

VERIFICAÇÃO “IN SITU” DA FORMAÇÃO DE MARTENSITA INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS ⁽¹⁾

Nilton José Lucinda de Oliveira ⁽²⁾

Mário Lúcio Talarico ⁽³⁾

José Mário Carneiro Vilela ⁽⁴⁾

Alexandre Tadeu Lopes Serrano ⁽⁵⁾

Margareth Spangler Andrade ⁽⁶⁾

Resumo

Foi objetivo deste trabalho verificar, *in situ*, a transformação da austenita em martensita α' induzida por deformação, em aços inoxidáveis austeníticos, visando o melhor entendimento dos mecanismos de encruamento e das transformações de fase induzidas pela deformação. Corpos de prova de dois diferentes aços inoxidáveis austeníticos do tipo ABNT 304 comercial foram ensaiados por tração até a ruptura, na temperatura ambiente e em condições isotérmicas. Durante os ensaios de tração, a fração volumétrica de martensita α' induzida pela deformação foi determinada por medidas magnéticas realizadas por um detetor de ferrita. Foram obtidas curvas de fração volumétrica de martensita em função da deformação verdadeira. Foram observados, nestas curvas, patamares de frações volumétricas de martensita relacionados ao início de estricção, que induz a formação localizada de martensita, aumentando a resistência à deformação nesta região. Assim, a deformação é interrompida naquele local e nova estricção inicia-se em outra região. Sucessivamente, novas “estricções” são formadas e interrompidas, propagando-se ao longo de todo o corpo de prova, causando aumento no alongamento uniforme. Os aços estudados apresentaram curvas com diferentes comportamentos que foram relacionados com suas respectivas propriedades de estampagem.

Palavras-chave: Martensita induzida por deformação; Ensaio de tração; Aços inoxidáveis austeníticos.

¹ *Contribuição técnica ao 60° Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Julho de 2005, Belo Horizonte.*

² *M.Sc., Pesquisador associado, CNPq/CETEC.*

³ *(3). M.Sc., Pesquisador Pleno, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.*

⁴ *Dr., Pesquisador associado, CNPq/CETEC.*

⁵ *M.Sc., Assistente Técnico – ACESITA S.A. - Associada à ARCELOR.*

⁶ *Dr., Pesquisador Pleno, Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais – CETEC.*

INTRODUÇÃO

Dentre as várias aplicações que os aços inoxidáveis possuem, pode-se citar a sua utilização na fabricação de painéis internos e externos, pias, eletrodomésticos, cutelaria, talheres, baixelas, panelas, componentes de sistemas de exaustão de motores à explosão, fogões, recipientes para criogenia e artigos ornamentais. Muitos destes produtos são fabricados pela estampagem de chapas laminadas a frio, com espessura da ordem de 1,0 mm. Assim, o desempenho na estampagem é uma característica essencial em várias aplicações de chapas de aços inoxidáveis.

O aparecimento da fase martensítica tetragonal de corpo centrado, α' , durante processos de conformação de aços inoxidáveis austeníticos, melhora o desempenho destes materiais na estampagem, aumentando a resistência à progressão de estricções. Isto melhora significativamente sua capacidade de deformação plástica por estiramento, distribuindo melhor a deformação em toda a peça. Este fenômeno é conhecido como efeito TRIP – *transformation induced plasticity*⁽¹⁾. Vários estudos⁽²⁻¹³⁾ têm sido desenvolvidos visando o entendimento dos mecanismos de deformação e das transformações de fases induzidas na deformação desses materiais, bem como a caracterização e reversão da martensita durante tratamentos térmicos posteriores.

Neste trabalho, objetivou-se verificar, *in situ*, a transformação da austenita em martensita α' induzida por deformação, durante ensaios de tração em aços inoxidáveis austeníticos. Visou-se o melhor entendimento dos mecanismos de encruamento e das transformações de fase induzidas pela deformação e seu relacionamento com as propriedades de estampagem.

