

Comportamento à fratura cíclica de um aço inoxidável ASTM 316

Pedro G S Passalini^{*a}, Ricardo P Weber^a, Paulo F S Filho^b

^aInstituto Militar de Engenharia (IME)

Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

^bInstituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ), Coordenação de engenharia mecânica, Paracambi, Rio de Janeiro.

*pedroguilhermesp2@hotmail.com

RESUMO: O estudo da fractografia de um material é de extrema importância, pois, através do mesmo, é possível chegar a conclusões que indicam o motivo e as condições pelas quais um material pode vir a romper-se. Aços inoxidáveis austeníticos, quando submetidos a carregamentos uniaxiais, com baixas taxas de deformação até a ruptura, apresentam um aspecto macroscópico de fratura dúctil, entretanto, uma análise detalhada por técnicas, como microscopia eletrônica de varredura (MEV), podem mostrar regiões de fratura frágil, o que pode ocorrer pela transformação de fase que os aços austeníticos apresentam quando submetidos à deformação plástica (efeito TRIP) ou pela austenita encruada. Este trabalho tem como objetivo avaliar o aspecto de fratura de um aço inoxidável 316, submetido a carregamento cíclico uniaxial de baixa frequência para fins comparativos, com o aspecto de fratura do mesmo material fraturado em um ensaio de tração, verificando como a mudança do tipo de carregamento pode afetar na morfologia de fratura do material. Os resultados indicam que ambos os tipos de carregamento apresentam fratura dúctil, porém com morfologias diferentes, ou seja, tipo taça e cone para tração, e ruptura em 45° para o ensaio cíclico. Essa diferença indica que a trinca se nucleia em diferentes regiões para cada carregamento, podendo também indicar serem dependentes da quantidade de material encruado e transformado durante cada ensaio.

PALAVRAS-CHAVE: Fractografia. Aço inoxidável ASTM 316. Ensaio cíclico. Ensaio de Tração.

ABSTRACT: The study of the fractography of a material is extremely important, because through it is possible to reach conclusions that indicate the reason and the conditions by which a material may break. Austenitic stainless steels, when subjected to uniaxial loads, with low deformation rates, until rupture, have a ductile fracture macroscopic aspect, however, a detailed analysis by techniques such as scanning electron microscopy (SEM) can show fragile fracture regions, which can occur due to the phase transformation that austenitic steels present when subjected to plastic deformation (TRIP effect) or by hardened austenite. This work aims to evaluate the fracture aspect of a 316 stainless steel, subjected to low frequency uniaxial cyclic loading for comparative purposes with the fracture aspect of the same fractured material in a tensile test, verifying how the type of loading changes can affect the fracture morphology of the material. The results indicate that both types of loading have ductile fractures, but with different morphologies, that is, cup and cone type for traction and 45° rupture for the cyclic test. This difference indicates that the crack is nucleated in different regions for each load, and may also indicate that they are dependent on the amount of material hardened and transformed during each test.

KEYWORDS: Fractography. Stainless Steel. ASTM 316. Cyclic test. Tensile test.

1. Introdução

O aço inoxidável ASTM 316 possui um importante papel na indústria devido à sua excelente resistência à corrosão [1][2] e ótima ductilidade [3]. É empregado em diversos setores, como petroquímico, alimentício, de equipamentos farmacêuticos, transporte de água, armamento, entre outros [4][5].

O aço inox 316 possui microestrutura austenítica [6], que, sendo metaestável [7], quando submetida à deformação plástica, tende a sofrer uma transformação microestrutural, ou seja, transformar a microestrutura

austenítica em martensítica, mais frágil. Este processo é conhecido por efeito TRIP (plasticidade induzida por transformação de fase), sendo observado pela primeira vez por volta de 1950 [8][9].

Diversos estudos indicam que o efeito TRIP tem a capacidade de reduzir significativamente as trincas produzidas por fadiga no aço com microestrutura austenítica [7][10][11][12], provavelmente devido à mudança microestrutural ocorrida durante sua deformação, indicando um maior efeito quanto maior for a deformação ocorrida no material [13].

