

# UMA DISCUSSÃO A RESPEITO DE ALGUNS ASPECTOS RELEVANTES À SELEÇÃO DE AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS DA SÉRIE 304 SUBMETIDOS À DEFORMAÇÃO PLÁSTICA A FRIO DURANTE A FABRICAÇÃO

Jan Vatauk\*  
Susana Marraccini Giampietri Lebrão\*\*  
Adayr Bôrro Jr\*\*\*

## Resumo

O presente trabalho relata uma sistemática na escolha entre as ligas 304 e 304 L, levando em conta o desempenho em aplicações específicas de componentes durante e após a fabricação. Para tanto, é realizada uma análise, através de técnica metalográfica e teste de dureza, de componente que em sua rota de fabricação é submetido ao processo de estampagem, e que apresenta comportamento normal quando é utilizada a liga 304, porém falha quando confec-

- \* Doutor em Engenharia Metalúrgica e de Materiais. Professor do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e graduação em Engenharia de Materiais da Universidade Presbiteriana Mackenzie.
- \*\* Doutora em Engenharia Metalúrgica e de Materiais EPUSP. Professora Associada do Departamento de Engenharia Mecânica e Metalúrgica da Escola de Engenharia Mauá.
- \*\*\* Mestre em Engenharia Metalúrgica. Professor do Programa de Graduação da Universidade Presbiteriana Mackenzie.

cionado com aço inoxidável austenítico AISI 304 L, apresentando trincas durante a estampagem. Discute-se também o problema de componentes que não devem ser magnéticos, mas que assumem esta característica durante processos de fabricação nos quais é imposta deformação plástica a frio quando fabricados com a liga 304 L. Nesse caso a solução é a utilização do aço 304, já que a deformação plástica a frio não é muito intensa nesta aplicação, sendo também apresentada uma metodologia para recuperar os componentes que se encontram magnéticos, por meio de tratamento térmico.

Todos os problemas supra expostos são discutidos à luz da estabilidade da austenita quando submetida à deformação plástica a frio, situação em que pode ocorrer a presença de martensita induzida por deformação plástica, levando-se em conta também as modernas especificações em termos de teores de carbono para os aços inoxidáveis austeníticos.

### **Abstract**

The present work deals with the materials selection criteria for a good choice between the 304 and 304L stainless steels for drawing operation. A trouble shoot analysis was carried out in a 304L stainless steel failed during a deep drawing operation. The high work hardening rate promoted by a high volume fraction of strain induced martensite formed during the plastic deformation, was responsible for these fail. A higher carbon content 304 stainless steel was the solution for these problem leading to better behavior in these drawing operation. A manufacturing problem related on components that must be free of magnetism was carried out. The 304L stainless steel became magnetic during cold forming due to strain induced martensite. A higher carbon content stainless steel, as grade 304, avoid strain induced martensite in these application. To restore the nonmagnetic nature of the 304 L stainless steel, a heat treatment of 40 minutes at 700°C was carried out.

All the problems and solutions presented in these paper were discussed on theoretical basis about austenite stability in terms of strain induced martensite.

# 1 INTRODUÇÃO

A estabilidade da austenita em ligas da série 3XX em termos da formação de martensita por deformação plástica a frio será abordada neste estudo, e por essa razão, antes de dar início a esta exposição, será apresentada uma tabela de composição química nominal para as ligas que serão referidas no texto<sup>1</sup>.

TABELA 1

Composição química (% em peso)

Tipo	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo
301	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	16,00-18,00	6,00- 8,00	
302	0,15	2,00	1,00	0,045	0,030	17,00-19,00	8,00-10,00	
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00-20,00	8,00-10,50	
316	0,08	2,00	1,50	0,045	0,030	16,00-18,00	10,00-14,00	2,00-3,00
310	0,08	2,00	1,50	0,045	0,030	24,00-26,00	19,00-22,00	

De uma maneira geral encontram-se indicações de que a taxa de encruamento (endurecimento causado pela deformação plástica a frio) de uma liga 304 é maior se comparada a uma 316 e 310, principalmente quando a temperatura de ensaio de tração é reduzida<sup>2</sup>, e que o aço 301 responde de forma ainda mais acentuada, encruando mais do que o 304<sup>1</sup>. Esse comportamento indica que à medida que se reduz a presença de elementos de liga – o menor teor é para o 301 seguido do 304 conforme a tabela 1, ocorre uma maior quantidade de martensita formada para um determinado grau de deformação plástica a frio<sup>1,2</sup>.

