

HETEROGENEIDADE DA DEFORMAÇÃO NA LAMINAÇÃO A FRIO DE METAIS COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS DE ENCRUAMENTO POR MEIO DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL.

Adriano Amâncio Trajano¹, Maria Teresa Paulino Aguilár¹ e Paulo Roberto Cetlin¹

¹ Universidade 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

O comportamento heterogêneo da deformação imposta na conformação mecânica de metais tem sido comumente estudado com o objetivo de aperfeiçoar as técnicas de processamento, no que se refere à previsão das propriedades mecânicas do metal empregado. As técnicas mais utilizadas para a avaliação do comportamento à tração dos materiais laminados e trefilados são o método dos perfis de microdureza e o de superposição. Neste contexto, este trabalho analisa, por meio de simulação computacional pelo método de elementos finitos e o método da superposição, a influência das características de encruamento de metais na previsão do comportamento à tração do material laminado a frio. Foram realizadas simulações numéricas de laminação a frio de chapas de aços inoxidáveis AISI 304 e AISI 420, o primeiro austenítico e o segundo ferrítico, com reduções de área de 5%, 10%, 15% e 20%. Após as simulações das laminações foi calculada a distribuição da deformação de cada material ao longo da espessura das chapas laminadas e, então, calculada a deformação média (ϵ_m) pelo teorema do valor médio. Com os dados obtidos analisaram-se os parâmetros Δ e ϕ e calculou-se a curva tensão-deformação do material laminado após o ensaio de tração. Os resultados indicam que o aço austenítico 304, diferentemente do ferrítico 420, comporta-se na tração ulterior como se tivesse sido previamente tracionado de ϵ_m , ou seja, as características de encruamento dos aços influenciam o comportamento à tração dos materiais pré-laminados, quando analisadas pela técnica de superposição.

Palavras Chave: Método dos elementos finitos; Laminação a frio; Heterogeneidade de deformação; encruamento.

INTRODUÇÃO

Nos processos de conformação a frio se observa, usualmente, uma heterogeneidade de deformação ao longo da secção transversal do material, resultante da variação dos esforços atuantes no processo, que provocam deformações além daquelas necessárias para produzir mudanças dimensionais no material processado. A deformação que não contribui para as variações dimensionais, denominada de deformação redundante (ϕ)^(1,2), tem sido analisada em diferentes estudos sobre trefilação^(3,4). Na laminação de chapas, os estudos^(5,6) também indicaram que o material durante o processamento é submetido a esforços de compressão e cisalhamento, que geram gradientes de deformação e, conseqüentemente, uma heterogeneidade de deformação ao longo da sua secção transversal.

A heterogeneidade de deformação é comumente avaliada por meio de um valor médio ε_m , que se refere à deformação efetiva média sofrida pelo material, ou seja, a deformação que o material sofreria em situações de tração uniaxial. Esse valor se relaciona por meio da deformação logarítmica ($\varepsilon = \ln(A_0/A_f)$) e com o fator ϕ , conforme equação A:

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

Dentre as técnicas utilizadas para avaliação da deformação média ε_m e, conseqüentemente, de ϕ , destaca-se o método de superposição das curvas tensão deformação, desenvolvido por Hill e Tupper para materiais trefilados⁽²⁾. O método consiste na superposição da curva tensão deformação do material recozido e do material pré-trefilado. No caso da laminação, estudos realizados por Backofen⁽⁷⁾ permitem associar a deformação heterogênea a um fator geométrico Δ , descrito pela equação B, em que R é o raio do cilindro do laminador, h_0 é a espessura inicial da chapa e r é redução da espessura (não percentual) no processo:

