

# EFEITO DA DISTRIBUIÇÃO E FRAÇÃO VOLUMÉTRICA DA FASE MARTENSÍTICA EM CHAPAS LAMINADAS A QUENTE NO FENÔMENO RIDGING EM AÇOS INOX FERRÍTICOS AISI 430<sup>1</sup>

José Sérgio Ferreira<sup>2</sup>  
Berenice Mendonça Gonzalez<sup>3</sup>  
Tarcisio Reis de Oliveira<sup>4</sup>

## Resumo

Os aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 (16% Cr) são largamente utilizados em móveis, pias, máquinas de lavar roupas, lava louças, fornos elétricos e outros bens de consumo duráveis. Devido à sua aplicação decorativa, a aparência da superfície das chapas é um fator muito importante, principalmente aquelas nas quais é necessária a estampagem, quando ocorre o fenômeno de estriamento (*ridging*), isto é, rugas ou estrias na superfície das partes deformadas. Um dos métodos para reduzir o grau de estriamento baseia-se no fato de que, no processamento a frio do aço AISI 430, a martensita formada no resfriamento rápido na laminação a quente a partir da região bifásica (ferrita+austenita), pode introduzir variações na trajetória de deformação na matriz ferrítica, e assim acarretar uma estrutura de grãos mais finos e com menor grau de orientação preferencial após o recozimento final.

Neste trabalho analisou-se a influência da fração volumétrica de martensita, presente na chapa durante a laminação a frio, nas propriedades mecânicas e no grau de estriamento de um aço do tipo AISI 430.

**Palavras-chave:** Aço inox ferrítico; Ridging; Estrias; 430.

<sup>1</sup> 60º CONGRESSO ANUAL DA ABM, a ser realizado nos dias 25 a 28 de julho de 2005, em Belo Horizonte – MG – Brasil

<sup>2</sup> Engenheiro Mecânico, Gerência de Metalurgia de Inoxidáveis da ACESITA; Timóteo – MG

<sup>3</sup> Profª, Dra. Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG; Belo Horizonte, MG.

<sup>4</sup> Engenheiro Mecânico, Mestre., Dr., Gerência do Centro de Pesquisa da ACESITA; Timóteo - MG

# 1 INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis ferríticos apresentam competitividade de custo frente aos austeníticos, devido à ausência ou baixo teor de níquel em sua composição. Portanto a sua utilização como substitutos dos aços da série 300 (principalmente o AISI 304) torna-se bastante atraente. No Brasil, durante a década de 90, do total de aços inoxidáveis consumidos, somente 35% eram ferríticos, hoje este percentual já passa de 54% conforme relatórios internos da ACESITA. Porém, os aços inoxidáveis ferríticos apresentam um conjunto de propriedades mecânicas, características de corrosão e estampagem, em geral, inferiores às dos aços austeníticos <sup>(1)</sup>

Os aços inoxidáveis ferríticos AISI 430 (16% Cr) são largamente utilizados em móveis, pias, máquinas de lavar roupas, lava louças, fornos elétricos e outros bens de consumo duráveis. Devido à sua aplicação decorativa, a aparência da superfície das chapas é um fator muito importante, principalmente para aplicações onde é necessária a estampagem, quando ocorre o fenômeno de estriamento (*ridging*), isto é, estrias ou rugas na superfície das partes deformadas <sup>(2)</sup>

Neste sentido, a redução da intensidade do estriamento vem sendo visada pelos produtores de aço inox desde, pelo menos, meados da década de 60, buscando atender às exigências crescentes por melhor qualidade por parte dos clientes.

A presença de estrias na superfície da chapa é um defeito em forma de rugas alinhadas no sentido de laminação após deformação por tração. Este defeito é avaliado pelo maior ou menor grau deste estriamento. Segundo a literatura as estrias estão relacionadas com <sup>(3)</sup>:

- Estrutura colunar durante a solidificação no lingotamento contínuo.
- Estrutura de grãos grosseiros na forma de bandas ou colônias após laminação a quente.