Estudo conduzido em aços 310, 301 e 302 indica que as ligas metaestáveis (301 e 302) exibem maior incremento do limite de escoamento com trabalho mecânico a frio em função da martensita induzida por deformação plástica a frio<sup>2</sup>.

De uma maneira geral é linguagem corrente na literatura que a transformação da austenita por deformação plástica a frio pode gerar a martensita  $\alpha'$  e a martensita  $\epsilon$ . A primeira é cúbica de corpo centrado e magnética, já a martensita  $\epsilon$  possui estrutura cristalina hexagonal compacta, sendo não magnética e de difícil identificação através de microscopia óptica. A martensita  $\alpha'$  ocorre com expansão volumétrica da ordem de 2,57%, já a  $\epsilon$  gera contração de 0,81%<sup>3</sup>.

A martensita  $\epsilon$ , hexagonal compacta, pode ser concebida a partir da estrutura austenítica FCC, cujo empilhamento é do tipo ABCABC, inserindo-se de forma regular uma falha de empilhamento a cada segundo plano do tipo {111} de modo que nesta região o empilhamento se torne do tipo ABAB. Existem indicações na lite-

ratura relacionando a energia de defeito de empilhamento com a presença da martensita  $\epsilon$ , de tal maneira que quanto menor esta energia maior a propensão para a formação da última por deformação plástica a frio. A martensita  $\alpha'$  se forma na intersecção entre os diferentes caracteres gerados pela deformação plástica, como bandas de deformação, maclas mecânicas, falhas de empilhamento e martensita  $\epsilon$ . Existem expressões que buscam correlacionar o início da formação da martensita  $\alpha'$  por deformação plástica, como pode ser visto a seguir:

$$Md (\alpha') (30/50) = 413 - 9.5\%Ni - 13.7\%Cr - 8.1\%Mn - 9.2\%Si - 18.5\%Mo - 462\%(C+N) \quad (1)$$

onde  $Md (\alpha') (30/50)$  é a temperatura na qual 50% de martensita  $\alpha'$  é formada após deformação plástica real de 30%<sup>1</sup>.

Pode-se observar mediante análise dos fatores apresentados na equação anterior que o carbono e o nitrogênio apresentam um forte efeito na estabilidade da austenita, de tal modo que as classes de aço inoxidável de carbono extra baixo, como por exemplo o 304 L, se tornam muito sensíveis à transformação martensítica, reduzindo seu desempenho em aplicações de hidrogênio de alta pressão<sup>1</sup>.

O controle da transformação martensítica durante a deformação plástica a frio pode resultar em ligas com características superiores no que se refere a processos de conformação a frio, sendo este o caso dos aços TRIP (Transformation Induced Plasticity), desenvolvidos para aplicações de estampagem profunda<sup>1</sup>.

A reversão da martensita  $\epsilon$  para austenita ocorre na faixa de temperatura de 150°C a 400°C, enquanto a reversão da martensita  $\alpha'$  para austenita ocorre entre 400°C e 800°C<sup>3</sup>.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