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

Outros estudos realizados por Backofen *et al.*⁽⁸⁾ constataram que a ocorrência de heterogeneidade de deformação tende a aumentar quando Δ é maior que 1. Mesma afirmação foi feita por Giosa⁽⁹⁾, que mostrou que a heterogeneidade de deformação ocorre na laminação a frio quando $\Delta > 1$, o que indicaria que, quanto maior for a espessura do material e menor a redução aplicada, maior será a heterogeneidade na deformação. Porém, Engler *et al.*⁽¹⁰⁾ afirmaram que a ocorrência de heterogeneidade ocorre ainda que Δ seja menor que 1. Giosa⁽⁹⁾ propôs uma equação que relaciona o coeficiente de deformação redundante ϕ e o parâmetro Δ , no caso da laminação do aço inoxidável 304, onde os valores numéricos são variáveis relacionadas com as características de encruamento do material (equação C):

$$\phi = 0.86 + 0.14 \Delta \quad (C)$$

De acordo com a literatura, com a determinação do valor de ϕ , associado ao parâmetro geométrico Δ e a técnica de superposição das curvas de tração é possível estimar as propriedades mecânicas do material laminado⁽⁹⁾. Neste trabalho, analisa-se, por meio de simulação computacional e da deformação média ε_m , a influência das características de encruamento na previsão do comportamento à tração dos materiais laminados, pelo método de superposição.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foram realizadas simulações numéricas de laminação utilizando o Software Deform2D/3D. Foram simuladas diferentes reduções de chapas de aço inoxidável austenítico 304 e ferrítico 420, escolhidos por apresentarem características de encruamento diferentes. Para a simulação foram utilizadas curvas tensão deformação dos metais, obtidas na literatura ⁽⁴⁾.

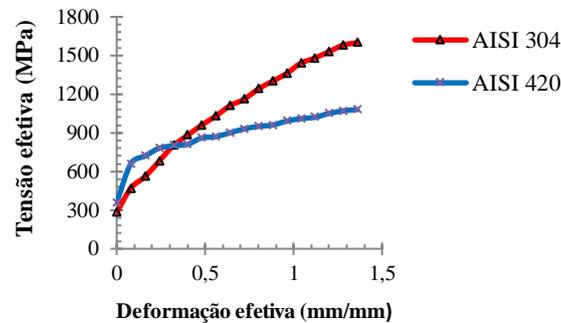


Figura 1: Curvas tensão deformação efetiva para aços inoxidáveis 304 e 420.

O método de simulação se iniciou pela construção de um modelo 2D, com amostras com dimensões de 100 mm de comprimento e espessura de 10 mm. A simetria utilizada no processo de laminação permitiu uma simulação que exigiu menor tempo de processamento (Figura 2).

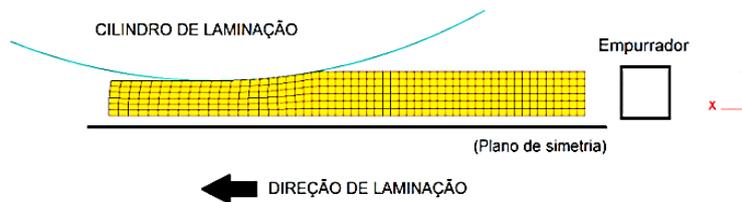


Figura 2: Imagem ilustrativa do modelo de simulação de laminação em 2D.

As reduções de espessura nas simulações foram de 5%, 10%, 15% e 20%. O material foi considerado plástico e os cilindros como objetos rígidos. As simulações foram executadas com um coeficiente de atrito entre as chapas e os cilindros de 0,3 e velocidade linear de 0,022 m/s. Após as simulações das laminações foi calculada a distribuição da deformação no material ao longo da espessura das chapas laminadas, utilizando ferramentas do programa. Foram retirados corpos de prova dos materiais laminados para ensaios de tração da forma ilustrada na Figura 3. Considerando a simetria do material, as simulações dos ensaios de tração foram realizadas usando 1/8 do corpo de prova e um bloco rígido simulou uma garra, com velocidade de tração de 0,1 mm/s.