Um dos métodos para reduzir o grau de estriamento baseia-se no fato de que, no processamento a frio do aço AISI 430, a martensita formada no resfriamento rápido na laminação a quente a partir da região bifásica (ferrita+austenita), pode introduzir variações na trajetória de deformação na matriz ferrítica, e assim acarretar uma estrutura de grãos mais finos e com menor grau de orientação preferencial após o recozimento final <sup>(4)</sup>.

Neste trabalho pretende-se estudar a influência da fração volumétrica de martensita, presente na chapa durante a laminação a frio, na microestrutura, nas propriedades mecânicas e no grau de estriamento de um aço do tipo AISI 430.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Materiais

O material utilizado foi um aço tipo AISI 430, com a composição química modificada em relação ao aço padrão. Foi produzida uma corrida industrial com redução do teor de carbono e aumento do teor de manganês. A redução do teor de carbono teve como objetivo melhorar a conformabilidade a frio, através da redução do teor de carbono da

martensita formada no resfriamento após recozimento intercrítico e diminuir a fração volumétrica de carbonetos de cromo na bobina laminada a frio. A Tabela 1 mostra a composição química do aço AISI 430 padrão e a do aço experimental, 430J. O aumento do teor de manganês visou manter constante o efeito dos elementos gamagêneos no aço.

**Tabela 1.** Composição química dos aços AISI 430 padrão e AISI 430J (%em peso)

Aço	C	N	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	Nb	Ti
AISI 430	0,048	0,0500	0,285	0,28	16,07	0,16	0,017	0,006	0,005
430J (Exp.)	0,017	0,0575	0,776	0,28	16,20	0,13	0,001	0,020	-

O material foi recebido na condição de chapa laminada a quente e em seguida processada em laboratório.

## 2.2 Métodos

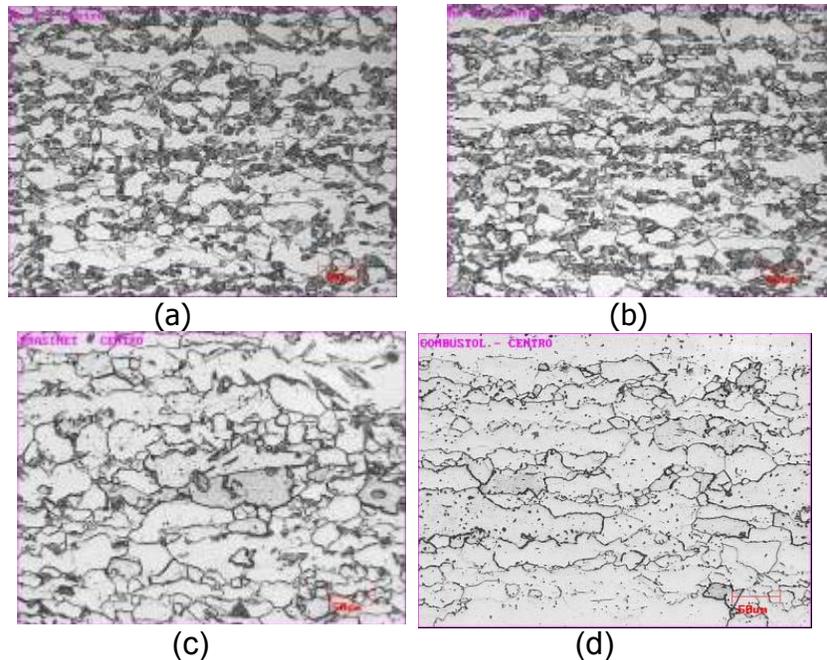
Chapas do aço 430J laminadas a quente, com microestrutura inicial de ferrita e carbonetos de cromo, foram submetidas a um recozimento intercrítico na temperatura de máxima fração de austenita (1025°C). Em seguida, foram resfriadas até a temperatura de 540°C, em diferentes taxas de resfriamento (20, 8, 0,03 e 0,01°C/s), a fim de se obter diferentes frações volumétricas de martensita. O resfriamento até a temperatura ambiente foi feito a uma taxa de 40°C/h (simulando o resfriamento após o bobinamento). Estas condições foram adotadas com base no trabalho de Koike<sup>(4)</sup>. As chapas foram, então, decapadas e laminadas a frio para uma espessura de 0,60mm (redução de 85%) e em seguida, foram recozidas à temperatura de 830°C por 32 segundos e novamente decapadas.

