

ESTUDO DA MARTENSITA INDUZIDA POR DEFORMAÇÃO PLÁSTICA NO AÇO INOXIDÁVEL DE ULTRA-ALTA REISTÊNCIA 17-7PH

Caio C. Ariseto^{1*}, Kahl D. Zilnyk¹, Osvaldo M. Cintho²

1 - Departamento de Engenharia Aeronáutica e Mecânica (ITA), São José dos Campos, SP.

2 - Departamento de Engenharia e Ciência de Materiais (UEPG), Ponta Grossa, PR.

caioarisseto@hotmail.com

RESUMO

A compreensão e domínio dos aços inoxidáveis é indispensável para a modernização e sofisticação de tecnologias de interesse aeronáutica e aeroespacial, impulsionando o desenvolvimento eficaz de novos materiais e rotas de processamento. O presente trabalho compreende o estudo da formação de martensita induzida por deformação a frio no aço inoxidável 17-7 PH durante o processo de laminação, e para o cumprimento deste estudo diferentes corpos de prova de uma mesma amostra foram fragmentados e laminados a frio em reduções de até 92% na espessura os quais posteriormente foram embutidas em novas amostras para preparação metalográfica e caracterizadas tanto microestruturalmente por microscopia óptica e difração de raio X, como também mecanicamente por ensaio de dureza Vickers. Com isso, foi possível determinar o progresso de transformação de fase, ou seja, a quantidade de martensita induzida em função da severidade de deformação, e a evolução da dureza do material de modo a analisar o grau de encruamento.

Palavras-chave: 17-7 PH. Indução de martensita. Deformação a frio. Endurecimento por deformação a frio. Encruamento.

INTRODUÇÃO

O aço inoxidável é uma classe de ligas metálicas ferrosas classificadas como aços de alta liga, ou seja, apresenta o ferro como principal constituinte e elementos de liga como o cromo, níquel e outros elementos em menores quantidades como o carbono, manganês, alumínio, silício e molibdênio. É possível ainda os atribuir em quatro principais categorias de acordo com as fases predominantes, são eles: austeníticos, ferríticos, martensíticos e os endurecíveis por precipitação⁽¹⁾.

A classe dos aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação é corriqueiramente utilizada nesses componentes estruturais devido à sua boa capacidade de suportar o ambiente agressivo e apresentar uma alta resistência mecânica, boa densidade, boa rigidez e excelente capacidade de conformação, e fácil de fabricar, ou seja, características elementares para componentes estruturais aeronáuticos e aeroespaciais⁽²⁾.

Diversos trabalhos mostraram que em determinados aços inoxidáveis austeníticos é viável elevar a resistência mecânica por meio da indução de martensita mediante diferentes tipos de esforços mecânicos a frio, como por exemplo laminação, fadiga de baixo ciclo e esforços de tração⁽³⁻⁷⁾.

Simultaneamente a isto, outros estudos mostram que a combinação de deformação plástica severa seguida de tratamentos térmicos podem aumentar de forma significativa a fração de martensita e conseqüentemente a sua resistência mecânica. O aço inoxidável 17-7 PH pode atingir tensões de escoamento de até quase 2,0 GPa após deformação a frio e um tratamento de envelhecimento^(8,9).

Com isso o presente trabalho tem como objetivo investigar e determinar propriedades mecânicas e microestruturas durante a formação da martensita induzida por deformação a frio do aço inoxidável 17-7 PH permitindo uma melhor compreensão sobre os mecanismos e o desenvolvimento do processo, pois elevados valores de resistência mecânica e dureza podem ser alcançados por meio de um processamento termomecânico apropriado desse material

MATERIAIS E MÉTODOS

O aço inoxidável 17-7 PH foi obtido através do lingotamento e laminação a quente de barras com seção quadrada de dimensões 65 mm x 65 mm. Posteriormente foram subdivididas por meio de eletroerosão para a produção de segmentos com 40 mm x 30 mm x 10 mm de espessura, com a maior direção paralela à direção de laminação a quente. Os segmentos foram laminados a frio em múltiplos passes até a espessura final de 0,8 mm. Foram coletadas amostras com redução de espessura de 0%, 15%, 30%, 55%, 70%, 80%, 90% e 92%.