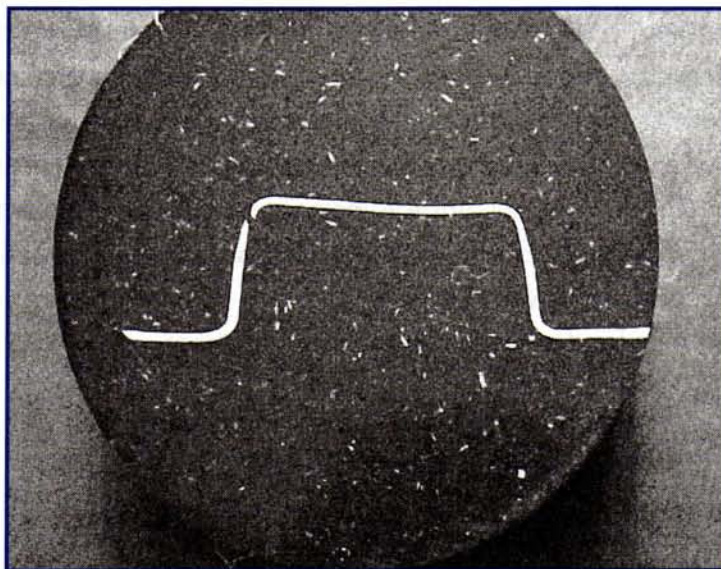
A composição química nominal das ligas 304 e 304 L são apresentadas na Tabela 2, sendo utilizada nos dois casos que serão discutidas.

TABELA 2

Composição química nominal (% em peso)

	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni
304	0,08	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00-20,00	8,00-10,50
304 L	0,03	2,00	1,00	0,045	0,030	18,00-20,00	8,00-10,50

**Caso 1** A Figura 1 apresenta a secção transversal da peça estampada, na qual pode ser observada a trinca originada durante a estampagem. Para este estudo foi possível obter a composição química (% em peso) em termos de carbono e nitrogênio, sendo para o 304 (C = 0,051%; N = 0,0380), e para o 304 L (C = 0,018; N = 0,0390).



**Figura 1** Secção transversal da peça falhada fabricada em 304 L. A seta indica região falhada com um aumento aproximado de 2 vezes.

Os componentes, falhado (304 L) e não falhado (304) durante a etapa de fabricação na qual é realizada a estampagem, foram submetidos à análise metalográfica, tendo sido utilizado um reativo Behara para se revelar a presença da martensita de deformação. (Utilizou-se em volume uma parte de HCl em 5 partes de água, sendo que 100 ml desta solução e 1g de metabissulfito de potássio formam a solução de estoque. O reativo foi obtido através de 100 ml da solução de estoque, 2 g de bifluoreto de amônio 1g de metabissulfito. Realizou-se um ataque por imersão de 5 a 8 segundos).

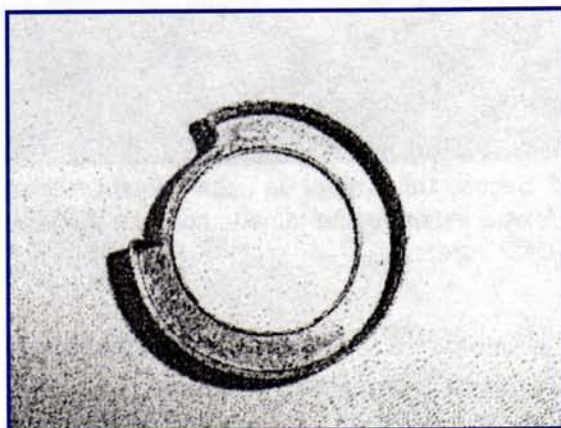
Essas amostras foram também submetidas ao ensaio de dureza Vickers com carga de 1 Kgf em região equivalente e próxima à falha. Os valores de dureza apresentados correspondem a média de cinco impressões, com desvio padrão sempre inferior a 10% do valor da média. O tamanho de grão inicial da matéria-prima era 7 a 8, segundo classificação ASTM E 112-88.