As chapas foram examinadas por microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e EBSD (Electron Back-Scattered Diffraction). As propriedades mecânicas, o expoente de encruamento, o coeficiente de anisotropia normal médio e o coeficiente de anisotropia planar foram determinados em amostras retiradas das chapas laminadas a frio e recozidas. O grau de estriamento foi avaliado por análise visual e por perfilometria em amostras após 15% de deformação por tração.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

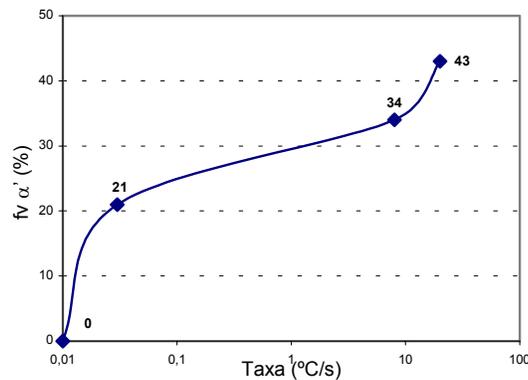
### 3.1 Microestrutura da Bobina Laminada a Quente Após Recozimento Intercrítico

A Figura 1 mostra a microestrutura das amostras após o tratamento térmico com diferentes taxas de resfriamento ( 20, 8, 0,03 e 0,01°C/s) e as respectivas frações volumétricas de martensita 43, 34, 21 e 0%. Observa-se a fase ferrita  $\alpha$  (clara) como uma mistura de grãos equiaxiais e de grãos alongados na direção de laminação e a fase martensítica  $\alpha'$  (escura) que foi transformada da fase austenita  $\gamma$ . A martensita está bem distribuída ao longo da espessura e localizada predominantemente nos contornos de grão da ferrita. A morfologia da martensita, identificada através do microscópio eletrônico de varredura, foi do tipo ripa, a qual é típica para aços com valores de carbono abaixo de 0,4%<sup>(5)</sup>.



**Figura 1.** Microestrutura das chapas do aço 430J após tratamento térmico para obtenção de martensita. (a) 43% (b) 34% (c) 21% (d) 0 % de martensita.

A Figura 2 mostra a variação da fração volumétrica média de martensita em função da taxa de resfriamento. Observa-se que a fração volumétrica de martensita diminui com a taxa de resfriamento, como o esperado.