MATERIAIS E MÉTODOS

Corpos de prova retangulares, com 25 mm de largura e comprimento útil de 100 mm, obtidos de chapas laminadas a frio de 0,6 mm de espessura de dois diferentes aços, com composições químicas mostradas na Tabela 1, foram ensaiados por tração até a ruptura, na temperatura ambiente e em condições isotérmicas. As condições isotérmicas foram conseguidas utilizando-se baixa taxa de deformação, com velocidade de movimentação do cabeçote de 1 mm/min.

Durante os ensaios de tração, a fração volumétrica de martensita induzida pela deformação foi determinada por medidas magnéticas realizadas por um detetor de ferrita calibrado por medidas comparativas realizadas em balança de saturação magnética. As medidas foram feitas na região central do comprimento do corpo de prova em intervalos de aproximadamente 0,5% de deformação. Foram obtidas curvas de fração volumétrica de martensita em função da deformação verdadeira.

Em ensaios preliminares, ocorreram deslizamentos do extensômetro durante as medições pelo detetor de ferrita. Foram então realizados ensaios com o objetivo de levantar curvas de deslocamento do cabeçote versus deformação do extensômetro de 50 mm de base de medida, sendo determinada a curva de calibração da Figura 1. Com esta calibração, os ensaios foram realizados, sem a utilização de extensômetro, sendo a deformação medida pelo deslocamento do cabeçote e,

posteriormente, convertida para deformação na base de medida de 50 mm através de ajustes determinados na Figura 1. Com o objetivo de verificar a evolução da microestrutura, foram realizados 3 ensaios de tração, em cada aço, com interrupção após deformações de 20%, 30% e 35%.

Tabela 1. Composições químicas dos aços estudados (porcentagem em peso)

Ligas	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S	N ⁽¹⁾	Co	V
304 A	0,060	0,390	1,310	18,09	8,03	0,040	0,070	0,030	0,001	330	0,100	0,040
304 B	0,027	0,360	1,110	18,09	8,80	0,030	0,090	0,020	0,005	228	0,100	0,020

(1) ppm

As propriedades mecânicas à tração dos aços foram determinadas, segundo a norma ASTM E8M – 97, em amostras usinadas conforme especificado para corpos de prova planos na referida norma. Os testes foram realizados na temperatura ambiente a uma taxa de deformação igual a $1,7 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$. Foram feitos três ensaios para cada aço.

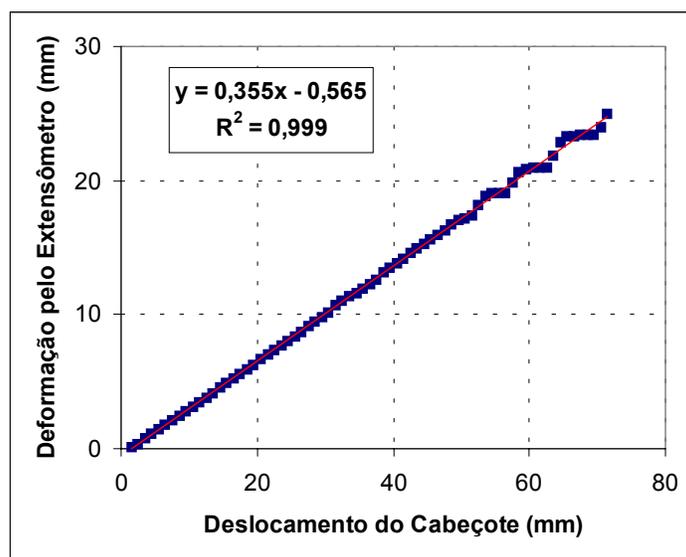


Figura 1. Curva de deslocamento do cabeçote versus deformação do extensômetro de 50 mm de base de medida utilizada para ajuste na deformação, para a liga 304A.

Os ensaios para caracterização da estampabilidade dos aços estudados foram realizados em uma prensa de laboratório marca Erichsen de 40 ton. Foi determinado o Índice Erichsen, IE, de acordo com a norma DIN 50 101, que avalia o comportamento em estiramento. A Razão Limite de Estampabilidade, LDR, foi obtida a partir do ensaio Swift, segundo a norma EN 1669. Esta propriedade avalia a aptidão ao embutimento.

