

# INFLUÊNCIA DO ESTADO DE DEFORMAÇÕES NA FORMAÇÃO DE MARTENSITA INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO EM AÇO INOXIDÁVEL AUSTENÍTICO <sup>1</sup>

Rodrigo Magnabosco<sup>2</sup>  
Daniella Caluscio dos Santos<sup>3</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de três modos de deformação na formação de martensita induzida por deformação ferromagnética (MID) no aço inoxidável austenítico UNS S30100, avaliando o grau de encruamento e sua relação com a fração de MID. Pode-se concluir que na laminação simétrica há uma maior fração volumétrica de MID se comparada à laminação assimétrica nos mesmos graus de deformação verdadeira, provavelmente associado ao menor cisalhamento provocado pela laminação simétrica em relação à assimétrica. Contudo, numa mesma deformação efetiva, a dureza das amostras é equivalente nos três modos de deformação, indicando pouca influência da fração de MID no encruamento do aço. Assim, supondo que presença de cisalhamento relativo entre as superfícies da chapa laminada assimetricamente reduza a energia de deformação, ocorreria redução da fração de MID. Assim, novos estudos quanto à energia de deformação imposta nos modos de deformação empregados neste trabalho faz-se necessária.

**Palavras-chave:** Martensita induzida por deformação; Aço inoxidável austenítico; Laminação; Laminação assimétrica.

## STRAIN MODE INFLUENCE ON THE FORMATION OF STRAIN-INDUCED MARTENSITE IN AUSTENITIC STAINLESS STEEL

### Abstract

This work evaluates the strain mode influence on the formation of ferromagnetic strain-induced martensite (SIM) in a UNS S30100 austenitic stainless steel, relating the degree of strain hardening to the volume fraction of SIM. Symmetric rolling leads to a higher SIM fraction in a given effective plastic strain if compared to asymmetric rolling, and this is probably associated to the higher shear strain imposed by asymmetric rolling. However, in the same effective plastic strain, samples deformed in different modes presented equivalent hardness, showing a weak contribution of SIM fraction in the strain hardening of this steel. A reduction in the SIM fraction is expected if the relative shear strain between sheet surfaces during asymmetric rolling leads to reduction in the strain energy, and for those reasons new efforts will be needed to verify the influence of strain energy of the applied deformation modes in SIM formation.

**Key words:** Strain induced martensite; Austenitic stainless steel; Rolling; Asymmetric rolling.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1º de agosto de 2008, Santos, SP, Brasil

<sup>2</sup> Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrmag@fei.edu.br

<sup>3</sup> Engenheira Química, daniellacaluscio@gmail.com.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis austeníticos recebem esta denominação por apresentarem a fase austenita (a estrutura CFC do ferro) estável inclusive em temperaturas inferiores à ambiente. Os mais comuns são modificações da clássica liga 18/8 (18% Cr e 8% Ni), o mais popular material resistente à corrosão por mais de 70 anos.<sup>(1,2)</sup> Dentre os mais comuns, o UNS S30100 (AISI 301) foi originalmente desenvolvido para aplicações que demandem, aliada a resistência à corrosão, alta resistência mecânica, a qual é obtida graças a grande capacidade de encruamento.

Durante a deformação plástica, o aço UNS S30100 apresenta endurecimento não só devido ao encruamento, mas também como resultado da formação de martensita induzida por deformação, particularmente em temperaturas abaixo da ambiente.<sup>(1)</sup>

Dois são as transformações induzidas por deformação experimentadas pela austenita, havendo formação de martensita  $\epsilon$ , de estrutura hexagonal compacta, e a martensita  $\alpha'$ , de estrutura cúbica de corpo centrado e ferromagnética, chamada neste trabalho de MID. Segundo Barbucci et al.<sup>(3)</sup> o aço UNS S30100 possui a capacidade de aumentar sua resistência à tração de 300 MPa na condição recozida para acima de 1500 MPa quando altamente deformado devido à formação de martensita induzida por deformação. Mézaros e Proháska<sup>(4)</sup> indicam que o aço inoxidável austenítico UNS S30400 apresenta 50% de martensita induzida por deformação com aproximadamente 50% de redução de espessura por laminação na temperatura ambiente. Kumar, Maharo e Singh<sup>(5)</sup> afirmam que se pode conseguir 80% de martensita induzida por deformação num aço AISI 304L após 90% de redução por laminação a frio na temperatura ambiente, e que a fração de martensita induzida por deformação pode atingir 90% se conduzida em temperaturas sub-zero.

