

# AVALIAÇÃO DA CONFORMABILIDADE DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS ATRAVÉS DE TRANSFORMAÇÕES MARTENSÍTICAS<sup>1</sup>

Marcio Roberto da Rocha<sup>2</sup>  
Carlos Augusto Silva de Oliveira<sup>3</sup>

## Resumo

Aços inoxidáveis com matriz austenítica podem apresentar durante a sua deformação, transformações martensíticas, as quais contribuem para aumentar a resistência da chapa e a sua conformabilidade. Tal alteração microestrutural resulta em significativo aumento da ductilidade devido ao retardo na formação de deformação localizada (*necking*), como também promove uma alteração do seu comportamento magnético, inicialmente paramagnético para ferromagnético. Tais transformações são dependentes principalmente da composição química da liga, da energia de falha de empilhamento, da temperatura e do modo de carregamento. Diante disso, neste trabalho procurou-se estudar qual a contribuição das transformações martensíticas na condição de falha de chapas submetidas ao processo de estampagem. Para tal, foram utilizadas chapas de aço inoxidável austenítico 304N e 304H, e construídas as curvas de limite de conformação, utilizando-se do ensaio de Nakazima. A microestrutura das chapas com e sem deformação foi avaliada via microscopia óptica e eletrônica de varredura, bem como por difração de raios-X e medidas magnéticas. A partir dos resultados apresentados pode-se observar que a conformabilidade limite das chapas de aço inoxidável austenítico relaciona-se possivelmente a uma quantidade limite de martensita na região de falha. Em outras palavras, de acordo com o estado de deformação a que a chapa será submetida, uma quantidade máxima de martensita irá se formar e definir o momento da estrição localizada. Tal característica é importante, pois através do monitoramento e determinação destas frações volumétricas de martensita para cada condição de deformação, poder-se-á evitar e/ou minimizar a ocorrência de defeitos nestas chapas.

**Palavras-chave:** Transformações martensíticas; Conformabilidade; CLC; Austenita

<sup>1</sup> 42º Seminário de Laminação, Processos e Produtos Laminados e Revestidos - 25 a 28 de outubro de 2005 – Santos - SP

<sup>2</sup> Doutorando – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina – [marcio2r@terra.com.br](mailto:marcio2r@terra.com.br)

<sup>3</sup> Professor Adjunto – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – [carlosa@emc.ufsc.br](mailto:carlosa@emc.ufsc.br)

## 1 INTRODUÇÃO

Novos materiais têm sido disponibilizados no mercado com propriedades superiores em termos de conformabilidade.<sup>(1)</sup> Dentre estes materiais destacam-se os aços inoxidáveis austeníticos com microestrutura metaestável. Estes aços quando deformados, transformam parte da austenita em martensita, agregando a estes materiais boas características de conformabilidade e resistência mecânica. Tal alteração microestrutural resulta em significativo aumento da ductilidade devido ao retardo na formação de deformação localizada (*necking*), como também, alteração do seu comportamento magnético, inicialmente paramagnético para ferromagnético.<sup>(2)</sup>

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ter transformação martensítica quando submetidos à deformação plástica, a tratamentos sub-zero, à descarga de hidrogênio, implantação iônica e *Magnetron Sputtering*.<sup>(3-5)</sup> Os aços com microestrutura metaestável (por exemplo, AISI 301, 302, 304, 304L, 316 e 316L), podem formar martensita  $\varepsilon$  (HC - paramagnética) e  $\alpha'$  (CCC - ferromagnética), enquanto que os aços com microestruturas estáveis (por exemplo, 310) formam somente martensita  $\varepsilon$  induzida por deformação plástica. Em aços metaestáveis, a seqüência de transformação é:



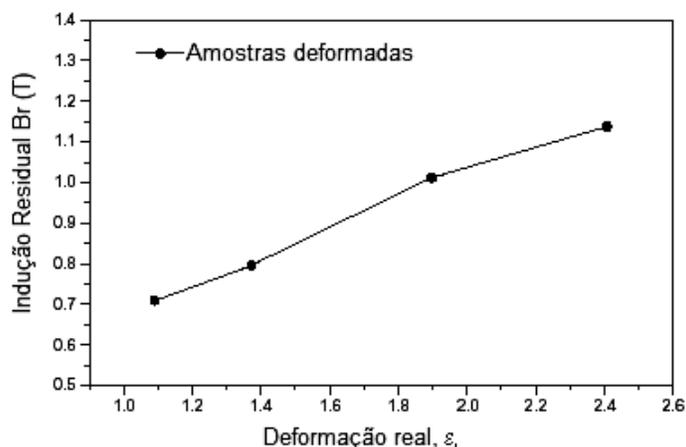
A transformação da austenita / martensita  $\alpha'$ , aumenta a taxa de encruamento (*strain hardening rate*) durante a deformação, tendo este efeito grande interesse para a produção de aços inoxidáveis com boa ductilidade e alta resistência mecânica.<sup>(6)</sup> Este endurecimento adicional obtido com  $\alpha'$  pode também ser utilizado na prática para reduzir o peso das peças produzidas, para um determinado nível de resistência mecânica.<sup>(7,8)</sup>

Destaca-se que as propriedades mecânicas e a intensidade de transformações de fase nos aços metaestáveis, em particular de aços Fe-Cr-Ni, dependem de muitos fatores, tais como a taxa de deformação, nível de deformação, estado de tensões, regime de carregamento mecânico, temperatura, energia de falha de empilhamento e composição da liga.<sup>(6)</sup> Como apresentado, a quantidade de martensita formada é uma função da composição química do aço, sendo que a temperatura mais alta na qual a martensita induzida por deformação se forma, sob condições definidas, é denominada de  $M_d$ .  $M_d$  é empregada geralmente para caracterizar a estabilidade da austenita frente à deformação.<sup>(9)</sup>

### → *Comportamento magnético*

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser totalmente paramagnéticos se sua microestrutura for efetivamente austenítica. Entretanto, eles se tornam ferromagnéticos quando a martensita  $\alpha'$  (CCC) é formada, seja por deformação plástica, descarga de hidrogênio ou irradiação iônica.<sup>(10,11)</sup>

Quando diferentes níveis de deformações são aplicados aos aços inoxidáveis austeníticos pode-se obter variações na proporção de martensita  $\alpha'$ , e desta forma, no seu comportamento magnético. Na Figura 1 pode-se observar a variação na indução residual para um aço 304L, submetido a diferentes níveis de deformação.



**Figura 1.** Variação da indução residual com a deformação imposta para um aço AISI 304L.<sup>(7)</sup>

Tal alteração no comportamento magnético dos aços com matriz austenítica metaestável poderia ser utilizada para monitorar e quantificar as transformações martensíticas obtidas sob diferentes níveis e condições de deformação. Neste sentido, magnetômetros tem sido utilizados para esta proposta, porém ainda somente a nível laboratorial.<sup>(12)</sup>

Dentro deste contexto, pretendeu-se neste trabalho avaliar a conformabilidade de chapas de aço inoxidável austenítico, relacionando-a com as transformações martensíticas induzidas por deformação, bem como, pelas variações no seu comportamento magnético a partir de diferentes condições de deformação.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para a avaliação das transformações martensíticas induzidas por deformação foram utilizadas duas chapas de aço inoxidável austenítico, especificamente a 304H e 304N, sendo a composição química indicada na Tabela 1. Esta última apresenta maior conformabilidade que a chapa 304H, pois com a adição de cobre há um retardo na formação de martensita  $\alpha'$  devido ao aumento da energia de falha de empilhamento da liga, principalmente.

**Tabela 1.** Composição química das chapas de aço 304H e 304N utilizadas.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	Co	V	Nb	Ti
304H	0,063	1,007	0,48	0,030	0,003	18,270	8,100	0,057	0,0950	0,048	0,046	0,011	0,0065
304N	0,038	0,884	0,46	0,033	0,003	18,020	8,060	0,072	1,5690	0,115	0,047	0,015	0,0071

De modo a poder construir os dois lados da curva de limite de conformação (CLC), foi realizado o ensaio de Nakazima. Utilizou-se 09 tiras de chapas com espessura de 0,5mm, comprimento igual a 215 mm e largura variando de 50 até 215 mm. Antes da deformação, foi gravada na superfície das chapas, por meio de serigrafia, uma malha de círculos para determinar as deformações locais antes e após o teste. O ensaio foi realizado em ferramental adaptado a uma máquina de tração-compressão de 30 toneladas, marca ZDM, com velocidade de deformação igual a 15mm/min.