Li et al., 2021 [14] realizaram ensaios monótonos de tração em um aço inoxidável 308L. Analisando

tanto macroscopicamente quanto microscopicamente o aspecto da fratura do material, concluíram que este foi rompido por fratura dúctil. Foi observado na microscopia eletrônica de varredura (MEV) vazios (“dímole”) na superfície de fratura do corpo de prova, indicando uma fratura dúctil do material.

Lall et al., 2021 [15] observaram regiões fibrosas com presença abundante de vazios, típicas de fratura dúctil, no centro da superfície de fratura de um aço inoxidável austenítico ASTM 709, submetido a um ensaio de tração, bem como regiões de clivagem nas bordas de tal superfície, caracterizando uma região de fratura frágil [15].

Ensaio de baixo ciclo uniaxiais e altas amplitudes de deformação foram realizados por Alsmadi et al. 2020 [16] em um aço austenítico 709. Foram observadas três regiões: a primeira foi identificada como o ponto de nucleação da trinca, a segunda como regiões de estrias, isto é, de propagação das trincas, e a terceira como regiões de sobrecarga com aspecto dúctil, indicado pela presença de vazios [16].

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar e comparar o aspecto de fratura do aço inoxidável austenítico ASTM 316, ensaiado monotomicamente à tração e ensaiado ciclicamente, a fim de verificar se houve mudança fractográfica em função do tipo de carregamento empregado.

2. Material e métodos

O material empregado neste trabalho foi o aço inoxidável ASTM 316. Sua composição química é descrita na **Tabela 1**. Foram produzidos corpos de provas (CP) de acordo com a norma E606-92/12 [17] para ensaios uniaxiais e cíclicos. As dimensões dos CPs são apresentadas na **Figura 1**

Tab. 1 – Composição química do aço inoxidável ASTM 316.

Ele.	C	Si	Mn	P	S
%p	0,018	0,33	1,44	0,035	0,025
Ele	Co	Cr	Ni	Cu	N
%p	0,09	17,0	10,16	0,25	0,064

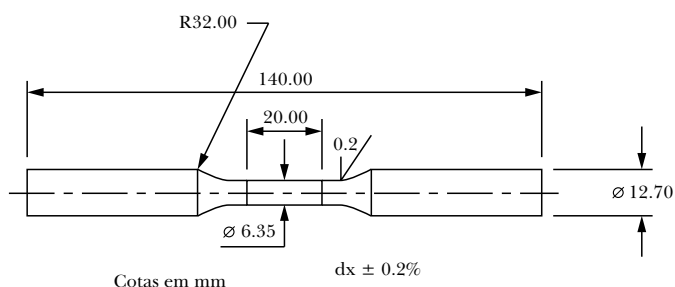


Fig. 1 – Dimensões do CP. Fonte: [17].

Os ensaios de tração e cíclico foram realizados em uma máquina servo-hidráulica, modelo Shimadzu Servopulser (**Figura 2**), com 5 Mpa de pressão nas garras. No ensaio de tração, foi utilizado um extensômetro modelo Dynastain. O ensaio cíclico foi controlado pelas forças máximas e mínimas de 14kN e -14kN (tração x compressão), variando, assim, a deformação em uma frequência de 0,075Hz até a ruptura.



Fig. 2 – Máquina universal de ensaios utilizada neste trabalho.

As análises dos aspectos de fratura para ambos os ensaios realizados foram feitas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Utilizando detector de elétrons secundários a uma tensão de aceleração de 10,00kV e “spot size” de 5.0.

3. Resultados e discussões

3.1 Ensaio de tração

A curva, obtida pelo ensaio de tração, é apresentada na **Figura 3**. O resultado expressa o comportamento típico de um material dúctil [18].