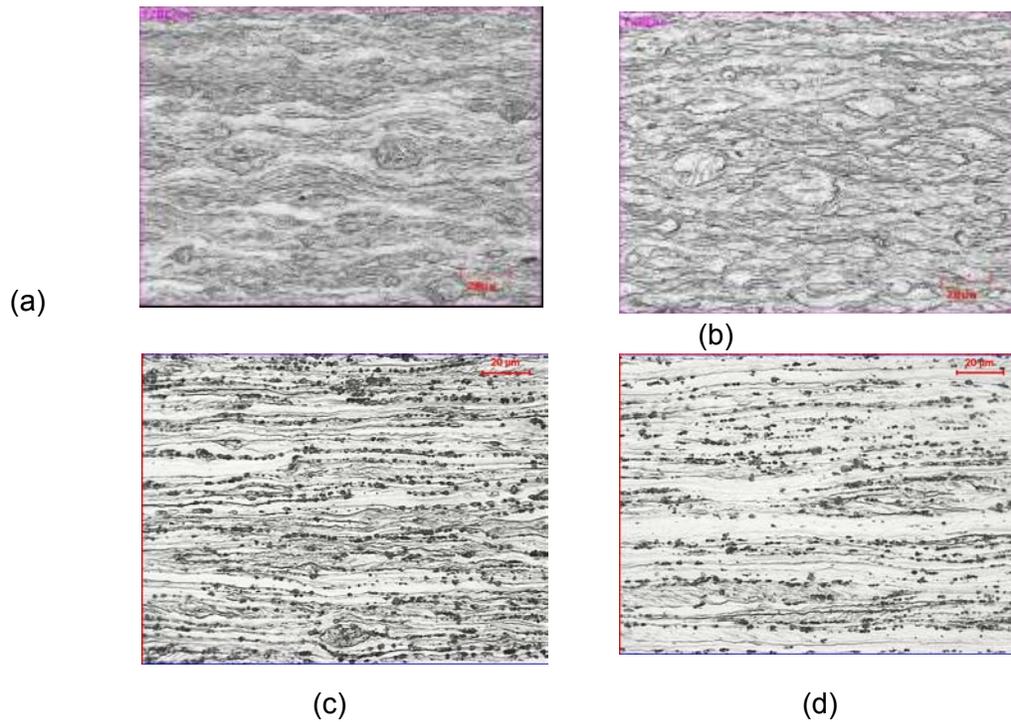


**Figura 2.** Variação da fração volumétrica de martensita em função das taxas de resfriamento.

### 3.2 Microestrutura Após Laminação a Frio

Conforme ilustrado na figura 3, para 43%, 34% e 21% de martensita, a microestrutura é constituída de ferrita deformada e martensita em forma de “nódulos”. As figuras ilustram a mudança da trajetória de deformação da ferrita na vizinhança dos nódulos de martensita. Isto cria um gradiente de deformação e uma acentuada curvatura de rede nas proximidades dos “nódulos” de martensita, fazendo com que estas regiões se tornem um local propício à nucleação de novos grãos durante o tratamento térmico posterior<sup>(6)</sup>. Por outro, lado na condição de 0% de martensita nota-se apenas a deformação da ferrita, sem mudança na trajetória de deformação desta fase. Como era

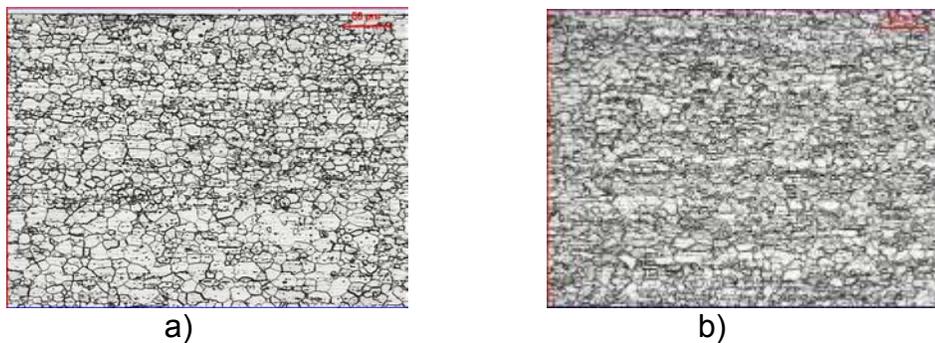
de se esperar, observa-se no caso das amostras com 21% e 0% de martensita uma maior quantidade de carbonetos de cromo (alinhados na direção de laminação).



**Figura 3.** Microestrutura do aço 430J após 85% de redução a frio.

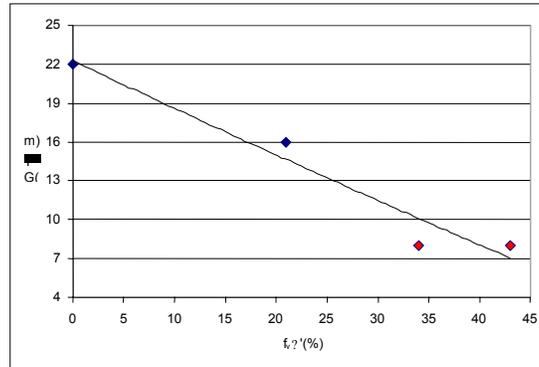
### 3.3 Microestrutura Após Recozimento

Após o tratamento térmico final, todas as condições apresentaram estrutura constituída de ferrita recristalizada e carbonetos de cromo. A Figura 4 apresenta a microestrutura para as amostras com 0 e 34% de martensita.