Talonen e Hänniken<sup>(6)</sup> reportam que num aço AISI 301LN a fração volumétrica de MID, medida por ferritoscópio, pode chegar a 40% após deformação verdadeira de aproximadamente 0,35, sob taxa de deformação de 200 s<sup>-1</sup>; a fração volumétrica de MID, contudo, pode atingir 80% se a taxa de deformação for reduzida a 3x10<sup>-4</sup> s<sup>-1</sup>. Os autores ainda afirmam que as interseções de bandas de cisalhamento atuam como sítios de nucleação de MID, e reportam que redução de temperatura eleva a fração de MID formada numa mesma deformação verdadeira.

O objetivo deste trabalho é avaliar a influência de três modos de deformação na formação de MID no aço inoxidável austenítico UNS S30100:

- 1) Deformação uniaxial por tração.
- 2) Deformação laminação de forma simétrica, utilizando cilindros de laminação de mesmo diâmetro e mesma velocidade periférica.
- 3) Deformação por laminação assimétrica, utilizando cilindros de laminação com razão de diâmetros 2:1 e mesma rotação, que geram diferentes velocidades periféricas em cada uma das superfícies das chapas, o que ocasiona cisalhamento relativo entre as duas superfícies da chapa.

Com isso, pretende-se avaliar o grau de encruamento e sua relação com a fração de MID no aço UNS S30100.

## 2 MATERIAL E MÉTODOS

Barras de 19,5mm de diâmetro foram cortadas e usinadas na forma de corpos-de-prova para ensaios de tração segundo a norma ASTM E8M-04.<sup>(7)</sup> A composição química do material estudado segue apresentada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição química em % massa do aço UNS S30100 em estudo.

C	Cr	Si	Mo	Ni	Mn	S	P	Fe
0,046	17,66	0,28	0,25	7,91	1,44	0,029	0,026	balanço

O material foi recozido por 8 horas a 1.200°C em forno poço com atmosfera de N<sub>2</sub> para evitar oxidação excessiva, com posterior resfriamento em água. A fim de se obter vários graus de encruamento por deformação uniaxial, foi realizado ensaio de tração nos corpos-de-prova obtendo-se amostras com deformações verdadeiras de até 0,322.

Da mesma barra original foram forjadas barras retangulares de 10,10 mm de espessura média, que também foram recozidas por 8 horas a 1.200°C em forno poço com atmosfera de N<sub>2</sub> para evitar oxidação excessiva, com posterior resfriamento em água. Estas barras retangulares foram laminadas de forma simétrica e assimétrica no laminador de planos do CDMatM-FEI. Na laminação simétrica utilizaram-se cilindros de mesmo diâmetro com velocidade periférica de 239 mm/s, obtendo-se amostras de 8,4 a 2,9 mm de espessura média. Já na laminação assimétrica utilizaram-se cilindros superior e inferior com velocidades periféricas de 322 e 161 mm/s respectivamente, obtendo-se amostras de 8,5 a 5,4 mm de espessura média. A diferença de velocidades periféricas na laminação assimétrica foi obtida utilizando-se cilindro superior com diâmetro duas vezes superior ao do cilindro inferior, e mantendo a mesma rotação nos dois cilindros.

A fim de permitir a comparação entre as diferentes formas de conformação empregadas, indicam-se neste trabalho o grau de deformação dos diferentes corpos-de-prova como sua deformação plástica verdadeira. Para os corpos-de-prova deformados uniaxialmente em tração, calculou-se a deformação verdadeira usando-se a Eq. 1:

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right) \quad \text{Eq. 1}$$

onde  $L$  é o comprimento após a deformação e  $L_0$  é o comprimento inicial de referência adotado. Para permitir a comparação destes valores à deformação imposta às amostras laminadas, calculou-se a deformação efetiva,<sup>(8)</sup> ou a equivalente à deformação uniaxial usando-se a Eq. 2:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2)} \quad \text{Eq. 2}$$