A **Figura 4** mostra a fratura para o ensaio de tração, onde é possível a verificação da morfologia taça e cone, típica de fratura dúctil [19], com regiões de clivagem nas bordas, o que mostra que a nucleação da trinca partiu do centro do CP [20]. Em uma análise mais aproximada (**Figura 5**), é possível a identificação de dimples, que indicam regiões de fratura dúctil, e de pontos de clivagem, que indicam fratura frágil [21]. Esses pontos podem ter sido formados pela austenita encruada ou por uma fração do material transformado pelo efeito TRIP [22].

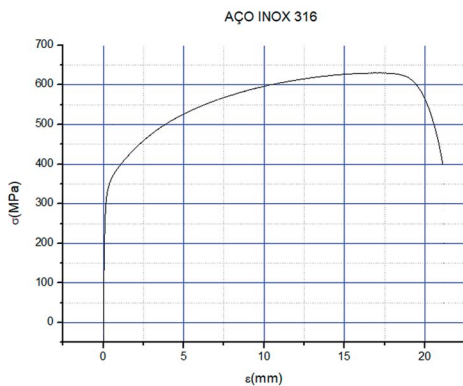


Fig. 3 – Curva tensão x deformação para o material ensaiado a tração.

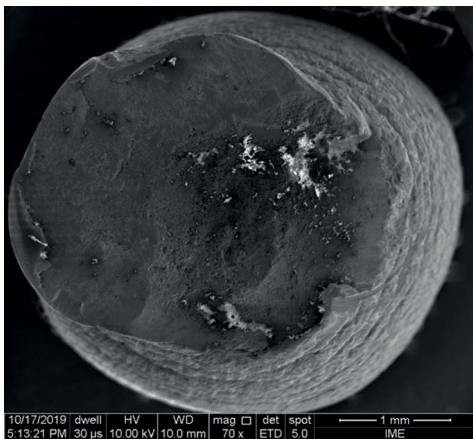


Fig. 4 – Micrografia, obtida por MEV para a fratura do aço em estudo submetido a tração.



Fig. 5 – Micrografia aproximada, obtida por MEV para a fratura do aço em estudo submetido a tração.

3.2 Ensaio cíclico

A curva característica obtida no ensaio cíclico é apresentada na **Figura 6**. O carregamento cíclico foi realizado a uma tensão acima da tensão de escoamento do material, o que fez com que este se rompesse com 220 ciclos.

Observa-se, na superfície de fratura do material ensaiado ciclicamente, três regiões (1,2,3) com aspecto de fratura por cisalhamento, apresentando inclinação de 45° (**Figura 7**) [23]. Uma imagem aproximada (**Figura 8**) destas regiões indica a presença de vazios [24].

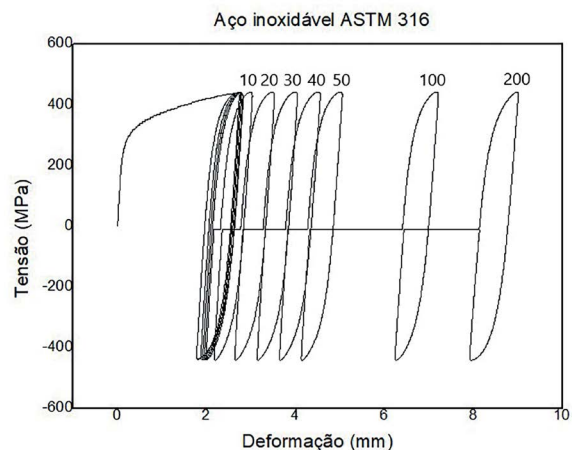


Fig. 6 – Curva tensão x deformação para o material ensaiado ciclicamente (acima de cada ciclo formado é indicado seu número).

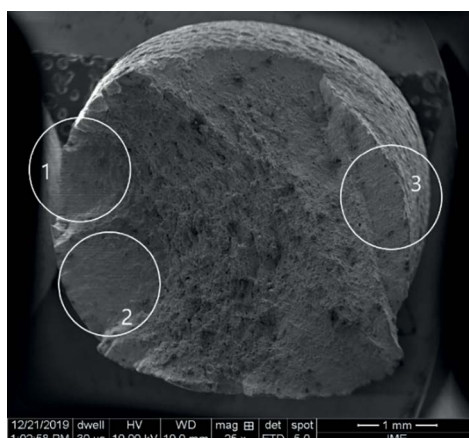


Fig. 7 – Micrografia obtida por MEV para para a fratura do aço em estudo submetido a ensaio cíclico.

