

PROJETO DE PESQUISA

**TRANSFORMAÇÃO MARTENSÍTICA INDUZIDA
POR DEFORMAÇÃO EM AÇOS INOXIDÁVEIS
AUSTENÍTICOS**

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Magnabosco

rodrmagn@fei.edu.br

Candidato: Paulo Henrique Perez Moreira

nº FEI: 219.308-4

phmoreira@metrosp.com.br

**Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica
Centro Universitário FEI**

RESUMO DO PROJETO

Durante a deformação plástica, aços inoxidáveis austeníticos podem apresentar endurecimento não só devido ao encruamento, mas também como resultado de transformação martensítica induzida por deformação (TMID). Duas são as TMID experimentadas pela austenita, havendo formação de martensita ϵ , de estrutura hexagonal compacta, e a martensita α' , de estrutura cúbica de corpo centrado e ferromagnética. Nota-se também que a temperatura e a taxa de deformação imposta podem também afetar a fração de martensita induzida por deformação. Assim, o objetivo deste trabalho é estudar a TMID de aços inoxidáveis austeníticos, que sofrerão diferentes graus de deformação a frio, em diferentes taxas de deformação e temperaturas, avaliando a fração de martensita α' e de martensita ϵ formadas, caracterizando as transformações de fase e correlacionando com as variáveis de deformação impostas. Os valores de fração volumétrica de martensita α' e de martensita ϵ serão obtidos por difratometria de raios-X, e serão comparados aos valores de fração volumétrica de martensita α' obtidos por medidas magnéticas em ferritoscópio, para comparação das técnicas.

Palavras-chave:

1. Aço inoxidável austenítico
2. Martensita
3. Difratometria de raios X
4. Transformação de fases
5. Transformação martensítica induzida por deformação

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aços com teores de cromo livre na matriz superiores a 11% tem a capacidade de formar película superficial aderente, não porosa e auto-regenerativa, chamada de película passiva; tal película, protegendo o aço da ação de agentes corrosivos (atmosfera, meios aquosos ou orgânicos), confere grande resistência à corrosão: estes aços, deste modo, recebem a denominação inoxidáveis. Além disso, a adição de outros elementos de liga (como molibdênio e nitrogênio) aumenta ainda mais a resistência à corrosão (SEDRIS, 1996).

Os aços inoxidáveis austeníticos recebem esta denominação por apresentarem a fase austenita (a estrutura CFC do ferro) estável inclusive em temperaturas inferiores a ambiente. Os mais comuns são modificações da clássica liga 18/8 (18% Cr e 8% Ni), um dos mais populares materiais resistentes à corrosão (SEDRIS, 1996; ASM, 1994). Dentre os mais comuns, o UNS S30100 foi originalmente desenvolvido para aplicações que demandem, aliada a resistência à corrosão, alta resistência mecânica, a qual é obtida graças a grande capacidade de encruamento, enquanto o UNS S32100 surgiu como uma modificação do aço UNS S30400 estabilizado ao Ti, para evitar a formação indesejável de carbonetos de cromo. Estes aços inoxidáveis, possíveis alvos deste estudo, apresentam a composição química nominal dada pela Tabela 1 e propriedades mecânicas típicas apresentadas na Tabela 2.

Tabela 1. Composição química nominal (% em massa) dos aços em estudo neste projeto (SEDRIS, 1996).

Aço (UNS)	Cr	Ni	C	Ti	Mn	Si	P	S	Fe
S30100	16-18	6-8	0,15	*.*.*					
					2,0	1,0	0,045	0,030	balanço
S32100	17-19	9-12	0,08	> 5.(%C)					

Tabela 2. Propriedades mecânicas típicas dos aços em estudo (SEDRIS, 1996)

Aço (UNS)	Limite de escoamento (MPa)	Limite de resistência (MPa)	Alongamento total em 50 mm (%)	Dureza (HRB)
S30100	276	758	60	85
S32100	241	620	45	80

Durante a deformação plástica, aços com composição química similar à dos aços UNS S30100 e UNS S32100 apresentam endurecimento não só devido ao encruamento, mas também como resultado de transformação martensítica induzida por deformação (TMID), particularmente em temperaturas abaixo da ambiente (SEDRIS, 1996). Duas são as TMID experimentadas pela austenita, havendo formação de martensita ϵ , de estrutura hexagonal compacta, e a martensita α' , de estrutura cúbica de corpo centrado e ferromagnética.

As TMID em aços inoxidáveis austeníticos são conhecidas e estudadas desde as décadas de 1950-1960 (REED, 1962), e vem sendo continuamente estudadas em inúmeros outros trabalhos (MITRA et al, 2004), (TALONEN, HÄNNINEN, 2004),

(HEDSTRÖM, 2005), (MÉSÁROS, PROHÁSZKA, 2005), (JOHANNSEN et al, 2006), (TALONEN, HÄNNINEN, 2007), (TAVARES et al, 2008), (DAS et al, 2008).

