

# EFEITO DA MARTENSITA SOBRE O FENÔMENO DE *DELAYED CRACKING* EM AÇOS INOXIDÁVEIS AUSTENÍTICOS AISI 304<sup>1</sup>

Marta Ribeiro dos Santos<sup>2</sup>  
Hélio José Batista Alves<sup>3</sup>  
Robson Guimarães Lopes<sup>4</sup>  
Berenice Mendonça Gonzalez<sup>5</sup>

## Resumo

Aços inoxidáveis austeníticos apresentam o fenômeno de *Delayed Cracking* quando são deformados em operações de estampagem. Este fenômeno é observado em aços inoxidáveis que se transformam, substancialmente, em martensita durante a conformação. O cobre é um elemento de liga que pode reduzir a taxa de transformação da austenita por torná-la mais estável. O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito que a adição de cobre à composição química de aços inoxidáveis do tipo AISI 304 teria sobre a quantidade de martensita induzida por deformação nas paredes de copos embutidos e reembutidos e também sobre o número de trincas formadas nas bordas dos copos devido ao fenômeno de *Delayed Cracking*. Estas mesmas características foram estudadas em um aço inoxidável austenítico convencional com o objetivo de compará-las ao aço com maior teor de cobre.

**Palavras-chave:** Fenômeno de *Delayed Cracking*; Martensita induzida por deformação; Aços inoxidáveis austeníticos

---

<sup>1</sup> Trabalho submetido ao 42º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos – 25 a 28 de outubro de 2005 – Santos- SP - Brasil

<sup>2</sup> Aluno de doutorado do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais

<sup>3</sup> Pesquisador do Centro de Pesquisa da Companhia Siderúrgica ACESITA S.A.

<sup>4</sup> Técnico Responsável pelo Laboratório de Estampagem – Centro de Pesquisas ACESITA S.A.

<sup>5</sup> Prof. Doutor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da Universidade Federal de Minas Gerais

# 1 INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 304 são usados na produção de uma ampla variedade de peças conformadas para aplicações na indústria automobilística, no setor industrial, em utensílios domésticos e em arquitetura. Esta classe de aços encontra grande aceitação na indústria de alimentos, farmacêutica e química porque os equipamentos feitos com estes materiais apresentam elevada resistência à corrosão e superfícies menos rugosas, o que evita o acúmulo de impurezas, além de facilitar a limpeza. <sup>(1)</sup> A maioria das aplicações nas quais são utilizados requer dos aços inoxidáveis bom desempenho durante os processos de fabricação uma vez que eles serão conformados em formas mais complexas sem passar por recozimentos intermediários. <sup>(2)</sup>

Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam excelente ductilidade e grande aptidão à deformação por estiramento, resultantes da presença da martensita induzida por deformação. <sup>(3,4)</sup> Está bem estabelecido na literatura que nestes aços ocorre um considerável aumento de resistência quando são deformados em temperaturas abaixo de  $M_d$ , que é a máxima temperatura na qual se observa a indução da martensita  $\alpha'$  por deformação. Este aumento de plasticidade desta classe de aços, causada pela formação da martensita, é conhecido como efeito TRIP - *Transformation Induced Plasticity*. <sup>(3,5)</sup>

Em relação à conformação por embutimento, os aços inoxidáveis austeníticos apresentam limitações sendo que seu coeficiente de anisotropia médio ( $\bar{r}$ ) situa-se em torno de 1, um valor baixo quando comparado ao dos aços inoxidáveis ferríticos. <sup>(2,6)</sup> Além do mais, aços inoxidáveis austeníticos são susceptíveis à ocorrência do fenômeno de *Delayed Cracking* quando as chapas destes aços são severamente deformadas em operações de embutimento. <sup>(2)</sup>