**Caso 2** Um outro componente fabricado em 304 L (veja a Figura 2), no qual a ausência de magnetismo era necessária para a sua utilização prática, foi submetido a tratamento térmico após conformação a frio, nas temperaturas de 400°C, 500°C, 600°C e 700°C por 40 minutos, com o intuito de reverter a martensita, eliminando o magnetismo gerado durante o processo de estampagem. Esta metodologia corretiva permite a recupera-



ção das peças, porém nem sempre pode ser praticada dentro de uma determinada empresa, pois, para tanto, torna-se necessária a utilização de fornos, além da aplicação de processo de decapagem para remoção da coloração gerada pela oxidação decorrente do tratamento térmico. As medidas magnéticas utilizadas nesta investigação consistiram em encostar a região deformada em um ímã, e estimar a dificuldade em se desfazer o contato, subtendendo a peça desde a condição de estampada até estampada e tratada termicamente nas temperaturas referidas. Essas medidas foram, portanto qualitativas, servindo apenas como indicação do efeito do tratamento térmico, principalmente quando o magnetismo não podia ser mais mensurado. Outra medida, essa de caráter preventivo, foi a utilização de uma liga 304 para a fabricação desse componente, a fim de não gerar magnetismo durante a fabricação. Essa sugestão resolveu o problema, contudo os resultados não serão apresentados neste estudo.

A Tabela 2 será utilizada nas discussões dos dois casos.



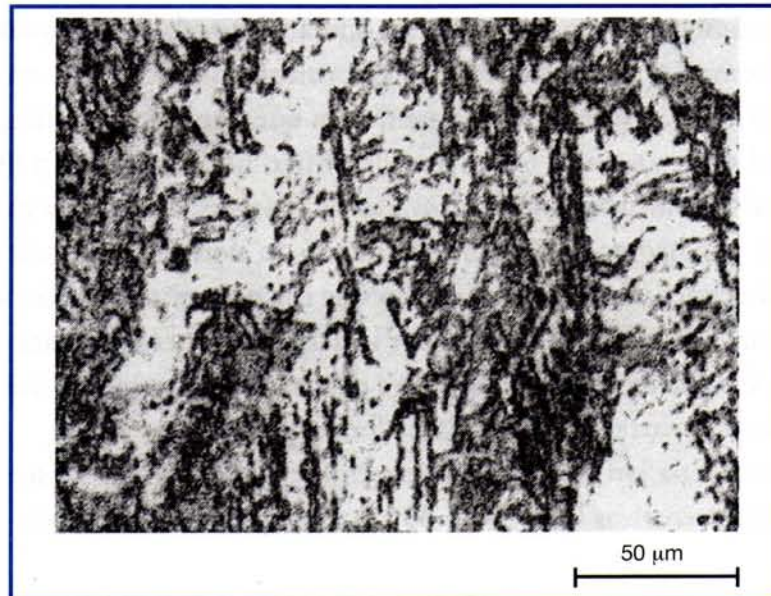
**Figura 2** Componente que não pode apresentar magnetismo. Aumento aproximado de 1 vez.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

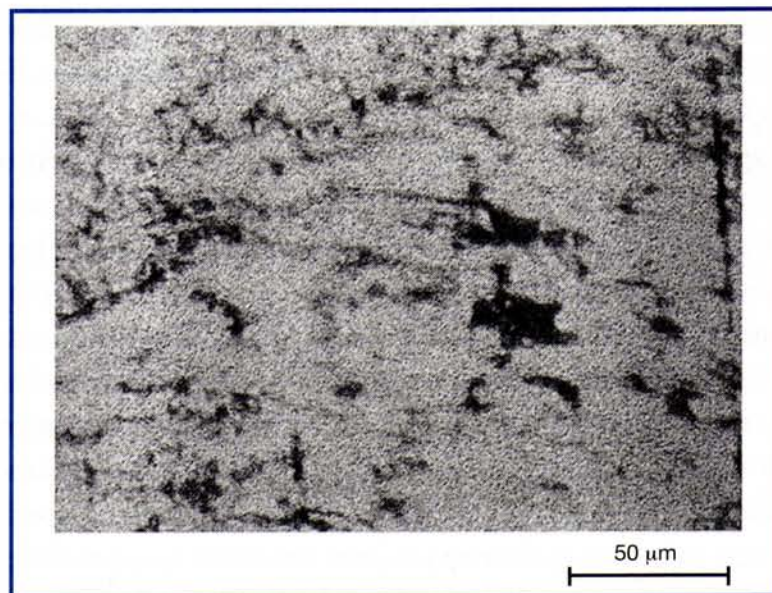
**Caso 1** As Figuras 3 e 4 são fotomicrografias em região equivalente para a liga falhada (304 L) e não falhada (304), respectivamente.

