

# AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS $r$ E $n$ DE UM AÇO BAIXO C COM ADIÇÃO DE Mn VIA RECOZIMENTO CONTÍNUO PARA % REDUÇÃO A FRIO DE 75% e 79%<sup>1</sup>

*Flávia Tereza dos Santos Fernandes<sup>2</sup>  
Augusto César Lacerda de Oliveira<sup>3</sup>  
Júlio Cesar Lopes da Silva<sup>4</sup>  
Nilton Vieira Larcher<sup>5</sup>  
Douglas de Sousa Barroso<sup>6</sup>  
José Eduardo Ribeiro de Carvalho<sup>7</sup>*

## RESUMO

Na concepção dos modernos automóveis, o fator segurança tem merecido especial destaque ao lado de outros como conforto, baixo custo e menor consumo de combustível. Seguindo esta tendência têm sido utilizados em larga escala pelas montadoras, materiais de menor espessura com elevada resistência mecânica, porém com algum requisito de conformabilidade. Para a obtenção desta classe de materiais, com uma resistência mecânica mínima de 350MPa (LR) e com alongamentos superiores a 32%, tem sido empregado Mn aos aços.

Foi realizado, em escala piloto, uma simulação do processo de laminação a frio de um aço baixo C com adição de Mn de 0,54% com o objetivo de se avaliar os valores de  $r_{90}$  e  $n_{90}$ . Os percentuais de redução a frio empregados foram de 75% e 79%.

A simulação foi realizada em um laminador piloto do tipo duo reversível e as amostras foram tratadas em forno de banho de sal, simulando o recozimento contínuo.

Os resultados obtidos indicam que para o percentual de Mn utilizado é possível a obtenção de valores de  $r_{90}$  superiores a 1,3 e valores de  $n_{90}$  de 0,20. Isto confere ao produto final (reforços internos) um bom desempenho em operações de estampagem.

Palavras Chave: manganês, alta resistência, laminação piloto.

---

<sup>1</sup> 41º SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS – 26 a 28 de Outubro de 2004, Joinville –SC-Brasil.

<sup>2</sup> Engenheira de Desenvolvimento Sênior, GGDP-CSN, Engenheira Metalúrgica, MSc.

<sup>3</sup> Aluno da Graduação e Iniciação Científica em Engenharia Metalúrgica EEIMVR-UFF.

<sup>4</sup> Técnico de Laboratório, GGDP-CSN, Técnico de Metalurgia.

<sup>5</sup> Engenheiro de Desenvolvimento Sênior, GGDP-CSN, Engenheiro Metalúrgico, DSc

<sup>6</sup> Engenheiro de Desenvolvimento Pleno, GGDP-CSN, Engenheiro Químico, MSc

<sup>7</sup> Coordenador de Projetos Especiais, GGDP-CSN, Engenheiro Metalúrgico, MSc.