O fenômeno de *Delayed Cracking*, que é observado em copos que foram embutidos com sucesso, é caracterizado pelo surgimento de trincas nas bordas dos copos, horas, dias ou meses após o término da operação. <sup>(7,8)</sup> O fenômeno, observado somente naqueles aços que se transformaram, substancialmente, em martensita durante a conformação, <sup>(7)</sup> está relacionado às tensões residuais deixadas nas paredes dos copos. As tensões residuais são causadas por diferentes níveis de deformação deixadas em diferentes partes de uma peça devido à i) diferença de resistência entre as diferentes fases que constituem o material, ii) diferentes níveis de deformação formados em diferentes partes da peça ou iii) a possível existência de um gradiente de temperatura. <sup>(9)</sup> Nos copos embutidos, estas tensões apresentam valores elevados próximos ao topo dos copos e podem levar a formação de trincas, a menos que sejam aliviadas. <sup>(6)</sup>

Em aços inoxidáveis austeníticos, a sensibilidade ao fenômeno é determinada pela fração volumétrica de martensita <sup>(10)</sup> que por sua vez está relacionada à composição química dos aços. <sup>(4)</sup> Frehn e Bleck <sup>(8)</sup> relataram a existência de um gradiente de martensita ao longo das paredes dos copos conformados. De acordo com estes autores, o fenômeno foi observado em aços inoxidáveis austeníticos que formaram grandes quantidades de martensita  $\alpha'$ , acima de 35%, no topo dos copos durante o processo de embutimento, e que, também, mostraram um elevado gradiente de martensita ao longo de suas paredes. Este gradiente parece ter sido o responsável pelas tensões residuais deixadas nas paredes dos copos e que poderiam levar ao aparecimento do fenômeno de *Delayed Cracking*.

A formação da martensita  $\alpha'$  está relacionada à estabilidade da fase austenítica em relação à transformação martensítica. Quanto maior for a fração volumétrica de martensita formada, menor é a estabilidade da austenita. Esta estabilidade da austenita é determinada pela composição química e é, normalmente, avaliada pelo parâmetro  $Md_{30}$ , que é a temperatura na qual 50% de martensita  $\alpha'$  é obtida, em tração, para uma deformação verdadeira de 0,3.<sup>(11)</sup>

Elementos de liga, tais como o níquel, cobre e os intersticiais carbono e nitrogênio, exercem grande influência sobre a estabilidade da austenita e, conseqüentemente, na formação da martensita e no fenômeno de *Delayed Cracking*. De acordo com Kim *et al.*,<sup>(12)</sup> a ocorrência do fenômeno é grande em aços inoxidáveis austeníticos que têm o teor de níquel reduzido. Por outro lado, a redução dos teores de carbono e nitrogênio diminui, consideravelmente, a susceptibilidade de ocorrência do fenômeno nesta classe de aços.

Nohara *et al.*<sup>(13)</sup> mostraram que o cobre apresenta o mesmo efeito que o níquel sobre a temperatura  $Md_{30}$ , a qual decresce com o aumento da quantidade destes dois elementos na composição química dos aços inoxidáveis austeníticos. Ainda, o cobre é um elemento efetivo para a melhoria da conformação por embutimento destes aços<sup>(2)</sup> porque ele eleva a energia de falha de empilhamento destes materiais o que facilita o escorregamento cruzado das deslocações, acarretando uma menor taxa de encruamento.<sup>(14)</sup>

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito que a adição de cobre à composição química de um aço inoxidável austenítico comercial exerce sobre a quantidade de martensita formada ao longo das paredes de copos embutidos e reembutidos e relacioná-la ao fenômeno de *Delayed Cracking*. Também foi apresentado o comportamento de um aço inoxidável austenítico convencional frente ao fenômeno de *Delayed Cracking* para fins de comparação ao aço com teor mais elevado de cobre.

## 2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As composições químicas e as temperaturas  $Md_{30}$ , calculadas de acordo com Nohara *et al.*,<sup>(13)</sup> do aço inoxidável austenítico com adição de cobre (chamado N) e do aço inoxidável austenítico convencional (B) utilizados neste estudo são mostradas na Tabela 1. Esta tabela indica que o teor de níquel do aço inoxidável austenítico N foi ligeiramente reduzida em 0,78% (%atômica) e o teor de cobre foi elevado em 1,2% (%atômica) em relação ao aço B (os valores de porcentagem atômica foram calculados a partir dos dados constantes na Tabela 1). Ambos os aços são de corridas industriais e foram fornecidos como chapas de 0,6mm de espessura, laminadas a frio e recozidas.