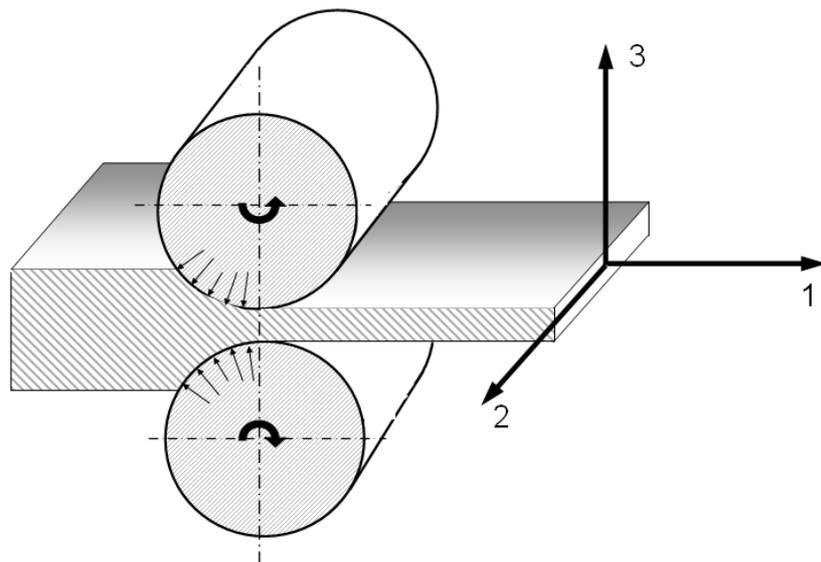
onde  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$  e  $\varepsilon_3$  são as deformações nos eixos indicados na Figura 1. Como na laminação de planos a deformação na largura ( $\varepsilon_2$ ) é desprezível, as deformações no comprimento ( $\varepsilon_1$ ) e na espessura ( $\varepsilon_3$ ) são iguais em módulo, para garantir a manutenção de volume observada após a deformação plástica. Assim, a Eq. 2 fica:

$$\bar{\varepsilon} = \sqrt{\frac{2}{3} \cdot (\varepsilon_3^2 + 0 + \varepsilon_3^2)} \cong 1,155 \cdot |\varepsilon_3| \cong 1,155 \cdot \ln\left(\frac{t_0}{t}\right) \quad \text{Eq. 3}$$

onde  $t$  é a espessura medida após a laminação e  $t_0$  é a espessura inicial, de 10,10 mm.

Após a laminação, as amostras foram seccionadas e a fração volumétrica de MID foi obtida com o auxílio de um ferritoscópio FISCHER modelo MP30, calibrado com o auxílio de padrões, tendo como limite de detecção 0,1% de ferrita. Dez medições foram realizadas em cada uma das amostras.