As chapas também foram caracterizadas mecanicamente através de ensaio de tração (EMIC DL10000), de acordo com a norma ASTM A370 E8,<sup>(13)</sup> sendo utilizados três corpos-de-prova para cada uma das direções 0°, 45° e 90° em relação à direção de laminação. Nesta etapa foram determinados o limite de escoamento,

limite de resistência, módulo de elasticidade, alongamento e expoente de encruamento.

Para a determinação do coeficiente de anisotropia normal (R) e coeficiente de anisotropia planar ( $\Delta R$ ) foram fabricados também três corpos-de-prova para as três direções supra-citadas, porém com geometria retangular (tipo C), conforme a norma E517-96<sup>a</sup>.<sup>(14)</sup>

Foram realizadas medidas de microdureza para caracterizar as amostras, tanto antes quanto após a aplicação das deformações, com o objetivo de acompanhar a evolução das transformações da microestrutura após a sua solitação. Cada valor obtido é resultado da média entre três endentações, com variações indicadas pelo intervalo de confiança para um nível de significância igual a 5%. Este ensaio foi realizado em um microdurômetro Vickers, marca Shimadzu – mod. HMV.

Após as deformações dos corpos-de-prova, amostras foram retiradas na região de falha do material, verificando-se quais as condições a que foram submetidas, bem como a suas variações microestruturais. As amostras foram cortadas em pequenos círculos com 6 mm de diâmetro, utilizando-se um máquina de eletroerosão, sendo posteriormente lixadas e polidas por meio eletrolítico para eliminar possíveis interferências do processo de corte. Posteriormente foram atacadas por meio eletroquímico para revelação de suas microestruturas e avaliadas via microscopia óptica (Olympus – Modelo BX60M) e eletrônica de varredura (PHILLIPS XL30).

Além disso, as microestrutura das amostras nas diferentes condições de deformação foram avaliadas via difração de raios-X (PHILLIPS XPERT) e também por medidas magnéticas, utilizando-se para isto um magnetômetro de amostra vibrante (VSM) para identificação das fases presentes. Isto é possível já que o comportamento das amostras é alterado de um comportamento inicialmente paramagnético (austenita) para ferromagnético, devido ao aparecimento da martensita  $\alpha'$  após diferentes níveis de deformação.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 são apresentados os valores encontrados na caracterização mecânica das chapas avaliadas na sua condição inicial. A dureza das chapas foram iguais a  $172 \pm 4 \text{HV}0,5$  para o 304H e  $150 \pm 2 \text{HV}0,5$  para o aço 304N.

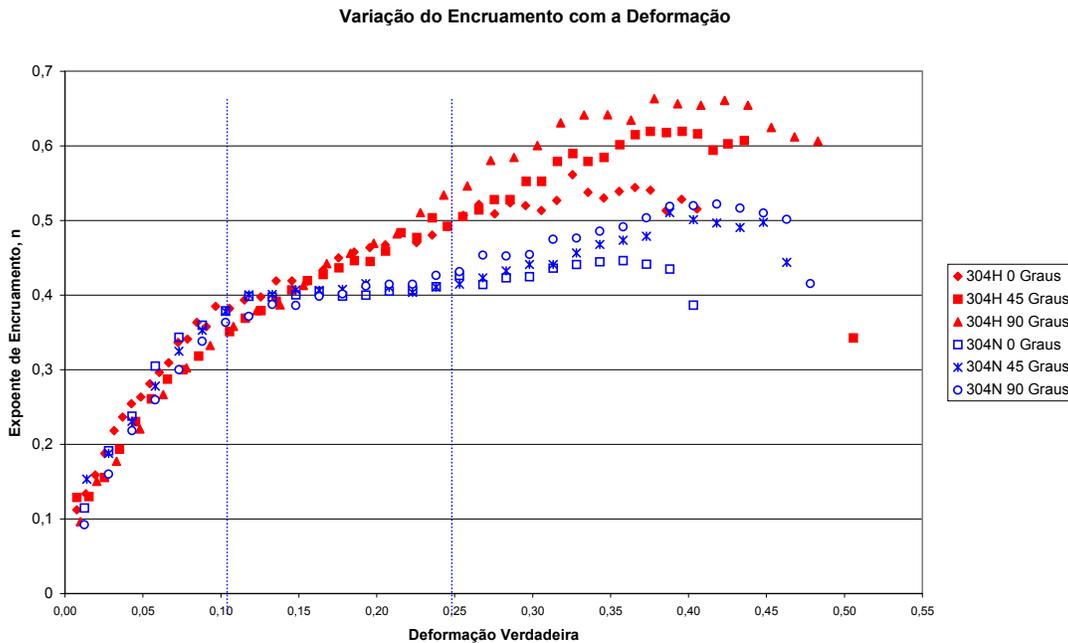
**Tabela 2.** Valores obtidos nos ensaios de tração dos aços inoxidáveis 304H e 304N.