**Figura 4.** Microestrutura do aço 430J laminado a frio após o recozimento final com (a) 0% e (b) 34% de martensita.

A Figura 5 apresenta a variação do tamanho do grão ferrítico em função da fração volumétrica de martensita ( $\alpha'$ ).



**Figura 5.** Variação do tamanho de grão após recozimento final com as diferentes frações volumétricas de martensita na laminação a frio

Observa-se que para as amostras com maior fração de martensita o tamanho de grão foi menor. Isto está ligado ao maior grau de encruamento ao redor das partículas de martensita (recristalização tipo NEP), o que implica em maior taxa de nucleação na recristalização<sup>(6)</sup>.

### 3.4 Propriedades Mecânicas

Os valores de limite de escoamento (LE), limite de resistência (LR), alongamento total, coeficiente de encruamento (n), anisotropia planar ( $\Delta R$ ), anisotropia normal média ( $\bar{R}$ ), dureza e tamanho de grão estão mostrados na Tabela 2.

**Tabela 2.** Resultados das propriedades mecânicas, estampabilidade e tamanho de grão das condições com diferentes frações de martensita.

Fração de Martensita (%)	Esp. (mm)	LE (MPA)	LR (MPA)	Al Total (%)	n	$\Delta R$	$\bar{R}$	Dureza	Tam. Grão (μm)
0	0,59	349	483	28,1	0,24	-0,09	0,96	72	22
21	0,60	363	504	28,9	0,24	-0,10	0,80	74	16
34	0,60	379	559	23	0,25	-0,14	0,90	79	8
43	0,59	380	557	24	0,25	-0,18	0,91	80	8
AISI 430 padrão	0,59	345	506	28	0,21	0,20	1,10	78	19

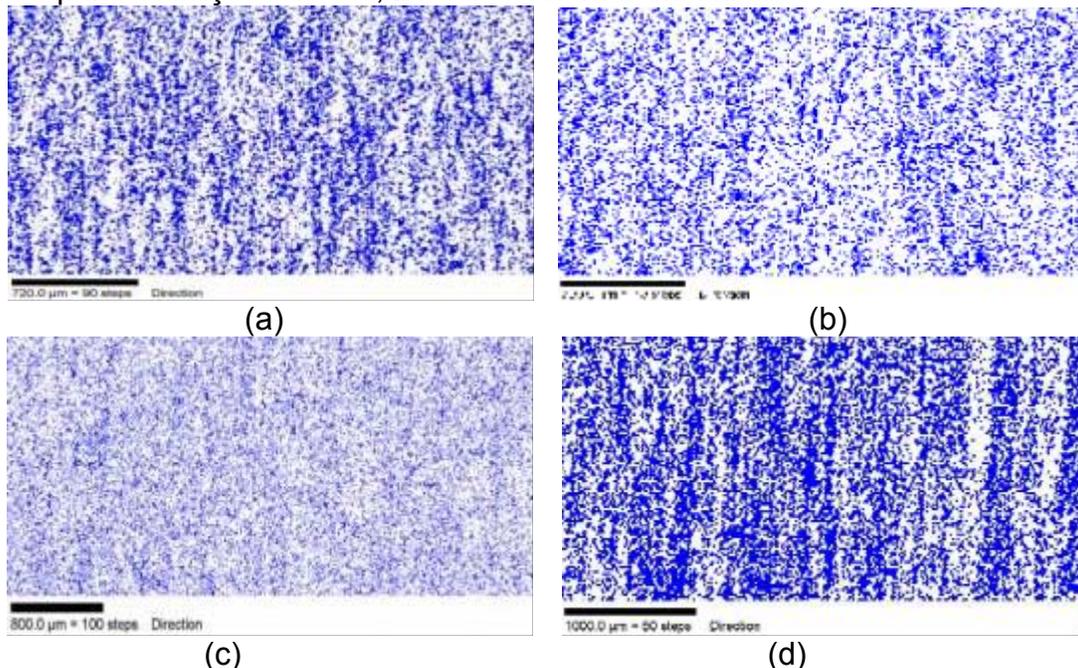
Com relação às propriedades mecânicas observou que o limite de resistência e o limite de escoamento aumentam e o alongamento uniforme e total diminuíram com o aumento da fração volumétrica de martensita. Este comportamento está diretamente relacionado com o tamanho de grão final, o qual por sua vez é função da fração volumétrica de martensita presente na laminação a frio.