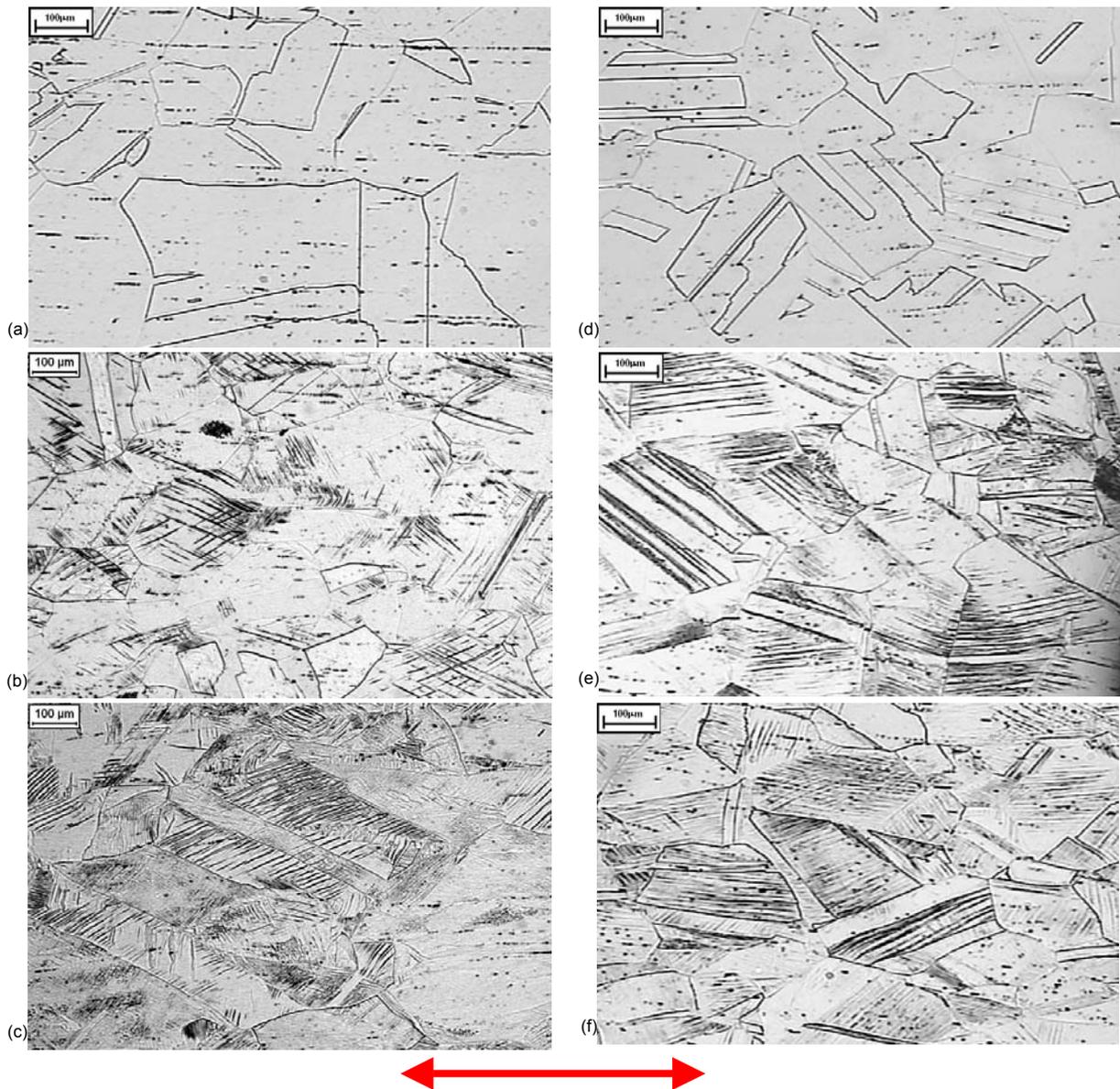
O material em estudo, nas condições antes e após as deformações, foi caracterizado por microscopia óptica após preparação metalográfica e ataque eletrolítico em solução 10% de ácido oxálico a 6 Vcc por 30 s. Além disso, obteve-se a dureza *Vickers* de todas as amostras, e para tal foram efetuadas cinco medições com carga de 5 kgf (49,1 N) em cada condição estudada.



**Figura 1.** Esquema da laminação simétrica realizada e sistema de eixos adotado. Na laminação assimétrica foi adotado o mesmo sistema de eixos, mas o cilindro superior apresenta diâmetro duas vezes superior ao do cilindro inferior.

### 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Na Figura 2 são apresentadas as micrografias do aço antes e após a deformação uniaxial por tração. Nota-se que a estrutura de grãos equiaxiais da barra usada nas deformações uniaxiais por tração (Figura 2a) é equivalente àquela da barra forjada e recozida usada nas laminações (Figura 2d), e que em todos os processos de deformação há orientação na direção principal de deformação. Além disso, nota-se nas amostras deformadas a presença de bandas de cisalhamento inclinadas com relação ao sentido da tração aplicada, sem diferenças significativas entre os modos de deformação. A máxima deformação plástica por tração foi de 0,322, garantindo a ocorrência de deformação uniforme, de acordo com a curva tensão-obtida mostrada na Figura 3, obtida num ensaio de tração do aço em estudo.



**Figura 2.** Micrografias do aço UNS S30100 (a) barra original recozida, (b) barra original deformada uniaxialmente  $\varepsilon=0,10$ , (c) barra original deformada uniaxialmente  $\varepsilon=0,18$ , (d) barra forjada e recozida, usada nas laminações, (e) barra laminada simetricamente,  $\bar{\varepsilon} = 0,20$ , (f) barra laminada assimetricamente,  $\bar{\varepsilon} = 0,20$ . Ataque eletrolítico com ácido oxálico 10%. A seta indica o sentido de deformação.

A variação de dureza em função da deformação aplicada é mostrada na Figura 4, onde se nota que para um mesmo grau de deformação a dureza é praticamente a mesma, considerando-se o desvio-padrão das medidas também indicados na Figura 4.

A fração de MID medida por ferritoscópio em função da deformação aplicada é mostrada na Figura 5, onde se nota, numa mesma deformação efetiva, uma maior formação de MID se o material é laminado simetricamente. Nota-se ainda que em qualquer grau de deformação realizado a fração de MID obtida na laminação assimétrica é sempre menor que na laminação simétrica ou na deformação uniaxial.