**Tabela 1.** Composições químicas (% em peso) e temperaturas  $Md_{30}$  (°C) dos aços inoxidáveis austeníticos N e B.

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

Na avaliação da susceptibilidade ao fenômeno de *Delayed Cracking*, os aços foram embutidos e reembutidos usando uma prensa hidráulica Erichsen 142-40. As chapas dos aços foram embutidas em diferentes razões de embutimento (DR) pela variação dos diâmetros do *blanks* (56, 60 e 64) utilizando um punção reto de 33mm de

diâmetro. A operação de reembutimento dos copos embutidos foi realizada com um punção também de base reta, porém com 26mm de diâmetro. As operações de conformação foram feitas em temperatura ambiente e a uma velocidade de ensaio de 600mm/min. Para evitar a formação de rugas na área do flange durante o embutimento, foi usado um prensa-chapas cuja pressão variou entre 10 e 12kN. Na etapa do reembutimento, para evitar o possível enrugamento das paredes dos copos reembutidos, a pressão do prensa-chapas variou entre 4 e 6kN. As chapas foram lubrificadas com filmes de PVC e bissulfeto de molibdênio.

Copos embutidos e reembutidos em várias razões de embutimento foram mantidos à temperatura ambiente, no mínimo por 24h, para observação do aparecimento de trincas. Se, pelo menos um, dentre um lote de copos, apresentasse uma trinca para uma determinada razão de embutimento (DR), então aquela seria a razão limite de embutimento do *Delayed Cracking* (LDR-DC). Após a determinação da razão limite de embutimento do *Delayed Cracking* (LDR-DC), os copos embutidos e reembutidos nesta razão limite de embutimento foram mantidos a temperatura ambiente e, periodicamente (a cada 24h), foram observados para a contagem do número de trincas abertas em suas bordas. Foi observado um lote contendo 15 copos embutidos e 15 copos reembutidos. O número médio de trincas nos copos trincados foi calculado dividindo-se o número total de trincas abertas no lote de copos pelo número de copos observados.

As frações volumétricas de martensita  $\alpha'$  formadas ao longo das paredes dos copos embutidos e reembutidos foram medidas por difração de raios-X. A determinação semi-quantitativa destas frações volumétricas presentes nas paredes dos copos foi baseada no princípio das intensidades integradas, na qual a intensidade integrada total de todos os picos de difração de uma determinada fase, em uma mistura, seria proporcional à fração volumétrica daquela fase.

Para quantificação da fração volumétrica de martensita nas paredes dos copos, por difração de raios-X, pastilhas foram cortadas de suas paredes através da técnica de corte por eletro-erosão em uma máquina *Metals Research Servomet Spark*. A máquina Servomet remove material da área vizinha da ferramenta de corte, sem manter contato mecânico com a peça, através da emissão de uma série de centelhas controladas. Cada centelha provoca a formação de uma pequena cratera no metal pela fusão e vaporização de material.

Para reduzir os efeitos do corte e impurezas presentes na superfície do metal sobre a formação de martensita e do espectro de difração, as pastilhas foram atacadas, quimicamente, com o reagente AG, com o intuito remover algumas frações da espessura das amostras. O reagente AG é composto por ácido clorídrico, ácido nítrico, glicerina e águas destilada.

A análise por difração de raios-X foi realizada em um difratômetro Philips PW 70 usando a radiação  $\text{Cu } k_{\alpha}$  e um cristal monocromador de grafite. Um porta-amostra foi, especialmente, desenvolvido para fixar as pastilhas no equipamento de difração. Este porta-amostras pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1.** Porta amostra usado para a medição da fração volumétrica de martensita por difração de raios-X em pastilhas cortadas das paredes dos copos conformados.

