

ESTUDO DO EFEITO DA TEMPERATURA NA MACLAÇÃO MECÂNICA DO AÇO 316 LV: COMPARAÇÃO ENTRE ENSAIOS DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO

Leonardo M. Correa^{2*}, Diogo P. Braga^{1,2}, Vitor L. Sordi^{1,2,3}, Carlos A. D. Rovere^{1,3}, O. M Cintho⁴, 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

4 – Departamento de Engenharia de Materiais Universidade Estadual de Ponta Grossa, (UEPG), Ponta Grossa, PR

leonardomuthi@estudante.ufscar.br

RESUMO

O desenvolvimento de aços que apresentem elevada resistência mecânica e considerável ductilidade é um dos principais anseios da indústria. Os aços de alta resistência que possuem maclação mecânica (efeito TWIP) são utilizados em aplicações que exigem alto limite de resistência, tenacidade e, principalmente, em situações com temperaturas criogênicas. Apesar da vasta utilidade, uma descrição do efeito TWIP sob diferentes modos de solicitação mecânica ainda é objeto de pesquisa. Neste estudo, o comportamento mecânico do aço 316 LV (F-138) foi avaliado sob os modos de tração e compressão em um intervalo de temperatura variando de -100 °C a 300 °C a uma taxa de deformação constante de 10^{-3} s^{-1} . Os resultados experimentais dos ensaios de tração e compressão foram relacionados com a evolução microestrutural observada por microscopia óptica (MO) e pela difração de elétrons retroespalhados (EBSD). Observou-se que a temperatura de trabalho é um dos fatores determinantes do modo de deformação, pois altera a cinética de maclação. O efeito TWIP, aparentemente, foi mais acentuado no modo de tração do que na compressão.

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

INTRODUÇÃO

A demanda mundial pelo desenvolvimento de aços que apresentem alta resistência mecânica e boa ductilidade tem incentivado e direcionado as pesquisas com metais de alta resistência. Esses materiais, conhecidos como “aços avançados de alta resistência” (em inglês advanced high-strength steels, AHSS), são efetivos quando utilizados em vários componentes fabricados pela indústria automotiva, biomédica, de eletrodomésticos, naval, entre outras. Assim, o estudo de materiais que sofrem transformações induzidas por deformação tornou-se uma ótima estratégia para alcançar as características mecânicas desejadas. Aços austeníticos

que apresentam o efeito TWIP (plasticidade induzida por maclação mecânica) produzem maclas em resposta à deformação plástica imposta ^(3,6).

A predominância e a cinemática dos mecanismos de deformação (TWIP, TRIP ou escorregamento) são determinadas pela estabilidade da austenita retida e pela energia de falha de empilhamento do material (EFE) que, por sua vez, dependem das propriedades químicas do material, do tamanho de grão, da temperatura, da taxa de deformação e de outros fatores ^(2,4,5,8,9).

Os primeiros estudos com materiais cúbicos de faces centradas (CFC's) que sofriam maclação durante a deformação foram apresentados por Rémy. Ele relacionou as propriedades mecânicas do material com o volume proporcional de maclas em várias temperaturas e desenvolveu um modelo baseado na relação clássica de Hall-Petch. Outro modelo pioneiro foi introduzido por Bouaziz e Guelton em 2001 e previa que as maclas agiam como obstáculos ao movimento das discordâncias, afetando assim, o caminho livre de movimentação dessas imperfeições ^(1,7).

A fração de maclas e a cinética da transformação variam de acordo com a deformação imposta. Na literatura, autores descrevem a cinética de maclação em função de uma equação empírica de nucleação e crescimento dependente da deformação plástica.

No entanto o comportamento observado em tração não se replica em outras formas de deformação. O presente trabalho compara os efeitos do sentido da compressão uniaxial, em ensaios de tração e compressão, e da temperatura no efeito TWIP de um aço ASTM F138, a fração maclada foi determinada a través da análise da taxa de encruamento e de análises da microestrutura por difração de elétrons retroespalhados (EBSD).

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

O material utilizado como base para esse trabalho foi um aço avançado de alta resistência desenvolvido para aplicações cirúrgicas e normatizado pela ASTM F138 fornecido pela Villares Metals em formato de tarugos possuindo 10 mm de diâmetro. Após recebido, o aço foi homogeneizado a 1050 °C por 30 minutos em um forno a vácuo sendo, em seguida, resfriado em água. A composição química do material está indicada na Tabela 1.