É razoável também considerar alguma influência nas propriedades mecânicas da distribuição dos carbonetos de cromo oriundos da decomposição da martensita no recozimento final. Maiores frações de martensita antes do recozimento resultam em uma dispersão mais fina dos precipitados após tratamento térmico, e conseqüentemente maior eficiência no bloqueio de discordâncias (efeito Orowan)<sup>(6)</sup>.

Nos resultados do coeficiente de anisotropia normal médio,  $\bar{R}$ , observa-se um menor valor nas condições laminadas com martensita. Isto provavelmente está ligado a menor intensidade de fibra gama  $\gamma$  (plano  $\{111\}$  paralelo a superfície da chapa) e presença de texturas desfavoráveis tais como Goss  $\{110\}\langle 100\rangle$  e fibra alfa  $\alpha$  nestas condições com martensita.

### 3.5 Microtextura

A Figura 6 ilustra os resultados da microtextura no mapa de orientação dos grãos do tipo fibra gama na região central da espessura, no plano da superfície do aço AISI 430 padrão e para as frações de 0%, 21 e 43% de martensita.

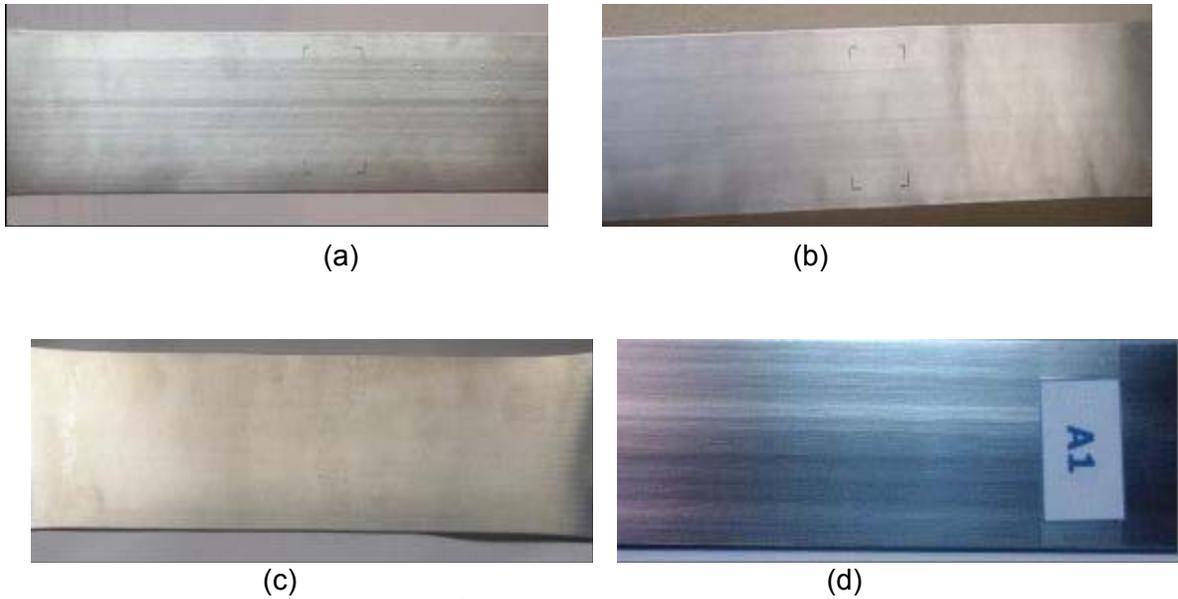


**Figura 6.** Mapa de orientação EBSD destacando-se a fibra gama. (a) 0% (b) 21% e (c) 43% de martensita antes do recozimento final. (d) aço AISI 430 padrão.

