

INFLUÊNCIA DO ESTADO DE DEFORMAÇÃO E DA TEMPERATURA NO FENÔMENO DE TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO (TRIP) EM UM AÇO AISI 201LN

**Diogo P. Braga^{1,2}, Leonardo M. Correa², Vitor L. Sordi^{1,2,3}, Carlos A. D. Rovere^{1,3},
Andrea M. Kliauga^{2,3}**

1 – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais (PPGCEM), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP.

2 – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica (PPGEMec), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP

3 – Departamento de Engenharia de Materiais (DEMA), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP

diogobraga@estudante.ufscar.br

RESUMO

Aços inoxidáveis da série AISI 200 (Cr-Ni-Mn) com baixa energia de falha de empilhamento (EFE) são suscetíveis ao fenômeno de transformação martensítica induzida por deformação (efeito TRIP), onde a formação induzida das martensitas ϵ -hcp e a' aumenta o encruamento e o alongamento total do material resultando em uma maior tenacidade e resistência mecânica e proporcionando grandes vantagens tecnológicas. O efeito TRIP pode ser afetado por parâmetros como a temperatura e o tipo de deformação ao qual o material é submetido. Assim, nesse trabalho foi investigado o comportamento desse fenômeno em um aço inoxidável autêntico AISI 201LN em dois estados de deformação: tração e compressão; em um intervalo de temperatura variando de -100°C a 800°C . A microestrutura final do material foi caracterizada por meio de difração de raios-X (DRX) e difração de elétrons retro espalhados (EBSD) e correlacionada aos modelos matemáticos de encruamento de Kocks-Mecking (K-M) e Hollomon. Observou-se que a deformação crítica para se iniciar o processo de transformação da martensita a' é menor para solicitações trativas do que em compressão e que, conforme se aumenta a temperatura de solicitação, em ambos os casos a quantidade de martensita transformada diminui devido ao aumento da EFE.

Palavras-chave: Aço inoxidável austenítico, energia de falha de empilhamento, efeito TRIP.

INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis (AIs) são uma classe de materiais que abrangem uma vasta gama de ligas Fe-C-Cr e que apresentam elevada resistência à corrosão combinada com boas propriedades estruturais e mecânicas, viabilizando assim sua aplicação nos mais diversos ramos industriais^{1,2}.

Dentre todas as classes de AIs os aços inoxidáveis austeníticos (AIAs) são atualmente os mais utilizados, destacando-se as ligas da série 300 (Cr-Ni). Os AIAs dessa série, porém,

apresentam custo de fabricação relativamente elevado devido ao alto teor de níquel em sua composição³. Com isso a busca por redução de custos tornou viável o desenvolvimento de outros AIAs como os da série 200, com menor teor de níquel e adição de elementos como o nitrogênio e manganês e que apresentam baixa energia de falha de empilhamento (EFE), resultando em uma metaestabilidade da fase austenítica. Essa metaestabilidade torna essas ligas suscetíveis à transformação martensítica induzida por deformação - efeito TRIP^{4,5}.

A EFE é um dos principais fatores que comanda a deformação plástica dos materiais; em materiais com baixa EFE os mecanismos de deformação plástica podem mudar do deslizamento de discordâncias para a formação de maclas de deformação ou de martensita. Metais com baixa EFE apresentam o efeito TRIP, já em uma faixa um pouco superior de EFE pode ocorrer maclação mecânica e para EFE elevadas o mecanismo dominante passa a ser o escorregamento de discordâncias^{6,7}.

Nesse contexto, entender como as variáveis envolvidas no processamento mecânico como temperatura e modo de deformação agem de forma a modificar a EFE e, consequentemente, o comportamento da deformação plástica mostra-se um campo importante para que se norteiem os processos de conformação mecânica nessa classe de materiais. Esse trabalho, a partir de ensaios mecânicos controlados, análises de DRX e EBSD buscar mapear mais profundamente como se dá a influência desses parâmetros na EFE, na cinética de transformação do efeito TRIP e, consequentemente, no comportamento da deformação plástica desses AIAs.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O material utilizado como base para esse trabalho foi um AIA da classe AISI 201LN fornecido pela APERAM South America em forma de chapas laminadas com 28mm de espessura produzidas por lingotamento contínuo e laminação de tiras a quente (LTQ). A composição química do material fornecida pelo fabricante está indicada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (%wt) fornecida pelo fabricante do AIA AISI 201LN