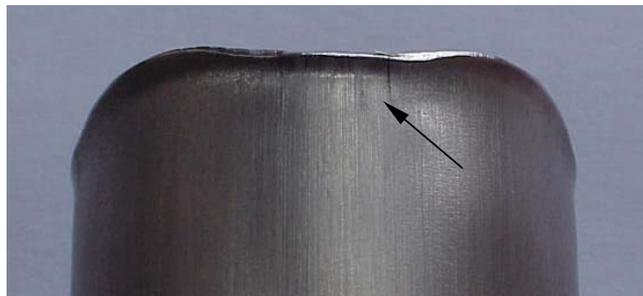
Após a determinação da fração volumétrica de martensita, as pastilhas foram, quimicamente, polidas com uma solução de ácido perclórico, etanol e água destilada e atacadas com Água Régia ou ácido oxálico. As amostras foram polidas com a corrente variando entre 0,2 e 0,4A durante até 10 s e logo após, lavadas com etanol. As características microestruturais das pastilhas foram observadas ao microscópio ótico.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Susceptibilidade dos Copos Conformados ao Fenômeno de *Delayed Cracking*

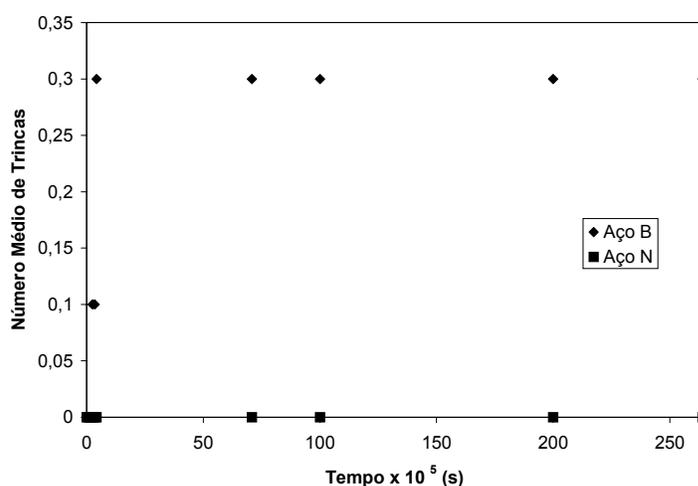
Após um período de 5 dias foi verificado que o fenômeno de *Delayed Cracking* apareceu apenas nos copos reembutidos do aço B, conforme se vê na Figura 2, que apresenta um copo reembutido do aço B na razão de embutimento de 1,9. Esta razão de embutimento foi definida como a razão limite de embutimento do *Delayed Cracking* (LDR-DC) do aço B. Os copos embutidos dos aços B e N e os copos reembutidos do aço N não apresentaram o fenômeno, mesmo para tempos maiores de observação (11 meses).

As evoluções dos números de trincas observados nas bordas dos copos reembutidos dos aços inoxidáveis austeníticos B e N são mostradas na Figura 3. Como pode ser observado nesta figura, o número de trincas aumentou com o tempo para o aço inoxidável B e alcançou a estabilização para um número médio de trincas de 0,3. Por outro lado, não foram abertas trincas nas bordas dos copos do aço inoxidável N durante o período inteiro de observação (11 meses) e na razão de embutimento de 1,9.