Os métodos utilizados para a caracterização microestrutural foram a utilização da microscopia óptica (MO) para observação de suas respectivas microestruturas após ataque eletrolítico, difração de raios X (DRX) de modo a quantificar a porcentagem de austenita e martensita nos corpos de prova, difração de elétrons retroespalhados (EBSD) para analisar a microestrutura das amostras 15%, 55% e 90%, a quantificação de fases pelo método da comparação direta paralelamente a difração de raio X, e por fim para caracterização mecânica utilizou-se o ensaio de dureza Vickers.

Os corpos de provas foram individualmente embutidos em baquelite e em seguida realizou-se o trabalho de metalografia utilizando lixadeira semi-automática com água corrente e lixas d'água com as seguintes granulações: 220, 400, 600, 1200 e 2400. Seguiu-se com o polimento utilizando a politriz automática Metprep 3 PH-3 e um pano de polimento com solução líquida de diamante de 3 μm por 30 minutos sob pressão de 9 N. Posteriormente a isso finalizou-se o polimento com um pano de neoprene utilizando solução de sílica coloidal por 30 minutos sob pressão de 24 N. Por fim atacou-se as amostras em um sistema eletrolítico com solução aquosa 60% de HNO₃ e tensão de 1,7 V.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dispõem-se abaixo em ordem crescente de deformação (0% até 92%) as micrografias de todas as amostras processadas por microscopia óptica (MO) após o polimento e ataque eletroquímico. A figura 1.D. ilustra as fases presentes nas amostras de até 55%, onde a região mais escura é ferrita (δ), e a região mais clara é austenita (γ) mais martensita induzida (α'). A partir da figura 1.E. para as amostras de 70% de deformação em diante é encontrado apenas ferrita (δ) e martensita induzida (α') e a austenita (γ) foi totalmente sucumbida, sendo tal afirmação confirmada nos dados coletados de difração e raio X, como mostrado na Figura 2 e Figura 04.

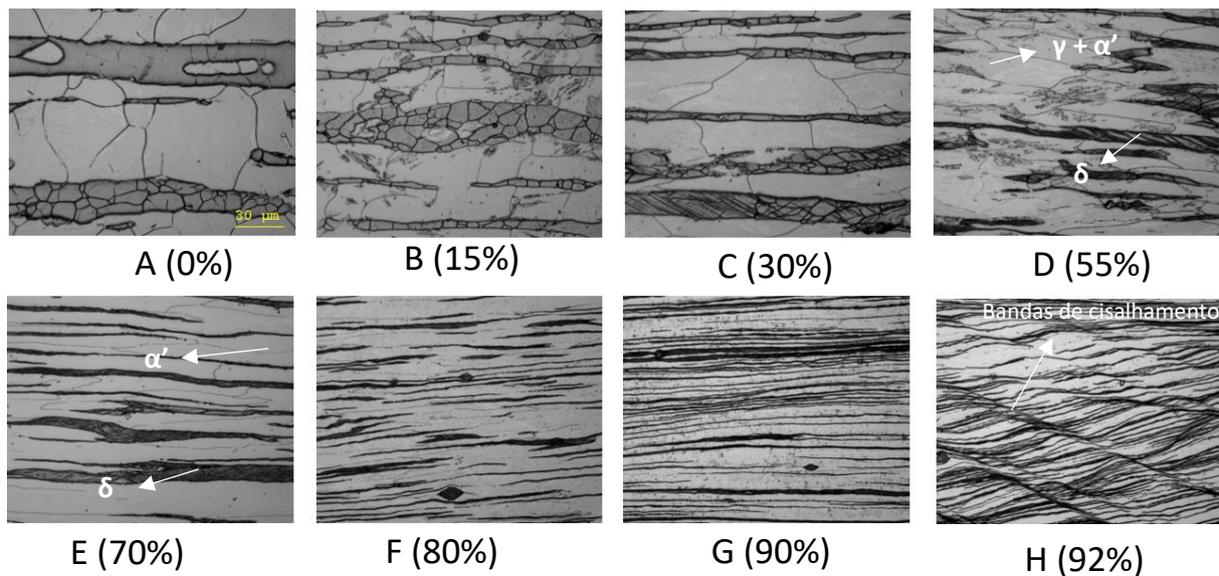


Figura 01: Evolução das micrografias de 0% até 92% de deformação.