Cr	Mn	Ni	C	N	Mo	Si	Cu	S	P
17.02	6.87	4.02	0.027	0.16	0.02	0.40	0.02	0.001	0.03

Após a confecção dos CPs o material foi submetido a um tratamento térmico de solubilização à 1150°C por 30 minutos em forno à vácuo, com resfriamento em água

Na condição como recebida (Fig. 1a) o material apresentou uma microestrutura austenítica recristalizada com tamanho médio de grão de $37\mu\text{m} \pm 4\mu\text{m}$ (ASTM E112), com maclas de recozimento (setas vermelhas), precipitados (setas azuis) e veios de ferrita δ nos contornos de grão (setas amarelas). Após o tratamento térmico (Fig. 1b) o material apresentou tamanho de grão médio de $61\mu\text{m} \pm 4\mu\text{m}$ com os precipitados e a ferrita δ parcialmente dissolvidos.

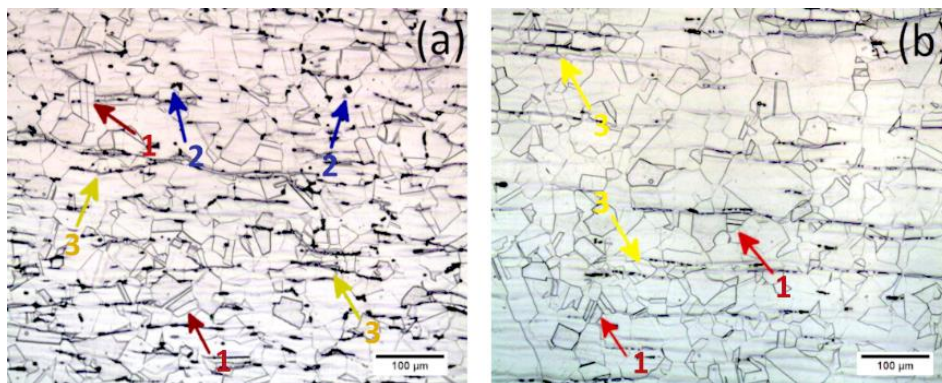


Figura 1: Micrografia óptica de uma seção longitudinal do AISI 201LN como recebido (a) e após tratamento térmico (b)

Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados tiveram como objetivo analisar o efeito dos principais parâmetros envolvidos em processos de conformação sobre a transformação martensítica induzida por deformação do AIA AISI 201LN. Assim foram planejados ensaios variando-se o tipo de sollicitação mecânica, a temperatura e a taxa de deformação.

Por serem ensaios relativamente simples de ser realizado e com boa repetibilidade os ensaios de tração e compressão foram escolhidos como ponto de partida para o estudo do efeito TRIP no AIA AISI 201LN.

Os ensaios foram realizados seguindo indicações das normas ASTM E8/E8M e ASTM E21 (tração) e ASTM E9 e ASTM E209 (compressão), com taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1} em um intervalo de temperaturas entre -100°C e 800°C .

Quantificação de fases

O AIA AISI 201LN possui, a princípio, 2 fases principais: uma matriz austenítica e veios de ferrita provenientes do processo de laminação a quente a partir do qual o material é obtido [78]; após a deformação plástica (em testes de tração e compressão) as fases martensita ϵ -HCP e α' podem ser formadas, resultando em até 4 fases na estrutura final do material [24, 71]

Uma vez que as fases austenita, martensita ϵ -HCP e martensita α' possuem diferentes estruturas cristalinas o método de DRX foi utilizado para uma análise quantitativa dessas fases, conforme norma ASTM E975-13.

Com as análises de EBSD foi possível obter um melhor entendimento da distribuição das fases formadas, identificando e localizando as fases martensita ϵ -HCP e α . Uma estimativa de fases quantitativa por EBSD não se mostrou oportuna, devido a área reduzida da análise.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 2 ilustra os resultados obtidos nos ensaios de tração (Fig. 2a) e compressão (Fig. 2b) realizados com taxa de deformação 10^{-3} s^{-1} em um intervalo de temperatura entre -100°C e 800°C para o AIA AISI 201LN.