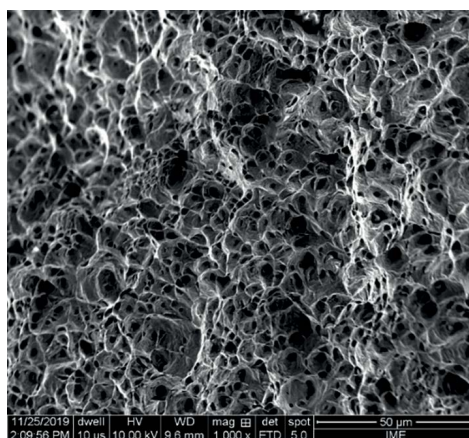


Fig. 8 – Micrografia aproximada, obtida por MEV para para a fratura do aço em estudo submetido a ensaio cíclico.

4. Conclusão

De acordo com os resultados apresentados, pode-se concluir que os aspectos microscópicos para ambos os ensaios foram de fratura dúctil, porém se diferenciaram em sua morfologia, sendo tipo taça e cone para tração, e ruptura em 45° para o ensaio cíclico. Essa diferença indica que a trinca se nucleia em regiões diferentes para cada tipo de carregamento,

podendo também ser dependente da quantidade de material encruado e transformado durante cada ensaio, o que influencia diretamente em como as trincas irão se propagar.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao IME e à UFF pela estrutura disponibilizada e à CAPES pelo suporte financeiro.

Referências

- [1] ABBAS, A. T.; ANWAR, S.; ABDELNASSER, E.; LUGMAN, M.; QUDEIRI, J. E. A.; ELKASEER, A. Effect of diferente cooling strategies on surface quality and power consumption in finishing end milling of stainless steel 316; **Materials**, 14, 903, 2021.
- [2] HOPPIUS, J. S.; KUKREJA, L. M.; KNYAZEVA, M.; PÖHL, F.; WALTHER, F.; OSTENDORF, A.; GUREVICH, E. L. On femtosecond laser shock peening of stainless steel AISI 316; **Applied Surface Science**, 435., 2018, pp.1120-1124.