Tabela 1: Composição química (%wt) fornecida pelo fabricante ASTM F138

Cr	Mn	Ni	C	Mo	Si	Al
17	1.8	14	0.015	2.8	0.3	-

Após o tratamento térmico o material apresentou uma microestrutura austenítica recristalizada com tamanho médio de grão de 25 $\mu\text{m} \pm 5\mu\text{m}$ (ASTM E112) e maclas de recozimento.

Ensaio Mecânicos

Os ensaios mecânicos realizados buscaram analisar o efeito dos principais parâmetros envolvidos em processos de conformação frente a maclação mecânica do ASTM F138. Dessa forma, os ensaios foram planejados variando-se a temperatura, o estado de tensão e a velocidade de deformação. Seguiu-se as normas ASTM E8/E8M e ASTM E21 para os ensaios de tração ao passo que, para os de compressão, utilizou-se como referência as orientações previstas na

ASTM E9 e ASTM E209; a taxa de deformação foi de 10^{-3} s^{-1} em um intervalo de temperaturas entre -100°C e 300°C .

Análises

Para desenvolvimento do modelo matemático por meio de dados experimentais utilizou-se as técnicas de raios x (DRX), microscopia óptica e difração de elétrons retroespalhados. A observação e a quantificação de todas as análises realizadas ajudaram a responder os questionamentos levantados frente a resposta mecânica positiva do material TWIP.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. 1 mostra os resultados obtidos para os ensaios de tração (Fig. 1a) e compressão (Fig. 1b) realizados a uma taxa de deformação 10^{-3} s^{-1} em um intervalo de temperatura que está entre -100°C e 300°C para o aço 316 LV. O material apresentou aumento de tenacidade, resistência mecânica e alongamento com a redução da temperatura. Isso ocorreu, em virtude do efeito de maclação induzida do material. Para compressão, os ganhos de propriedades mecânicas foram menores.

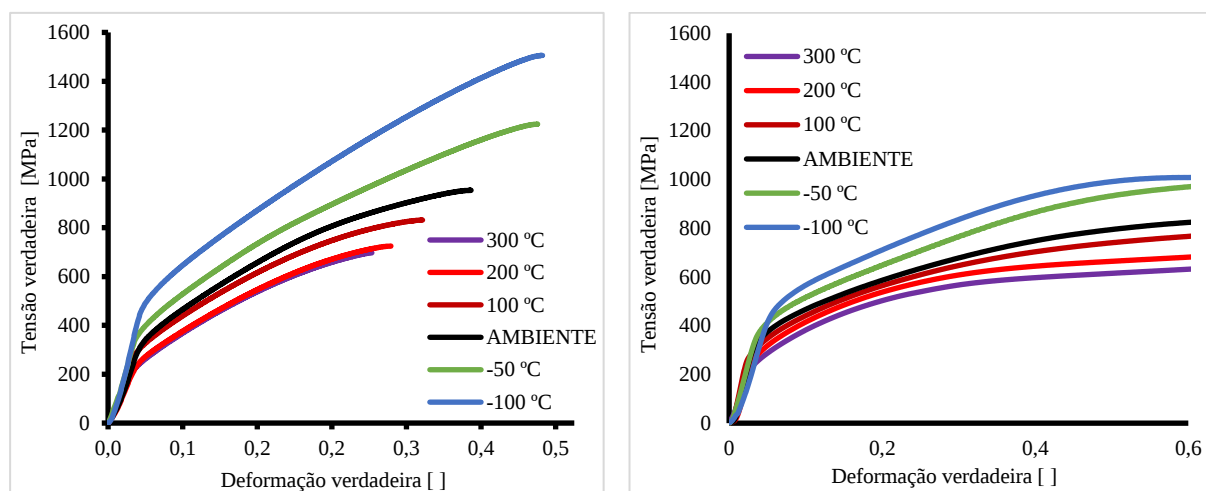


Figura 1: Curvas de tensão-deformação para os ensaios de tração (a) e compressão (b) no 316 LV (F138) a uma faixa de temperatura entre -100°C e 300°C ; taxa de deformação 10^{-3} s^{-1}