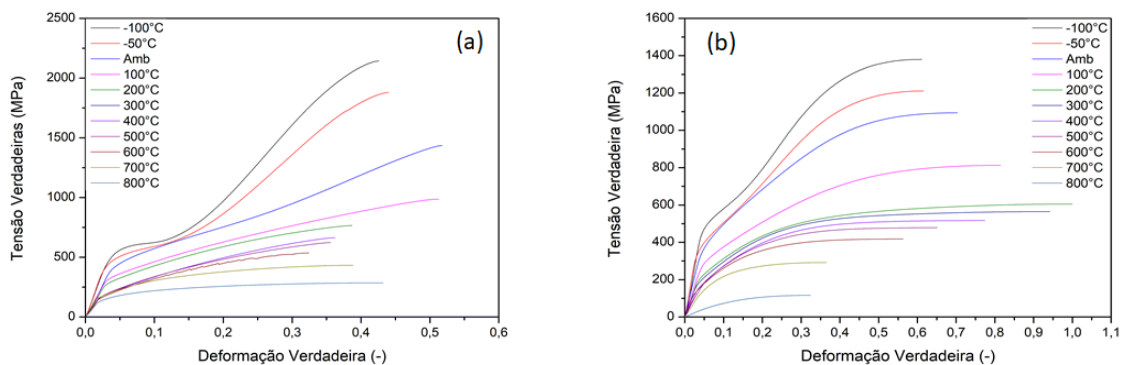


Figura 2: Curvas de tensão Vs deformação para os ensaios de tração (a) e compressão (b) no AIA 201LN em uma faixa de temperatura entre -100°C e 800°C. Taxa de deformação 10^{-3} s $^{-1}$

Foi possível observar nessas curvas comportamentos distintos em diferentes intervalos de temperatura tanto para os ensaios de tração quanto para os ensaios de compressão. Entre -100°C e 100°C notou-se claramente um aumento da resistência mecânica do material durante a deformação plástica, resultantes, principalmente dos efeitos TRIP. Esse comportamento, nessa faixa de temperatura, pôde ser corroborado pelas curvas de EFE Vs temperatura (Fig. 3) e pelo modelo de K-M (Fig. 4).

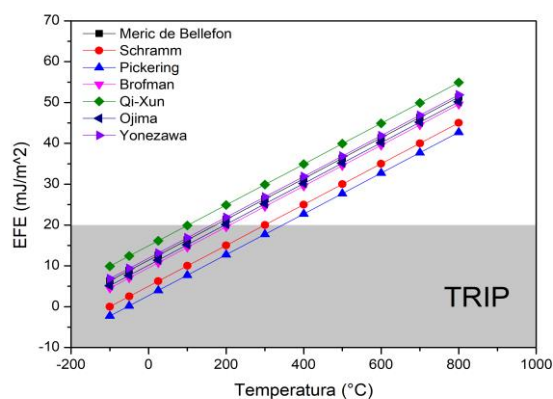


Figura 3: Curvas energia de falha de empilhamento (EFE) Vs temperatura para o AISI 201LN segundo modelos matemáticos encontrados na literatura⁸⁻¹⁴.

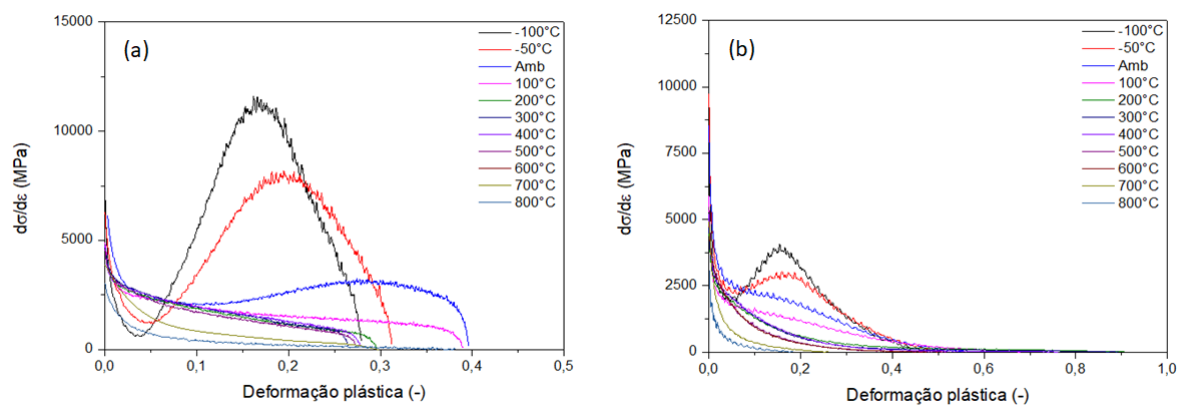


Figura 4: Curvas do modelo de K-M para a deformação plástica do AISI 201LN após ensaios de tração (a) e compressão (b) em diferentes temperaturas.