Material	Direção	LE <sub>0,2%</sub> (MPa)	LR (MPa)	Al (%)	r	R*	$\Delta R^*$	RE*
304H	0°	303,7 $\pm$ 12,9	740,5 $\pm$ 14,4	52,1 $\pm$ 1,4	1,002	1,00	0,60	0,41
	45°	286,5 $\pm$ 10,3	703,1 $\pm$ 1,7	62,1 $\pm$ 2,8	0,704			0,41
	90°	309,8 $\pm$ 7,0	714 $\pm$ 5,9	63,1 $\pm$ 6,7	1,602			0,43
304N	0°	300,8 $\pm$ 3,8	662,0 $\pm$ 2,2	49,2 $\pm$ 2,3	0,836	1,01	0,26	0,45
	45°	271,7 $\pm$ 2,8	602,4 $\pm$ 2,7	58,4 $\pm$ 0,2	0,885			0,45
	90°	300,3 $\pm$ 13,1	625,5 $\pm$ 3,5	60,1 $\pm$ 0,6	1,454			0,48

\*\*\* RE = LE/LR

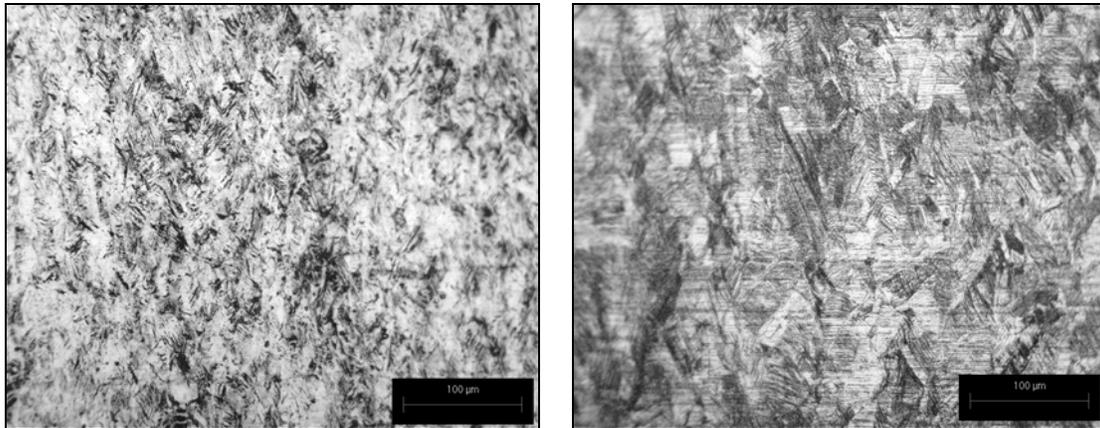
Durante a determinação do expoente de encruamento, observou-se uma grande variação de seu comportamento frente à deformação aplicada. Deste modo, procurou-se, como apresentado na Figura 2, analisar o seu comportamento a partir de incrementos de deformação. Observa-se nesta figura que os maiores valores de  $n$  são obtidos para o aço com baixo cobre (304H), nos valores máximos de 0,65, enquanto para o aço 304N,  $n$  teve um máximo de 0,52. Ponto importante a ser

observado é que os maiores valores obtidos para o aço 304H são resultado da maior intensidade da transformação martensítica durante a deformação, resultando em uma maior dureza final. Já para o aço 304N, observa-se uma região constante, com  $n$  em torno de 0,4 entre 0,1 e 0,25 de deformação, sendo que a partir deste valor, o encruamento tende a aumentar até o valor máximo de 0,52. Para baixas deformações (inferiores a 0,12), o aumento do  $n$  foi equivalente para ambos os aços estudados.