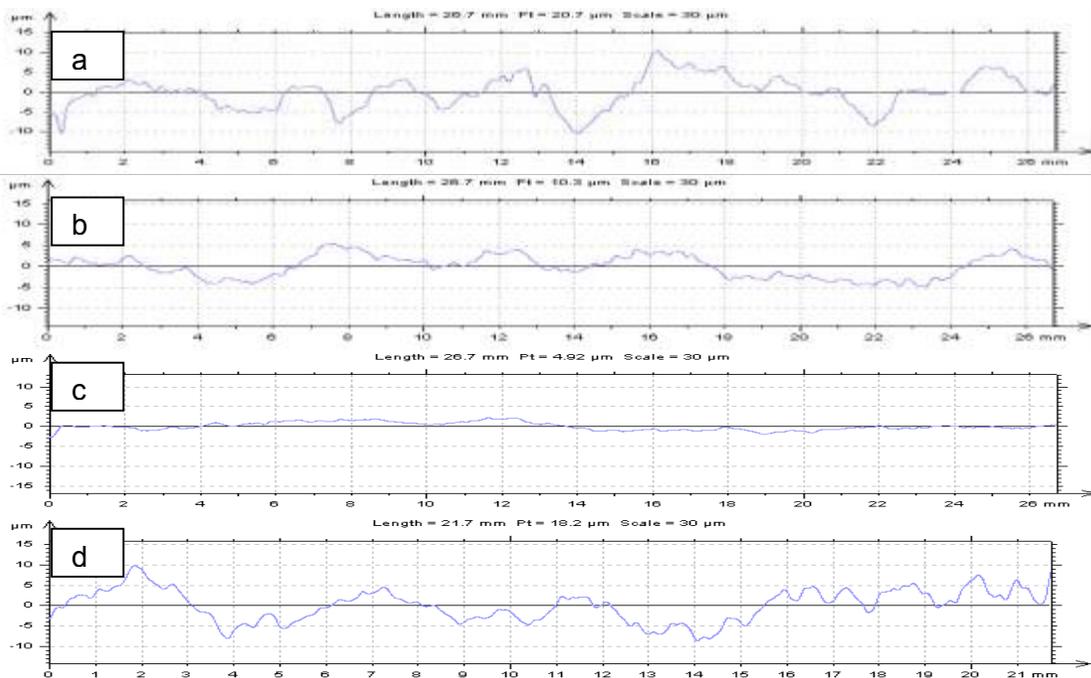
Para os mapas de orientação das condições com 34 e 43% de martensita houve uma quebra do alinhamento dos grãos e uma formação de textura aleatória. Na condição com 21% de martensita começa a haver um alinhamento dos grãos o que fica mais evidente para a condição com 0% de martensita. Pode ser observado na figura 6 o alinhamento dos grãos nos aços AISI 430 padrão, formando colônias de mesma orientação, o que é considerado o principal fator para a formação de estrias nestes aços<sup>(7)</sup>

### 3.6 Avaliação do Nível de Estriamento

Os resultados da análise visual e através do rugosímetro são mostrados nas Figuras 7 e 8.



**Figura 7.** Aparência da estria na superfície da chapa após 15% de deformação em tração. (a) 0%, (b) 21%, (c) 34%, (d) referência AISI 430 padrão.



**Figura 8.** Perfil da rugosidade (transversal) nas diferentes frações de martensita após 15% de deformação em tração (a) 0%, (b) 21%, (c) 34% de martensita (d) AISI 430 padrão.

Os resultados mostram que um aumento na fração volumétrica de martensita durante a laminação a frio diminui acentuadamente a tendência ao estriamento no aço 430J, sendo isento de estria na análise visual. Além disso, o estriamento medido via perfilometria é muito baixo para as frações volumétricas de martensita de 34 e 43%.

#### **4 CONCLUSÕES:**

1- A presença de martensita na etapa de laminação a frio do aço 430J reduziu o grau de estriamento em relação ao aço AISI 430 padrão. Este efeito foi significativo para frações volumétricas de martensita entre 34 e 43%, para as quais por análise visual não há estrias.

2- Os valores das propriedades mecânicas em tração para o aço 430J ficaram dentro dos limites estabelecidos para o aço AISI 430 padrão, porém, apresentaram diferenças em relação aos valores típicos.