**Figura 2.** Fenômeno de *Delayed Cracking* observado em um copo reembutido do aço B.

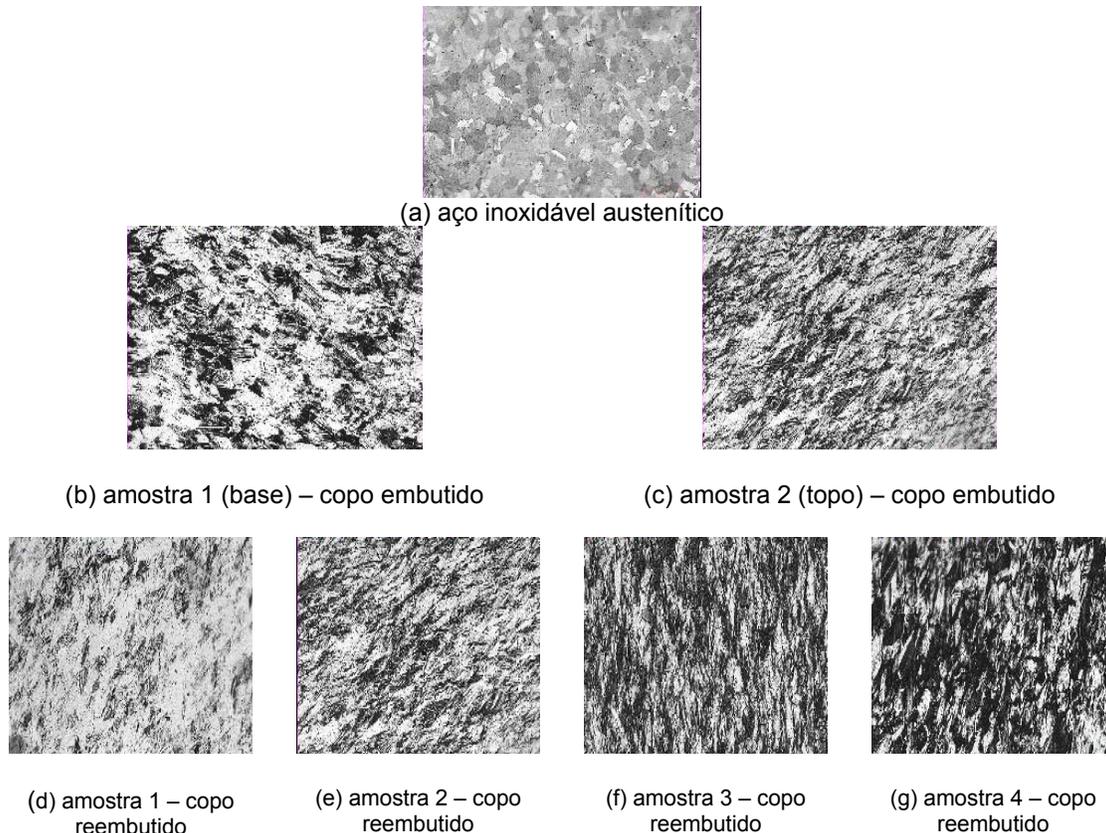
Conforme se vê na Tabela 1, o teor de cobre presente no aço inoxidável austenítico N é mais elevado que no aço B, apresentando também, o teor de níquel ligeiramente mais baixo. Está estabelecido na literatura que o fenômeno de *Delayed Cracking* tende a ocorrer em aços com menores teores de níquel. No entanto, o fato de se ter mais alto o teor de cobre, sugere que o cobre atuou beneficemente na supressão do fenômeno de *Delayed Cracking*. Assim, quanto mais alto o teor de cobre, menor é a propensão de ocorrência do fenômeno fenômeno de *Delayed Cracking*, mesmo apesar da influência contrária causada pela redução do níquel.



**Figura 3.** Susceptibilidade ao fenômeno de *Delayed Cracking* dos aços inoxidáveis austeníticos B e N.

### 3.2 O Efeito da Adição de Cobre sobre a Formação da Martensita e sua Variação ao Longo das Paredes dos Copos

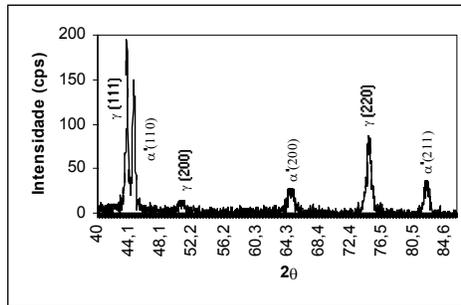
A Figura 4 mostra a microestrutura desenvolvida em várias posições ao longo das paredes dos copos embutidos e reembutidos do aço inoxidável N. A quantidade de martensita induzida parece variar, diretamente, com a altura da paredes dos copos devido à magnitude das deformações (estiramento radial e compressão tangencial) sofridas pelas diferentes áreas do *blank* durante seu movimento em direção à matriz para formar a parede do copo. Em relação aos copos reembutidos, a distribuição de tensões na zona de deformação é, qualitativamente, igual àquela ocorrida durante o embutimento. Devido à forma cônica da entrada da matriz, uma pressão adicional, causada pela compressão tangencial, pressiona o copo contra a matriz (15). Assim, as paredes dos copos embutidos são forçadas a escoar para dentro da cavidade da matriz causando deformação adicional e por consequência, maior formação de martensita induzida por deformação a partir da austenita remanescente nos copos embutidos.



**Figura 4.** Fotomicrografias apresentando a formação de martensita induzida por deformação ao longo das paredes dos copos embutido e reembutido do aço 304N, a partir da base de sua base. No topo pode ser vista a microestrutura do aço inoxidável austenítico antes da conformação. Aumento: 200x. Ataque: Behara.

