

# A FORMAÇÃO DE MARTENSITA DURANTE TREFILAÇÃO DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 302

MB. Tessler, IGS. Falleiros\*

## RESUMO

A transformação martensítica induzida por deformação nos aços inoxidáveis é tecnologicamente muito importante. Aços inoxidáveis onde a transformação martensítica induzida por deformação ocorre são chamados metaestáveis e possuem elevada resistência mecânica. O aço ABNT 302, estudado neste trabalho, por exemplo, tem grande aplicação na fabricação de molas. Neste caso, a elevada resistência mecânica é resultado da elevada taxa de encruamento na trefilação, como resultado da formação de martensita. A fração de martensita no ABNT 302 aumenta continuamente com a deformação. Os resultados de difração e medidas magnéticas mostram que o teor de martensita atinge 40% após trefilação. Os resultados de propriedades mecânicas mostram que na temperatura de trefilação a taxa de encruamento é maior que na temperatura ambiente. O expoente de encruamento varia com a deformação e isto é explicado pela formação de martensita durante o ensaio de tração.

Aços Villares, S. Caetano do Sul  
\*Aços Villares e Escola Politécnica USP

## INTRODUÇÃO

O ABNT 302 é o principal aço inoxidável usado na fabricação de molas. Ele apresenta resistência à corrosão e possui alta resistência mecânica após deformação, devido à sua elevada taxa de encruamento. Isto ocorre pela baixa energia de defeito de empilhamento e pela formação de martensita induzida por deformação. <sup>(1)</sup>

Existem dois tipos de martensita induzida por deformação. Uma é cúbica de corpo centrado e ferromagnética, enquanto a outra é hexagonal e paramagnética. A formação de martensita causa aumento na permeabilidade magnética e aços metaestáveis deformados são atraídos por um ímã. <sup>(2,3)</sup>

A formação de martensita depende da temperatura e nível de deformação, composição química e estado de tensões. Com a diminuição da temperatura de deformação ocorre aumento no teor de martensita formada. Com o aumento na intensidade de deformação também ocorre elevação na fração de martensita. <sup>(4)</sup>

A influência da composição química na formação de martensita induzida por deformação é descrita pela seguinte equação:

$$Md_{50} (\text{°C}) = 497 - 462 \left( (\%C) + (\%N) \right) - 9,2 (\%Si) - 8,1 (\%Mn) - 13,7 (\%Cr) - 20 (\%Ni) - 18,5 (\%Mo)$$

$Md_{50}$  é a temperatura em que ocorre a formação de 50% de martensita com uma deformação verdadeira igual a 0,3. Quanto maior for o valor  $Md_{50}$ , maior será a tendência do material em formar martensita induzida por deformação.

A equação acima foi desenvolvida para tensões de tração em estado uniaxial. Se o estado de tensões for hidrostático de compressão, a fração de martensita formada será menor. <sup>(5)</sup>

Com a formação de martensita ocorre queda na resistência à corrosão do aço por haver aumento na quantidade de defeitos estruturais que funcionam como local para nucleação de pites. Além de prejudicar a resistência à corrosão por pite, a formação de martensita provoca queda na resistência à corrosão intergranular do aço. <sup>(6)</sup>

## PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A composição do material estudado neste trabalho é mostrada na Tabela I. O tarugo desta corrida foi laminado para fio máquina  $\phi$  8mm e solubilizado a 1060°C.

O aço foi trefilado para arame com diâmetro igual a 3,0mm. Após cada passe, foram retiradas amostras para levantamento da curva de encruamento.

As amostras para metalografia foram retiradas dos arames com 88% de redução de área. Foi usado ataque eletrolítico com solução  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8 + \text{K}_2\text{S}_2\text{O}_7$ .

A fração de martensita foi determinada por medidas magnéticas junto com a difração de raios-X. A martensita medida por difração na bitola de 3,20mm foi usada como padrão para determinação da martensita em todas as outras bitolas, através da medida da permeabilidade magnética. <sup>(6)</sup>

A temperatura do arame durante a trefilação foi estimada por um modelo de transferência de calor. Foi medido o perfil de aquecimento da água (dentro de uma caixa de isopor) que estava em contato com o arame saindo da fieira. Para detalhes, ver referência 6.

Os ensaios de tração foram feitos com o material solubilizado na temperatura de trefilação. A velocidade de deformação foi  $0,001\text{s}^{-1}$ . O expoente de encruamento foi calculado pela inclinação da curva  $\ln$  (tensão verdadeira) em função de  $\ln$  (deformação verdadeira).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A curva de encruamento do aço 302 é mostrada na Figura 1. O limite de resistência aumenta de 600 MPa para 1850 MPa após 90% de redução. A ductilidade, medida pela redução de área na fratura, diminui de 60% para 25%.

O teor de martensita em diferentes níveis de deformação é mostrado na Figura 2. Ele aumenta continuamente e atinge 40% após 90% de redução em área. A martensita, como uma fase dura, desempenha um papel importante na elevada taxa de encruamento deste aço, como observado na Figura 1. Além disto, a presença de martensita no aço 302 torna-o ferromagnético e assim o aço deformado é atraído por um ímã.