Para eliminar o encruamento e reverter a transformação martensítica, levando a uma estrutura de grãos de austenita, o aço UNS S30100 é recozido em temperaturas entre 1010°C e 1120°C. Isto evita a faixa de temperaturas onde é possível a precipitação de carbonetos de cromo (entre 425°C e 900°C), além de permitir a total dissolução de carbonetos deste tipo possivelmente presentes na estrutura. Tal procedimento, aliado a resfriamento rápido após o recozimento, mantém o carbono e o cromo em solução sólida, aumentando a resistência a corrosão, particularmente a intergranular (ASM, 1994).

Reduções de espessura em laminação a frio de até 65% levam a formação de até 68% em volume de martensita α' em aços inoxidáveis austeníticos (MITRA et al, 2004), (TALONEN, HÄNNINEN, 2004), (MÉSÁROS, PROHÁSZKA, 2005), sendo o aumento da fração de martensita α' proporcional a redução a frio imposta ao aço, como exemplificado na Figura 1; nesta figura, é interessante notar que a fração de martensita α' , ferromagnética, apresenta-se com valores distintos se medida por ferritoscópio ou por cálculos sobre os resultados de difratometria de raios-X, de modo semelhante ao já observado por este grupo de pesquisa em trabalhos com aço inoxidável dúplex (MAGNABOSCO, SPOMBERG, 2011).

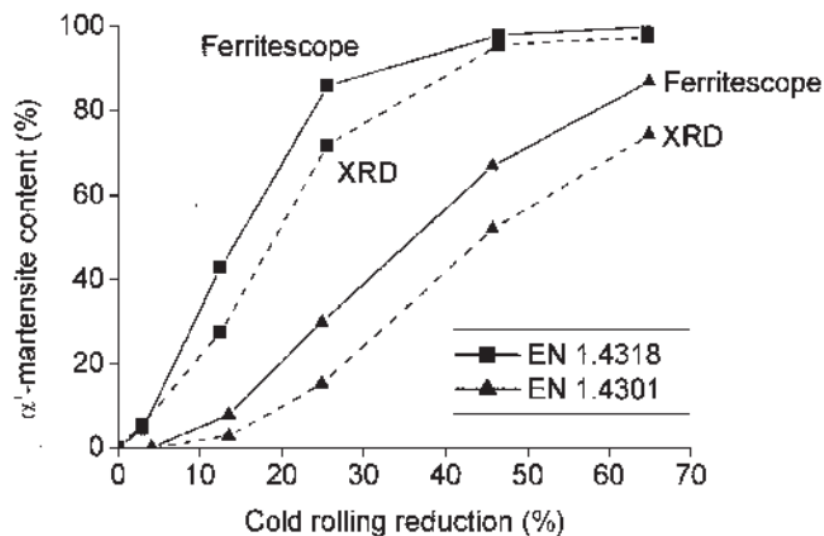


Figura 1. Fração de martensita α' em dois aços inoxidáveis austeníticos em função da redução de espessura imposta em laminação a frio (TALONEN, HÄNNINEN, 2004).

Apesar de vários trabalhos (JOHANNSEN et al, 2006), (TALONEN, HÄNNINEN, 2007), (TAVARES et al, 2008) apresentarem estudos de difratometria de raios-X aplicados na caracterização da TMID de aços inoxidáveis austeníticos, poucas são as citações sobre a cristalografia da martensita ϵ , e também por este motivo raras são as informações cristalográficas sobre esta fase e sua quantificação. TALONEN e HÄNNINEN (2007) apresentam o difratograma de raios-X da Figura 2, obtido com radiação $\text{Co K}\alpha_1$ para aço UNS S30100 deformado a deformação plástica verdadeira de 0,09, a 3.10^{-4} s^{-1} e -40°C , onde é possível distinguir picos das três fases presentes após a

deformação de um aço austenítico passível de TMID: a matriz de austenita (γ) e a martensita ϵ , paramagnéticas, e a martensita α' , ferromagnética.