Por meio dos ensaios de DRX foi possível estimar a porcentagem de ferrita residual presente no material recebido (9,3%) e, admitindo-se que essa quantidade se manteve constante durante os ensaios mecânicos estimou-se a quantidade de martensita ϵ -HCP e α' transformada a partir da austenita. Esses resultados podem ser vistos graficamente na Figura 5.

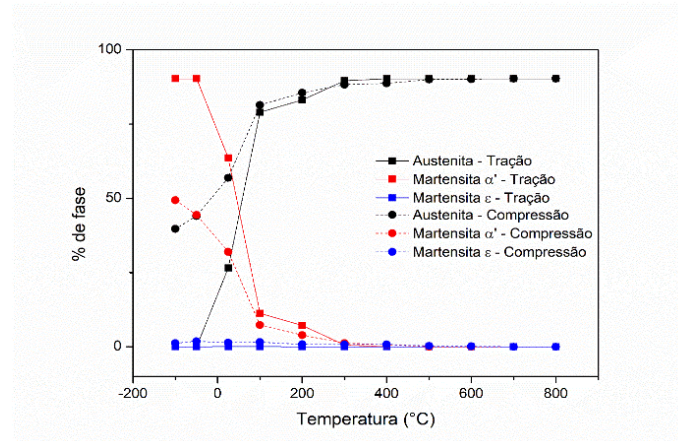


Figura 5: Estimativa do volume de fases por DRX no AISI 201LN após ensaios de tração e compressão em diferentes temperaturas.

Uma identificação mais precisa dessas fases também foi feita por EBSD, como exemplificado na Figura 6 para ensaios de tração em compressão em temperatura ambiente (25°C).

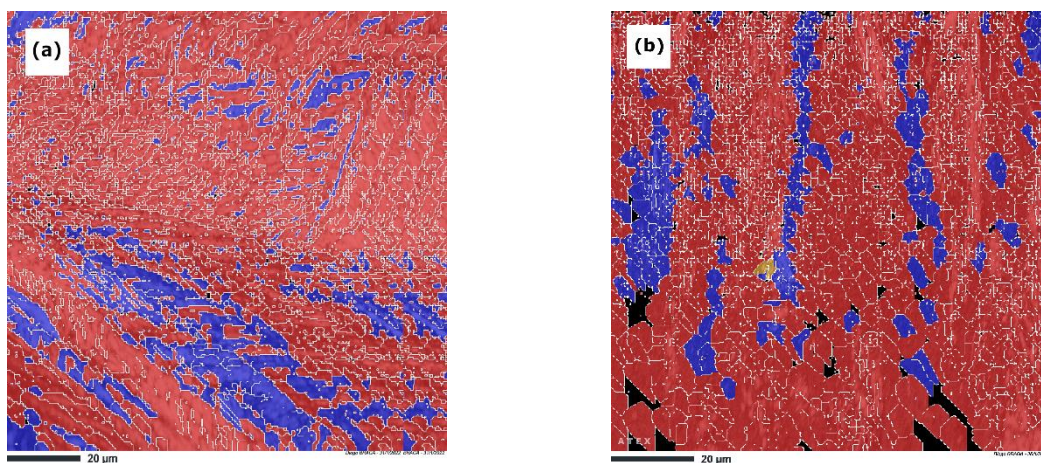


Figura 6: Identificação de fases por EBSD para o AISI 201LN após ensaios de tração (a) e compressão (b) em temperatura ambiente (25°C). Martensita α' (TCC) em vermelho, martensita ϵ (HCP) em amarelo e austenita (CFC) em azul.

CONCLUSÕES

O efeito TRIP foi observado no AISI 201LN para uma faixa de temperatura entre 100°C e 100°C, com contribuições significativas na resistência mecânica do material.

Nas mesmas condições, a presença de martensita α' após os ensaios de tração foi maior que para os ensaios de compressão, enquanto que nos ensaios de compressão foi possível observar ainda a presença de martensite ϵ -HCP.

Observou-se que a deformação crítica para se iniciar o processo de transformação da martensita é menor para solicitações trativas do que em compressão e que, conforme se aumenta

a temperatura de solitação, em ambos os casos a quantidade de martensita transformada diminui devido ao aumento da EFE.