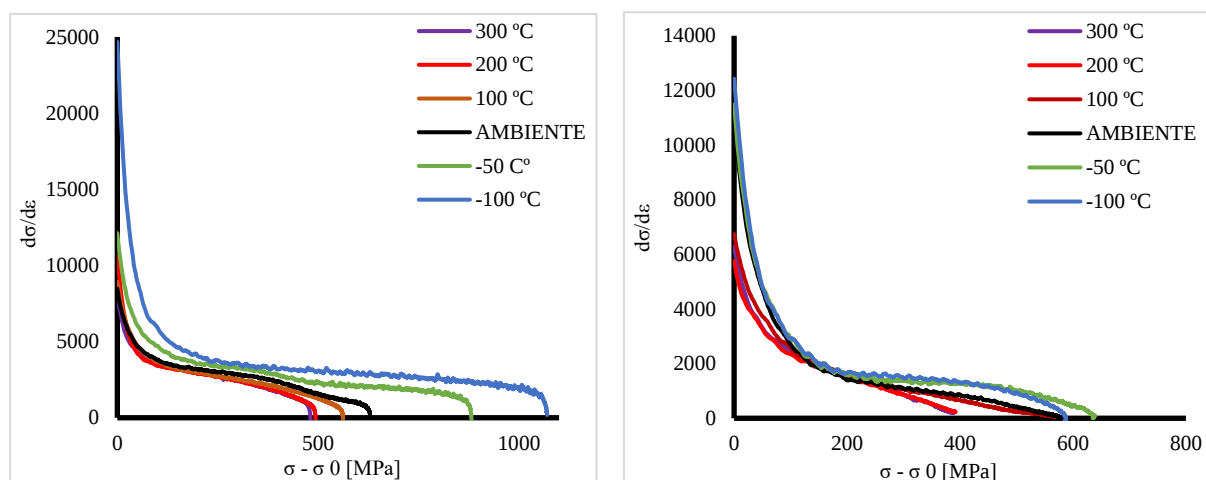


Figura 2: Curvas da taxa de encruamento para os ensaios de tração (a) e compressão (b) para o material 316 LV (F138) a uma faixa de temperatura entre -100°C e 300°C ; taxa de deformação 10^{-3} s^{-1}

A Fig. 2 ilustra os resultados obtidos para a taxa de encruamento. Para a curva da tração (Fig. 2a) observou-se claramente dois regimes para a curva de -100 °C (azul). O inicial, até aproximadamente $\sigma \approx 600$ MPa, marcado pela transição do regime elástico para o plástico, sendo caracterizado pelo aumento do volume de discordâncias e, em seguida, o segundo regime, que é definido pela maclação mecânica primária e secundária. Em -50 °C (curva verde) observa-se quatro regimes, sendo eles: aumento da densidade de discordâncias, maclação primária, diminuição da maclação primária (predominância do mecanismo de deslizamento de discordâncias) e, por fim, maclação secundária. Percebe-se que, a partir da temperatura ambiente, as curvas não apresentam, certamente, o comportamento causado pela maclação secundária.

Notou-se que, apesar de possuir tendência de limite de resistência equivalente ao da curva de tração com a diminuição da temperatura, não há similaridade entre a tração e a compressão para os gráficos de taxa de encruamento. A partir de $\sigma - \sigma_0 \approx 180$ MPa existe uma divergência de comportamento aos pares. As curvas de -100 e -50 °C têm as maiores taxas de encruamento (quase constantes); as de 100 °C e ambiente andam em conjunto, com uma inclinação menor; as de 200 e 300 °C apresentam as menores inclinações, indicando que os mecanismos de maclação e escorregamento, sob essas condições, também são reduzidos.

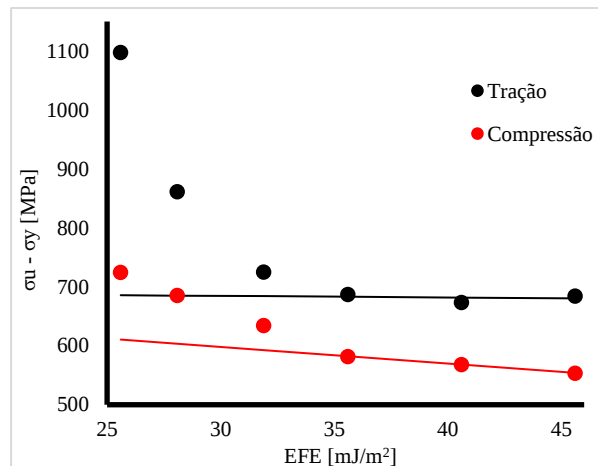


Figura 3: Gráfico do comportamento da tensão ($\sigma_u - \sigma_y$) pela energia de falha de empilhamento (EFE) para as temperaturas de -100 °C a 300 °C e taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1}

O gráfico acima (Fig. 3) ilustra a variação da tensão no limite de resistência à tração com a energia de falha de empilhamento. O aumento da propriedade com a diminuição de temperatura foi maior para o modo de tração, indicando que a maclação mecânica pode ser favorecida nesse estado.