A Figura 5 mostra um perfil de difração de raios-X de uma amostra retirada da parede de um copo de aço inoxidável austenítico B. Os planos de difração individuais da austenita (CFC) e da martensita  $\alpha'$  (CCC) podem ser, claramente, identificados e foram indicados na figura. Três reflexões de cada fase foram usadas para quantificar as frações volumétricas de cada fase.

As frações volumétricas de martensita  $\alpha'$  em função de posições ao longo das paredes de copos embutidos e reembutidos dos aços inoxidáveis austeníticos deste estudo são vistas, respectivamente, nas Figuras 6 e 7. Pode-se observar nestas figuras a existência de uma diferença de fração volumétrica de martensita  $\alpha'$  na extensão das paredes, tanto nos copos embutidos quanto nos reembutidos para ambos os aços. A variação da fração volumétrica de martensita  $\alpha'$  nas paredes dos copos reembutidos do aço inoxidável N apresentou crescimento linear enquanto que o aço inoxidável B apresentou comportamento parabólico. Também foi observado que a diferença de quantidade de martensita  $\alpha'$  sempre foi mais elevada nos copos reembutidos que nos embutidos, independentemente do aço avaliado. Comparando-se a fração volumétrica de martensita induzida por deformação nos copos reembutidos de ambos os aços, nota-se que a quantidade de martensita em quase todas as posições de medição foi mais elevada no aço B para o mesmo grau de deformação, embora esta tendência tenha se invertido na base dos copos embutidos. Este fato pode estar relacionado à incerteza no processo de medição.

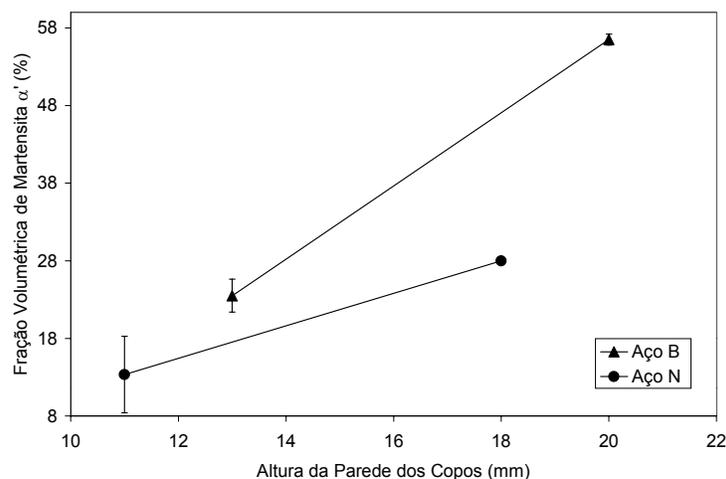


**Figura 5.** Difratoograma de uma amostra da parede de um copo do aço inoxidável austenítico B, usando radiação  $\text{Cu K}\alpha$ , no qual se nota a presença da martensita e da austenita.

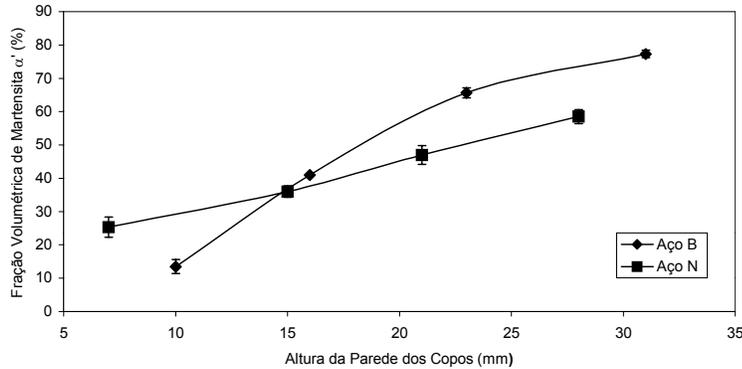
Como dito anteriormente, Frehn e Bleck<sup>(8)</sup> relataram a existência de um gradiente de martensita  $\alpha'$  formado nas paredes de copos embutidos de aços inoxidáveis austeníticos do tipo 301. Os autores mediram uma quantidade de martensita  $\alpha'$  em torno de 5% na base dos copos e acima de 40% em suas bordas.