A análise metalográfica, por microscopia ótica, foi realizada em um microscópio Leitz Metalloplan, sendo obtidas imagens das microestruturas em um sistema de aquisição e análise de imagens "Image – Pro". Seções longitudinais dos corpos de prova dos ensaios de tração interrompidos foram embutidas em resina epóxi, lixadas e polidas em panos com pasta de diamante de até $1 \mu\text{m}$. Após o polimento

mecânico, as amostras foram submetidas a polimento eletrolítico em solução de ácido perclórico em metanol e ataque com reagente Beraha II.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 1 apresenta os resultados do ensaio realizado com o objetivo de determinar a curva de calibração do deslocamento do cabeçote com a deformação medida pelo extensômetro. Nesta figura, podem ser observados degraus correspondentes a deformação constante medida pelo extensômetro, enquanto a deformação no cabeçote prossegue. Isto indica que, do início do ensaio até a deformação no cabeçote de aproximadamente 50 mm, a deformação é distribuída uniformemente em todo o corpo de prova. A partir desse ponto, a deformação é interrompida na região do extensômetro e se concentra em outra região do corpo de prova, já que o cabeçote continua a se mover. A seguir, a deformação volta a ocorrer na região do extensômetro por um certo intervalo, sendo novamente paralisada. Esta situação é repetida várias vezes até o rompimento do corpo de prova.

Já na Figura 2, podem ser observados, na curva deformação versus fração volumétrica de martensita, patamares de fração volumétrica de martensita constante, mesmo com o prosseguimento da deformação. Como a fração volumétrica de martensita sempre foi determinada na região central do corpo de prova, esses patamares podem ser explicados pelas interrupções sucessivas da deformação, nesta região, conforme observado na Figura 1. Nota-se também, na curva tensão versus deformação da Figura 2, instabilidade na tensão que pode ser relacionada com estes patamares.

O comportamento observado nas Figuras 1 e 2 indica que, a partir do aparecimento da primeira estricção, tanto a deformação quanto a conseqüente formação da martensita são heterogêneas e se propagam ao longo do corpo de prova. Quando a estricção se inicia, provoca a formação localizada de grande quantidade de martensita, aumentando a resistência à deformação nesta região. Com isto, a estricção é interrompida e o corpo de prova continua a se deformar em outra região, até que o aumento da resistência provoque novamente a mudança da região do corpo de prova sob deformação. Sucessivamente, novas “estricções” são formadas e interrompidas, propagando-se ao longo de todo o corpo de prova, causando aumento no alongamento uniforme que, neste caso, não seria precisamente uniforme.

A Figura 3 apresenta as curvas deformação versus fração volumétrica de martensita para as duas ligas estudadas. A curva correspondente à liga 304A tem o comportamento descrito anteriormente. Já a curva da liga 304B apresenta maior continuidade, com patamares de fração volumétrica de martensita constante apenas em deformações próximas da ruptura do corpo de prova. Esta diferença de comportamento se reflete nas propriedades mecânicas mostradas na Tabela 2, onde pode ser observado que o alongamento uniforme (ϵ_u) da liga 304A é 15 % maior que o da liga 304B.