Pode-se observar mediante a análise das Figuras 3 e 4 que o componente que falhou durante a estampagem apresenta em sua microestrutura uma quantidade de martensita superior em relação à peça não falhada. Os valores de dureza (média de cinco impressões) obtidos nessa região para os dois componentes corrobora o supra exposto, pois o componente fabricado em 304 L correspondente à Figura 3 atingiu

395 HV<sub>1</sub> próximo à falha, enquanto a liga 304 não ultrapassou 325 HV<sub>1</sub> em região equivalente, indicando uma menor presença de martensita neste.



**Figura 3** Microestrutura da peça falhada (304 L) próxima da região fraturada. Região azulada corresponde à martensita. Aumentada aproximadamente de 400 vezes.



**Figura 4** Microestrutura da peça não falhada (304) em região equivalente à apresentada na Figura 3. Região azulada corresponde à martensita aumentada aproximadamente 400 vezes.

O exame da Figura 3 em conjunto com a Figura 1 permite inferir que mesmo na presença de martensita (Figura 3) a fratura da região falhada ocorre por cisalhamen-



to (Figura 1), o que indica que o problema não ocorreu por mecanismo que leve em conta uma eventual fragilização, mas muito provavelmente em virtude da não-manutenção da uniformidade da deformação plástica, necessária quando se deseja a obtenção de grandes alongamentos. Esse fato está diretamente relacionado com o momento em que a formação da martensita por deformação plástica a frio tem início, ou seja, se esta começa a se formar no momento em que tem início a estrição, o endurecimento local obriga a outra região a se deformar, uniformizando a deformação e permitindo maior deformação uniforme. Caso a martensita se forme mais no início da deformação, esta não poderá atuar no aumento do alongamento, pois além de não ocorrer o endurecimento nos momentos em que iria ocorrer a estrição, a última será antecipada induzindo a fratura plástica por instabilidade mecânica para deformações pequenas<sup>4</sup> em virtude da baixa ductilidade e da taxa de encruamento inerente a grandes quantidades de martensita formada de forma precoce.

A análise realizada em termos de nitrogênio e carbono permite se inferir que a principal diferença entre as ligas 304 e 304 L é no que se refere ao teor de carbono.

**Caso 2** A comparação simples entre uma liga 304, que na atualidade raramente contém mais do que 0,05% de carbono, e a 304 L, que em geral não ultrapassa 0,02% com a atual tecnologia de fabricação de carbono, apesar da especificação da Tabela 2, indica uma diferença no teor de carbono na ordem de 0,03%, que na Expressão (1) se traduz por uma redução do Md (30/50) (50% de martensita formada para uma deformação de 30%) de menos de 15°C para a liga com maior teor de carbono. Essa diferença dificilmente explica um comportamento tão diferenciado entre a 304L e em que 304, última não se apresenta magnéticos com esta diferença no teor de carbono. Esse fato pode ser uma indicação de que a deformação plástica imposta nesse processo de estampagem seja pequena, possibilitando a não ocorrência de martensita na liga 304.

O efeito dos tratamentos térmicos na redução do magnetismo só foi representativo na temperatura de 700°C (tratamento de 40 minutos) quando o nível de inspeção utilizado indicou ausência de magnetismo, sendo que a literatura indica apreciável redução de magnetismo a 700°C e praticamente total desaparecimento após tratamento a 800°C, em situações que se prolonguem por 20 horas<sup>3</sup>. Como já mencionado anteriormente, essa pode ser uma medida para a recuperação dos componentes que se apresentam magnéticos, devendo-se levar em conta que a realização desse tratamento sem atmosfera protetora gera uma oxidação que muda a coloração do componente, sendo necessária a realização de uma decapagem para devolver a cor natural do aço inoxidável, o que constitui em uma dificuldade adicional na recuperação dos componentes.