## 1 - INTRODUÇÃO

A estampabilidade das chapas de aço depende, dentre outros, de sua textura.[2] Este é um processo complexo, uma vez que envolve distribuição de deformações e tensões também complexas. Dentre os fatores que influenciam no processo de estampagem das chapas, destacam-se as propriedades do material, a % redução durante a laminação a frio, as condições de processamento termomecânico, as condições de estampagem e o projeto do ferramental. Nos aços baixo C, a alta estampabilidade está associada à presença de grande quantidade de planos {111} paralelos à superfície da chapa enquanto a baixa estampabilidade está associada à grande incidência de planos {100} paralelos à superfície da chapa.[2] A textura de recozimento ou de recristalização depende fortemente do grau de redução a frio que precede o recozimento.[2] Para baixas reduções aparece junto com a textura {111}//ND, a textura de Goss (011)<100>. Com o aumento do grau de redução, a textura de Goss é enfraquecida e a textura {111}//ND é fortalecida. Para reduções muito altas aparecem componentes da textura indesejável <100>. Portanto, existe um grau de redução ótimo para cada aço situado entre 65 e 80%.[2] Neste contexto, a simulação das condições de laminação a frio, em escala piloto, utilizando %redução a frio diferenciados, serve para estimarmos as características de conformabilidade, uma vez que elas irão influenciar nos modos de deformação a que as chapas serão submetidas. Estes modos de deformação envolvem operações de dobramento, estampagem profunda, estiramento, afinamento de parede ou uma combinação destas.[3] O teste utilizado para medir as características de conformabilidade é o ensaio de tração com determinação dos coeficientes  $r$  e  $n$ . O índice de anisotropia plástica,  $r$ , é a razão entre as deformações no sentido da largura, pelas deformações no sentido da espessura medidas num corpo de prova de tração com uma deformação de 15 a 20%. A anisotropia normal que relaciona os valores de  $r$  medidos em corpos de prova retirados a 0, 45 e 90° em relação à direção de laminação, tem um efeito significativo no modo de deformação por estampagem profunda e quanto maior for o valor de  $r$  melhor será a estampagem da peça. O coeficiente  $n$  está relacionado ao estiramento da chapa e pode ser visto como um fator de distribuição de deformações. No modo de deformação por estiramento a capacidade do material de diminuir a espessura sem que ocorra instabilidade plástica irá determinar a altura da peça conformada sem fratura e, de acordo com a teoria da plasticidade, quanto maior for o valor de  $n$  mais aumenta o limite de instabilidade.[3] Ainda do ponto de vista das características do material, a composição química irá determinar o grau de resistência mecânica do aço, determinando assim, a sua maior ou menor habilidade para a conformação. Neste caso particular, será realizada uma avaliação dos parâmetros de conformabilidade  $r$  e  $n$  de um aço baixo C com adição de 0,54%Mn quando submetido a duas porcentagens de redução a frio diferentes 75% e 79%. Para a aplicação a que destina (reforço interno), estão sendo objetivados  $r_{90}$  superior a 1,3 e  $n_{90}$  maior que 0,18. Os resultados obtidos, em escala piloto, indicaram que para a %redução a frio utilizado foi possível a obtenção dos valores de  $r$  e  $n$  objetivados. Entretanto, se faz necessária uma validação das condições obtidas, em escala industrial. Isto será objeto de um novo trabalho, e nesta oportunidade, será realizado um estudo mais aprofundado destas variáveis como também será feita uma avaliação da influência da textura obtida nos parâmetros de conformabilidade desses aços.

## 2 – REVISÃO DE LITERATURA

Na confecção de aços laminados a frio de alta resistência, tem sido utilizado manganês em adições que variam em função do grau de resistência mecânica e conformabilidade requeridos para os aços. Para adições de Mn variando entre 0,2 e 0,7%, têm sido obtidos produtos com desempenho satisfatório em prensa, na confecção de componentes estruturais e de reforços internos. Entretanto, no caso de aplicações mais complexas, é necessária certa cautela, tendo em vista que de acordo com a literatura[1] o Mn tem efeito prejudicial à textura do material laminado a frio e recozido a partir de determinados níveis de adição deteriorando assim, a conformabilidade do produto final. Ushioda[4] e outros estudando o efeito do Mn em teores de 0,02%Mn até 0,52%Mn mostram que o Mn retarda a cinética de recristalização em aços baixo C acalmados ao alumínio. Em particular o período de incubação para a recristalização é prolongado consideravelmente pela presença de Mn. Foi observado que o Mn, em especial para um teor de 0,52%Mn, retarda a taxa de crescimento de grãos recristalizados, obtendo-se como resultado, uma microestrutura mais refinada no produto final. Ambos, tamanho de grão e quantidade de Mn, influenciam na obtenção da textura adequada como mostrado no gráfico 1. Foi observado que a adição de Mn diminuiu a intensidade <111>//ND o que indica que o Mn em solução (na verdade o dipolo Mn C) prejudica o desenvolvimento da textura <111>//ND. Brito[5] também mostra a influência do Mn e tamanho de grão no valor do coeficiente de anisotropia normal como mostrado nos gráficos 2 e 3. de Carvalho[6] cita que para cada 0,1% de Mn adicionado a um aço baixo C, ocorre um aumento de 3MPa no limite de escoamento, 5MPa no limite de resistência e uma perda de 5% no alongamento.HU e Goodman[1] mostram que para uma variação no teor de Mn de 0,005% até 0,56% ocorre uma variação nos valores de  $r_{90}$  de 1,86 para 1,58. Para a faixa de Mn em questão, seus experimentos evidenciaram, que a partir de 0,14% Mn a textura dominante (111) [112], que é favorável ao processo de estampagem, deteriora-se pelo enfraquecimento dessa e pelo desenvolvimento de uma série de orientações desfavoráveis como pode ser visto nas figuras 1, 2, 3 e 4.

