

Efeito do gradiente de martensita induzida por deformação sobre o fenômeno de *delayed cracking* em aços inoxidáveis austeníticos

Marta Ribeiro dos Santos

Aluna de doutorado do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da UFMG

E-mail: marta@demet.ufmg.br

Hélio José Batista Alves

Pesquisador do Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica ACESITA S.A.

E-mail: helioalves@acesita.com.br

Robson Guimarães Lopes

Técnico do Laboratório de Estampagem - Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica ACESITA S.A.

E-mail: rglopes@acesita.com.br

Berenice Mendonça Gonzalez

Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG

E-mail: gonzalez@demet.ufmg.br

Resumo

O principal objetivo desse trabalho foi estudar o fenômeno de *Delayed Cracking*, em aços inoxidáveis austeníticos, quando foram, severamente, deformados em operações de estampagem. Durante a conformação, a austenita desses aços se transformou em martensita e a fração volumétrica dessa fase apresentou variação em relação à altura da parede do copo e à composição química dos aços. O cobre é um elemento de liga que foi capaz de tornar o aço menos sensível ao fenômeno de *Delayed Cracking* pela inibição da transformação martensítica. Gradientes de martensita ao longo da parede dos copos embutido e reembutido foram determinados para um aço inoxidável austenítico convencional e um com maior quantidade de cobre em sua composição química. Os efeitos desse gradiente sobre o fenômeno de *Delayed Cracking* também foram analisados.

Palavras-chave: Fenômeno de *Delayed Cracking*, embutimento profundo, aços inoxidáveis austeníticos, martensita induzida por deformação.

Abstract

The main objective of this work was to study the Delayed Cracking Phenomenon in metastable austenitic stainless steels when they were significantly deformed by deep drawing. During the forming operations, the austenite of these steels has transformed substantially to martensite. The volume fraction of this phase has changed with the cup height and chemical composition. Copper is an alloying element able to turn the steels less prone to the cracking by inhibiting the martensitic transformation. Martensite gradients throughout the drawn and redrawn cups wall were determined for one conventional and a copper-added austenitic stainless steel and their effects on the Delayed Cracking Phenomenon were evaluated.

Keywords: *Delayed Cracking Phenomenon, deep drawing, austenitic stainless steels, strain induced martensite.*

1. Introdução

Aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 304 são, amplamente, utilizados na produção de uma vasta gama de produtos conformados para aplicação em utensílios domésticos, em arquitetura e nas indústrias automotiva, farmacêutica e alimentícia. No caso das indústrias farmacêutica, química e de alimentos, esses aços são, prontamente, indicados, uma vez que eles apresentam alta resistência à corrosão e superfícies mais lisas, o que evita o acúmulo de impurezas e facilita o trabalho de limpeza (Acesita, 2002). Muitas dessas aplicações requerem bom desempenho dos aços durante as etapas de fabricação, uma vez que eles serão conformados sem recozimentos intermediários (Ikegami et al. 1999). No tocante à indústria automobilística, esta demanda aços com boa combinação de resistência e conformabilidade, que permitam redução de peso e um *design* mais arrojado dos carros.

Aços inoxidáveis austeníticos são adequados a essas aplicações, por apresentarem boa combinação de ductilidade e conformação por estiramento resultantes da transformação martensítica que eles sofrem (Rintamaa et al., 1982; Gonzalez et al., 2003). No entanto, a transformação martensítica pode apresentar efeitos desfavoráveis no campo do embutimento profundo com o surgimento do fenômeno de *Delayed Cracking*, quando esses aços são, severamente, deformados (Ikegami et al., 1999). Mesmo que os copos tenham sido conformados com sucesso, trincas aparecem em suas bordas, horas, dias ou meses após o fim da conformação (Schaller et al., 1972; Frehn & Bleck, 2003).