AGRADECIMENTOS

Esse estudo foi financiado em parte pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) – Processo nº 2019/07178-6 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) – Código de financiamento 001.

Esta pesquisa utilizou instalações do Laboratório Nacional de Nanotecnologia (LNNano), do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) - Projeto SEM-C1 - 27091

REFERÊNCIAS

1. PADILHA, A.F.E GUEDES, L.C. Aços Inoxidáveis Austeníticos - Microestrutura e Propriedades. São Paulo: Hemus, 1998.
2. DAVIS, J.R. ASM Specialty Handbook - Stainless Steels. Ohio: ASM International, 1994.
3. LO, K.H., SHEK, C.H.E LAI, J.K.L. Recent Developments in Stainless Steels. Mater. Sci. Eng. R Rep, v.65, p.39-104, 2009.
4. OSHIMA, T., HABARA, Y.E KURODA, K. Efforts to Save Nickel in Austenitic Stainless Steels. ISIJ Int., v.47, p.359-364, 2007.
5. CHARLES, J. The New 200-Series: An Alternative Answer to Ni Surcharge? Risks or Opportunities? Rev. Metall., v.104, p.308-317, 2007.14.
6. ALLAIN, S., et al. Correlations Between the Calculated Stacking Fault Energy and the Plasticity Mechanisms in Fe–Mn–C alloys. Mater. Sci. Eng. A, v.387-389, p.158-162, 2004.
7. TALONEN, J.E HÄNNINEN, H. Formation of Shear Bands and Strain-induced Martensite During Plastic Deformation of Metastable Austenitic Stainless. Acta Mater., v.55, p.6108-6118, 2007.
8. MERIC DE BELLEFON, G., VAN DUYSSEN, J.C.E SRIDHARAN, K. Composition-dependence of Stacking Fault Energy in Austenitic Stainless Steels Through Linear Regression with Random Intercepts. J. Nucl. Mater., v.492, p.227-230, 2017.
9. SCHRAMM, R.E.E REED, R.P. Stacking Fault Energies of Seven Commercial Austenitic Stainless Steels. Metall. Trans. A, v.6, p.1345, 1975.
10. PICKERING, F.B. Physical Metallurgy Of Stainless Steel Developments. in Stainless Steels '84. Gotemburgo, Suécia, 1984.
11. BROFMAN, P.J.E ANSELL, G.S. On the Effect of Carbon on the Stacking Fault Energy of Austenitic Stainless Steels. Metall. Trans. A, v.9, p.879-880, 1978.
12. QI-XUN, D., et al. Stacking Fault Energy of Cryogenic Austenitic Steels. Chin. Phys. Lett., v.11, p.596-600, 2002.
13. OJIMA, M., et al. Weak Beam TEM Study on Stacking Fault Energy of High Nitrogen Steels. V.80, p.477-481, 2009.
14. YONEZAWA, T., et al. The Effect of Chemical Composition and Heat Treatment Conditions on Stacking Fault Energy for Fe-Cr-Ni Austenitic Stainless Steel. Metall Mater. Trans. A, v.44, p.5884-5896, 2013.

INFLUENCE OF THE STATE OF DEFORMATION AND TEMPERATURE ON THE TRANSFORMATION INDUCED PLASTICITY (TRIP) IN AN AISI 201LN STEEL

ABSTRACT

AISI 200 series (Cr-Ni-Mn) stainless steels, which have low stacking fault energy (SFE), are susceptible to Transformation Induced Plasticity (TRIP), in which the transformation of the austenitic- γ matrix in ϵ -hcp and a' martensites increases the material's work hardening and elongation, resulting in greater tenacity and mechanical resistance and providing significant technological advantages. The TRIP effect can be affected by parameters such as temperature and the deformation mode to which the material is subjected. Thus, the behavior of this effect was investigated in this work in two states of deformation: tension and compression, over a temperature range from -100 °C to 800 °C for the authentic stainless steel AISI 201LN. The final microstructure was characterized by X-ray diffraction (XRD) and backscattered electron diffraction (EBSD) and correlated to the mathematical models of hardening from Kocks-Mecking (K-M) and Hollomon. It was observed that the critical strain to start the transformation process of martensite a' is smaller for tensile stresses than in compression and that, as the stress temperature increases, in both cases the amount of transformed martensite decreases due to the increase in the SFE.

Keywords: *Austenitic stainless steel, Stacking fault energy (SFE), TRIP effect.*

.