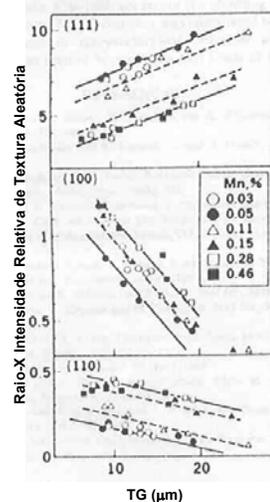


Gráfico 1 – Efeito do TG e do Mn sobre a Textura de um Aço Baixo C [4]

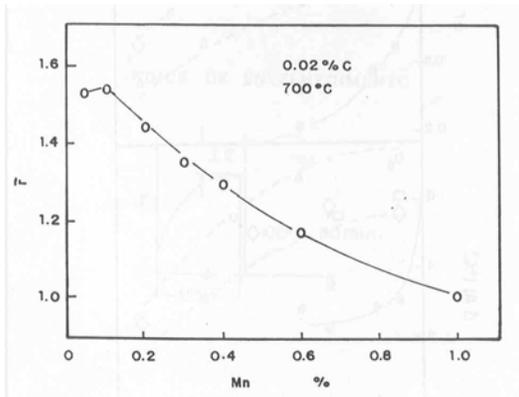


Gráfico 2 – Efeito do Mn sobre r barra de um Aço Baixo C [5]

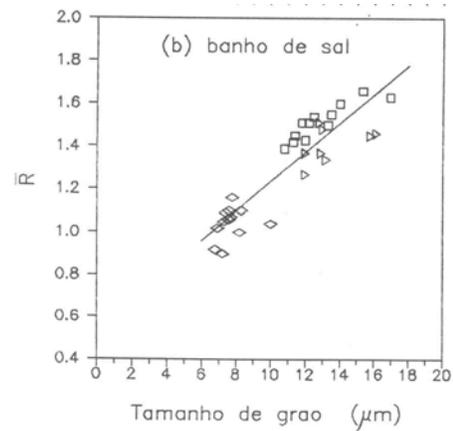


Gráfico 3– Efeito do TG sobre r barra de um Aço Baixo C [5]

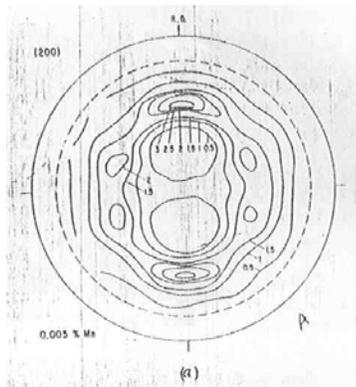


Figura 1–Textura de um aço Baixo C Laminado a Frio e Recozido com 0,005%Mn [1]

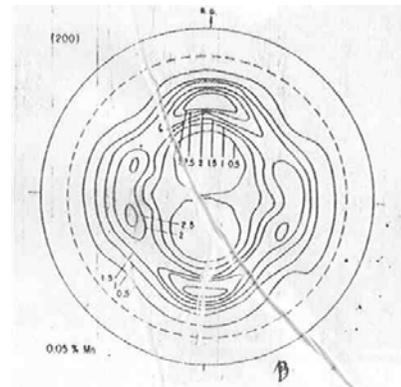


Figura 2 – Textura de um aço Baixo C Laminado a Frio e Recozido com 0,05%Mn [1]