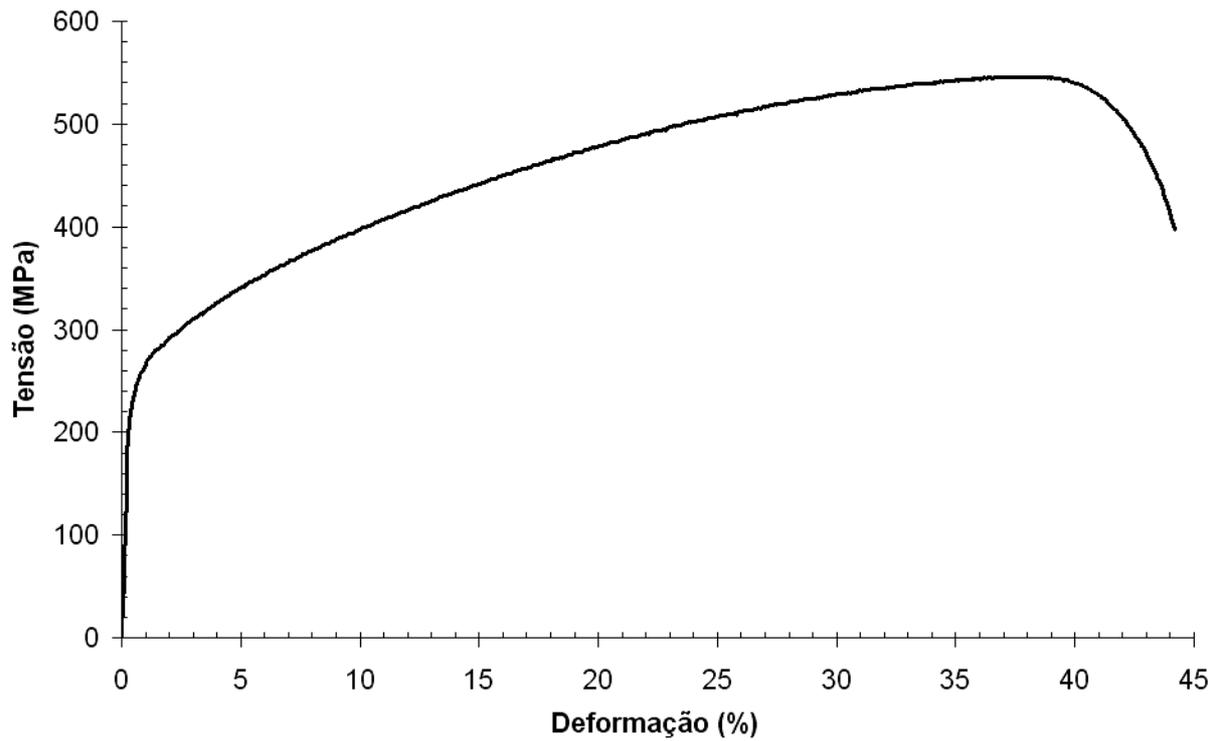


Figura 3. Curva tensão-deformação obtida no ensaio de tração do aço UNS S30100.