3- A redução no grau de estriamento observada para as frações de martensita entre 21 e 43%, está relacionada ao decréscimo ou eliminação de colônias de grãos de mesma orientação cristalográfica. Entretanto, esta presença de martensita reduz a intensidade de fibra gama  $\gamma$  e conseqüentemente o coeficiente de anisotropia normal médio.

4- O aumento no limite de escoamento e no limite de resistência e o decréscimo no alongamento e total com o aumento na quantidade de martensita, presente na laminação a frio, são conseqüências da diminuição do tamanho de grão e do raio médio das partículas de carbonetos de cromo com o aumento da fração volumétrica de martensita

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.**

- 1 LACOMBE, P., BAROUX, B., BERANGER, G. - Stainless Steels, Les editions de Physique, 2000
- 2 COMPANHIA AÇOS ESPECIAIS ACESITA. Divisão de Metalurgia. Manual Técnico de Aços Inoxidáveis, Características e cuidados, Relatório interno.
- 3 TAKECHI H, KATO H, SUNAMI T, NAKAYAMA T. The mechanism of ridging phenomenon in 17% chromium stainless steel sheets. Trans. JIM 1967, 31(6), 717,
- 4 MASAO KOIKE. Development of in-line austenite treatment process for elimination of ridging in aisi 430 ferritic stainless steel sheets. Proceeding of international conference on stainless steels, 1991, Chiba, ISIJ.
- 5 HONEYCOMBRE, R. W. K.. Steel, microstructure and properties, 2<sup>a</sup>. Ed. Edward Arnold, 1981, pp. 244.
- 6 HUMPHREYS F.J.; HATHERLY M. Recrystallization and Related Annealing, Pergamon, ed. Elsevier, second edition, 2004
- 7 ROGER N. WRIGHT. Anisotropy plastic flow in ferritic stainless steel and the ROPING phenomenon. Research and development center, Westinghouse E. corp. Pittsburgh, volume 3, January 1972, pag. 83-91.
- 8 HUNG CHI CHAO .The mechanism of ridging in ferritic stainless steel. Trans. Am. Soc. Met. 1967.
- 9 R. W. K. HONEYCOMBRE. Steel, microstructure and properties, 2<sup>a</sup>. Ed. Edward Arnold, 1981, pp. 244.

# EFFECT OF THE DISTRIBUTION AND VOLUMETRIC FRACTION OF THE MARTENSITE PHASE IN HOT ROLLED SHEETS IN THE RIDGING PHENOMENON IN AISI 430 FERRITIC STAINLESS STEEL<sup>1</sup>

*José Sérgio Ferreira<sup>2</sup>  
Berenice Mendonça Gonzalez<sup>3</sup>  
Tarcísio Reis de Oliveira<sup>4</sup>*

## **Abstract**

The ferritic stainless steel AISI 430 (16% Cr) is used broadly to make pieces of furniture, sinks, washing machines, dishe-washers, electric ovens and other durable consumer goods. Due to their ornamental application, the appearance of the surface is a very important factor, mainly when drawing is necessary and the ridging phenomenon happens, this is, grooves on the surface of the deformed parts. One of the methods to reduce the level of ridges is based on the fact that, during the cold processing of the steel, the martensite formed in the fast cooling of the hot rolling, can introduce variations in the deformation path of the ferritic, and this can produces a finer grain structure and smaller level of preferential orientation after the final annealing.

In this work it is analyzed the influence of the distribution and volumetric fraction of martensite formed during the cooling after hot rolling in the mechanical properties and in the level of ridging of cold and annealed AISI 430 steel sheets.

**Key- words:** AISI 430 ferritic stainless steel; Martensite; Ridging.

<sup>1</sup> 60th ABM ANNUAL CONGRESS, to be accomplished on July 25 to 28, 2005, Belo Horizonte - MG - Brazil

<sup>2</sup> Mechanical engineer, Stainless Steel Metallurgy Department - ACESITA; Timóteo - MG

<sup>3</sup> Professor, PhD, Metallurgy and Materials Engineering Department - UFMG; Belo Horizonte, MG.

<sup>4</sup> Mechanical engineer, PhD, ACESITA Research Center; Timóteo - MG