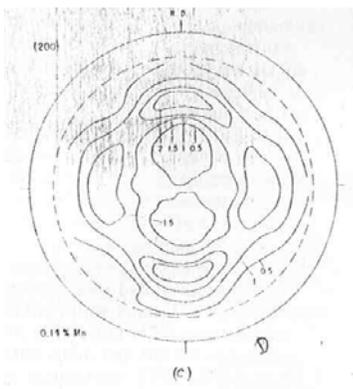


Figura 3 – Textura de um aço Baixo C Laminado a Frio e Recozido com 0,14%Mn [1]

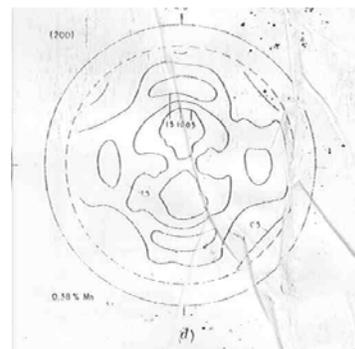


Figura 4– Textura de um aço Baixo C Laminado a Frio e Recozido com 0,38%Mn [1]

### 3 – TECNOLOGIAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO

#### 3.1 – Laminador a Frio Piloto

O processo de laminação a frio mostrado na foto 1, é um processo de deformação plástica dos metais ou ligas metálicas realizada por deformação mecânica entre cilindros (figura 5) obtendo-se como resultado um material encruado que nestas condições, apresenta elevados limites de escoamento, dureza e limite de resistência com baixíssimos valores de alongamento[7]. A laminação é utilizada para reduzir a espessura das chapas ao mesmo tempo em que lhes confere boa qualidade superficial, forma e aplainamento adequados e uma quantidade de redução a frio que lhe confira uma textura apropriada à obtenção de bons coeficientes de conformabilidade. Na prática industrial, o processo de laminação a frio é realizado em 5 etapas e como resultado obtém-se uma chapa de aço encruada como pode ser visto na foto 2.



Foto 1 – Laminador a Frio Industrial [7]

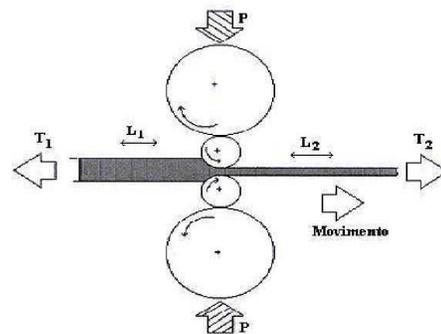


Figura 5 – Esquema de Laminação [7]

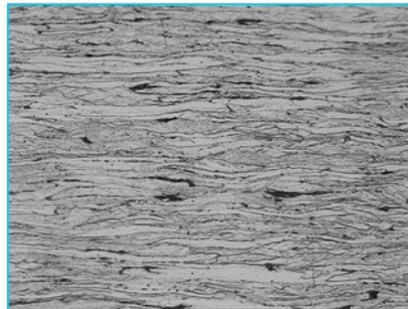


Foto 2 – Microestrutura do Material Laminado a Frio – 200x [7]

O processo de laminação a frio piloto foi baseado num esquema real de laminação a frio industrial, sendo que para a obtenção dos percentuais de redução a frio objetivados no produto final (75% e 79%) foram utilizados 7 e 6 passes de laminação. Foi utilizado um laminador piloto do tipo duo reversível com acionamento manual como pode ser visto na foto 3. Outras características do laminador incluem mesa com largura de 200 mm e velocidade de laminação variando entre 0 e 53 m/s.