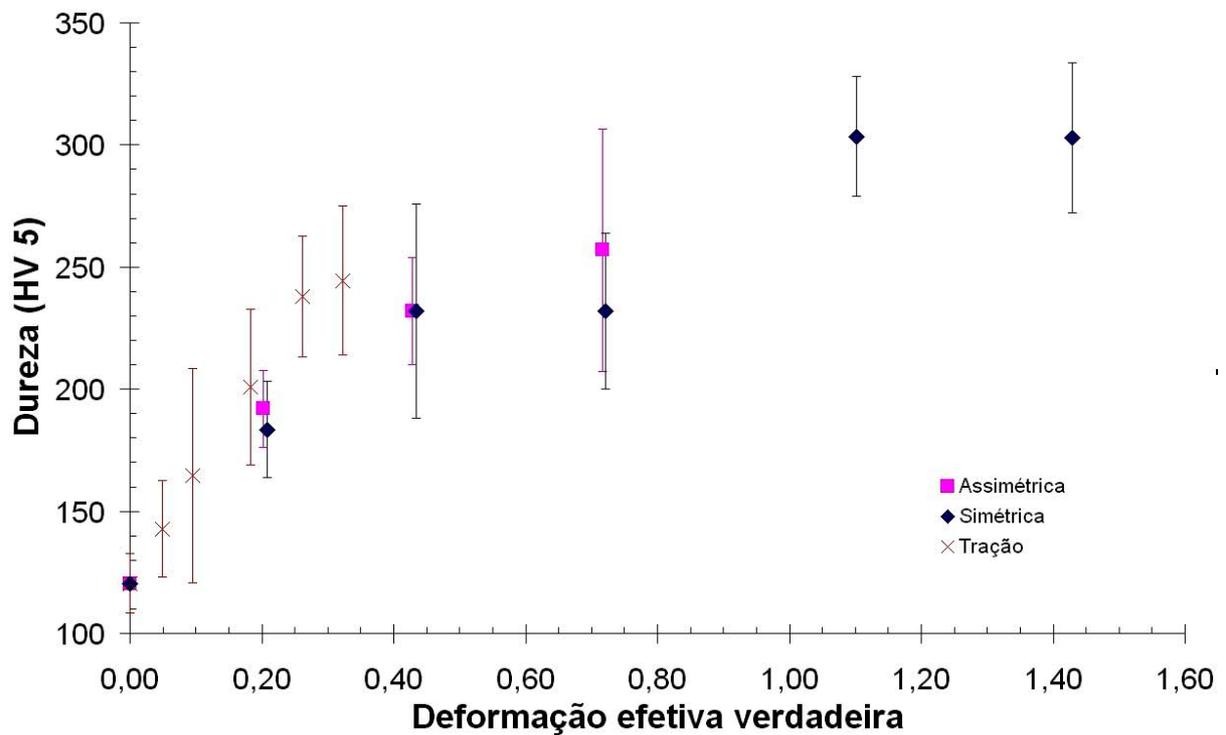


Figura 4. Dureza das amostras em função da deformação efetiva sofrida e do modo de deformação imposto.