As caracterizações subsequentes exibem os resultados das difrações de raios X para cada amostra. É ilustrado na Figura 2 que, diferentemente dos resultados mostrados acima, é possível identificar a evolução da porcentagem de cada microestrutura em cada amostra e que a amostra de partida (com 0% de deformação) dispõe maiores quantidades de picos de CFC (austenita) e menores picos de CCC (ferrita/martensita). À medida que a deformação a frio foi progredindo a transformação martensítica intensificou-se e rapidamente os valores começaram a se inverter.

Além disso, nos planos (111) e (110) entre os valores de 0% até 55% é facilmente visível a inversão na intensidade de sinal encontrada de fases pelo equipamento, sendo que a partir desse ponto é detectado cada vez menos sinais de CFC de modo que em 70% de deformação praticamente não há sinais de sua presença. Outro ponto importante a observar é que os aproximadamente 20% de CCC detectado no corpo de prova de 0% de deformação são de ferrita (δ), enquanto nas outras amostras trata-se de ferrita + martensita, uma vez que é inexistente diferenciar martensita (α') da ferrita (δ) (devido as premissas da lei de Bragg) pois ambas possuem o mesmo arranjo cristalino CCC.

Paralelamente as difrações de raios X, realizou-se a quantificação numérica de cada microestrutura utilizando suas respectivas posições e áreas de cada pico. A Figura 3 ilustra esses números e exprime os resultados encontrados nas difrações de raios X, onde é cabível perceber que a indução de martensita por deformação a frio é veloz, visto que com apenas 15% de deformação há um expressivo aumento de fase CCC.

Como não é possível diferenciar no DRX as fases ferrita (δ) da martensita (α'), pode-se afirmar através da amostra de 0% de deformação que há inicialmente nos corpos de prova aproximadamente 21% de ferrita (δ), uma vez que a transformação ocorre apenas da austenita para martensita, mantendo estável e inalterado a quantidade de ferrita.

Além disso, em conformidade com os tópicos anteriores, a Figura 3 também enaltece através do gráfico a estreita relação entre a evolução de propriedades mecânicas e o aumento de fase martensita proveniente da indução por deformação a frio. A Figura 3 revela que ambas as curvas (evolução da dureza e da martensita) apresentam o mesmo comportamento e tendência, sendo que para valores iniciais de redução de espessura a variação de dureza e transformação

martensítica é mais intensa quando contraposta com os valores finais. Além disso, a medida em que toda a austenita é transformada em martensita de modo concomitante à saturação de encruamento oriunda da demasiada deformação plástica, é presumível notar que as curvas se movimentam em comportamento assintótico quando valores de 70% de redução de espessura é atingido, havendo branda ou nenhuma evolução a partir deste valor.