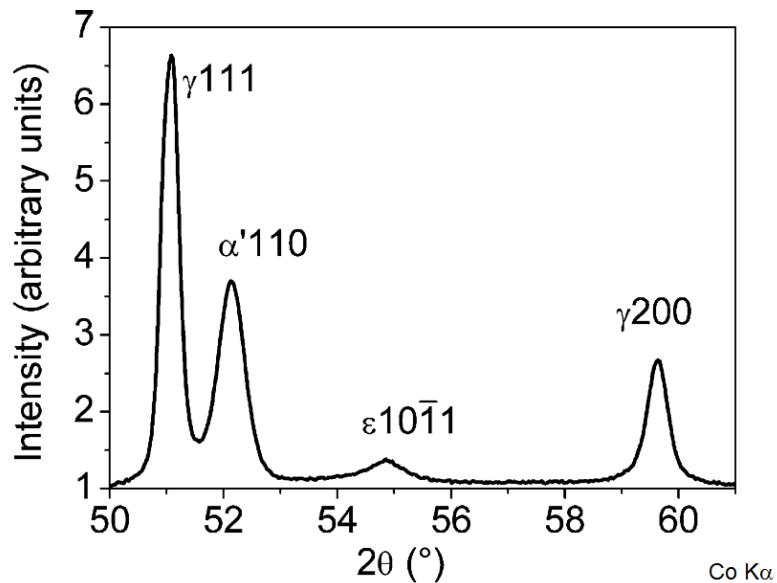


Figura 2. Difratoograma de raios-X obtido com radiação Co $K\alpha$ 1 para aço UNS S30100 com deformação plástica verdadeira de $0,09$ a $3 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ e -40°C (TALONEN, HÄNNINEN, 2007).

Assim, de posse das informações cristalográficas das fases γ , α' e ϵ presentes na literatura (JOHANNSEN et al, 2006), (TALONEN, HÄNNINEN, 2007), (TAVARES et al, 2008) é possível a construção da Tabela 3, que traz para diferentes planos cristalográficos destas fases o ângulo de difração de cada pico nas três usuais radiações utilizadas na difratometria de raios-X de caracterização de materiais. Nota-se que se usada a radiação de Cr $K\alpha$ 1 ($\lambda=0,22897 \text{ nm}$) é possível a melhor separação entre os picos das diferentes fases, permitindo sua caracterização e talvez sua quantificação, adaptando-se a metodologia descrita em TALONEN e HÄNNINEN (2007).

Tabela 3. Informações cristalográficas das fases γ , α' e ϵ presentes nos aços inoxidáveis austeníticos passíveis de TMID. (JOHANNSEN et al, 2006), (TALONEN, HÄNNINEN, 2007), (TAVARES et al, 2008).

Fase	Plano	d (nm)	Cr $K\alpha$ 1	Co $K\alpha$ 1	Cu $K\alpha$ 1
			($\lambda=0,22897 \text{ nm}$)	($\lambda=0,178897 \text{ nm}$)	($\lambda=0,154056 \text{ nm}$)
			2 θ ($^\circ$)		
γ	(1 1 1)	0,208	66,8	50,9	43,5
	(2 0 0)	0,180	79,0	59,6	50,7
	(2 2 0)	0,127	128,7	89,6	74,7
α'	(1 1 0)	0,203	68,7	52,3	44,6
	(2 0 0)	0,144	105,8	77,1	64,9
	(1 1 1)	0,117	155,3	99,5	82,2
ϵ	(1 0 $\bar{1}$ 1)	0,194	72,4	54,9	46,8

PROJETO DE PESQUISA

Objetivos

O objetivo deste trabalho é estudar a TMID de aços inoxidáveis austeníticos, que sofrerão diferentes graus de deformação a frio, em diferentes taxas de deformação e temperaturas, avaliando a fração de martensita α' e de martensita ϵ formadas, caracterizando as transformações de fase e correlacionando com as variáveis de deformação impostas. Os valores de fração volumétrica de martensita α' e de martensita ϵ serão obtidos por difratometria de raios-X, e serão comparados aos valores de fração volumétrica de martensita α' obtidos por medidas magnéticas em ferritoscópio, para comparação das técnicas.

Metodologia

Os possíveis aços para estudo (UNS S30100 e UNS S32100) já são de propriedade do Centro de Desenvolvimento de Materiais Metálicos – CDMatM-FEI – e foram obtidos como chapas de 1 mm de espessura, e para o aço UNS30100 também na forma de barras cilíndricas usinadas como corpos-de-prova de tração. Os materiais serão solubilizadas para que o teor de fase magnética nas amostras seja ínfimo, garantindo a formação de uma estrutura austenítica. A composição química nominal dos dois aços pode ser constatada na Tabela 1, já apresentada. A temperatura ideal de solubilização será obtida através de simulação do equilíbrio termodinâmico usando-se o Thermo-Calc[®], e a base de dados TCFE9.

