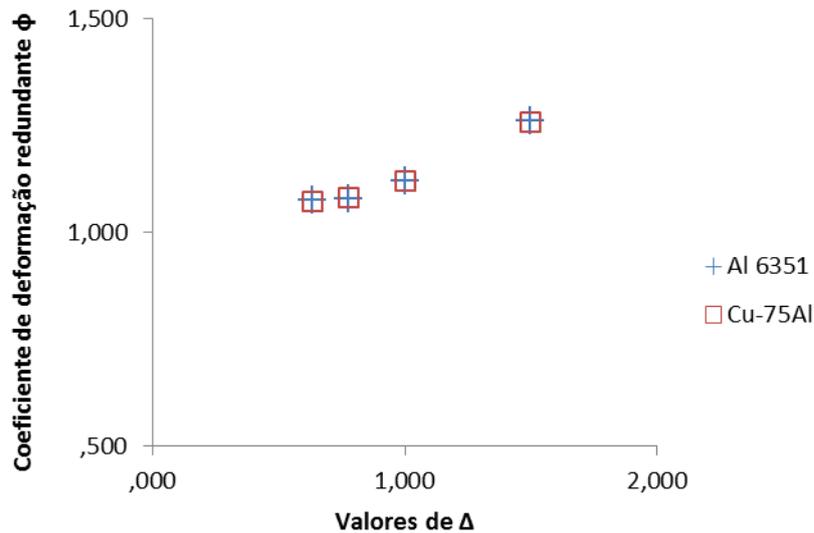


Fig. 5: Variação do coeficiente de deformação redundante em função do parâmetro Δ .

Para reduções menores que 10%, o coeficiente de deformação redundante é pouco afetado quando se altera os valores de Δ . Mas, já para reduções maiores que 10%, quando maior os valores de delta, maiores serão os coeficientes de deformação redundante. Quando comparado aos dois materiais, Verifica-se que os resultados obtidos tiveram pouca alteração quando se mudou o tipo de liga. Assim, Os resultados indicaram que, embora os materiais apresentem características de encruamento diferentes, o grau de heterogeneidade ao longo da seção transversal é praticamente o mesmo, assim como o coeficiente de deformação redundante.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos na simulação por método elementos finitos indicam que:

- 1- quanto maior a redução imposta pela laminação a frio, maior é a deformação média do material e menor o coeficiente de deformação redundante.
- 2- o coeficiente de deformação redundante para reduções de 5% e 10% são menos sensíveis a redução imposta pela laminação.
- 3- ligas de alumínio, com características de encruamento diferentes, apresentaram o mesmo grau de heterogeneidade de deformação ao longo da seção transversal, assim como o coeficiente de deformação redundante, quando submetidas à 1 passe de laminação a frio, com reduções de 5%, 10%, 15% e 20%.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG, CAPES e ao CNPq pelo apoio financeiro para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 P. R. CETLIN. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Stress-Strain Curves Superposition Method in Round Section Bar Drawing - A Literature Analysis. Transactions of the ASME - Journal of Engineering Materials and Technology, v. 109, (1987), pp. 272-275.
- 2 A. K. GHOSH; W. A. BACKOFEN. Strain Hardening and Instability in Biaxially Stretched Sheets. Metallurgical Transactions, v. 4, (1973), pp. 1113-1123.
- 3 B. B. HUNDY; A. R. E. SINGER. Inhomogeneous Deformation in Rolling and Wire Drawing, Journal of the Institute of Metals, v. 83, (1955), pp. 401- 402.
- 4 W. A. BACKOFEN. Deformation Processing, 1 ed. Massachusetts: Addison Wesley Reading, (1972), pp. 326.
- 5 HILL, R.; TUPPER,S.J. A New Theory of the Plastic Deformation in Wire Drawing. Journal of the Iron and Steel Institute, v. 158, (1948), pp. 353 - 359.
- 6 C. W. MACGREGOR; L.F. COFFIN. The Distribution of Strains in the Rolling Process, J. Appl. Mech., (1943), pp. 10 – 13.
- 7 B. L. AVERBACH. Plastic Deformation in the Rolling Process, Trans. AIME, 188, 150, (1958).
- 8 O. ENGLER; M. Y. HUH; C. N. TOME. A Study of Through-Thickness Texture Gradients in Rolled Sheets. Metallurgical And Materials Transactions, (2012).
- 9 J. A. GIOSA; P. R. CETLIN. Strain Heterogeneity in Cold Rolled 304 Stainless Steel, Transactions ISIJ, vol. 28, (1988).

- 10 P. R. CETLIN; CORRÊA, E. C. S.; AGUILAR, M. T. P. The Effect of the Strain Path on the Work Hardening of Austenitic and Ferritic Steel in Axisymmetric Drawing, *Metallurgical and Material Transactions*, v.34A, march 2003, p. 595.
- 11 CORRÊA, E. C. S.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. Analysis of the Redundant Deformation Factor in the Axisymmetric Drawing of AISI 304 Stainless Steel Bars through Experimental Techniques. *Materials Science Forum*, v. 638-642, p. 3170-3175, 2010.
- 12 CADDEL, R.M.; ATKINS, A.G. The Influence of Redundant Work When Drawing Rods Through Conical Dies. *Transactions of ASME B - Journal of Engineering for Industry*, p. 411-419, May 1968.
- 13 CORRÊA, E. C. S.; SANTOS, C. A.; AGUILAR, M. T. P.; CETLIN, P. R. The Deformation and the Redundant Work Factor in the Axisymmetric Drawing of AISI 420 Stainless Steel Bars Strain Path Effects Analysis. *ISIJ International*, v. 48 , p 67, 2008.
- 14 KAZEMINEZHAD, M. A study on the computation of the redundant deformation factor in wire drawing of austenitic 304 stainless steel. *Journal of Engineering Materials and Technology*, v.99, p.230-233, 2008.
- 15 C.E. FELTNER; C. LAIRD. Cyclic stress response of F.C.C metals and alloys – I, Phenomenological experiments. *Acta Metalurgica*, v. 15, 1967.

Study Of Heterogeneity Of Deformation in the Cold Rolling of Aluminum and Copper Alloys Using Finite Element Simulations

¹Adriano Amâncio Trajano; ¹Natanael Geraldo e Silva Almeida; ¹Benedito Carneiro de Andrade Júnior; ¹Alisson Duarte Silva Dr; ¹Maria Teresa Paulino Aguiar Dr^a; ¹Paulo Roberto Cetlin Dr.

¹Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil.

Avenida Presidente Antônio Carlos 7545. CEP. 31270-010. Bairro São Luiz, Belo Horizonte, MG.

adriano.a.trajano@gmail.com

ABSTRACT

Cold mechanical forming processes commonly introduce a heterogeneity of deformation along the transverse section of the product. This heterogeneity, expressed in terms of mean deformation and redundant deformation coefficient, depend on the work hardening characteristics of the material and influence the prediction of the mechanical behavior of the metal after mechanical working. This paper evaluated the heterogeneity of deformation of cold rolled Al 6351 and Cu-7,5Al, with a 5% reduction, 10%, 15% and 20%, using computer finite element simulations. The results indicated that although different materials exhibit various strain hardening characteristics, the degree of heterogeneity along the cross section is practically the same, as well as the redundant deformation coefficient.

Key-words: Rolling, heterogeneity, finite element.