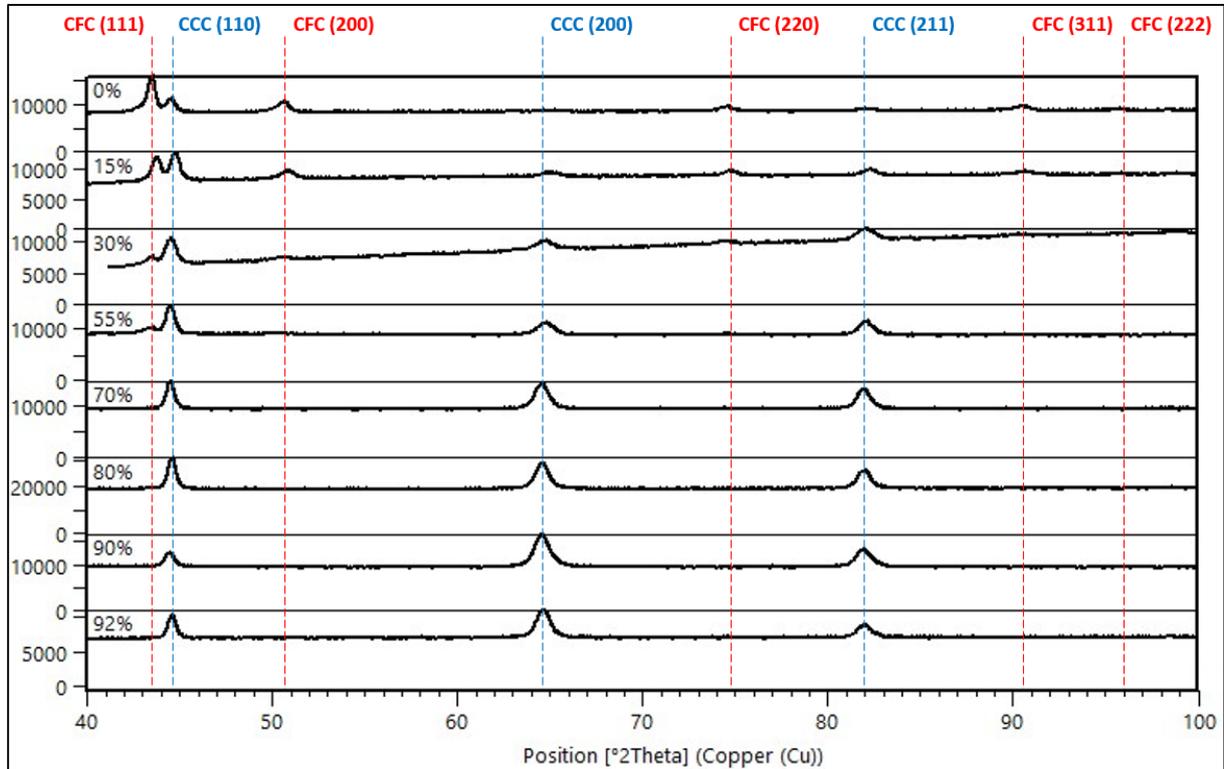


Figura 02: Difração de raio X para todas as amostras e seus respectivos picos.

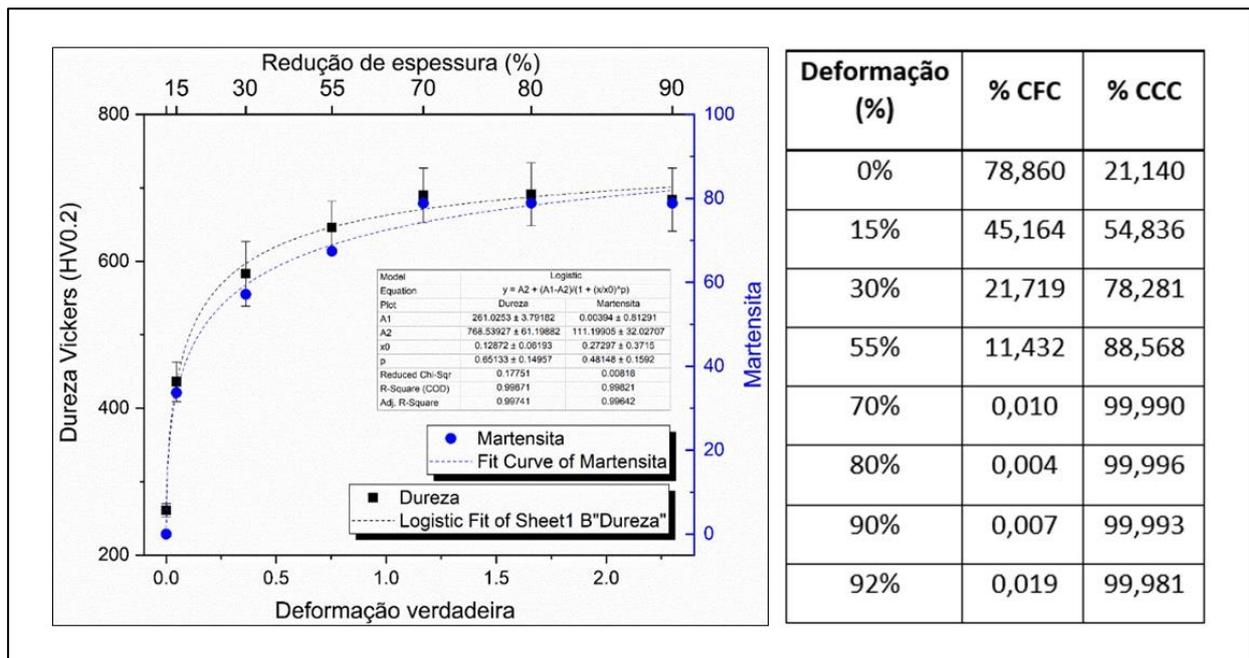


Figura 03: Correlação entre as propriedades e porcentagem de fases para cada amostra.