Os dois aços serão laminados a temperatura ambiente no laminador de planos do Departamento de Engenharia de Materiais da FEI, com reduções de espessura de 0% a 55%, gerando 12 amostras de cada aço, com valores crescentes de redução de espessura de 5% executando-se a laminação em pelo menos três temperaturas: ambiente, -40 °C e -196 °C. Os corpos de prova de tração serão solicitados em tração na máquina universal de ensaios MTS até em pelo menos 3 valores de deformação plástica uniforme, em diferentes taxas de deformação, à temperatura ambiente e à -196 °C.

Avaliação visual das TMID será realizada por microscopia óptica (MO) após ataque eletrolítico de ácido oxálico a 6 Vcc por 15 a 30s.

Todas as amostras serão analisadas no difratômetro de raios-X Shimadzu XRD-7000 do Centro Universitário FEI, utilizando-se radiação de Cu $K\alpha_1$ ou Cr $K\alpha_1$, permitindo a detecção, quando possível, de todos os picos de difração apresentados na Tabela 3. A varredura será conduzida a taxa de 1°/min, com passo de 0,02°. Com os difratogramas, além de se identificar as fases presentes em cada aço em função da deformação aplicada, pretende-se quantificar a fração de martensita α' e de martensita ϵ formadas, em função da deformação plástica imposta, a partir da análise dos difratogramas obtidos usando a metodologia descrita por TALONEN e HÄNNINEN (2004). Os valores de fração volumétrica de martensita α' obtidos por difratometria serão comparados aos obtidos por medidas magnéticas em ferritoscópio, para comparação das técnicas.

Plano de trabalho e cronograma

Para cumprir as metas anteriormente propostas, o trabalho será dividido conforme descreve o cronograma mostrado na Tabela 4.

Tabela 4. Cronograma global de atividades do projeto.

Atividade	meses															
	Jun/20	Jul/20	Ago/20	Set/20	Out/20	Nov/20	Dez/20	Jan/21	Fev/21	Mar/21	Abr/21	Mai/21	Jun/21	Jul/21	Ago/21	
Finalização de créditos																
Tratamentos térmicos																
Deformação plástica																
Análises metalográficas																
DRX																
Análise dos resultados																
Exame de qualificação																
Finalização e defesa																

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASM, 1994, "Heat treating" IN: ASM Specialty Handbook – Stainless Steels, ASM, Metals Park, USA, pp. 290-313.
2. ASTM E 112-96A, "Standard test methods for determining average grain size", ASTM – American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA, 1997, Committee E-4, pp. 1-23.
3. DAS, A. et al., 2008, "Morphologies and characteristics of deformation induced martensite during tensile deformation of 304 LN stainless steel", Materials Science and Engineering A, v. 486, 2008, p. 283–286
4. HEDSTRÖM, P., 2005, "Deformation induced martensitic transformation of metastable stainless steel AISI 301", Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, 75p.
5. JOHANNSEN, D. L. et al, 2006, "Influence of Annealing Treatment on the Formation of Nano/Submicron Grain Size AISI 301 Austenitic Stainless Steels", Metallurgical and Materials Transactions A, v. 37A, ago. 2006, p. 2325-2338.
6. MAGNABOSCO, R.; SPOMBERG, S., 2011, "Comparative study of ferrite quantification methods applied to duplex stainless steels". In: 7th European Stainless Steel Conference - Science and Market: Proceedings. AIM, 2011.
7. MÉSÁROS, I.; PROHÁSZKA, J., 2005, "Magnetic investigation of the effect of α' -martensite on the properties of austenitic stainless steel", Journal of Materials Processing Technology, v. 161, 2005, p. 162–168.
8. MITRA, A. et al, 2004, "Ferromagnetic Properties of Deformation-Induced Martensite Transformation in AISI 304 Stainless Steel", Metallurgical and Materials Transactions A, v. 35A, fev. 2004, p. 599-605.
9. REED, R. P., 1962, "The spontaneous martensitic transformations in 18% Cr, 8% Ni Steels", Acta Metallurgica, v. 10, set. 1962, p. 865-77.
10. SEDRIKS, A. J., 1996, "Corrosion of stainless steels". Wiley-Interscience:New York, 1996 pp. 13-24.
11. TALONEN, J; HÄNNINEN, H., 2004, "Damping Properties of Austenitic Stainless Steels Containing Strain-Induced Martensite", Metallurgical and Materials Transactions A, v. 35A, ago. 2004, p. 2401-2406.
12. TALONEN, J; HÄNNINEN, H., 2007, " Formation of shear bands and strain-induced martensite during plastic deformation of metastable austenitic stainless steels", Acta Materialia, v. 55, 2007, p. 6108-6118.
13. TAVARES, S. S. M. et al., 2008 "Magnetic properties and α' martensite quantification in an AISI 301LN stainless steel deformed by cold rolling", Materials Characterization, v. 59, 2008, p. 901– 904.