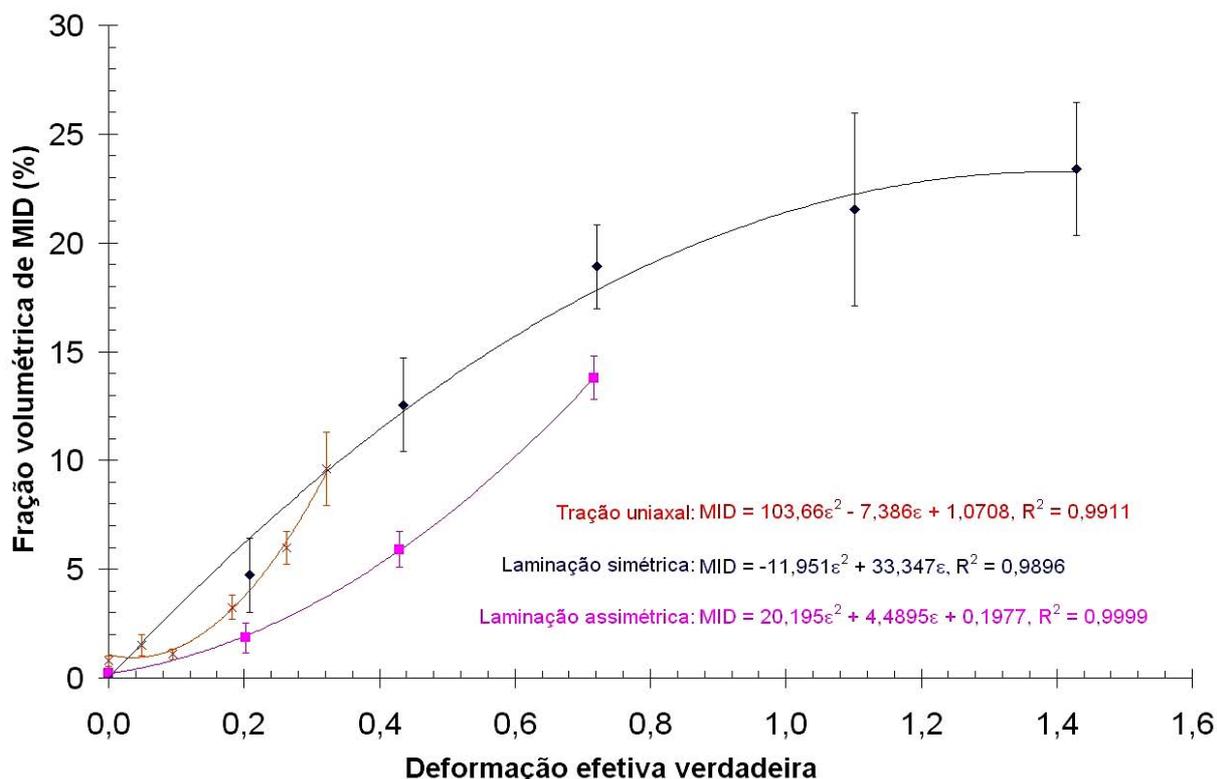


Figura 5. Fração de MID em função da deformação efetiva sofrida e do modo de deformação imposto.

#### 4 DISCUSSÃO

A partir dos dados da Figura 4 nota-se que o aumento de dureza das amostras, em qualquer modo de deformação, é proporcional à deformação efetiva imposta, num típico processo de encruamento, onde a deformação plástica é dificultada pelo aumento da densidade de discordâncias, ocasionando o aumento de dureza.

No entanto, a Figura 5 mostra que numa mesma deformação efetiva a fração de MID ferromagnética ( $\alpha'$ ) é maior quando o material é laminado simetricamente, mostrando que o modo de deformação pode influenciar na formação desta fase. O maior cisalhamento entre as superfícies da chapa provavelmente imposto devido a laminação assimétrica pode ter alterado a energia introduzida na deformação, levando a uma menor formação de MID do tipo  $\alpha'$ , ou induzindo a uma maior formação de martensita  $\epsilon$ , não mensurada no presente trabalho.

Assim, pode-se supor que a fração de MID do tipo  $\alpha'$ , ou ferromagnética, não é determinante do grau de encruamento do aço em estudo, contrariando o estabelecido na literatura.<sup>(1)</sup> Pode-se supor ainda a presença de cisalhamento relativo entre as superfícies da chapa laminada assimetricamente reduza a energia de deformação, o que reduziria a formação de MID. Assim, estudos quanto à energia de deformação imposta nos modos de deformação aqui empregados faz-se necessária.

## 5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- 1 Na laminação simétrica há uma maior fração volumétrica de martensita induzida por deformação ferromagnética (MID) se comparada à laminação assimétrica nos mesmos graus de deformação verdadeira, provavelmente associado ao menor cisalhamento provocado pela laminação simétrica em relação à assimétrica.
- 2 Numa mesma deformação efetiva, a dureza das amostras é equivalente nos três modos de deformação, indicando pouca influência da fração de MID no encruamento do aço.
- 3 Supondo que presença de cisalhamento relativo entre as superfícies da chapa laminada assimetricamente reduza a energia de deformação, ocorreria redução da fração de MID. Assim, novos estudos quanto à energia de deformação imposta nos modos de deformação empregados neste trabalho faz-se necessária.

## REFERÊNCIAS

- 1 SEDRIKS, A. J., **Corrosion of stainless steels**. Wiley-Interscience:New York, 1996 pp. 13-24.
- 2 **Heat treating**. IN: ASM Specialty Handbook – Stainless Steels, ASM, Metals Park, USA, 1994, p. 290-313.
- 3 BARBUCCI, A. et al., **Electrochemical and corrosion behaviour of cold rolled AISI 301 in 1M H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>**. Journal of Alloys and Compounds, Genova, 317-318, p. 607-611, 2001.
- 4 MEZSÁROS, I.; PROHÁSZKA, J., **Magnetic investigation of the effect of  $\alpha'$ -martensite on the properties of austenitic stainless steel**. Journal of Materials Processing Technology. Budapest, n.161, p.162-168, 2005.
- 5 KUMAR, B. R., MAHARO, B., SINGH, R., **Influence of Cold-Worked Structure on Electrochemical Properties of Austenitic Stainless Steels**. Metallurgical and Materials Transactions A, v. 38A, 2007, p. 2085-2094.
- 6 TALONEN, J., HÄNNINEN, H., **Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels**. Acta Materialia, n. 55, p. 6108-6118, 2007.
- 7 ASTM E 8M-04, **“Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials[Metric]”**, ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 2001, pp.1-24.
- 8 DOWLING, N. E., **Mechanical Behavior of Materials**, Prentice Hall:New Jersey, 2. ed, 1999, p. 570-573.