

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DO PASSE DE ENCRUAMENTO NAS PROPRIEDADES E NA CONFORMABILIDADE DO AÇO CSN 4130 UTILIZADO NA PRODUÇÃO DE EMBALAGENS ¹

Marcelo Campos Pereira ²

Miguel Justino Ribeiro Barboza ³

Hugo Ricardo Zschommler Sandim ³

Resumo

A fabricação de embalagens metálicas vem se aprimorando a cada ano em face de concorrência e a necessidade de melhoria da matéria prima exigida pelos clientes. Estes fatos exigem um aperfeiçoamento na qualidade do aço principalmente quanto às propriedades mecânicas e a qualidade superficial, haja vista o avanço da tecnologia nos processos de estampagem e a ampliação no mercado do uso de latas expandidas. Em paralelo a estes fatos, ocorre uma necessidade de aperfeiçoamento das etapas do processo de fabricação de aço. Neste trabalho avaliou-se a influência do processo de laminação a frio (skin pass) na capacidade de estampabilidade de chapas finas de um aço com baixo teor de carbono CSN 4130 aplicado na produção de latas expandidas. A estampabilidade depende, em grande parte, da resistência ao afinamento das regiões laterais adjacentes ao fundo do copo e à formação de orelhas. Para avaliação da capacidade de adaptação às operações de estampagem, foram determinadas as propriedades mecânicas sob condições de tração uniaxial em função do grau de redução a frio, conjuntamente com o valor do coeficiente de encruamento. A melhor condição para as operações em questão, também foi definida com base nos cálculos dos coeficientes de anisotropia média e planar em função do grau de redução a frio e através do ensaio Swift. Após a análise de todos os resultados, concluiu-se que a condição ótima para estampagem corresponde a chapas com grau de redução de no máximo 1,0%.

Palavras-chave: Encruamento; Aços baixo carbono; Embalagens.

STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPER MILL IN THE PROPERTIES AND FORMABILITY OF STEEL CSN 4130 USED FOR PACKING

Abstract

The production of metal packing has increased over the years to face competing products and to satisfy customers' ever-growing requirements for better raw materials. Surface quality and suitable mechanical properties required for the technological breakthrough in the stamping process are mandatory. In addition to these facts, there is a need to improve each step of the steel manufacturing process. This work aims to evaluate the influence of the cold rolling process on the drawing capability of low carbon CSN 4130 steel sheets applied in the production of expanded cans. The drawability depends, largely, on the resistance to downgauging of the side areas adjacent to the bottom of the cup and the amount of earing. To evaluate the adaptation capability to stamping operations, mechanical properties have to be determined under uniaxial tensile conditions as a function of the cold rolling reduction (skin pass), along with hardness. The best operational conditions are defined by determining the mechanical properties, and the coefficients of mean and planar anisotropy as a function of the strain (Swift test). After analyzing all results, our findings show that the optimum condition for stamping are those obtained after a skin pass corresponding to a total 1.0% reduction.

Key words: Temper mill; Low carbon steel; Packing.

¹ Contribuição Técnica ao 43º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais (ABM), 17 a 20 de Outubro de 2006, Curitiba, PR, Brasil.

² Engenheiro de Produção, CSN, Volta Redonda - RJ

³ Professor, Escola de Engenharia de Lorena – EEL, USP, Lorena - SP

1 INTRODUÇÃO

O projeto e desenvolvimento de estruturas e peças metálicas requerem a consideração de vários fatores, geralmente inter-relacionados, de tal forma que os requisitos de desempenho e performance de um componente metálico pertencente a um sistema mecânico, são determinados de maneira a compatibilizar as funções exigidas com a possibilidade de fabricação e suas características mecânicas. Desta forma, a análise dos fatores que influenciam o projeto do produto e a especificação do processo de fabricação são fundamentais para a seleção conveniente dos materiais a serem utilizados na confecção de componentes.⁽¹⁾

Especificamente, as propriedades mecânicas dos materiais metálicos devem ser consideradas como uma das questões mais importantes na seleção e na especificação de componentes, sejam elas estáticas ou dinâmicas. No entanto, deve-se destacar a capacidade dos materiais adaptarem-se aos meios básicos de fabricação. Essa capacidade corresponde às propriedades que se originam da interação entre as características do processo e as propriedades mecânicas exigidas na fabricação.^(1,2)

Entre outras considerações, a usinabilidade, a soldabilidade e, principalmente, a conformabilidade plástica, podem ser otimizadas através da determinação de parâmetros estáticos, definindo de maneira objetiva, a capacidade do metal de ser deformado plástica e continuamente, produzindo peças de qualidade superior e com características mecânicas bem definidas.^(1,2)

A conformabilidade está relacionada com a capacidade de um material ser deformado plasticamente sem a possibilidade de formação de defeitos internos e externos. Em alguns processos, o limite de conformação é determinado pela formação da estrição localizada e não pela ocorrência de fratura. A capacidade de um material ser trabalhado envolve conceitos tecnológicos complexos que possui dependência não só da resistência à fratura, mas também de detalhes específicos do processo, tais como o grau de redução, atrito, temperatura, taxa de deformação e, principalmente, do estado de tensão e das relações geométricas envolvidas em cada modalidade.⁽²⁾