Essas trincas, que caracterizam o fenômeno, se formam nas bordas dos copos e se desenvolvem, linearmente, em direção às suas bases. O surgimento do fenômeno, que só ocorre naqueles aços austeníticos que se transformam, substancialmente, em martensita, durante a conformação (Schaller et al., 1972), é atribuído a essa transformação, às tensões residuais causadas por diferença de re-

sistência mecânica entre as fases austenítica e martensítica coexistentes (Wang e Gong, 2002) e ao teor de hidrogênio (Sumitomo, 1979). A sensibilidade do fenômeno está diretamente relacionada à composição química dos aços e esta, por sua vez, exerce forte influência sobre a transformação martensítica (Hoshino, 1977). Está bem estabelecido, na literatura, que o fenômeno tende a ocorrer em aços com menor teor de níquel (Sumitomo, 1978), mas a presença de cobre e alguns outros elementos de ligas, bem como a redução dos intersticiais carbono e nitrogênio, promovem o retardamento do fenômeno já citado (Ikegami et al. 1999).

Em relação à transformação martensítica, Frehn e Bleck (2003) relataram a existência de um gradiente de martensita induzida por deformação nas paredes de copos embutidos. De acordo com esses autores, o fenômeno foi observado em aços inoxidáveis austeníticos, que formaram grandes quantidades de martensita nas bordas dos copos, acima de 35%, ou que apresentaram um gradiente dessa fase ao longo das paredes dos copos. O gradiente foi responsável pelas tensões residuais deixadas nas paredes dos copos e levou ao surgimento do fenômeno de *Delayed Cracking*.

A formação da fase martensítica está relacionada à estabilidade dos aços austeníticos: quanto mais estável for o aço, menos martensita é formada. Essa estabilidade pode ser avaliada pelo parâmetro Md_{30} , que é a temperatura na qual 50% de martensita é obtida para uma deformação verdadeira de 0,3 (Angel, 1954).

Nesse trabalho, foi realizado um estudo comparativo sobre a sensibilidade do fenômeno de *Delayed Cracking*, em dois aços inoxidáveis austeníticos do tipo 304, pela caracterização da transformação martensítica que ocorreu durante operações de embutimento e reembutimento. Também foi avaliado o efeito da adição de cobre aos aços sobre o gradiente de martensita.

2. Procedimentos experimentais

2.1 Material

Os materiais estudados foram dois tipos de aços inoxidáveis austeníticos de corrida industrial fornecidos como chapas de 0,6 mm de espessura, laminadas a frio e recozidas. As composições químicas e as temperaturas Md_{30} , calculadas de acordo com a equação de Nohara (Nohara et al., 1977), podem ser vistas na Tabela 1. A microestrutura dos aços como recebidos corresponde à de um policristal monofásico 100% austenítico com grãos equiaxiais com tamanho de grão ASTM 8. A Figura 1 apresenta a microestrutura do aço N antes da deformação.

Tabela 1 - Composição química (% em massa) e temperatura Md_{30} (°C) dos aços austeníticos.

Aço	B	N
C	0,0255	0,033
N	0,047	0,035
Si	0,31	0,44
Mn	0,443	0,99
Cr	18,23	18,07
Ni	8,91	8,06
Cu	0,225	1,601
Mo	0,126	0,099
Nb	0,012	-
Md_{30}	-13,7	-34,3

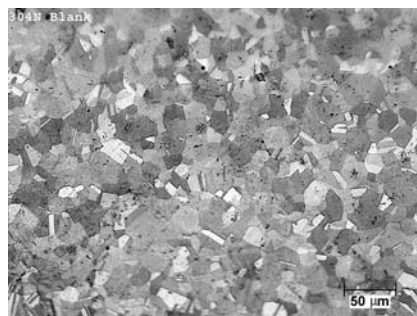


Figura 1 - Microestrutura do aço N antes da deformação.