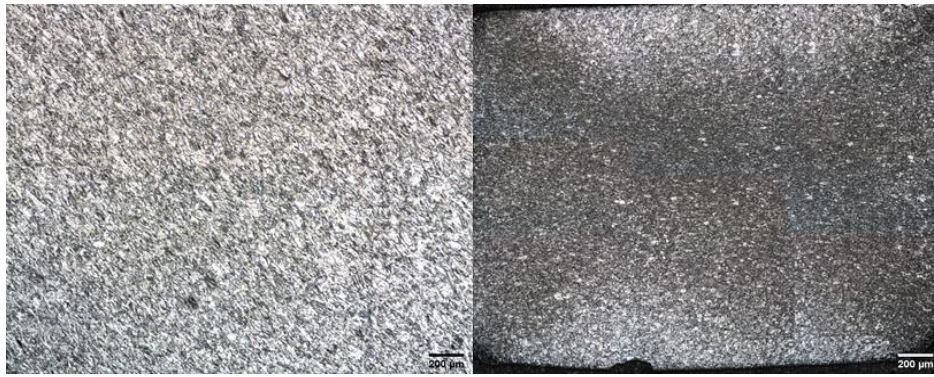


Figura 4: Comparação metalográfica entre as amostras de tração (a) e compressão(b) a -100 °C e taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1}

A Fig. 4 evidencia a diferença de textura existente entre as amostras submetidas à tração e compressão. A Fig. 4b, da compressão, mostra as regiões de alta (centro da amostra) e baixa (em contato com a matriz de compressão) deformação. As amostras de compressão aparentam ter alta deformação concentrada ao passo que na tração essa deformação é mais homogênea. O fenômeno de maclação, ao que aparece, é mais evidente sob tração.

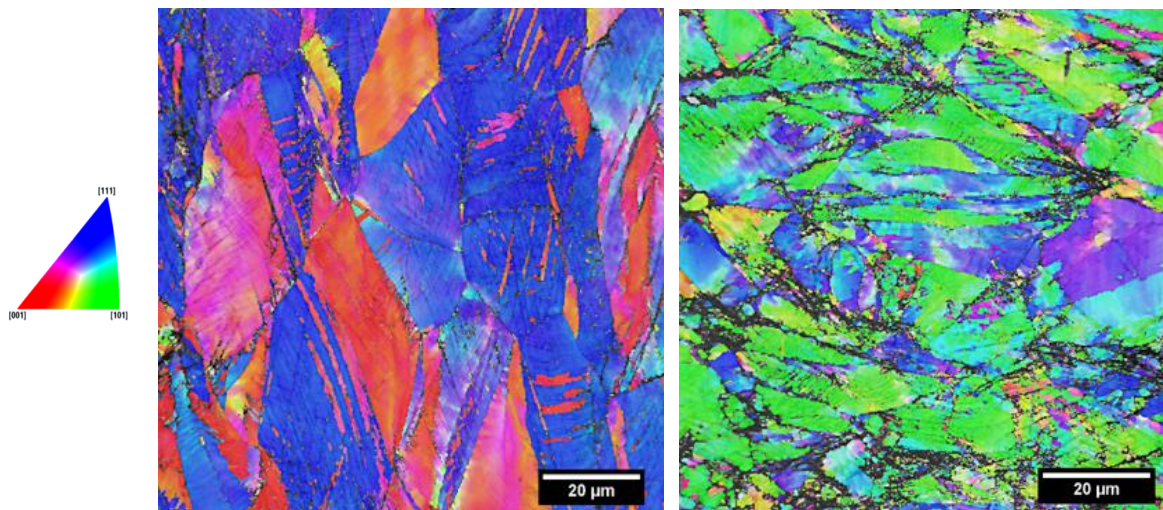


Figura 4: Mapas de orientação cristalográfica por EBSD, eixo de deformação uniaxial como referência. Amostras de tração (a) e compressão (b) a -100 °C e taxa de deformação de 10^{-3} s^{-1} . As maclas são representadas pelas linhas pretas finas.