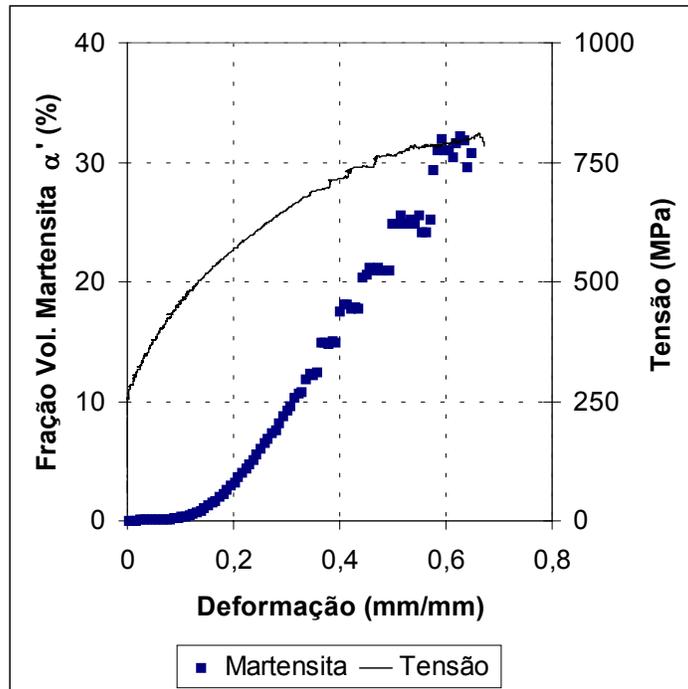


Figura 2. Curvas tensão versus deformação e deformação versus fração volumétrica de martensita para a liga 304A. A deformação foi corrigida pelo ajuste da Figura 1.

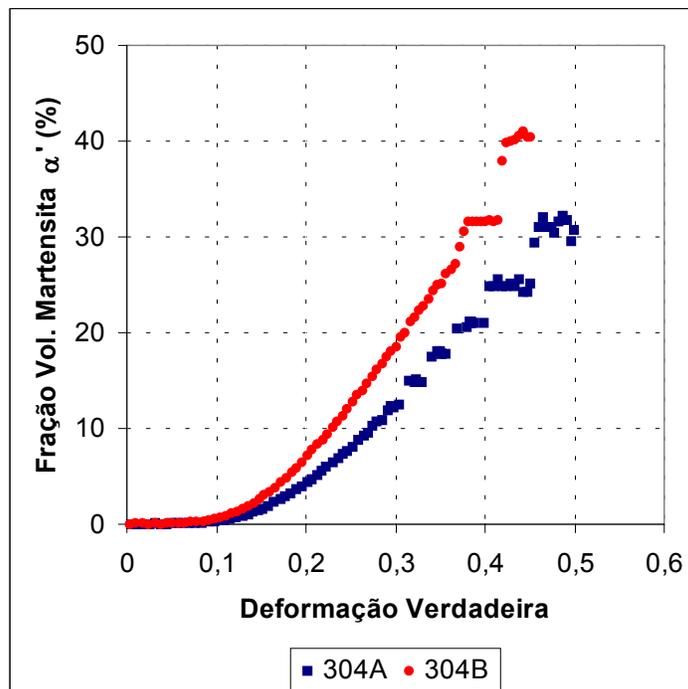


Figura 3. Curvas deformação verdadeira versus fração volumétrica de martensita para as duas ligas estudadas. A deformação foi corrigida pelo ajuste da Figura 1.

Tabela 2. Propriedades mecânicas e temperatura Md_{30} das duas ligas.

Liga	σ_c (MPa)	σ_R (MPa)	e_u (%)	e_T (%)	Md_{30} (°C)
304 A	276 ± 1	770 ± 8	57 ± 3	65 ± 1	12
304B	281 ± 8	701 ± 10	42 ± 2	55 ± 1	15

A Tabela 2 mostra também os resultados da temperatura Md_{30} que é definida como a temperatura de formação de 50 % de martensita induzida por 30% de deformação verdadeira. Esta temperatura, que está relacionada com a estabilidade da austenita, tem sido relacionada com o alongamento uniforme e_u , conseqüentemente, com a estampabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos^(1, 6, 7, 11, 13). Nota-se, nesta tabela, uma grande diferença nos alongamentos uniformes, apesar de as duas ligas apresentarem temperaturas Md_{30} muito próximas. Esta diferença se reflete nas propriedades de estampagem, apresentadas na Tabela 3, principalmente no Índice Erichsen, IE, que avalia o comportamento em estiramento.

Tabela 3. Índice Erichsen, IE, e Razão Limite de Estampabilidade, LDR, das duas ligas.

Liga	IE (mm)	LDR
304 A	11,76	2,04
304 B	11,03	2,01

A Figura 4 apresenta as imagens de microscopia ótica dos aços após interrupção do ensaio em 3 diferentes deformações. As microestruturas são constituídas de matriz austenítica, regiões claras, e martensita induzida por deformação.