Observa-se da Tabela 1 que os aços B e N possuem composições químicas similares, apresentando diferenças no teor de níquel, cuja quantidade foi reduzida em 0,78% (%atômica) no aço N e no de cobre, cujo teor aumentou em 1,2% (%atômica) nesse mesmo aço.

2.2 Testes mecânicos

Para serem avaliados, em relação à susceptibilidade ao fenômeno de *Delayed Cracking*, todos os aços usados, nesse trabalho, foram submetidos a operações de embutimento e reembutimento, usando uma prensa Erichsen modelo 142-40. Os aços B e N foram embutidos em vários diâmetros de *blank* (56, 60, 65 e 66mm), usando um punção cilíndrico de base reta de 33mm de diâmetro.

Os reembutimentos foram feitos com um punção de 26mm de diâmetro com a mesma geometria do anterior. Todas as operações de conformação foram realizadas à temperatura ambiente e a uma velocidade de embutimento de 600 mm/min. O enrugamento das bordas dos copos foi evitado pela aplicação de uma carga de 10 a 12 kN no prensa-chapa durante o embutimento e de 4 a 6 kN no reembutimento. Todo o material foi lubrificado com bissulfato de molibdênio (Molycote) antes da conformação.

O fenômeno de *Delayed Cracking* foi caracterizado pelo parâmetro LDR-DC (Razão Limite de Embutimento do *Delayed Cracking*). Esse parâmetro foi definido como sendo o diâmetro de *blank* para o qual o aço, submetido ao embutimento e ao reembutimento, tenha apresentado, pelo menos, uma trinca até 24h após o fim da operação de reestampagem. Foi observado um lote contendo 15 copos embutidos e 15 copos reembutidos de cada aço do trabalho.

2.3 Avaliação da fração volumétrica de martensita

A fração volumétrica de martensita induzida por deformação formada ao longo das paredes dos copos embutidos e

reembutidos foi medida na superfície das amostras por difração de raios X, usando a radiação $K\alpha$ (Cu) e um cristal monocromador de grafite. As difrações foram realizadas em um difratômetro Philips PW70. A determinação da quantidade de martensita por difração de raios X foi baseada no princípio de que a intensidade integrada total de todos os picos de difração de uma determinada fase, em uma mistura, é proporcional à fração volumétrica daquela fase.

Pastilhas de 5mm de diâmetro, para a determinação da fração volumétrica de martensita, foram cortadas ao longo das paredes dos copos em uma máquina de corte por eletroerosão Metals Research Servomet. A eletroerosão remove metal nas vizinhanças da ferramenta de corte, sem contato mecânico, através de uma série de centelhas controladas. Cada centelha promove a formação de uma cratera por fusão e vaporização de metal. Com o intuito de remover impurezas e efeitos do corte sobre o difratograma, cada pastilha foi atacada, quimicamente, de modo a causar uma redução em sua espessura. A solução usada para o ataque foi uma mistura de ácido clorídrico, ácido nítrico, glicerina e água destilada. As pastilhas foram fixadas no difratômetro através de um porta-amostra especialmente desenvolvido para esse fim. O porta-amostra e uma pastilha podem ser vistos na Figura 2.

As microestruturas dos aços como recebidos e após a conformação foram obtidas através do polimento eletrolítico e ataque químico com ácido oxálico das pastilhas retiradas das paredes dos copos. As amostras para microscopia ótica foram lavadas com detergente e etanol.

3. Resultados e discussão

3.1 Susceptibilidade dos aços ao fenômeno de *Delayed Cracking*

O fenômeno de *Delayed Cracking* foi observado no copo reembutido do

aço B, como se pode ver na Figura 3, quando conformado na razão de embutimento de 1,9. Como as trincas na borda do copo (indicadas pela seta na Figura 3) apareceram dentro do período de tempo estipulado pela definição de LDR-DC, o valor dessa razão de embutimento se tornou, então, o valor do LDR-DC para o aço B. O aço N não apresentou trincamento no tempo definido pelo parâmetro LDR-DC.