Por meio da análise por EBSD foi possível perceber que existe, paralelo a direção de carregamento, uma textura predominante de planos $\{111\}$ quando o material está sob tração e $\{100\}$ quando está sob compressão. Essas direções, ortogonais entre si, mostram que os polos $\{111\}$ estão orientados na direção de maior deformação positiva. A Fig. 4b (sob compressão) mostra que há mais regiões de alta deformação próximas dos contornos de grão, formação de bandas de cisalhamento e uma menor indexação de contornos de maclas. Isso favorece a hipótese de predominância do escorregamento de discordâncias sob compressão. Nas amostras de tração (Fig. 4.a) grãos com orientação $\{111\}$ paralela ao eixo de tração apresentam maclação mais acentuada do que grãos com orientação $\{100\}$.

CONCLUSÕES

O efeito TWIP foi avaliado no material 316 LV para uma faixa de temperatura entre -100°C e 300°C e apresentou contribuições expressivas na resistência mecânica do material

O material inoxidável estudado, aparentemente, é mais sensível ao processo de maclação quando está sob tração. O modo de compressão possui muitas regiões de alta deformação formando bandas de cisalhamento, favorecendo o mecanismo de encruamento por escorregamento de discordâncias.

A temperatura de transição entre os mecanismos de deformação foi de 23 °C (ambiente). Para faixas acima dessa temperatura, predomina o deslizamento de discordâncias; para faixas abaixo dessa temperatura, o mecanismo de maclação mecânica.

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).

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. BOUAZIZ, O.; GUELTON, N. Modelling of TWIP effect on work-hardening. **Materials Science and Engineering: A**, 319-321, p. 246-249, 2001/12/01/ 2001.
2. DAS, A. Revisiting Stacking Fault Energy of Steels. **Metallurgical & Materials Transactions. Part A**, 47, n. 2, p. 748-768, 2016. Article.
3. HWANG, J.-K. Effect of Stress States on Twinning Behavior in Twinning-Induced Plasticity Steel. **Journal of Materials Engineering and Performance**, 28, n. 8, p. 4811-4825, 2019/08/01 2019.
4. LIU, L.; HE, B.; HUANG, M. The Role of Transformation-Induced Plasticity in the Development of Advanced High Strength Steels. **Advanced Engineering Materials**, 20, n. 6, p. 1701083, 2018/06/01 2018.
5. MATSUOKA, Y.; IWASAKI, T.; NAKADA, N.; TSUCHIYAMA, T. *et al.* Effect of Grain Size on Thermal and Mechanical Stability of Austenite in Metastable Austenitic Stainless Steel. **ISIJ International**, 53, n. 7, p. 1224-1230, 2013.
6. PAREDES, M.; GROLLEAU, V.; WIERZBICKI, T. On ductile fracture of 316L stainless steels at room and cryogenic temperature level: An engineering approach to determine material parameters. **Materialia**, 10, p. 100624, 2020/05/01/ 2020.
7. REMY, L. Kinetics of f.c.c. deformation twinning and its relationship to stress-strain behaviour. **Acta Metallurgica**, 26, n. 3, p. 443-451, 1978/03/01/ 1978.
8. ZHAO, Y. H.; ZHU, Y. T.; LIAO, X. Z.; HORITA, Z. *et al.* Tailoring stacking fault energy for high ductility and high strength in ultrafine grained Cu and its alloy. **Applied Physics Letters**, 89, n. 12, p. 3, Sep 2006. Article.
9. ZHU, Y. T.; NARAYAN, J.; HIRTH, J. P.; MAHAJAN, S. *et al.* Formation of single and multiple deformation twins in nanocrystalline fcc metals. **Acta Materialia**, 57, n. 13, p. 3763-3770, 2009/08/01/ 2009.

STUDY OF THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE MECHANICAL TWINNING OF 316 LV STEEL: COMPARISON BETWEEN TENSION AND COMPRESSION TESTS

ABSTRACT

The development of steels with a high mechanical strength and considerable ductility is one of the main concerns of the industry. High strength steels that have mechanical twinning (TWIP effect) are used in applications that require a high limit of strength, toughness and, especially, under cryogenic situations. Despite its vast utility, a description of the TWIP effect under different modes of mechanical stress is still a subject of research. In this study, the mechanical behavior of 316 LV steel (F-138) was evaluated under tensile and compression modes in a temperature range varying from -100 °C to 300 °C at a constant strain rate of 10^{-3} s^{-1} . The experimental results of the tensile and compression tests were related to the microstructural evolution observed by optical microscopy (OM) and by backscattered electron diffraction (EBSD). It was observed that the working temperature is one of the determining factors of the deformation mode, as it changes the twinning kinetics. The TWIP effect, apparently, was more pronounced in the traction mode than in the compression.

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