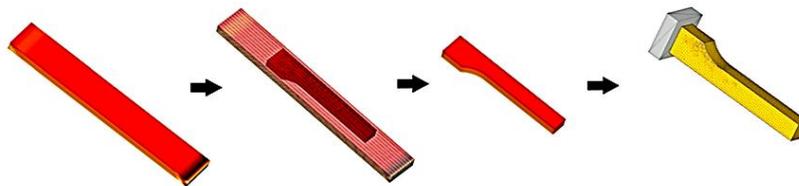


Figura 3: Extração de corpo de prova de chapa laminada para ensaio de tração.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 4 ilustra a distribuição das deformações ao longo da espessura, para ambos os materiais laminados e para as quatro reduções de área. Observou-se que as deformações nos materiais aumentam à medida que aumentam as reduções de espessura ⁽⁵⁾; além disso, a deformação ao longo da linha de centro da amostra é sempre menor que a deformação próxima à superfície do material, para todas as reduções e ambos os materiais ^(6,9).

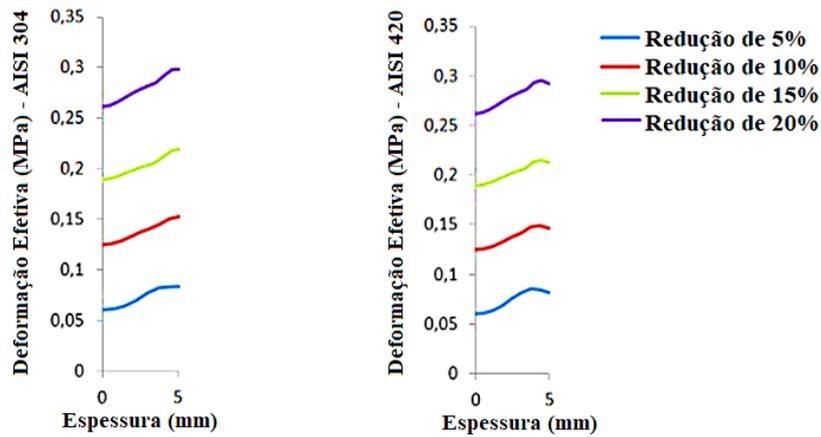


Figura 4: Distribuição de deformações ao longo da seção transversal das chapas laminadas para as várias reduções.

Com os dados da Figura 4, foram calculadas as deformações médias (ϵ_m) para cada material e redução, pelo teorema do valor médio (área sobre a curva de deformação dividida pelo comprimento longitudinal da seção transversal das chapas laminadas). Também, foi calculado o coeficiente Δ (Equação B) e ϕ (Equação A). A Tabela 1 apresenta os valores encontrados para cada redução de área. Pode-se observar que o tipo de aço não afetou a relação encontrada de forma significativa. Entretanto, os valores de ϕ foram superiores aos medidos por Giosa⁽⁹⁾, que utilizou o método do perfil de microdureza para determinar a deformação média (Figura 5).

Tabela 1: Deformação média (ϵ_m) e coeficiente de deformação redundante (ϕ) para as diversas reduções.

Redução de área (%)	AISI 304		AISI 420	
	ϵ_m	ϕ	ϵ_m	ϕ
5	0,078	1,229	0,074	1,255
10	0,137	1,133	0,137	1,131
15	0,202	1,079	0,202	1,077
20	0,279	1,083	0,279	1,083

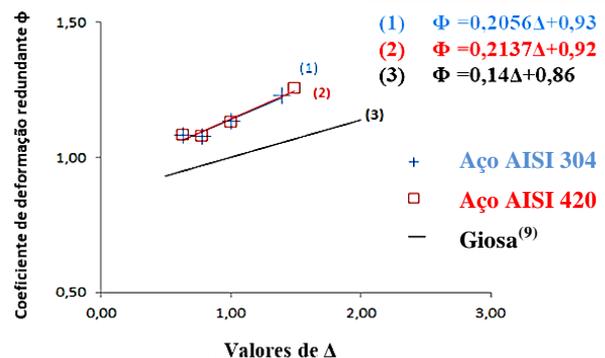


Figura 5: Variação do coeficiente de deformação redundante (ϕ) em função do parâmetro geométrico Δ para a laminação a frio de aços inoxidáveis 304 e 420.