3.2 Fração volumétrica de martensita

As frações volumétricas de martensita formadas ao longo das paredes dos copos embutidos e reembutidos dos aços B e N podem ser vistas nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

Pode-se observar dessas Figuras que a fração volumétrica de martensita aumentou, gradualmente, da base até o topo dos copos, independentemente do aço empregado. O valor máximo da quantidade de martensita, situado em torno de 90%, foi obtido para o aço B na borda do copo reembutido. Esse valor está consistente com os dados obtidos por Frehn e Bleck (2003), para um aço austenítico 301, no qual foi medida uma quantidade de martensita da ordem de 5%, na base, e acima de 40%, na borda de copos embutidos. O aço B apresentou fração volumétrica de martensita sempre mais elevada que o aço N, para o mesmo grau de deformação, embora essa tendência tenha se invertido, na base dos copos reembutidos.

A Tabela 2 apresenta a variação da fração volumétrica de martensita ($\Delta\alpha'$) formada entre a base e a borda dos copos embutidos e reembutidos para os aços estudados.

Foi observado, nesse trabalho, que o fenômeno surgiu apenas no copo reembutido do aço B. Verifica-se, pela observação da Tabela 2, que a variação da fração volumétrica de martensita, para o copo reembutido do aço B, alcançou o valor de 64%. Como afirmado por Frehn e Bleck, a ocorrência de trincamento é mais propensa nos aços que formam gran-

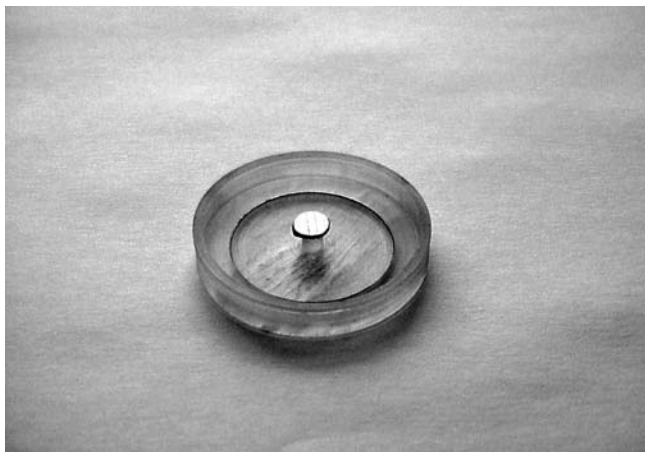


Figura 2 - Porta-amostra com uma pastilha usada para a medição da fração volumétrica de martensita.

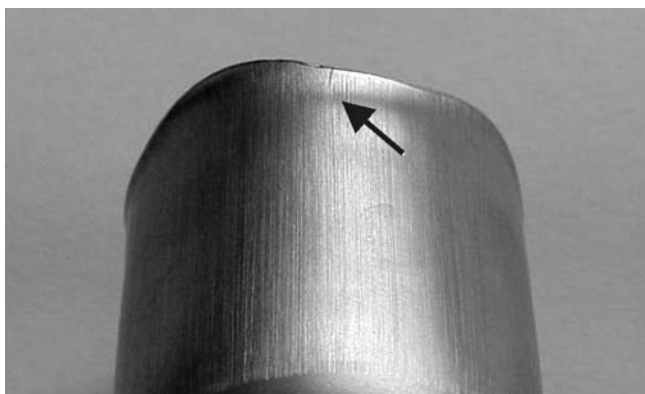


Figura 3 - O fenômeno de *Delayed Cracking* observado no aço B.

des quantidades de martensita no topo dos copos, acima de 60%, ou cujo gradiente de fração volumétrica de martensita esteja acima de 35%. O copo reembutido do aço B alcançou e ultrapassou essas condições e, por isto, apresentou o fenômeno de *Delayed Cracking*.