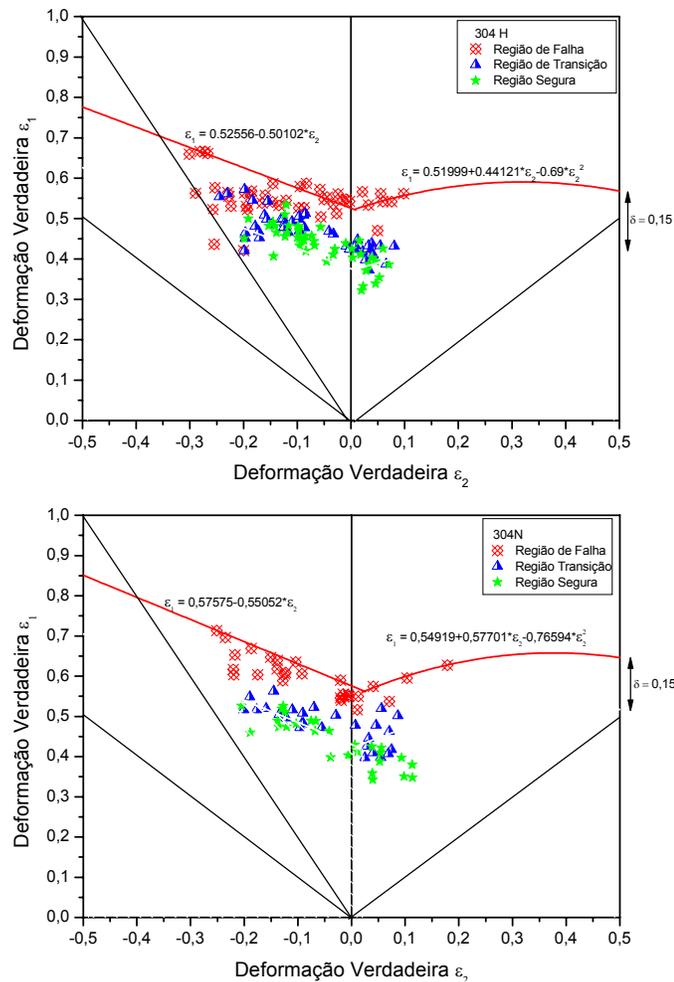
**Figura 2.** Variação do expoente de encruamento para os aços 304H e 304N frente a diferentes níveis de deformação. A relação para o cálculo  $n$  nos diferentes níveis de deformação está baseada na equação  $\sigma = K \cdot \epsilon^n$ .

Para se avaliar a região de falha, foram extraídas algumas amostras na região de estricção dos corpos-de-prova testados no ensaio de Nakazima. A partir de observações via microscopia óptica e difração de raios-X - Figura 3 - observou-se maior quantidade de martensita  $\alpha'$  e  $\epsilon$  na amostra 304H, o que era de fato esperado, uma vez que tal amostra apresenta uma energia de falha de empilhamento mais baixa, quando comparada a amostra 304N com maior conteúdo de cobre (o cobre adicionado tende a elevar a EFE da liga). Esta maior quantidade de martensita também pode ser evidenciada pela maior dureza apresentada pela amostra 304H, onde na região próxima à falha maiores níveis de dureza foram verificados ( $454 \pm 10 \text{HV}_{0,5}$  na região da falha e afastado 5mm foi igual a  $400 \pm 10 \text{HV}_{0,5}$ ). Para o aço 304N, a dureza verificada foi de  $337 \pm 15 \text{HV}$  para a região de falha e  $322 \pm 12 \text{HV}$  para a afastada.