A Tabela 2 apresenta a diferença na quantidade de martensita induzida por deformação ( $\Delta\alpha'$ ) formada entre a base e o topo dos copos embutidos e reembutidos dos dois aços em estudo. A variação da quantidade de fase martensítica no copo reembutido do aço inoxidável austenítico B foi a maior. Como observado por Frehn e Bleck (8), o fenômeno de *Delayed Cracking* ocorria com maior propensão nos aços inoxidáveis que formavam altas quantidades de martensita  $\alpha'$  na borda dos copos, acima de 60%, ou que apresentassem uma grande diferença (acima de 35%) entre as frações volumétricas desta fase medidas entre a borda e a base dos copos. Observando-se a Tabela 2, os copos embutidos dos aços inoxidáveis austeníticos B e N e o copo reembutido do aço N não alcançaram qualquer uma destas condições e por conseguinte, não foram formadas trincas em suas paredes.

O fenômeno de *Delayed Cracking* não ocorreu no aço com teor mais elevado de cobre (o aço inoxidável N). A diferença na susceptibilidade ao fenômeno entre os aços inoxidáveis B e N pode ser explicada em termos da composição química.



**Figura 6.** Variação da fração volumétrica de martensita  $\alpha'$  ao longo das paredes de copos embutidos dos aços inoxidáveis austeníticos B e N.



**Figura 7.** Variação da fração volumétrica de martensita  $\alpha'$  ao longo das paredes de copos reembutados dos aços inoxidáveis austeníticos B e N.

**Tabela 2.** Variação da fração volumétrica de martensita de martensita induzida por deformação entre a base e a borda dos copos embutidos e reembutados dos aços inoxidáveis austeníticos B e N.

Aço	$\Delta\alpha'$ (%)	
	Copo Embutido	Copo Reembutado
B	34	64
N	13	35

A presença em maior quantidade de cobre no aço inoxidável austenítico N afetou a estabilidade da austenita e atuou na energia de falha de empilhamento do aço. Como esperado, o maior teor de cobre presente no aço N contribuiu para decrescer sua temperatura  $Md_{30}$ , conforme é visto na Tabela 1. Isto significa que o aço N ficou mais estável em relação à transformação martensítica, como de fato, foi observado neste trabalho.

Em relação a energia de falha de empilhamento, sabe-se que o cobre aumenta o seu valor em aços inoxidáveis austeníticos. Assim, espera-se que o aço inoxidável N tenha maior valor de energia de falha de empilhamento que o aço B o que facilita o escorregamento cruzado das deslocções, que se arranjam em estrutura celular, e reduz a capacidade encruamento dos aços inoxidáveis austeníticos (14). Além do mais, adições de cobre a aços inoxidáveis austeníticos contribuem para a supressão da formação de martensita induzida por deformação conforme relata Choi e Jim (5). Em resumo, a menor taxa de formação de martensita  $\alpha'$  no aço inoxidável austenítico N foi uma consequência direta da maior estabilidade da austenita e da maior energia de falha de empilhamento, ambas conferidas pela presença de uma quantidade mais elevada de cobre na composição química no aço inoxidável N.

#### 4 CONCLUSÕES

A adição de cobre a aços inoxidáveis austeníticos do tipo AISI 304 proporcionou um aumento na estabilidade da austenita em relação a transformação martensítica e pareceu suprimir o fenômeno de *Delayed Cracking*. Este fenômeno parece estar relacionado à presença de frações volumétricas de martensita na bordas dos copos, acima de 60%, e a uma variação da quantidade desta fase entre a base e o topo dos copos acima de 35%.

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Pesquisa (CNPq) pela bolsa concedida a aluna de doutorado e a Companhia Siderúrgica ACESITA S.A., pelo fornecimento dos materiais e realização dos testes deste trabalho.

