

# EFEITO BAUSCHINGER EM AÇOS INOXIDÁVEIS <sup>1</sup>

Rodrigo Magnabosco<sup>2</sup>  
Sandro Guilherme Solosando<sup>3</sup>

## Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar a ocorrência do efeito Bauschinger em dois aços inoxidáveis dúplex (UNS S31803 e UNS S32750) e em um aço inoxidável austenítico (UNS S30100), avaliando o efeito da deformação plástica imposta de forma uniaxial, tanto trativa como compressiva. Os materiais em estudo foram submetidos a ensaios de tração, tração-compressão e compressão-tração, revertendo-se o carregamento quando deformações trativas e compressivas de 1, 3 e 5% fossem alcançadas. Quanto ao efeito Bauschinger, verificou-se a redução do limite de escoamento de todos os aços pesquisados, além de uma pequena variação dos parâmetros BE e BEF quando o sentido inicial de sollicitação era revertido. Não foi encontrada nenhuma relação linear quanto aos valores do coeficiente de resistência e expoente de encruamento obtidos e o efeito Bauschinger. Também se procurou encontrar uma relação entre os parâmetros BE e BEF e o limite de escoamento obtido no sentido inverso do carregamento, com o sentido e o módulo da deformação previamente imposta antes de se reverter o carregamento, verificando-se também nenhuma relação linear entre os mesmos, e que os parâmetros BE e BEF dependem de forma errática da deformação plástica imposta até a reversão do carregamento para os aços estudados.

**Palavras-chave:** Efeito Bauschinger; Aços inoxidáveis; Limite de escoamento.

## BAUSCHINGER EFFECT IN STAINLESS STEELS

### Abstract

This work studied the Bauschinger effect in two duplex stainless steels (UNS S31803 and UNS S32750) and in a austenitic stainless steel (UNS S30100), evaluating the effect of the plastic deformation imposed in tension or compression. The materials studied were submitted to tensile strength tests, and tension-compression and compression-tension with load reversion when strains of 1, 3 and 5 pct were reached. The Bauschinger effect was noticed due to reduction of the yield strength in all tests after load reversion, besides a small variation of the parameters BE and BEF when load was reverted. It was not found any relationship between the strength coefficient, strain-hardening exponent and the Bauschinger effect. There is no relationship among the parameters BE and BEF and the yield strength obtained after load reversion, neither with the absolute value of strain previously imposed before load reversion. For the studied steels, parameters BE and BEF depend on the plastic strain imposed at load reversion in a erratic form.

**Key words:** Bauschinger effect; Stainless steels; Yield strength

<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, rodrimagn@fei.edu.br

<sup>3</sup> Aluno do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, solosando@gmail.com

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Objetivo

O presente trabalho tem como objetivo estudar a ocorrência do efeito Bauschinger em dois aços inoxidáveis dúplex (UNS S31803 e UNS S32750) e em um aço inoxidável austenítico (UNS S30100), avaliando o efeito da deformação previamente imposta de forma uniaxial, tanto trativa quanto compressiva. Deste modo, pretende-se esclarecer o fenômeno de redução de limite de escoamento quando se efetua o carregamento reverso em materiais.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

O efeito Bauschinger é um importante fenômeno mecânico em metais e suas ligas. Este efeito é normalmente associado a condições de carregamento onde a tensão limite de escoamento sofre diminuição, quando a deformação imposta sobre um dado material metálico, normalmente policristalino, é invertida.<sup>[1]</sup>

O efeito Bauschinger pode ocorrer basicamente devido a dois mecanismos. Um deles propõe que a presença de tensões residuais localizadas, como as encontradas no empilhamento de discordâncias em contornos de grão, facilitariam o movimento de discordâncias no sentido contrário ao da deformação inicial, assim facilitando o escoamento no sentido reverso; já outro mecanismo propõe que fontes de discordâncias de sinais opostos no carregamento reverso proporcionariam a aniquilação de discordâncias inicialmente formadas com conseqüente redução do encruamento e do limite de escoamento observado inicialmente.<sup>[1]</sup>