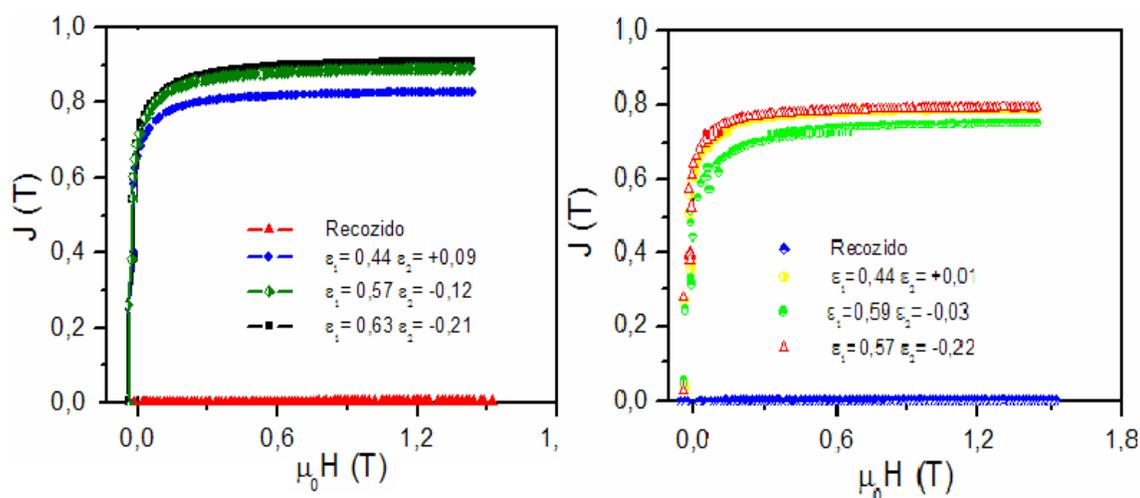
**Figura 3.** Micrografia da região de falha das amostra 304N e 304H, para a largura de 70mm do ensaio de Nakazima. Ataque: HCl + Metilsulfito de Na + água destilada.

Na Figura 4 são apresentadas as curvas de limite de conformação obtidas para os dois aços analisados. Como pode ser visto, o aço 304N apresenta um limite de conformação um pouco maior que o 304H. Embora esta diferença seja pequena, isto permite uma maior altura principalmente na etapa de estiramento da chapa.



**Figura 4.** Comparativo entre as CLC's dos aços 304H e 304N.

Na Figura 5 é apresentado o comportamento magnético das chapas após diferentes níveis de deformação. Tais amostras pertencem à região de estricção ocorridas nos diferentes corpos-de-prova utilizados no ensaio de Nakazima. Para se ter um referencial quanto ao comportamento magnético, uma amostra de cada chapa foi recozida para promover um alívio de tensões em 480°C/15min, propiciando assim uma matriz austenítica isenta de tensões. Pode-se observar que com o aumento gradativo da deformação, há um proporcional aumento da quantidade de martensita  $\alpha'$ , e desta forma sua matriz paramagnética (austenita) passa agora a apresentar um maior ferromagnetismo. Disto resultam os diferentes níveis de saturação magnética observados nas figuras.



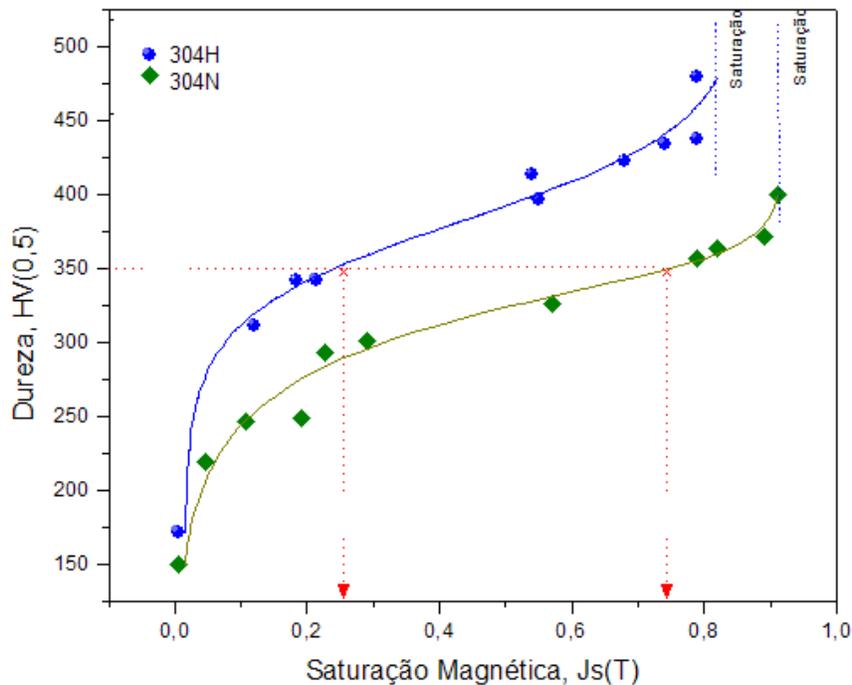
**Figura 5.** Efeito da deformação sobre o comportamento magnético dos aços 304N e 304H, respectivamente.  $J(T)$  é a magnetização residual induzida nas amostras e,  $\mu_0 H$  o campo magnético externo aplicado (valores em Tesla). As amostras foram extraídas das regiões de falha das tiras ensaiadas no ensaio de Nakazima. O estado de deformações de cada amostra é apresentado na respectiva legenda.