Foto 3 – Laminador a Frio Piloto utilizado na Simulação  
3.2 – Forno de Recozimento Piloto

Após o processo de laminação a frio, as chapas são recozidas para que as propriedades mecânicas sejam restauradas. Na prática industrial, as chapas podem ser recozidas em linhas contínuas com fornos de recozimento dos tipos vertical (figura 6), horizontal (figura 7) ou ainda recozidas em fornos do tipo caixa.

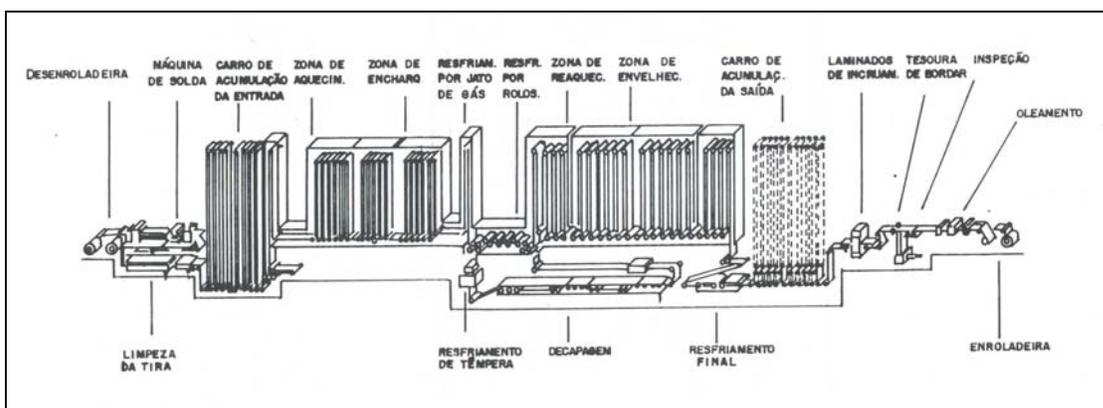


Figura 6- Forno de Recozimento Contínuo Tipo Vertical [7]

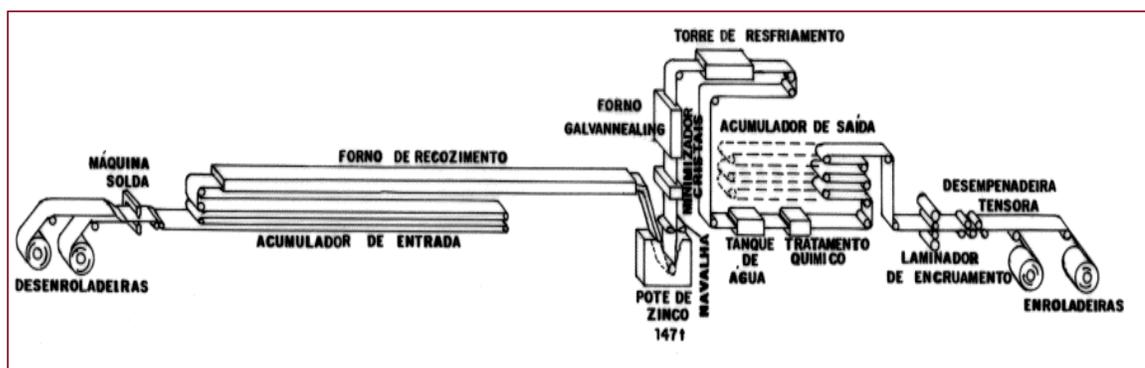


Figura 7– Forno de Recozimento Contínuo Tipo Horizontal em linha de Galvanização [7]

Para a simulação do recozimento contínuo, foi utilizado um forno de banho de sal do tipo TOE 22/45 com aquecimento elétrico (foto4) equipado com dois pirômetros, sendo um para controlar a temperatura da câmara e outro para controlar a temperatura do banho de sal. O forno possui um cadinho com 220 mm de diâmetro e profundidade de 450 mm. Os tempos de tratamento adotados foram baseados em dados reais de recozimento, tomando-se por base as dimensões finais das chapas para o cálculo dos tempos necessários à temperatura de recristalização.