Uma maneira de quantificar o efeito Bauschinger é através do parâmetro BE (“*Bauschinger Effect*”),<sup>[1]</sup> como indicado na Figura 5, e BEF (“*Bauschinger Effect Factor*”).<sup>[2-4]</sup> Os parâmetros BE e BEF estão representados matematicamente pelas equações de (1) a (4):

$$BE_{t-c} = \frac{|S_{NA\_REVERSÃO}| - |S_{LE,COMPRESSÃO}|}{S_{NA\_REVERSÃO}} \quad (1)$$

$$BE_{c-t} = \frac{|S_{NA\_REVERSÃO}| - |S_{LE,TRAÇÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (2)$$

$$BEF_{t-c} = \frac{|S_{LE,COMPRESSÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (3)$$

$$BEF_{c-t} = \frac{|S_{LE,TRAÇÃO}|}{|S_{NA\_REVERSÃO}|} \quad (4)$$

Onde  $S_{NA\_REVERSÃO}$  é o limite de escoamento no instante da reversão do carregamento, e  $S_{LE,COMPRESSÃO}$  e  $S_{LE,TRAÇÃO}$  são respectivamente os limites de escoamento na tração e compressão na direção reversa.<sup>[1]</sup>

Os mesmos mecanismos que levam a ocorrência do efeito Bauschinger produzem efeitos em curvas do tipo tensão-deformação cíclica, responsáveis pela nucleação de defeitos de fadiga. Desta maneira o entendimento do efeito Bauschinger é uma ferramenta para se compreender o comportamento à fadiga,<sup>[5]</sup> além de permitir avaliar o comportamento mecânico de materiais metálicos sujeitos a processos de conformação plástica, onde carregamentos em sentidos contrários podem ocorrer.<sup>[1,6]</sup>

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

A composição química dos aços em estudo, fornecidos na forma de barras de 20 mm de diâmetro, é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% em massa) dos três aços em estudo

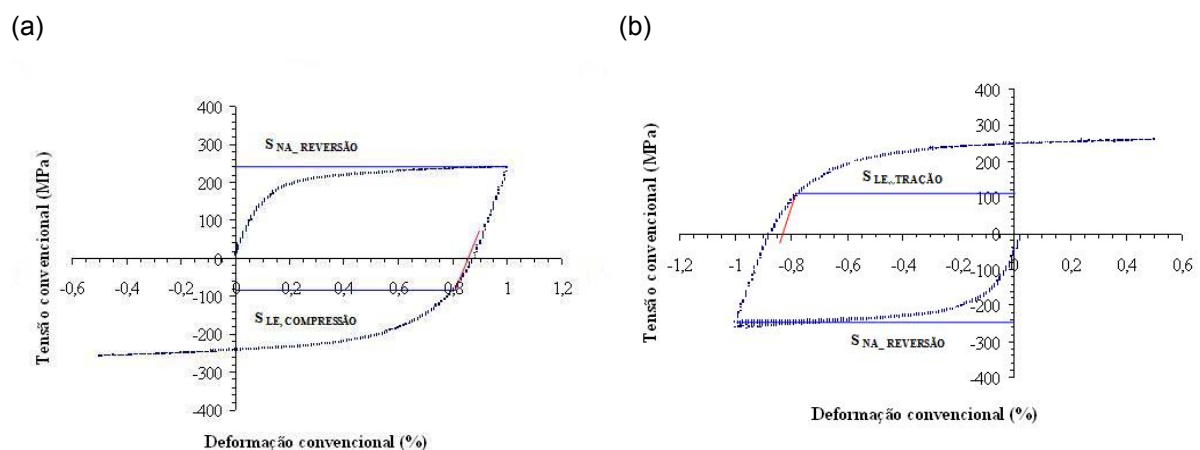
| Aço UNS | Cr    | Ni   | Mo   | N    | C    | Mn   | Si   | P    | S     | Fe      |
|---------|-------|------|------|------|------|------|------|------|-------|---------|
| S30100  | 17,7  | 7,9  | 0,25 | ***  | 0,05 | 1,44 | 0,28 | 0,03 | 0,03  | balanço |
| S31803  | 22,21 | 5,4  | 3,15 | 0,18 | 0,02 | 0,76 | 0,45 | 0,02 | 0,01  | balanço |
| S32750  | 24,95 | 6,91 | 3,79 | 0,26 | 0,02 | 0,43 | 0,26 | 0,02 | 0,001 | balanço |