Com os ensaios de microscópio eletrônico de varredura (MEV) e difração de elétrons retro espalhados (EBSD) foi possível de modo visual certificar a presença e organização das fases de martensita induzida e austenita, uma vez que não foi viável constatar tais fases apenas no microscópio óptico. Para este fim utilizou-se as amostras de 15%, 55% e 90% de deformação a frio para observar a evolução das fases.

Na Figura 04 para a amostra de 15% nota-se a alta presença da microestrutura CCC (cor azul) e baixa presença da microestrutura CFC (cor vermelha), ao passo que para a amostra de 90% não há vestígio CFC. Ao equiparar tais resultados é plausível corroborar as informações apuradas previamente, uma vez que há uma perceptível redução na quantidade de austenita, respaldando assim o pressuposto da indução da martensita por deformação a frio que foi observada pelos valores de dureza e quantificação de fases por difração de raios X. Além disto a diminuição de fração indexada, percebido nas legendas das amostras na Figura 04 e variando respectivamente de 95%, 81% e 60%, conjectura uma influência prejudicial do abundante grau de encruamento e refinamento dos grãos em relação a qualidade de captura da imagem.

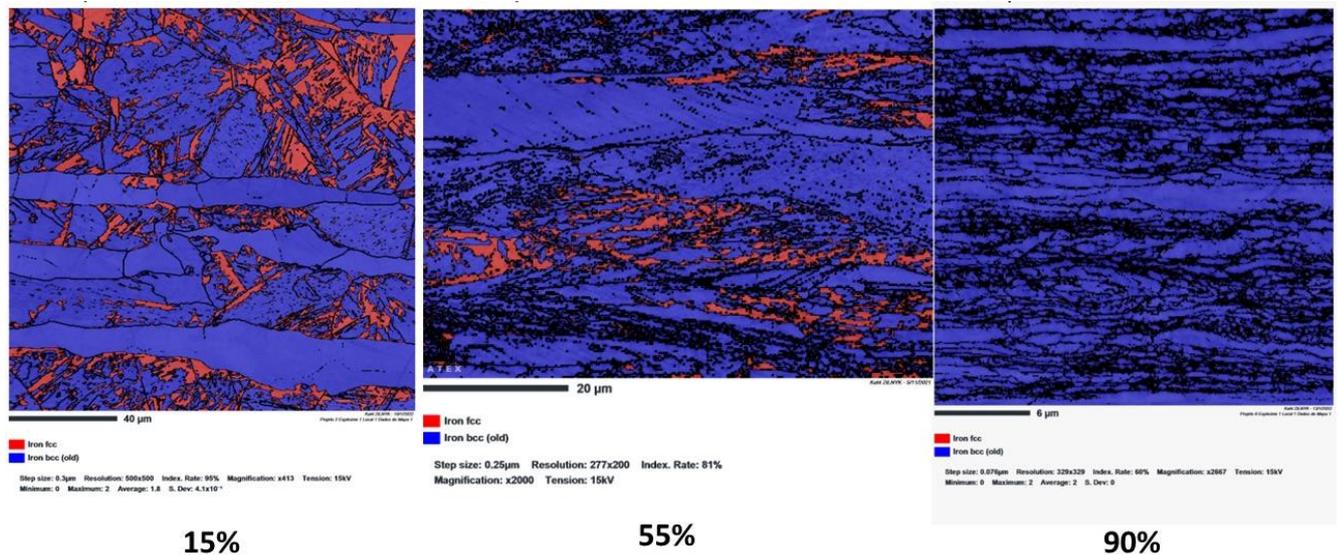


Figura 04 - Intensidades das fases austenita e martensita para amostra de 15%, 55% e 90%.