A diferença de susceptibilidade ao fenômeno de *Delayed Cracking* dos aços estudados, nesse trabalho, pode ser explicada em termos da composição química que afetou, tanto a estabilidade da austenita, quanto a energia de falha de empilhamento do aço. O maior teor de cobre presente na composição química do aço N promoveu o abaixamento de sua temperatura Md_{30} (Tabela 1), o que reduziu a taxa de transformação martensítica e o tornou menos propenso à formação de trincas. Em relação à energia de falha de empilhamento, o cobre é um elemento de liga que promove o aumento do valor dessa energia. Além do mais, adições de cobre a aços inoxidáveis austeníticos contribuem para a supressão da formação de martensita (Choi & Jim, 1996). Assim, espera-se que o aço N possua maior energia de falha de empilhamento que o B, o que implica, também, uma menor taxa de formação de martensita induzida por deformação.

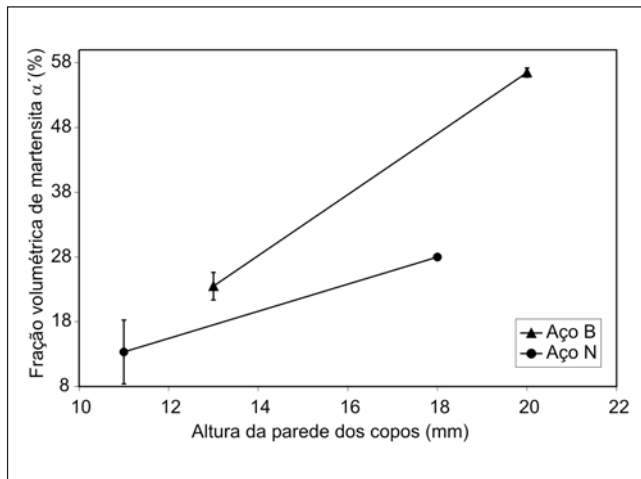


Figura 4 - Variação da fração volumétrica de martensita induzida por deformação ao longo da parede de copos embutidos dos aços B e N.

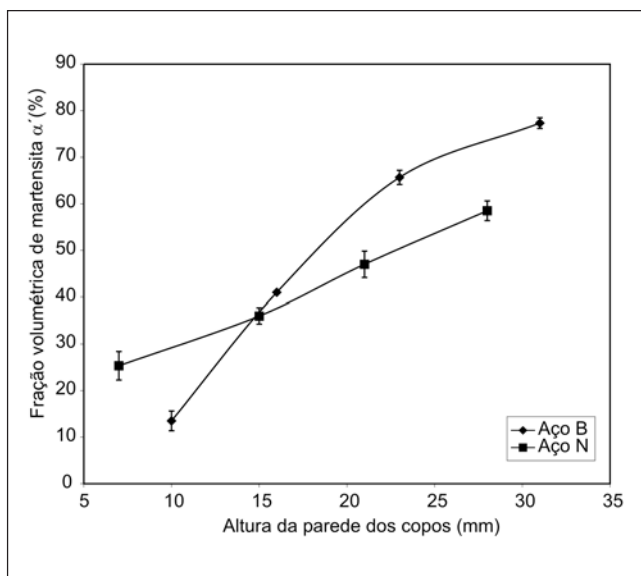


Figura 5 - Variação da fração volumétrica de martensita induzida por deformação ao longo da parede de copos reembutidos dos aços B e N.

Tabela 2 - Variação da fração volumétrica de martensita ($\Delta\alpha'$) e o topo dos copos conformados.

Aço	$(\Delta\alpha')$	
	Copo embutido	Copo reembutido
B	34	64
N	13	35

4. Conclusões

A composição química dos aços inoxidáveis exerceu grande influência sobre o fenômeno de *Delayed Cracking*, alterando a propensão à sua ocorrência. A susceptibilidade ao fenômeno foi, visivelmente, diminuída pela adição de cobre ao aço inoxidável austenítico N.