Os corpos-de-prova dos três aços em estudo foram obtidos respeitando a norma ASTM E606-04.<sup>[7]</sup> Os corpos-de-prova do aço UNS S30100 foram solubilizados a 1200°C por 30 minutos e resfriados em água para garantir que estes possuísem somente a fase austenita presente.<sup>[8,9]</sup>

Ensaio de tração foram conduzidos segundo a norma ASTM E8M-04,<sup>[10]</sup> em um equipamento servo-controlado MTS. Com o mesmo equipamento utilizado nos ensaios de tração, ensaio de tração-compressão e compressão-tração (ensaio de efeito Bauschinger) foram realizados, sendo cada um deles interrompidos em 1%, 3% e 5% de deformação plástica uniforme, tanto trativa quanto compressiva, revertendo-se o sentido do carregamento até que uma compressão (no ensaio de tração-compressão) e uma tração (no ensaio de compressão-tração) de 0,5% fosse obtida, com relação ao seu comprimento original.

## 3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A Figura 1, itens (a) e (b), mostra respectivamente um exemplo das curvas obtidas nos ensaios de efeito Bauschinger dos três aços em estudo e as Tabelas de 2 a 7 mostram os resultados coletados destes ensaios juntamente com o coeficiente de resistência e o expoente de encruamento, obtidos até 7% de deformação, do ensaio de tração.



**Figura 1.** Ensaio de efeito Bauschinger do aço UNS S30100 até 1% de deformação: (a) tração-compressão; (b) compressão-tração.

Tabela 2. Limite de escoamento e parâmetros BE e BEF na tração e compressão e limite de escoamento na reversão do aço UNS S30100.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão |                                |                                  |                           |                            |
|--|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| 1  | 240                            | 80                               | 0,67                      | 0,33                       |
| 3  | 282                            | 89                               | 0,68                      | 0,31                       |
| 5  | 260                            | 62                               | 0,76                      | 0,24                       |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração |                                |                                  |                           |                            |
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| -1   | 102                            | 243                              | 0,58                      | 0,42                       |
| -3   | 81                             | 299                              | 0,73                      | 0,27                       |
| -5   | 120                            | 358                              | 0,66                      | 0,33                       |

Tabela 3. Limite de escoamento e parâmetros BE e BEF na tração e compressão e limite de escoamento na reversão do aço UNS S31803.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão |                                |                                  |                           |                            |
|--|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| 1  | 550                            | 200                              | 0,64                      | 0,36                       |
| 3  | 600                            | 149                              | 0,75                      | 0,25                       |
| 5  | 650                            | 180                              | 0,72                      | 0,28                       |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração |                                |                                  |                           |                            |
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| -1   | 190                            | 575                              | 0,67                      | 0,33                       |
| -3   | 125                            | 625                              | 0,80                      | 0,20                       |
| -5   | 250                            | 750                              | 0,67                      | 0,33                       |

Tabela 4. Limite de escoamento e parâmetros BE e BEF na tração e compressão e limite de escoamento na reversão do aço UNS S32750.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão |                                |                                  |                           |                            |
|--|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------|----------------------------|
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| 1  | 650                            | 250                              | 0,61                      | 0,38                       |
| 3  | 751                            | 201                              | 0,73                      | 0,27                       |
| 5  | 749                            | 250                              | 0,67                      | 0,33                       |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração |                                |                                  |                           |                            |
| Deformação (%)                                 | S <sub>NA_REVERSÃO</sub> (MPa) | S <sub>LE_COMPRESSÃO</sub> (MPa) | BE <sub>t-c</sub> eq. (1) | BEF <sub>t-c</sub> eq. (3) |
| -1   | 250                            | 650                              | 0,61                      | 0,38                       |
| -3   | 175                            | 748                              | 0,77                      | 0,23                       |
| -5   | 300                            | 810                              | 0,63                      | 0,37                       |