As microestruturas do arame deformado são mostradas nas Figuras 3 e 4. Pode-se observar a martensita induzida por deformação e a austenita retida. Os pontos negros são pites originados no ataque eletrolítico. Mesmo após 88% de redução, nem toda austenita se transformou em martensita. A transformação martensítica ocorre com expansão volumétrica, criando tensões de compressão na austenita retida. Estas tensões atrapalham o prosseguimento da reação.

A Figura 4 mostra a martensita induzida por deformação com maior aumento. Pode-se observar que se trata de uma martensita tipo ripa.

Os resultados da simulação matemática mostraram que a temperatura do arame durante a trefilação é aproximadamente 80°C. A elevação de temperatura é resultado da elevada taxa de deformação e do atrito entre o arame e a fieira.

A Figura 5 mostra o comportamento do aço 302 durante ensaio de tração a 80°C. A curva pode ser dividida em duas partes com dois expoentes de encruamento. O expoente de encruamento no primeiro trecho é 0,31 enquanto no segundo é 0,70. Este comportamento está associado a formação de martensita durante o ensaio e é típico dos aços metaestáveis. Nas ligas estáveis o expoente de encruamento não aumenta com a deformação. <sup>(7)</sup>

O expoente de encruamento global a 80°C é 0,57. O resultado do ensaio de tração a 25°C indicou um expoente de encruamento igual a 0,38. Este aumento da taxa de encruamento com a temperatura pode ser explicado pela interação entre os átomos de carbono e as discordâncias nas temperaturas mais elevadas.

## CONCLUSÕES

As seguintes conclusões podem ser descritas sobre a trefilação do aço ABNT 302:

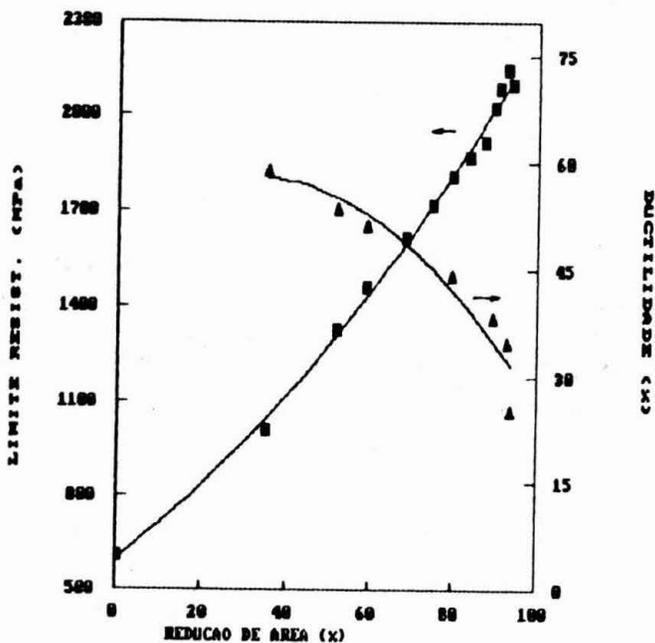
- O limite de resistência aumenta de 600 MPa para 1850 MPa após 90% de redução de área. Enquanto isto, a ductilidade diminui de 60% para 25%.
- A fração de martensita atinge 40% após 90% de redução de área.
- A taxa de encruamento durante o ensaio de tração depende do nível de deformação. Na temperatura de trefilação, aproximadamente 80°C, ela aumenta mais de 100%.
- A taxa de encruamento na temperatura de trefilação é 50% maior que na temperatura ambiente.

## REFERÊNCIAS

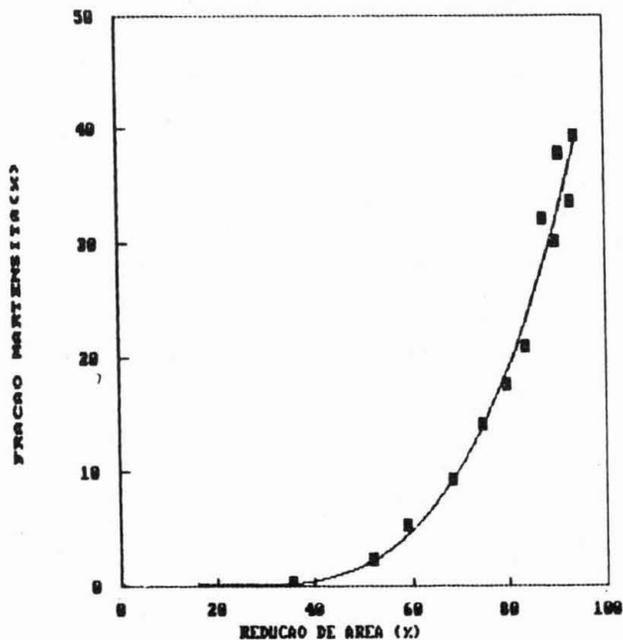
- 1) M. BOMBEKE, Quelques Remarques Sur Le Comportement Des Aciers Inoxydables Austeniteques Lors Du Tréfilage O Froid. Revue de Metallurgie, dec. (1976), p. 801.
- 2) R. P. REED, Martensitic Transformation in Fe-Cr-Ni Stainless steels. Austenitic Stainless Steels at Low Temperatures, (1982), Plenum Press, p.41.
- 3) F. LECROISEY and A. PINEAU, Martensitic Transformations Induced by Plastic Deformation in the Fe-Ni-Cr System. Metal. Transact, vol.3, fev. (1972).
- 4) J. SINGH, Influence of Deformation on the Transformation of Austenitic Stainless Steel. J. of Mater. Science, 20, (1985).
- 5) M. BOWKETT and D. HARRIES, Martensitic Transformation in Cold Rolled Type 321 Austenitic Stainless Steel. Harwell Publication, april, (1978).
- 6) M. TESSLER, A Formação de Martensita Durante Trefilação do Aço Inoxidável AISI 302. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica USP, (1992).
- 7) V. SEETHARAMAN and R. KRISHON, Influence of the Martensite Transformation on the Deformation Behaviour of AISI 316 Stainless Steel at Low Temperatures. J. of Mater. Science, 16, (1981).