As Figuras 6a e 6b mostram as curvas tensão deformação efetiva, obtidas por simulação do ensaio de tração das amostras laminadas com reduções de 5%, 10%, 15% e 20%. Observa-se as diferentes características de encruamento dos aços ferrítico e austenítico em função da redução.

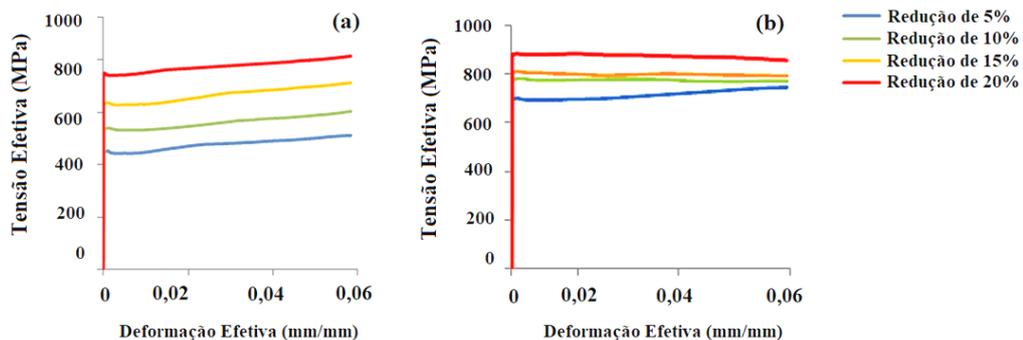


Figura 6: Curvas de tensão efetiva deformação efetiva para a simulação do ensaio de tração dos aços inoxidáveis (a) 304 e (b) 420, após simulação de laminação a frio.

A Figura 7 apresenta as curvas tensão deformação efetivas para os corpos de prova do aço inoxidável 304 (Figura 7a) e 420 (Figura 7b) recozidos e para várias reduções. As curvas dos materiais pré-laminados foram deslocadas, ao longo do eixo de deformação, de acordo com o valor de deformação média calculada (Tabela 1). No caso do aço inoxidável 304, observa-se que as curvas deslocadas se sobrepõem às do recozido, o que indica que o material laminado a frio se comporta sob tração como se tivesse sido previamente submetido a uma deformação de tração correspondente à deformação média no material laminado a frio ⁽⁹⁾. O mesmo, porém, não é verdade para o aço inoxidável 420, onde os corpos de prova laminados apresentam tensões maiores do que aquelas correspondentes à deformação sob tração pura. Estes resultados mostram a influência das características de encruamento na previsão do comportamento à tração do material pré-laminado.

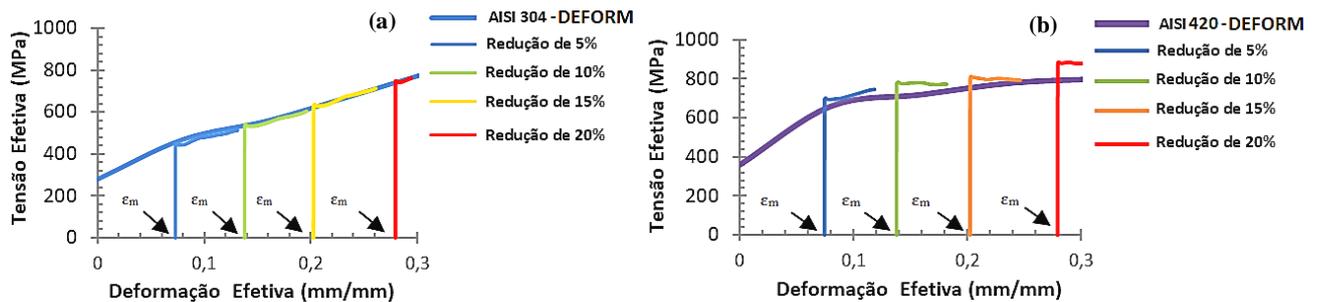


Figura 7: Curvas tensão deformação efetiva para corpos de prova de aços inoxidáveis (a) 304 e (b) 420, recozidos e laminados, deslocadas da deformação média (ϵ_m).