Tabela 5. Coeficiente de resistência (H) (em MPa) e expoente de encruamento (n) obtidos nos ensaios de efeito Bauschinger e no ensaio de tração, até 7% de deformação, do aço UNS S30100.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão e ensaio de tração |                     |                 |                     |                 |
|---|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| 1   | 0,08                | 0,14            | 361,49              | 494,02          |
| 3   | 0,14                | 0,16            | 478,34              | 570,82          |
| 5   | 0,17                | 0,20            | 452,94              | 593,04          |
| 7   | 0,22±0,02           | -----           | 629,23±46,44        | -----           |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração                    |                     |                 |                     |                 |
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| -1  | 0,08                | 0,16            | 369,77              | 555,65          |
| -3  | 0,19                | 0,15            | 585,26              | 544,40          |
| -5  | 0,30                | 0,16            | 911,71              | 670,30          |

Tabela 6. Coeficiente de resistência (H) (em MPa) e expoente de encruamento (n) obtidos nos ensaios de efeito Bauschinger e no ensaio de tração, até 7% de deformação, do aço UNS S31803.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão e ensaio de tração |                     |                 |                     |                 |
|---|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| 1   | 0,04                | 0,34            | 677,20              | 3326,23         |
| 3   | 0,07                | 0,20            | 785,43              | 1375,18         |
| 5   | 0,11                | 0,17            | 924,42              | 1304,51         |
| 7   | 0,15±0,01           | -----           | 1035,65±2,97        | -----           |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração                    |                     |                 |                     |                 |
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| -1  | 0,11                | 0,30            | 1000,09             | 2815,72         |
| -3  | 0,10                | 0,14            | 918,16              | 1095,95         |
| -5  | 0,27                | 0,08            | 1814,23             | 983,60          |

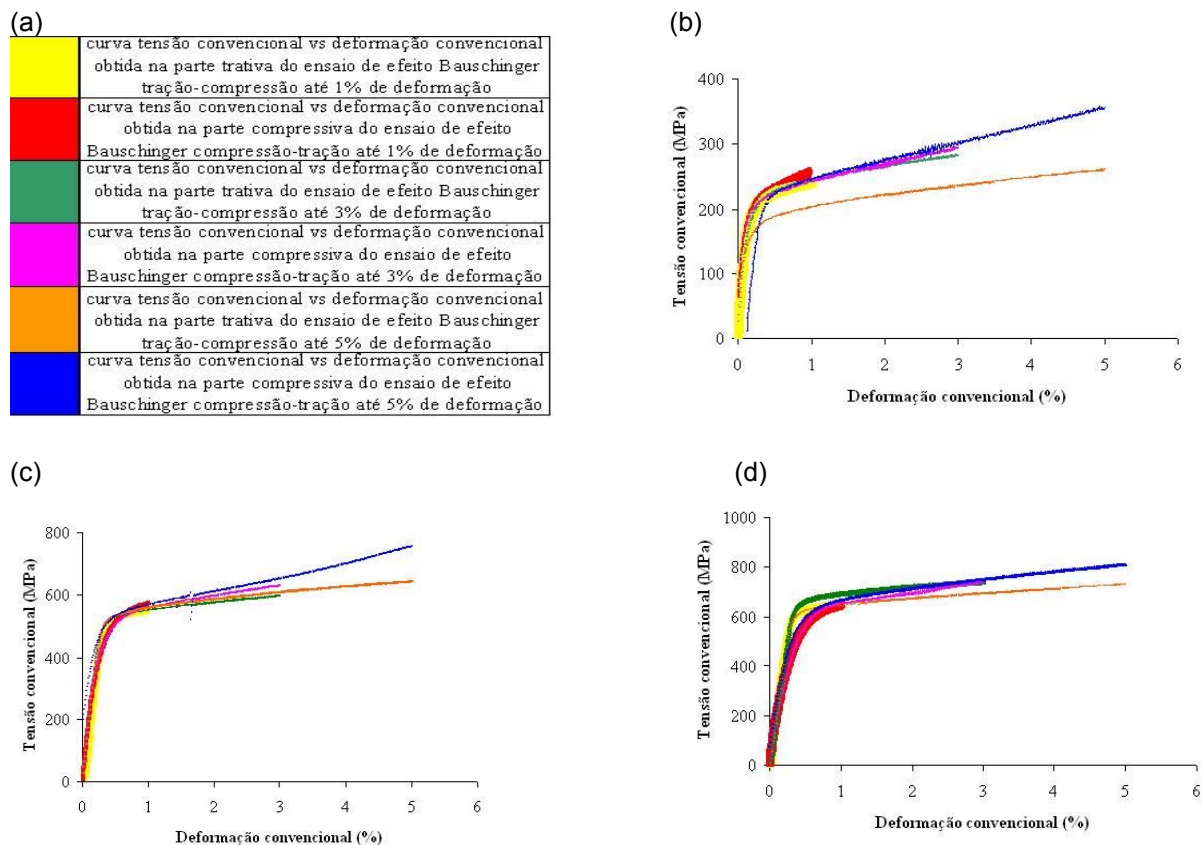
Tabela 7. Coeficiente de resistência (H) (em MPa) e expoente de encruamento (n) obtidos nos ensaios de efeito Bauschinger e no ensaio de tração, até 7% de deformação, do aço UNS S32750.