A adição de cobre ao aço inoxidável austenítico N diminuiu a taxa de formação, de martensita induzida por deformação tanto pelo abaixamento da temperatura Md_{30} , quanto pelo aumento da energia de falha de empilhamento do aço.

O aparecimento do fenômeno de *Delayed Cracking*, no aço B, foi associado a uma alta quantidade de martensita formada na borda do copo reembutido, devido ao maior grau de deformação imposto pela etapa de reembutimento.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) do Ministério de Ciência e Tecnologia pela bolsa de doutorado concedida a aluna Marta Ribeiro dos Santos e a Cia Siderúrgica ACESITA pelo fornecimento do material e realização dos ensaios desse trabalho.

6. Referências bibliográficas

- ACESITA. *Espaço Acesita: publicação para clientes, investidores, empregados e comunidade*. Ano II, n. 10, 2002.
- ANGEL, T. Formation of martensite in austenitic stainless steel. Effects of deformation, temperature and composition. *Journal of the Iron and Steel Institute*, p. 165-174, 1954.
- CHOI, Y., JIN, W. Strain induced martensite formation and its effect on strain hardening behavior in the Cold Drawn 304 austenitic stainless steels. *Scripta Materialia*, v. 36, p. 99-104, 1996.
- FREHN, A., BLECK, W. Effect of austenite stability on the mechanical properties and Delayed Cracking in metastable austenitic steels, *Stainless Steel World (The Netherlands)*, v. 15, n. 1, p. 40-45 2003.
- GONZALEZ, B.M., CASTRO, C.S.B., BUONO, V.T.L., VILELA, J.M.C., ANDRADE, M.S., MORAES, J.M.D., MANTEL, M.J. The influence of copper addition on the formability of AISI 304 stainless steel. *Material Science & Engineering*, A343, p.51-56, 2003.
- HOSFORD, W.F., CADDEL, R.M. *Metal Forming Mechanics and Metallurgy*. Englewood Cliffs: Prentice Hall Inc., 1983.
- HHOSHINO, K. Effect of chemical composition on season cracking of metastable stainless steel. *Transactions ISIJ*, v. 20, p. 147-153, 1977.
- IKEGAMI, Y., FUKUI, T., NISHI, T. Development of an austenitic stainless steel for deep drawing. *International Congress of Stainless Steel'99*, p.211-219, 1999.
- KIM, K.Y., CHOI, D.Y., KIM, K.T. Delayed cracking behaviour of multi-stage deep-drawn cup of austenitic stainless steel sheets after bright annealing. *International Congress of Stainless Steel'99*, p. 199-207, 1999.
- NOHARA, K. ONO, Y., OHASHI, N. Composition and grain size dependencies of strain induced martensite transformation in metastable austenitic stainless steels. *Transactions ISIJ*, v. 17, p. 772-782, 1977.
- RINTAMAA, R., SULONEM, M. Proc. 12th Biental Congress International Deep Drawing Group, *Associazione Italiana de Metallurgia*, p. 119-130, 1982.
- SCHALLER, F.W., SCHIMID, T.E., SNAPE, E. Delayed Cracking of Deep Drawn Stainless Steel, *Sheet Metal Industries*, v.10, pp.621-624, 1972.
- SUMITOMO, H. Earing and delayed cracking of deep-drawn cup of austenitic stainless steel sheets. *Advanced Technology of Plasticity*, v. 2, p. 1289-1296, 1978.
- WANG, Z., GONG, B. Residual stress in the forming of materials. *ASM International Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel (USA)*, p. 141-149, 2002.

Artigo recebido em 30/07/2006 e
aprovado em 05/10/2006.

Rem - Revista Escola de Minas
71 anos divulgando **CIÊNCIA**.
www.rem.com.br