A diferença mais significativa nas composições químicas das ligas, apresentadas na Tabela I, é o maior teor de carbono da liga 304A que produz martensita induzida por deformação de mais alto carbono, com dureza e resistência à deformação mais elevadas. Isto pode ser confirmado pelo maior valor elevado do limite de resistência da liga 304A mostrado na Tabela 2. O aparecimento dos patamares seria mais favorável na presença de martensita com maior resistência à deformação, ou seja, na liga 304A.

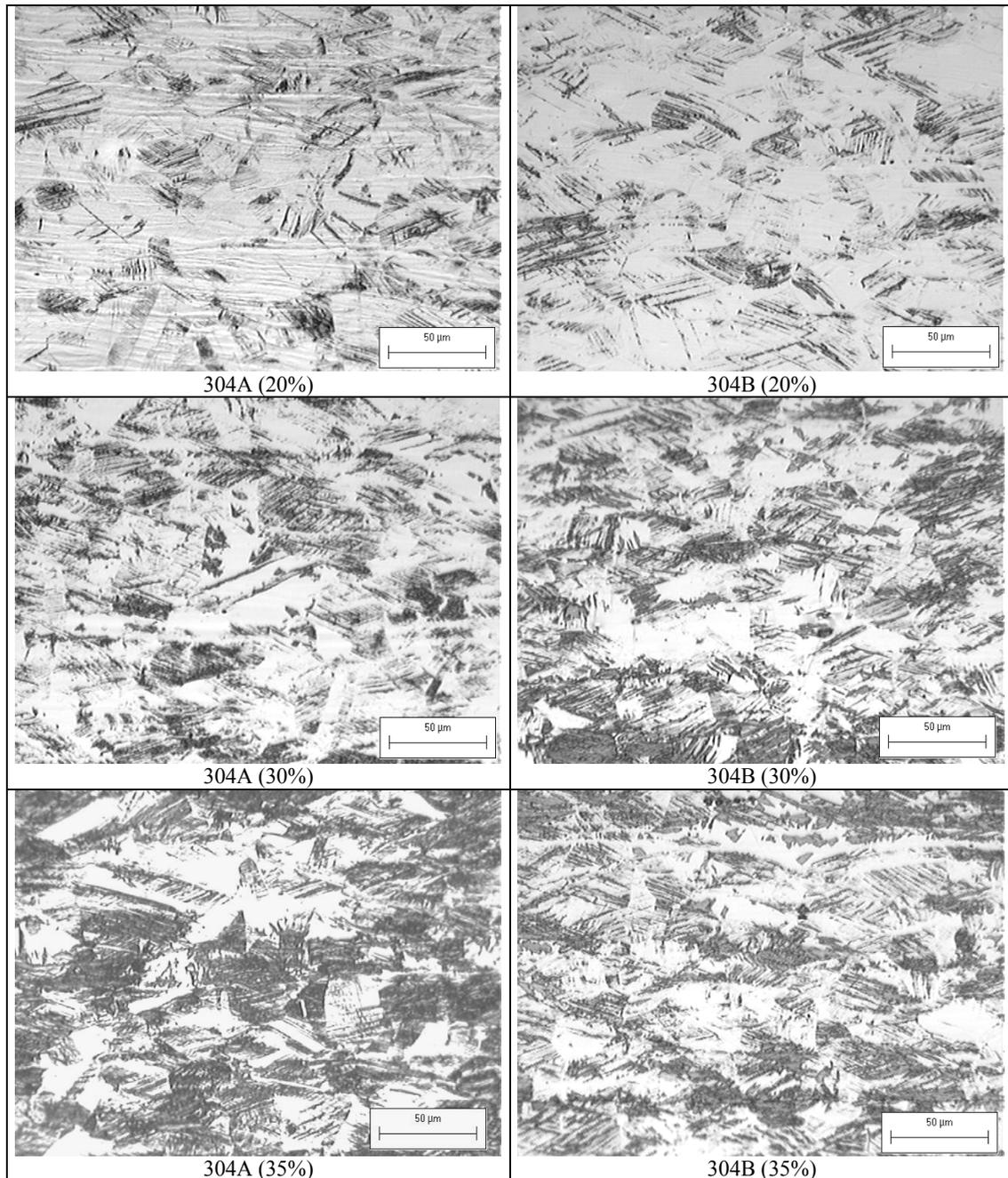


Figura 4. Imagens de microscopia ótica dos dois aços após interrupção do ensaio em 3 diferentes deformações. As microestruturas são constituídas de matriz austenítica, regiões claras, e martensita induzida por deformação.