| Ensaio de efeito Bauschinger tração-compressão e ensaio de tração |                     |                 |                     |                 |
|---|---------------------|-----------------|---------------------|-----------------|
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| 1   | 0,03                | 0,32            | 774,09              | 3411,03         |
| 3   | 0,06                | 0,18            | 925,26              | 1573,18         |
| 5   | 0,09                | 0,15            | 1005,95             | 1362,99         |
| 7   | 0,12±0,01           | -----           | 1135,91±32,02       | -----           |
| Ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração                    |                     |                 |                     |                 |
| Deformação (%)  | (n) no carregamento | (n) na reversão | (H) no carregamento | (H) na reversão |
| -1  | 0,15                | 0,25            | 1415,99             | 2404,50         |
| -3  | 0,10                | 0,13            | 1075,54             | 1232,88         |
| -5  | 0,14                | 0,09            | 1302,22             | 1145,99         |

#### 4 DISCUSSÃO

Com o intuito de verificar se os três aços em estudo estavam balanceados foram sobrepostas as curvas da parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger na tração-compressão e da parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger compressão-tração, conforme a Figura 2, itens (b), (c) e (d) com respectiva legenda indicada conforme o item (a) da Figura 2 .

Da Figura 2, itens (b), (c) e (d), verifica-se que todos os aços em questão encontram-se balanceados para deformações de 1% e 3%, sendo assim, o limite de escoamento é igual tanto na parte trativa do ensaio de efeito Bauschinger na tração-compressão como na parte compressiva do ensaio de efeito Bauschinger na compressão-tração; já para uma deformação convencional de 5% observa-se que na parte trativa dos ensaios de efeito Bauschinger na tração-compressão que os aços em estudo apresentam um valor de limite de escoamento diferente daqueles obtidos nos ensaios de efeito Bauschinger na compressão-tração. O desvio observado nos ensaios efetuados até 5% de deformação plástica uniforme pode estar associado a um erro de ajuste na célula de carga após fixação do corpo-de-prova de cada aço em estudo. Logo se conclui que os três materiais em estudo estão balanceados, ou seja, apresentam o mesmo limite de escoamento se carregados em tração ou em compressão.



**Figura 2.** Sobreposição das curvas tensão-deformação dos ensaios de efeito Bauschinger dos três aços em estudo: (a) legenda dos gráficos; (b) parte tratativa e compressiva do ensaio de efeito Bauschinger na tração-compressão e compressão-tração do aço UNS S30100; (c) parte tratativa e compressiva do ensaio de efeito Bauschinger na tração-compressão e compressão-tração do aço UNS S31803; (d) parte tratativa e compressiva do ensaio de efeito Bauschinger na tração-compressão e compressão-tração do aço UNS S32750.