Foto 4 – Forno de Banho de Sal Piloto [7]

### 3 – MATERIAIS UTILIZADOS E PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1 - Amostragem

Para a realização da experiência em escala piloto, foram retiradas 24 amostras nas dimensões 100 x 150 mm de uma chapa de aço de espessura de 3,55 mm. Essa chapa foi laminada a quente industrialmente com temperatura de acabamento acima de 790°C e temperatura de bobinamento abaixo de 730°C. O esquema utilizado para a retirada das amostras é mostrado na figura 8.

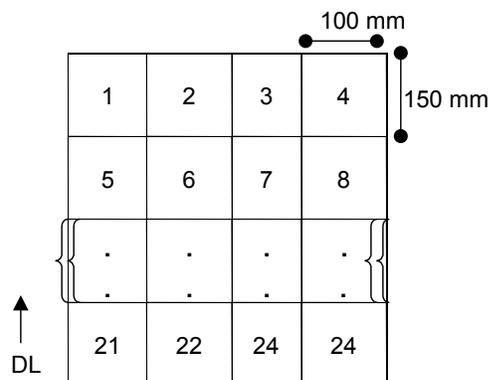


Figura 8 - Esquema de Retirada de Amostras em chapa de aço



13 a 24 em razão da espessura final. Após a realização do tratamento térmico de recozimento, as amostras foram esfriadas ao ar. As temperaturas e os tempos de tratamento obtidos para cada amostra, são mostrados na tabela III. Após esta etapa as chapas sofreram laminação de encruamento de 1,8%.

Tabela III – Condições de Processamento na Simulação de Recozimento Contínuo

Grupo	Identificação das Amostras	Temperatura de Encharque	Tempo de Encharque
1	1, 2, 3	844°C	45" 83
	4, 5, 6	841°C	45" 04
	7, 8, 9	844°C	45" 49
	10, 11, 12	843°C	45" 36
2	13, 14, 15	842°C	53" 20
	16, 17, 18	842°C	53" 11
	19, 20, 21	843°C	54" 07
	22, 23, 24	842°C	53" 35

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 – Análise Química

A faixa de composição química utilizada para todas amostras pode ser vista na tabela IV.

Tabela IV – Faixa de Composição Química das amostras 1 a 24.

Amostras	C	Mn	P	S	Si	N	Al
1 a 24	0,050 0,080	0,544	0,020 máx	0,0080	0,010 máx	0,040 máx	0,067

### 4.2 – Ensaio de Tração

Tabela V – Propriedades Mecânicas das Amostras 1 a 24.

Grupo	Espesura Inicial Média (mm)	Espesura Final Média (mm)	Red Frio (%)	LE Médio (MPa)	LR Médio (MPa)	Al <sub>80</sub> Médio (%)	r <sub>90</sub> médio	n <sub>90</sub> médio
1	3,56 ± 0,01	0,74 ± 0,01	79	319,67 ± 6,47	387,58 ± 9,51	36,32 ± 1,52	1,46 ± 0,07	0,21 ± 0,01
2	3,56 ± 0,01	0,89 ± 0,01	75	315,92 ± 7,06	382,00 ± 5,06	35,13 ± 1,23	1,40 ± 0,05	0,20 ± 0,01
<b>Valores de Referência SEW 093</b>				<b>260 – 340 MPa</b>	<b>350 – 430 MPa</b>	<b>24 % mín</b>	<b>1,30 mín</b>	<b>0,18 mín</b>

Nota: Os valores de r e n não são informados na norma SEW 093.

Para todas as amostras laminadas a frio e recozidas foram obtidos valores de r e n superiores aos valores objetivados 1,3 e 0,18 respectivamente, entretanto foi

observado patamar de escoamento nas mesmas. Este fato pode estar associado à imprecisão do laminador na obtenção de percentuais de redução tão baixos quanto 1,8% utilizado na laminação de encruamento.