CONCLUSÕES

Desta forma, conclui-se que é verossímil induzir martensita mediante aplicação de deformação a frio em uma liga de aço inoxidável 17-7 PH e que há uma estreita relação entre evolução da transformação martensítica, propriedades mecânicas e grau de deformação. Além disso, inicialmente, a transformação é demasiadamente rápida visto deformações iniciais de redução de espessura é o suficiente para equiparar valores em relação a quantidade de cada fase. Coexistentemente a isso, percebe-se que laminações acima de aproximadamente 70% de redução de espessura não demonstrou elevar ou mudar propriedades mecânicas como por exemplo a dureza, uma vez que as amostras apresentaram praticamente 100% de martensita induzida por deformação devido ao encruamento alcançar o seu limite.

REFERÊNCIAS

1. ANDRADE, M.S.; VILELA, J.M.C.; GOMES, O.A.; DE CASTRO, A.L.R.; PINTO, T.B.; DE OLIVEIRA, N.J.L.; SERRANO, A.L.; DE MORAES, J.M.D. Martensite reversion in ABNT 304 austenitic stainless steel. 2003.
2. CAMBELL, Jr, Flake C. Manufacturing technology for aerospace structural materials. 2011.
3. TALONEN, Juho. Effect of Strain-Induced α' -Martensite Transformation on Mechanical Properties of Metastable Austenitic Stainless Steels. 2007.
4. SHIBUTANI, Y.; TANIYAMA, A.; TOMITA, Y.; ADACHI, T. Measurement of local strain-induced martensitic phase transformation by micro-hardness. Journal of the Society of Materials Science, v. 46, p. 893 - 899, 1997.
5. CHIU, P.K.; WENG, K.L.; WANG, S.H.; YANG, J.R.; HUANG, Y.S.; FANG, J. Low-cycle fatigue-induced martensitic transformation in SAF 2205 duplex stainless steel. Materials Science and Engineering A, v. 398, p. 349 – 359, 2005
6. CHIU, P.K.; WANG, S.H.; YANG, J.R.; WENG, K.L.; FANG, J. The effect of strain ratio on morphology of dislocation in low cycle fatigued SAF 2205 DSS. Materials Chemistry and Physics, v. 98, p. 103 – 110, 2006.
7. HWANG, S.W.; JI, J.H.; LEE, E.G.; PARK, K. Tensile deformation of a duplex Fe-20Mn-9Al-0.6C steel having the reduced specific weight. Materials Science and Engineering A, v. 528, p. 5196 – 5203, 2011
8. ZHOU, Z., S. Wang, J. Li, Y. Li, X. Wu, Y. Zhu, Nano Mater. Sci., in press. 2019.
9. LEE, S.H., Lee, J.C., Choi, J.Y. Effects of deformation strain and aging temperature on strain aging behavior in a 304 stainless steel. Met. Mater, p. 21–26. 2010.

STUDY OF COLD DEFORMATION-INDUCED MARTENSITE IN ULTRA-HIGH STRENGTH STAINLESS STEEL.

ABSTRACT

The knowledge and mastery of metallic materials, especially stainless steels, is essential to modernize and sophisticate technologies of interest to national defense, especially for the aeronautical and aerospace industries to promote the effective development of new materials and processing routes. In this present work, the results obtained from the induction of martensite in stainless steel 17-7 PH by cold rolling are reported. Different specimens from the same sample were separated and cold-rolled until a reduction of 92% in thickness. After this, samples were mounted in resin and then microstructurally characterized by optical microscopy and X-ray diffraction, and mechanically characterized by Vickers hardness test. With this, was possible to determine the phase transformation kinetics, that is the quantity of induced martensite as a function of the deformation severity, and the evolution of the material hardness in order to observe the work hardening rate. Was found satisfactory results correlating these hardening mechanisms with the kinetics of deformation-induced martensite formation in order to better understand the concepts involved through these phenomena to enable the best route for mechanical processing of 17-7 PH stainless steel.

Keywords: *Stainless steel 17-7 PH. Martensite induction. Cold deformation. Precipitation hardening. Cold working.*