Na Figura 5 observa-se também, que a saturação magnética das amostras sofreu pouca interferência da forma de carregamento quando esta atinge uma condição limite de deformação (níveis de saturação próximos). Tal fato pode ser decorrente tanto de um nível crítico de encruamento que a liga apresenta, como também por uma fração de martensita crítica induzida durante a deformação e/ou a combinação de ambos os fatores.

Maiores níveis de dureza foram observados na amostra 304H, a qual teria uma maior propensão à obtenção de martensita, bem como ao encruamento (Figura 6). Verifica-se ainda que, para um mesmo nível de dureza, as amostras N apresentam uma saturação magnética um pouco maior que o 304H, resultado de uma maior quantidade de martensita formada. Destaca-se que os maiores níveis então de endurecimento verificados nas amostras 304H devam estar mais intimamente ligados ao encruamento da matriz do que propriamente por efeito de endurecimento de transformações martensíticas. Disto resultaria a menor altura de embutimento no ensaio de Nakazima para esta liga (Figura 4).

Ainda na Figura 5, observa-se que para diferentes combinações de deformações principais aplicadas, parece existir um limite quanto à quantidade de martensita formada. Isto pode ser melhor visualizado na Figura 6, onde com o aumento da dureza há uma tendência para um valor limite de saturação magnética,

ou em outras palavras, de martensita  $\alpha'$ . Tal característica é importante, pois isto indica que: as transformações martensíticas estão vinculadas às condições de carregamento e caminhos de deformação e, que possivelmente a falha está diretamente ligada a uma quantidade limite de martensita formada por aquela condição de carregamento.



**Figura 6.** Comparação entre a dureza e a saturação magnética (Js) nos aços 304H e 304N após diferentes níveis de deformação. Nos limites de saturação indicados encontram-se as amostras extraídas da região de estrição das chapas.

## CONCLUSÕES

A conformabilidade de chapas de aços inoxidáveis austeníticos dependem tanto das condições de deformação a que serão expostos, como também da sua microestrutura. Da interação destas duas condições decorrem as transformações martensíticas induzidas por deformação, as quais contribuem tanto para o aumento da resistência mecânica, como também no sentido de retardar o afinamento das paredes das chapas quando estas são estiradas, permitindo uma maior deformação através da “supressão” da estrição localizada.

A partir dos resultados apresentados pode-se observar que a conformabilidade das chapas de aço inoxidável austenítico relacionam-se possivelmente a uma quantidade limite de martensita na região de falha. Em outras palavras, de acordo com o estado de deformação a que a chapa será submetida, uma quantidade máxima de martensita irá se formar e definir o momento da estrição localizada. Tal característica é importante, pois através do monitoramento e determinação destas frações volumétricas de martensita para cada condição de deformação, poder-se-á evitar e/ou minimizar a ocorrência de defeitos nestas chapas.

## Agradecimentos

Os autores agradecem à ACESITA S/A pelo fornecimento das chapas utilizadas neste trabalho e a CAPES pelo apoio financeiro.