CONCLUSÕES

- Foram observados, nas curvas deformação versus fração volumétrica de martensita, patamares de frações volumétricas relacionados ao início de estricção, que provoca a formação localizada de martensita, aumentando a resistência à deformação nesta região. Assim, a deformação é interrompida naquele local e nova estricção inicia-se em outra região. Sucessivamente, novas

“estricções” são formadas e interrompidas, propagando-se ao longo de todo o corpo de prova, causando aumento no alongamento uniforme.

- A curva deformação versus fração volumétrica de martensita correspondente à liga 304A apresentou patamares a partir da deformação de 0,3. Já a curva da liga 304B apresentou patamares apenas em deformações próximas da ruptura do corpo de prova. Esta diferença de comportamento se refletiu no alongamento uniforme (e_u), sendo o da liga 304A 15 % maior que o da liga 304B, e nas propriedades de estampagem, principalmente no Índice Erichsen, IE, que avalia o comportamento em estiramento, sendo maior na liga 304A.
- A diferença de comportamento das duas ligas, apesar de apresentarem temperaturas Md_{30} muito próximas, pode ser explicado pelo maior teor de carbono da liga 304A. A martensita induzida por deformação na liga 304 A, de mais alto carbono, possui resistência à deformação mais elevada. Isto pode ser confirmado pelo maior valor do limite de resistência da liga 304A. O aparecimento dos patamares seria mais favorável na presença de martensita com maior resistência à deformação, ou seja, mais facilmente a estrição é interrompida, levando o corpo de prova a se deformar em outra região.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP e à ACESITA SA. pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 PECKNER, D., BERSTEN, I.M.; **Handbook of Stainless Steels**, MacGraw-Hill, p. 4.1-4.78, 1977.
- 2 VILELA, J.M.C., OLIVEIRA, N.J.L., ANDRADE, M.S., MORAES, J.M.D., “Aplicações de técnicas de microscopia de varredura por sonda mecânica na análise metalográfica de aços”, Anais do 55º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, p.1915-1917, Rio de Janeiro, julho de 2000.
- 3 VILELA, J.M.C., ANDRADE, M.S., OLIVEIRA, N.J.L., GONZALEZ, B.M., SANTOS, C.E.R., MANTEL, M. J., “Atomic force microscopy study of martensite formation in austenite stainless steels”, (First Latin American Symposium on Scanning Microscopy – LASPM, Águas de São Pedro, SP), Acta Microscopica, v.10, 1, p.115-118, 2001.
- 4 VILELA, J.M.C., ANDRADE, M.S., OLIVEIRA, N.J.L., SANTOS, C.E.R., BUONO, V.T.L., GONZALEZ, B.M., MANTEL, M. J, “Atomic force microscopy observation of chromium carbide precipitates after reverse transformation of stress induced martensite in AISI 304 stainless steel”, (First Latin American Symposium on Scanning Microscopy - LASPM, Águas de São Pedro, SP), Acta Microscopica, v.10, 1, p.143-146, 2001.
- 5 VILELA, J.M.C., OLIVEIRA, N.J.L., ANDRADE, M.S., GONZALEZ, B.M., SANTOS, C.E.R., MORAES, J.M.D., MANTEL, M.J., “Análise Metalográfica em Aço Inoxidável Austenítico após Deformação em Diferentes Temperaturas”, Anais do 56º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, p.510-519, Belo Horizonte, Julho de 2001.