#### 4.3 – Metalografia

Todas as amostras apresentaram-se recristalizadas com microestrutura homogênea formada por grãos ferríticos poligonais associados a cementita lamelar fina precipitada nos contornos de grãos e alguma perlita. O tamanho de grão ficou em torno de 11ASTM. Na foto 5 é mostrada a microestrutura típica das amostras do grupo 1 e na foto 6 é mostrada a microestrutura característica das amostras do grupo 2.



Foto 5 - Microestrutura Característica das amostras 1 a 12 - 200X – TG 11 ASTM

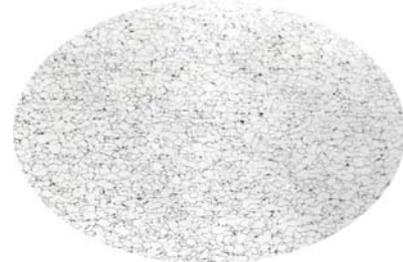


Foto 6 - Microestrutura Característica do das amostras 13 a 24 – 200X – TG 11 ASTM

#### 5 - CONCLUSÃO

- Foi possível verificar que é viável a obtenção, em escala piloto, de valores de  $r_{90}$  superiores a 1,3 com valores de  $n$  da ordem de 0,20 para um teor de Mn de 0,54%. Estes resultados estão de acordo com os valores encontrados por Hu e Goodman [1] que ao aumentarem o teor de Mn de 0,005% para 0,56% observaram uma redução nos valores de  $r_{90}$  1,86 para 1,58.
- Para os percentuais de redução a frio utilizados, 79% e 75%, bem como a temperatura e tempos de recozimento empregados, não foram observadas diferenças significativas na microestrutura, ambas apresentaram um tamanho de grão médio de 11 ASTM, entretanto, as amostras que sofreram um percentual de redução a frio maior (79%) mostraram discreta melhora nos valores de  $r$  e  $n$  (não podendo ser considerada como uma tendência) quando comparadas às amostras que sofreram 75% de redução.
- Os resultados obtidos neste trabalho são importantes na aplicação de materiais de alta resistência com adição de Mn onde é requerido algum requisito de conformabilidade, devendo sempre haver um compromisso entre o grau de resistência pretendido e o desempenho satisfatório do produto nas operações de estampagem.

Embora os resultados de  $r$  e  $n$  tenham sido satisfatórios, se faz necessário um ajuste nas condições de laminação de encruamento e na temperatura de recozimento em escala

piloto, visando a obtenção de melhores valores  $r$  e  $n$ . Somado a isso, será também necessário uma validação dessas condições em escala industrial.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 – HU, H e GOODMAN, S.R. Effect of Manganese on the Annealing Texture and Strain Ratio of Low-Carbon Steels. Metallurgical Transactions, volume 1, November 1970, pp 3057-3064.

2 – FILHO, A.F; de LIMA, L.M.G; PADILHA, A.F; de LIMA, N.B. Controle da Microestrutura e da Textura de Chapas de aço Baixo Carbono para Estampagem. II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: deformação plástica, recristalização e crescimento de grão, São Paulo IPEN, 2003.

3 – PLAUT, R.L. Estampabilidade de Chapas: ensaios e aplicações. II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: deformação plástica, recristalização e crescimento de grão, São Paulo: IPEN, 2003.

4 – USHIODA, K; YOSHINAGA, N; AKISUE, O. Influences of Mn on Recrystallization Behavior and Annealing Texture Formation in Ultra Low Carbon and Low-Carbon Steels. ISIJ International, Vol 34 (1994) n°1, pp 85-91.

5 – BRITO, R.M. Aspectos Microestruturais e Propriedades Mecânicas de Aços Baixo C Acalmados ao Alumínio submetidos a Recozimento Contínuo. Tese de Doutorado da UFRJ, setembro 1989.

6 – de CARVALHO, J.E.R, Comportamento à Corrosão de Soldas a Ponto por Resistência Elétrica de Chapas Zincadas de Alta Resistência. Tese de Mestrado UFRJ, agosto, 1990.

7 – CSN - Treinamento Básico para Clientes, documento interno