## REFERÊNCIAS

- 1 FRITZ, E. Stainless Steel Production Tecnology Trends, Developments and New Projets, Steel World, vol. 7, 2002. p. 33
- 2 SPENCER, K.; EMBURY, J.D.; CONLON, K.T.; VERON, M; BRECHET, Y. Strengthening Via the Formation of Strain-Induced Martensite in Stainless Steels, Materials Science and Engineering, v. A387-389, 2004. p.873-881.
- 3 TAVARES, S.S.M. Ferromagnetics Properties of Cold Rolled AISI304L Steel, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 242-245, 2002. p.1391-1394
- 4 MANGONON, P.L., THOMAS, G., Metallurgical Transactions, vol. 1, 1970. p. 1587.
- 5 PADILHA, A.F.; GUEDES, L.C. Aços Inoxidáveis Austeníticos – Microestruturas e Propriedades, Ed. Hemus, São Paulo, Brasil, 1994.
- 6 LEBEDEV, A.A, KOSARCHUK, V.V. Influence of Phase Transformations on the Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel, International Journal of Plasticity, v.16, 2000. p. 749-767.
- 7 TAVARES, S.M.M.; FRUCHART, D.; MIRAGLIA, S. A Magnetic Study of Reversion of Martensite  $\alpha'$  in a 304 Stainless Steel, Journal of Alloys and Compounds, v.307, 2000. pg. 311-317.
- 8 GUY, K.B.; BUTLER, E.P.; WEST, D.R.F.; Met. Science, vol. 17, 1983. p.167.
- 9 SINHA, A.K. Physical Metallurgy Handbook, MacGraw Hill ed., 2003. p.10.50
- 10 ZHAO, L.et al. Magnetic and X-ray Diffraction Measurements for the Determination of Retained Austenite in TRIP Steels; Materials Science and Enginneering, v. A313, 2001. p.145-152
- 11 TAKAHASHI, S. et al. Martensitic Transformation Due Plastic Deformation and Magnetic Properties in SUS304 Stainless Steel, Journal of Materials Processing, v. 108, 2001. p. 213-216
- 12 FÖLDEÁKI, M. e LEDBETTER, H. Magnetic Properties of Cr-Mn austenitic Stainless Steels, Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 110, 1992. p. 185-196
- 13 ASTM A370 E8 – Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.05, 1995.
- 14 ASTM E517-96A - Annual Book of ASTM Standards, vol. 03.06, 1997.
- 15 HU, J., MARCINIAK, Z., DUNCAN, J. Mechanics of Sheet Metal Forming, 2ª Ed., Butterworth-Heinemann, 2002.

# THE CONTRIBUTION OF MARTENSITIC INDUCED TRANSFORMATIONS ON FORMABILITY OF AUSTENITIC STEEL PLATES<sup>1</sup>

Marcio Roberto da Rocha<sup>2</sup>  
Carlos Augusto Silva de Oliveira<sup>3</sup>

## Abstract

The conformability of the austenitic stainless steel is related mainly with factors like temperature, chemical composition, strain and stress level. A factor that contributes to improve the strength of these steels is the induced martensitic transformation by applied deformation. This microstructural transformation rise the conformability, avoiding the local instabilities (necking) in the plates during a deformation. This way, in this work was studied the contribution of martensitic induced transformations on formability of two austenitic steel plates, 304H e 304N. The conformability was evaluated in compared with martensitic induced transformations and the strain path. The analysis was developed using optical microscopy and scanning electron microscopy, with X-ray and magnetic analysis (by VSM). The results seem to show that exist a critical volumetric fraction of martensite, that contribute to occur the failure in the plates subjected in several levels of deformation. This is verified by magnetic saturation observed in several samples in failure region of pieces.

**Key words:** Austenitic stainless steel; Martensite; Magnetic properties; Conformability

<sup>1</sup> 42nd Rolling Seminar, Processes, Rolled and Coated Products, October 25 to 28, 2005 – Santos – SP - Brazil

<sup>2</sup> PhD Student – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais – Universidade Federal de Santa Catarina – [marcio2r@terra.com.br](mailto:marcio2r@terra.com.br)

<sup>3</sup> Professor – Departamento de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Santa Catarina – [carlosa@emc.ufsc.br](mailto:carlosa@emc.ufsc.br)