## Referências

- 1 Acesita, 2002. “Espaço Acesita: Publicação para Clientes, Investidores, Empregados e Comunidade”, Ano II, n. 10, 2002.
- 2 IKEGAMI, Y., FUKUI, T., NISHI, T., Development of an Austenitic Stainless Steel for Deep Drawing, *International Congress of Stainless Steel'99*, pp.211-219, 1999.
- 3 RINTAMAA, R., SULONEM, M., Proc. 12th Biental Congress International Deep Drawing Group, *Associazione Italiana de Metallurgia*, pp. 119-130, 1982.
- 4 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.
- 5 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, pp. 99-104, 1996.
- 6 HOSFORD, W.F., CADDEL, R.M., Metal Forming Mechanics and Metallurgy, Prentice Hall Inc., 1<sup>st</sup> edition, Englewood Cliffs, 1983.
- 7 SCHALLER, F.W., SCHIMID, T.E., SNAPE, E., Delayed Cracking of Deep Drawn Stainless Steel, *Sheet Metal Industries*, v.10, pp.621-624, 1972.
- 8 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, no. 1, pp. 40-45 2003.
- 9 WANG, Z., GONG, B. Residual Stress in the Forming of Materials. *ASM International Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel (USA)*, pp. 141-149, 2002.
- 10 HOSHINO, K.; Effect of Chemical Composition on Season Cracking of Metastable Stainless Steel. *Transactions ISIJ*, v. 20, pp. 147-153, 1977.
- 11 ANGEL, T., Formation of Martensite in Austenitic Stainless Steel. Effects of Deformation, Temperature and Composition, *Journal of the Iron and Steel Institute*, pp. 165-174, 1954.
- 12 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*, pp 199-207, 1999.
- 13 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, pp. 772-782, 1977.
- 14 PICKERING, F.B., Physical Metallurgical Developments of Stainless Steels, Proc. Conf. Stainless Steels, 84, Gothenburg, pp. 2-28, 1984.
- 15 LANGE, K., *Handbook of Metal Forming*. McGraw-Hill Book Company, first edition, New York. 1985.

# EFFECT OF STRAIN INDUCED MARTENSITE ON THE DELAYED CRACKING PHENOMENON IN AISI 304 STAINLESS STEELS<sup>1</sup>

Marta Ribeiro dos Santos<sup>2</sup>  
Hélio José Batista Alves<sup>3</sup>  
Robson Guimarães Lopes<sup>4</sup>  
Berenice Mendonça Gonzalez<sup>5</sup>

## Abstract

Metastable austenitic stainless steels show the Delayed Cracking Phenomenon when they are heavily deformed by deep drawing operation. This phenomenon occurs in those steels that transform substantially to martensite during forming. Copper is an alloying element that can partially inhibit this transformation making austenite more stable against strain induced martensitic transformation. The purpose of this investigation was to evaluate both the effect of copper addition on the amount of  $\alpha'$  martensite formed along the cup wall of austenitic stainless steel deep-drawn and redrawn cups and the number of cracks appearing in the cups edges due to the Delayed Cracking Phenomenon. Also in this work, the same features of a conventional metastable austenitic stainless steel are presented in order to compare to copper-added steel.

**Key words:** Delayed cracking phenomenon; Strain induced martensite; Austenitic stainless steel.

<sup>1</sup> Paper presented at 42<sup>th</sup> Rolling Processes, Rolled and Coated Products Seminar of ABM; Santos, SP, October 25 to 26, 2005.

<sup>2</sup> Graduate Student - Federal University of Minas Gerais - Metallurgical and Material Engineering Department - Rua Espírito Santo, 35 - Centro - Belo Horizonte - Minas Gerais - [marta@demet.ufmg.br](mailto:marta@demet.ufmg.br)

<sup>3</sup> Cia Siderúrgica Acesita S.A. - Research Center - Praça 10 de Maio, 09 - Centro - Timóteo - Minas Gerais - [helioalves@acesita.com.br](mailto:helioalves@acesita.com.br)

<sup>4</sup> Cia Siderúrgica Acesita S.A. - Research Center - Praça 10 de Maio, 09 - Centro - Timóteo - Minas Gerais - [rglopes@acesita.com.br](mailto:rglopes@acesita.com.br)

<sup>5</sup> Professor - Federal University of Minas Gerais - Metallurgical and Material Engineering Department - Rua Espírito Santo, 35 - Centro - Belo Horizonte - Minas Gerais - [gonzalez@demet.ufmg.br](mailto:gonzalez@demet.ufmg.br)