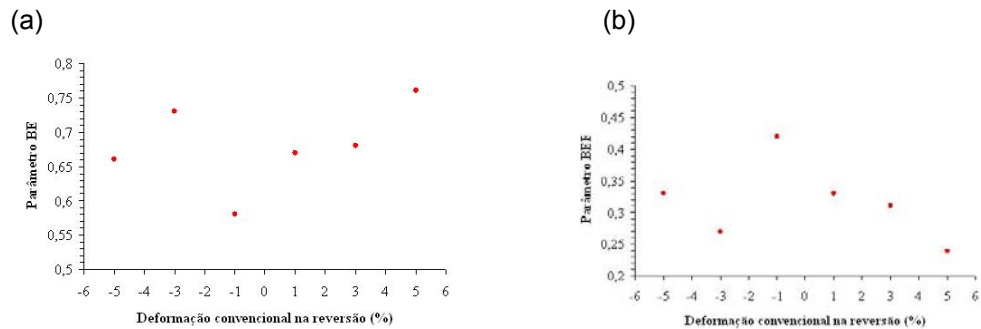
Consultando-se as Tabelas de 2 a 7 conclui-se que não há relação entre o aumento ou diminuição dos valores de expoente de encruamento e coeficiente de resistência dos três aços em estudo com o efeito Bauschinger, apesar da existência do mesmo, visto que a tensão limite de escoamento dos três aços em estudo sempre é menor quando o sentido do carregamento é revertido, pois os valores de coeficiente de resistência e expoente de encruamento ora aumentam ora diminuem dependendo do módulo e sentido da deformação previamente imposta. Entretanto, das Tabelas de 5 a 7 verifica-se para os três aços em estudo que o expoente de encruamento obtido em um ensaio de tração aumenta quando a deformação plástica uniforme imposta nestes materiais também aumenta. Logo se conclui que quanto maior a deformação plástica uniforme imposta nos aços UNS S30100, UNS S31803 e UNS S32750 em um ensaio de tração, maior é o valor expoente de encruamento.

Das Tabelas de 2 a 4 nota-se que não há relação entre o sentido e o módulo da deformação previamente imposta e o limite de escoamento obtido a 0,05% de deformação dos três aços em estudo, pois os valores de limite de escoamento ora aumentam ora diminuem dependendo do módulo e sentido da deformação previamente imposta.

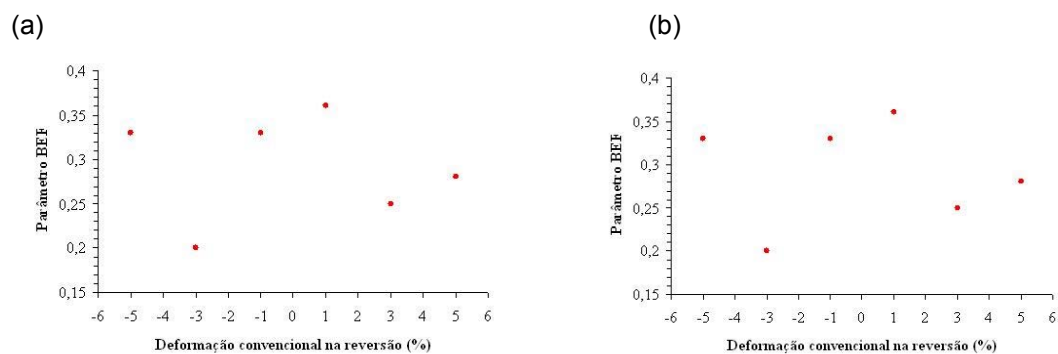
Tentando-se obter uma relação entre a deformação imposta até a reversão do carregamento e os parâmetros BE e BEF foram montados os gráficos de BE e BEF em função da deformação imposta até a reversão do carregamento dos três aços em

estudo, como apresentam as Figuras de 3 a 5. Nota-se que dependendo do sentido da deformação imposta e de quanto varia esta deformação, que os parâmetros BE e BEF variam de maneira irregular.