CONCLUSÕES

A equação obtida neste trabalho, que relaciona ϕ e Δ , é similar às apresentadas na literatura. Além disso, os resultados mostram que o aço austenítico 304 laminado, diferentemente do ferrítico 420, comporta-se na tração ulterior como se tivesse sido previamente tracionado de ϵ_m . Dessa forma, os resultados indicam que as características de encruamento dos aços influenciam o comportamento na tração dos materiais pré-laminados, quando analisadas pela técnica de superposição.

REFERÊNCIAS

1. CETLIN, P. R. Redundant Deformation Factor Evaluation Through the Stress-Strain Curves Superposition Method in Round Section Bar Drawing. Transactions of the ASME - Journal of Engineering Materials and Technology, v. 109, 272-275, 1987.
2. HILL, R., TUPPER, S.J. A New Theory of the Plastic Deformation in Wire Drawing. Journal of the Iron and Steel Institute, v. 158, 353 – 359, 1948.
3. HUNDY, B.; SINGER, A. R. Inhomogeneous Deformation in Rolling and Wire Drawing, Journal of the Institute of Metals, v. 83, 401- 402, 1955.
4. CORRÊA, E. C. S. Aspectos do encruamento de metais previamente deformados a frio. Tese de doutorado, 2004.
5. MACGREGOR, C. W.; COFFIN, L.F. The Distribution of Strains in the Rolling Process, J. Appl. Mech., pp. 10 – 13, 1943.
6. AVERBACH, B. L. Plastic Deformation in the Rolling Process, Trans. AIME, 188, 1958.
7. BACKOFEN, W. Deformation Processing, 1 ed. Addison Wesley Reading, 326, 1972.
8. GHOSH, K.; BACKOFEN, W. A. Strain Hardening and Instability in Biaxially Stretched Sheets. Metallurgical Transactions, v. 4, 1113-1123, 1973.
9. GIOSA, J. A.; CETLIN, P. R. Strain Heterogeneity in Cold Rolled 304 Stainless Steel, Transactions ISIJ, vol. 28, 1988.
10. ENGLER, O.; HUH, M. Y.; TOME, C. N. A Study of Through-Thickness Texture Gradients in Rolled Sheets. Metallurgical And Materials Transactions, 2012.

STRAIN HETEROGENEITY IN COLD ROLLING OF METALS WITH DIFFERENT HARDENING CHARACTERISTICS THROUGH COMPUTER SIMULATION.

Adriano Amâncio Trajano¹, Maria Teresa Paulino Aguiar¹ e Paulo Roberto Cetlin¹

¹ Universidade 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

The heterogeneity of strain imposed in the mechanical shaping of metals has been commonly studied with the aim of improving processing techniques, in terms of predicting the mechanical properties of the metal used. The most used techniques to evaluate the tensile behavior of rolled and drawn materials are the microhardness profile method and the superposition method. In this context, this work analyzes, through computer simulation using the finite element method and the superposition method, the influence of the work hardening characteristics of metals in the prediction of the tensile behavior of the cold rolled material. Numerical simulations of cold rolling of AISI 304 and AISI 420 stainless steel sheets were performed, the first austenitic and the second ferritic, with area reductions of 5%, 10%, 15% and 20%. After the laminations simulations, the deformation distribution of each material along the laminated plates thickness was calculated and, then, the average deformation (ϵ_m) was calculated by the average value theorem. With the data obtained, the parameters Δ and ϕ were analyzed and the stress-strain curve of the laminated material after the tensile test was calculated. The results indicate that the austenitic steel 304, unlike the ferritic 420, behaves in the further tension as if it had been previously tensioned by ϵ_m , that is, the work hardening characteristics of the steels influence the tensile behavior of the pre-rolled materials, when analyzed by the superposition technique.

Keywords: Finite element method; Cold rolling; Work hardening; strain heterogeneity.