- 6 C.S.B. CASTRO, V.T.L. BUONO, B.M. GONZALEZ, M.S. ANDRADE, J.M.D. MORAES, M.J. MANTEL, "Variação do alongamento uniforme e da quantidade de martensita alfa linha induzida por deformação em aços inoxidáveis austeníticos", Anais do 56º Congresso Anual da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, p. 810-817, Belo Horizonte, Julho de 2001.
- 7 J.M.C. VILELA, M.S. ANDRADE, B.M. GONZALEZ, V.T.L. BUONO, J.M.D. MORAES, M.J. MANTEL, "Estrutura e conformabilidade do aço AISI 304: influência da transformação martensítica induzida por deformação", II Simpósio Brasileiro de Estruturologia, Tiradentes, setembro 2001.
- 8 CASTRO, C.S.B., BUONO, V.T.L., GONZALEZ, B.M., M.J., ANDRADE, M.S., MORAES, J.M.D., MANTEL, M.J., ANDRADE, M.S., "Variação do Alongamento Uniforme e da Quantidade de Martensita α' Induzida por Deformação em Aços Inoxidáveis Austeníticos", Anais da III Semana de após Graduação da UFMG, Belo Horizonte, fevereiro de 2002.
- 9 VILELA, J.M.C., OLIVEIRA, N.J.L., ANDRADE, M.S., GONZALEZ, B.M., SANTOS, C.E.R., MORAES, J.M.D., MANTEL, M.J., "Análise Metalográfica em Aço Inoxidável Austenítico Após Deformação em Diferentes Temperaturas", Metalurgia e Materiais – Engenharia e Aplicações de Materiais N^o 2, vol.. 58, n. 520, p. 25-31, 2002.
- 10 VILELA, J.M.C., ANDRADE, M.S., GOMES, O.A., MACHADO, R.R., SERRANO, A.T.L., MORAES, J.M.D., "Nanoscratching, atomic and magnetic force microscopies of phases formed during martensite reversion in stainless steels", (Second Latin American Symposium on Scanning Microscopy-LASPM, Búzios, RJ, 7-9 abril 2003), Acta Microscopica, Vol. 12, Supplement A, p. 70-73, April 2003.
- 11 ANDRADE, M.S., GOMES, O.A., VILELA, J.M.C., SERRANO, A.T.L., MORAES, J.M.D., "Avaliação da estampabilidade de dois aços inoxidáveis austeníticos", Anais do II Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – II COBEF, Uberlândia, MG, Brasil, 18-21 de maio, 2003.
- 12 ANDRADE, M.S., VILELA, J.M.C., GOMES, O.A., CASTRO, A.L.R., PINTO, T.B., OLIVEIRA, N.J.L., SERRANO, A.T.L., MORAES, J.M.D., "Reversão de martensita em aços inoxidáveis tipo ABNT 304", Anais do 58º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Rio de Janeiro, p. 3155-3164, julho 2003.
- 13 GONZALEZ, B.M., BUONO, V.T.L., CASTRO, C.S.B., ANDRADE, M. S., MORAES, J. M. D., MANTEL, M.J. The Influence of Copper Addition on the Formability of AISI 304 Stainless Steel. Materials Science and Engineering A-Structural Materials Properties Microstructure And Processing. Estados Unidos: v.343, n.1-2, p.51 - 56, 2003.

IN SITU VERIFICATION OF THE DEFORMATION INDUCED MARTENSITE FORMATION IN AUSTENITIC STAINLESS STEELS

*Nilton José Lucinda de Oliveira
Mário Lúcio Talarico
José Mário Carneiro Vilela
Alexandre Tadeu Lopes Serrano
Margareth Spangler Andrade*

Abstract

The objective of this work was to verify, in situ, the transformation of austenite into strain induced martensite α' with an aim to better understand the strain hardening mechanisms of induced phase transformations. Tensile specimens of two different 304 austenitic stainless steels were tested until rupture at room temperature and isothermal conditions. During the tensile tests the volumetric fraction of induced martensite was determined by magnetic measurements using a ferrite detector. Curves of volumetric fraction of martensite versus the true strain were acquired. Steps were observed in the volumetric fraction curves that were related to the beginning of necking that provokes the located formation of martensite, increasing the resistance to the deformation in the necking region. The deformation was interrupted in that region and new necking was initiated in another region of specimen. New necking regions were formed and interrupted, spreading throughout the entire specimen, causing an increase of the uniform elongation. The two steels studied showed curves of different behaviors that were related to the drawing properties.

Key-words: Deformation induced martensite; Tensile test; Austenitic stainless steels.