C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	Cu	Co	P	S	N
0,080	0,60	1,42	8,72	18,10	0,09	0,10	0,05	0,027	0,014	0,04

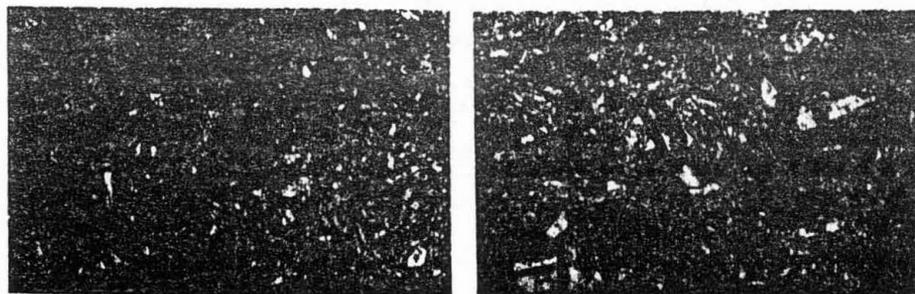
**Tabela I** - Composição química do aço investigado.



**Figura 1** - Efeito do nível de deformação no limite de resistência e na ductilidade.



**Figura 2** - Efeito do nível de deformação na fração de martensita.



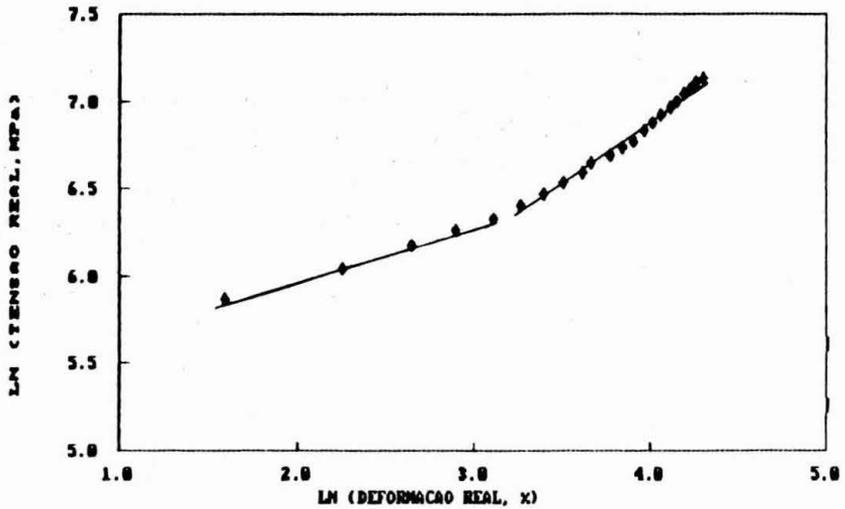
(a)

(b)

**Figura 3** - Microestrutura da seção transversal do arame após 88% de redução. (a) 100x, (b) 200x.



**Figura 4** - Microestrutura da seção transversal do arame após 88% de redução. Aumento: 500x.



**Figura 5** - Valores de Ln (tensão real) em função de Ln (deformação real) durante ensaio de tração a 80°C.

## ABSTRACT

Strain Induced martensite transformation in stainless steels is technologically very important. Its occurrence during cold working causes significant changes in mechanical and magnetic properties and in corrosion resistance. Stainless steels where strain induced martensite transformation occur are called metastable. These steels have high mechanical strength. AISI 302 investigated here, for instance, has wide application in spring fabrication. In this case, high strength is due to high strain hardening in wire drawing process, as a result of martensite formation.

Martensite fraction in AISI 302 increases steadily with deformation level. The results of X ray diffraction and magnetic measurements show that martensite content reach about 40% after cold working in wire drawing. The results of mechanical testing show that work hardening at wire drawing temperature (around 80°C) is higher than at room temperature. Work hardening exponent changes with deformation, and this is explained by martensite formation during the test.