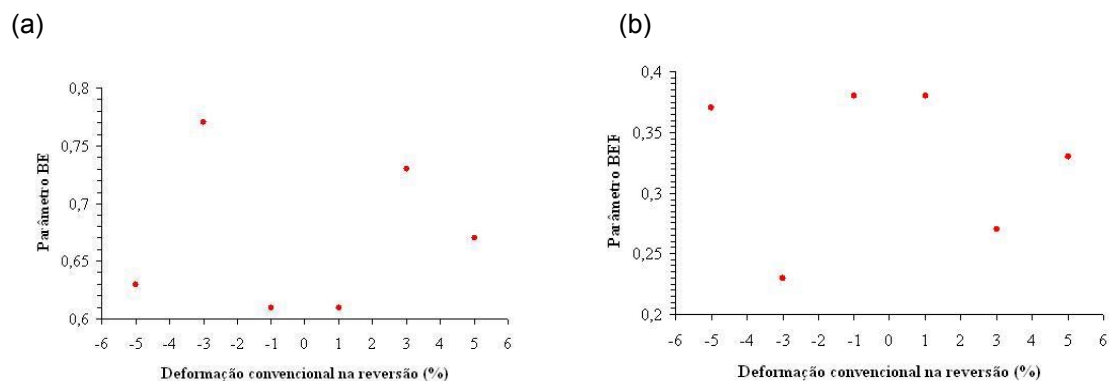
Deste modo os dois parâmetros de quantificação de efeito Bauschinger (BE e BEF) devem ser utilizados com ressalvas, já que seus valores dependem erraticamente do valor de deformação imposta antes da reversão do carregamento.



**Figura 3.** Aço UNS S30100: (a) Parâmetro BE vs deformação convencional na reversão; (b) Parâmetro BEF vs deformação convencional na reversão.



**Figura 4.** Aço UNS S31803: (a) Parâmetro BE vs deformação convencional na reversão; (b) Parâmetro BEF vs deformação convencional na reversão.



**Figura 5.** Aço UNS S32750: (a) Parâmetro BE vs deformação convencional na reversão; (b) Parâmetro BEF vs deformação convencional na reversão



## 5 CONCLUSÕES

Do presente trabalho pode-se concluir que:

- Nos ensaios de efeito Bauschinger de todos os aços estudados observou-se a redução da tensão limite de escoamento quando o sentido de solicitação do material era invertido, apesar dos materiais em estudo apresentarem praticamente o mesmo valor de tensão limite de escoamento se ensaiados apenas à tração ou à compressão.
- Os parâmetros de quantificação de efeito Bauschinger dependem de forma errática da deformação plástica imposta até a reversão do carregamento.

## REFERÊNCIAS

- 1 HAN, K.; VAN TYNE, C.J.; LEVY, B.S. "Effect of Strain and Strain Rate on the Bauschinger Effect Response of Three Different Steels", *Met. Trans. A*, v. 36A, 2005, p. 2379-2384.
- 2 MATAYA, M. C.; CARR, M. J.; KRAUSS, G. "The Bauschinger Effect in a Nitrogen-strengthened Austenitic Stainless Steel" *Mat. Sci. Eng*, 57 (1983), p. 205-222.
- 3 R. L. Woolley; *Philos. Mag.*, 44 (1953) 597.
- 4 S. N. Buckley and K. M. Entwistle, *Acta Metall.*, 4 (1956) 35
- 5 Mateo, A.; Gironès, A.; Keichel, J.; Llanes, L.; Akdut, N.; Anglada, M. "Cyclic deformation behaviour of superduplex stainless steels", *Mat. Sci. Eng. A*, v. 314, 2001, p. 176-185.
- 6 DIETER, G.E., "Mechanical Metallurgy", McGraw Hill, London, Eng, SI Ed, 1988, pp. 139-144.
- 7 ASTM E606-04. "Standard Practice for Strain-Controlled Fatigue Testing". ASTM- "American Society for Testing and Materials", 2004, p. 1-16.
- 8 SEDRIKS, A. J. "Corrosion of Stainless Steels". 2° ed., Wiley-Interscience: New York, 1996, p. 1-53.
- 9 MAGNABOSCO, R.; MELO, D. Influência do tamanho de grão no comportamento mecânico de aço inoxidável UNS S30100. 60° Congresso Internacional Anual da ABM – 25 a 28 de julho de 2005, Belo Horizonte.
- 10 ASTM E 8M-04. "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]". ASTM- "American Society for Testing and Materials", 2004, "Committee" E-28, p. 1-24.