Além do mais, uma diferença climática entre alto verão e inverno pode facilmente superar esses 15°C, devendo ser considerada principalmente ao se compararem paí-



ses nórdicos, como por exemplo a Suécia, quando a baixa temperatura ambiente pode estimular de forma ainda mais dramática a formação de martensita durante a conformação a frio.

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A estabilidade da austenita é de fundamental importância, havendo, por exemplo, situações nas quais se deseja a presença da martensita após processos de conformação a frio, em virtude da elevação da resistência mecânica, podendo-se por exemplo obter um efeito do tipo mola, como é o caso de anéis de óleo de motores diesel. Esses anéis são compostos de dois segmentos raspadores de óleo, que são empurrados contra o cilindro através de uma mola confeccionada com aço 301, que durante a estampagem a frio apresenta um grande incremento de dureza, podendo chegar a valores da ordem de 400 HV, por meio do encruamento advindo da formação de grande quantidade de martensita de deformação. Ainda neste sentido pode-se obter uma maior deformação uniforme traduzida, por exemplo, em uma maior estampabilidade. Nesse caso a taxa de formação de martensita é tal que no momento em que aconteceu a estricção ocorre endurecimento localizado pela formação de martensita, obrigando a outra região a se deformar, uniformizando a deformação. Essa não foi a situação apresentada neste estudo para o Caso 1, no qual a martensita de deformação deve ter-se formado logo no início da conformação, perdendo o benefício da deformação uniforme, o que fez com que o componente falhasse durante a fabricação.

Existem, no entanto, situações nas quais a geração da martensita é completamente indesejável, como em componentes que não podem apresentar magnetismo. A fabricação desses componentes, como indicado neste estudo para o Caso 2, requer a utilização de ligas mais estáveis, como por exemplo a 304 em detrimento da 304 L, considerando-se no entanto o grau de deformação plástica a frio ao qual o componente é submetido durante a fabricação. Caso essa deformação seja mais elevada, será necessária a utilização de liga ainda mais estável, como por exemplo a 316, o que irá representar um custo adicional ao componente.

Outro fator que deve ser considerado diz respeito à temperatura do ambiente na qual se realiza a conformação mecânica a frio, pois a mesma solução adotada no Rio de Janeiro, onde raramente a temperatura é inferior a 30°C, pode não servir para países nórdicos como por exemplo a Suécia, onde ao ar livre são comuns temperaturas próximas ou mesmo inferiores a 0°C. Um componente fabricado por conformação a frio em aço inox austenítico, que eventualmente não se torne magnético em um

país quente, pode apresentar magnetismo se fabricado em campo aberto em países frios, exigindo neste caso uma mudança de especificação mais radical.

## 5 CONCLUSÕES

- O componente confeccionado com a liga 304 L no Caso 1, trincou em decorrência da formação precoce de martensita durante o processo de fabricação. Os valores de dureza medidos em região próxima à falha foram da ordem de 395 HV<sub>1</sub>.
- O material com maior teor de carbono (liga 304) apresentou comportamento satisfatório, não trincando durante a fabricação. Os valores de dureza nesta liga em região equivalente ao componente falhado foram de 325 HV<sub>1</sub>.
- A liga 304 L se apresentou magnética no Caso 2, com total desaparecimento desta quando utilizado o aço 304.
- O tratamento térmico de 40 minutos a 700°C resultou em grande redução do magnetismo da liga 304 L do Caso 2.

## REFERÊNCIAS

1. ASM Speciality Handbook, stainless steels. J.R. Davies & Associates. *ASM International*, p. 25, 1994.
2. REED, R. P., HORIUCHI, T. *Austenitic steels at low temperatures*. Nova York e Londres: Plenum Press, p. 4-8, 1982.
3. MARSHALL, P. *Austenitic stainless steels microstructure and mechanical properties*. Elsevier Applied Science Publishers, p. 23-29, 1984.
4. FERRAN, E., SOUZA, C. M. *Conformação de Aços inoxidáveis a baixas temperaturas*. Trabalho apresentado no XXXII Congresso da ABM, São Paulo, 1977.