- [3] XIONG, Y.; YUE, Y.; LU, Y.; HE, T.; FAN, M.; REN, F.; CAO, W. Cryorolling impacts on microstructure and mechanical properties of AISI 316 LN austenitic stainless steel; **Materials Science & Engineering: A**, 709, 2018, pp. 270-276.
- [4] WILLIAMS, D. F.; KELLAR, E. J. C.; JESSON, D. A.; WATTS, J. F. Surface analysis of 316 stainless steel treated with cold atmospheric plasma; **Applied Surface Science**, 403, 2018, pp. 240-247.
- [5] HUTLI, E.; NEDELJKOVIC, M.; BONYÁR, A. Controlled modification of the surface morphology and roughness of stainless steel 316 by high speed submerged cavitating water jet; **Applied Surface Science**, 458, 2018, pp. 293-304.
- [6] ZHAO, J.; JIANG, Z. Thermomechanical processing of advanced high strength steels; **Progress in Materials Science**, 94, 2018, pp. 174-242.
- [7] MARTELO, D. F.; MATEO, A. M.; CHAPETTI, M. D.; Fatigue crack growth of a metastable austenitic stainless steel; **International Journal of Fatigue**, 80, 2015, pp. 406-416.
- [8] NISHIYAMA, Z. **Martensitic Transformation**. New York: Academic Press, 1978.
- [9] ONUKI, Y.; SATO, S. In situ observation for deformation-induced martensite transformation during tensile deformation of SUS 304 stainless steel by using neutron diffraction part II: transformation and texture formation mechanisms. **Quantum beam science**, 5, 6, 2021.
- [10] PINEAU, A. G.; PELLOUX, R. M. Influence of strain-induced martensitic transformation on fatigue crack growth rates in stainless steels; **Metall Mater Trans B**, 5, 1974, pp. 1103-1112.
- [11] MARTELO, D.F.; MATEO, A.; CHAPETTI, M.D. Crack closure and fatigue crack growth near threshold of a metastable austenitic stainless steels; **Metall. Trans. A**, 21, 1990.
- [12] MEI, Z.; MORRIS, J. W. Influence of deformation-induced martensite on fatigue crack propagation in 304-type steels. **Metall. Mater Trans. A**, 21, 1990, pp. 3137-3152.
- [13] JAMBOR, M.; VOJTEK, T.; POKORNÝ, P.; SMÍD, M. Effect of solution annealing on fatigue crack propagation in the AISI 304L TRIP steel. **Materials**, 14, 1331, 2021.
- [14] LI, Y.; LUO, Y.; LI, J.; SONG, D.; XU, B.; CHEN, X. Ferrite formation and its effect on deformation mechanism of wire arc additive manufactured 308L stainless steel. **Journal of Nuclear Materials**, 550, 3115, 2021.
- [15] LALL, A.; BOWEN, P.; RABIEI, A. Effect of aging on failure mechanism of alloy 709 at various temperatures. **Materials Characterization**, 171, 1044, 2021.
- [16] ALSMADI, Z. Y.; ALOMARI, A.; KUMAR, N.; MURTY, K. L. Effect of hold time on high temperature creep-fatigue behavior of Fe-25Ni-20Cr (wt.%) austenitic stainless steel (alloy 709). **Materials Science & Engineering A**, 771, 921, 2020.
- [17] ASTM; **Standard test method for strain-controlled fatigue testing**. [S.I], 2-5, p.10, 52. 2012.
- [18] LIU, Y.; YANG, Y.; MAI, S.; WANG, C.; SONG, C. Investigation into spatter behavior during selective laser melting of AISI 316L stainless steel powder. **Materials and Design**, 87, 2015, pp. 797-806.
- [19] CARLTON, H. D.; HABOUB, A.; GALLEGOS, G. F.; PARKINSIN, D. Y.; Macdowell, A. A. Damage Evolution and failure mechanisms in additively manufactured stainless steel. **Materials Science & Engineering A**, 651, 2016, pp.406-414.
- [20] ZHONG, Y.; RÄNNAR, L.; LIU, L.; KOPTYUG, A.; WIKMAN, S.; OLSEN, J.; CUI, D.; SHEN, Z. Additive manufacturing of 316L stainless steel by electron beam melting for nuclear fusion applications. **Journal of Nuclear Materials**, 486, 2017, pp.234-245.
- [21] ZHAO, Y.; LEE, D.; SEOK, M.; LEE, J.; PHANIRAJ, M. P.; SUH, J.; HA, H.; KIM, J.; RAMAMURTY, U.; JANG, J. Resistance of CoCrFeMnNi high-entropy alloy to gaseous hydrogen embrittlement. **Scripta Materialia**, 135, 2017, pp. 54-58.
- [22] ORTWEIN, R.; RYS, M.; SKOCZEN, B. Damage Evolution in a stainless steel bar undergoing phase transformation under torsion at cryogenic temperatures. **International Journal of Damage Mechanics**, 25, 2016.
- [23] SUN, Q.; JIANG, F.; DENG, L.; XIAO, H.; LI, L.; LIANG, M.; PENG, T.; Uniaxial fatigue behaviour of Cu-Nb micro-composite conductor, part I: Effect of peak stress and stress ratio. **International Journal of Fatigue**, 91, 2016, pp. 275-285.
- [24] TRÁVNÍČEK, L.; KUBENA, I.; MAZÁNOVÁ, V.; VOJTEK, T.; POLÁK, J.; HUTAR, P.; SMÍD, M. Advanced description of short fatigue crack growth rates in austenitic stainless steels with distinct properties. **Metals**, 11, 475, 2021.