Desta forma a laminação constitui-se como um processo de transformação mecânica de metais mais utilizados na prática em função da alta produtividade apresentada e por permitir bons níveis de controle dimensional do produto acabado.⁽²⁾

Um dos segmentos mais importantes corresponde à utilização de chapas laminadas nos processos de estampagem leve e profunda.⁽³⁾ Deste modo, uma grande parcela da produção de aços está voltada para o mercado de embalagens alimentícias sendo que, dentro deste contexto, está o aço com baixo teor de carbono CSN 4130 utilizado na confecção de latas expandidas. No presente trabalho, avaliou-se o efeito do grau de redução no laminador de encruamento (*skin pass*) nos valores de limite de escoamento, anisotropia, dureza e conformabilidade do aço CSN 4130.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para realização deste trabalho será utilizado o aço CSN 4130, sendo um material com baixo teor de carbono contendo aproximadamente 0,020% de carbono (em peso), na forma de chapas finas com espessura de 0,20 mm e largura de 879 mm, aplicado na produção de latas expandidas. As amostras com diferentes

reduções foram obtidas após o processo num laminador quádruplo de duas cadeiras e também revestidas com estanho numa linha de estanhamento eletrolítico, na Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

Para observação metalográfica foram retiradas amostras após processo de recozimento e processo de encruamento com reduções em torno de 0,6, 1,4 e 2,0% para realização deste ensaio. Após processo de encruamento foram medidas as propriedades mecânicas em condições de tração uniaxial para amostras com os graus de redução em torno de 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 e 2,0 % no material com e sem revestimento de acordo com a norma ASTM E8.⁽⁴⁾ As medidas dos coeficientes de anisotropia com base no parâmetro r de Lankford foram obtidas com base na norma ASTM E517,⁽⁵⁾ para chapas com grau de redução de 0,6, 1,0, 1,4 e 2,0%. Medidas de dureza foram realizadas ao longo da seção longitudinal na superfície das amostras na condição encruada com 0,6, 0,8, 1,0, 1,2, 1,4, 1,6 e 2,0 % de redução no laminador de encruamento no material com e sem revestimento. Foram realizados ensaios de estampagem Swift, para observação do comportamento do material, em amostras que sofreram reduções de 0,6, 1,0, 1,4 e 2,0% no material sem revestimento.

2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Ensaio de Tração

Os valores dos limites de escoamento (σ_E), de resistência (σ_R) e o alongamento percentual (AL) foram determinados a partir de ensaios de tração uniaxial. Três ensaios foram realizados para cada redução (*skin pass*). A Tabela 1 apresenta os valores médios obtidos nos ensaios de tração para cada redução dos materiais com e sem revestimento.

Tabela 1. Valores médios dos limites de escoamento (σ_E), e de resistência (σ_R) e o alongamento percentual (AL) obtidos em ensaio de tração para materiais com diferentes reduções.

Item	Redução	Após Encruamento			Após Revestimento		
		σ_E (MPa)	σ_R (MPa)	AL(%)	σ_E (MPa)	σ_R (MPa)	AL(%)
1	0,60%	299	397	22,98	377	414	20,64
2	0,80%	316	400	19,21	403	439	20,21
3	1,00%	307	384	20,19	386	428	19,48
4	1,20%	337	422	15,7	402	438	16,83
5	1,40%	328	398	18,35	384	414	16,53
6	1,60%	359	434	14,22	439	459	14,64
7	2,00%	373	436	13,09	418	445	14,27

Nas curvas apresentadas nas Figuras 1 e 2 pode-se verificar a influência da redução aplicada nos laminadores de encruamento nos resultados do limite de escoamento, limite de resistência e do alongamento. Com a redução de 0,6 %, pode-se verificar que o limite de escoamento médio é igual a 300 MPa, ao passo que, para uma redução de 2,0 %, este valor médio aumenta para 373 MPa. Da redução de 0,6% para 2,0 % tem-se um aumento de 24 % no valor do limite de escoamento.

Na Figura 1 também se observa o aumento no limite de resistência a tração. Com 0,6 % de redução obteve-se um limite de resistência a tração médio de 397 MPa, e com 2,0% um valor médio de 436 MPa, tem-se um aumento de 10 % no limite de resistência a tração. Os valores obtidos na faixa de 0,6 a 1,0% de redução

são muito próximos. Este aumento começa a ser perceptível a partir de 1,2% de redução, onde ocorre um incremento médio de 25 MPa no limite de resistência a tração.

No gráfico apresentado na Figura 2 os valores de alongamento obtido nos ensaios de tração são apresentados. Para uma redução de 0,6% obteve-se um alongamento médio de 23 % e com 2,0 % este valor caiu para 13 % (redução de 44%).

Hoggan e colaboradores (6) em experimentos semelhantes, entretanto utilizando materiais com composição química diferente e recozimento em caixa, obtiveram resistência mecânica menor. Em sua análise verificou-se que houve um aumento do limite de escoamento e uma redução no alongamento nos ensaios de tração.

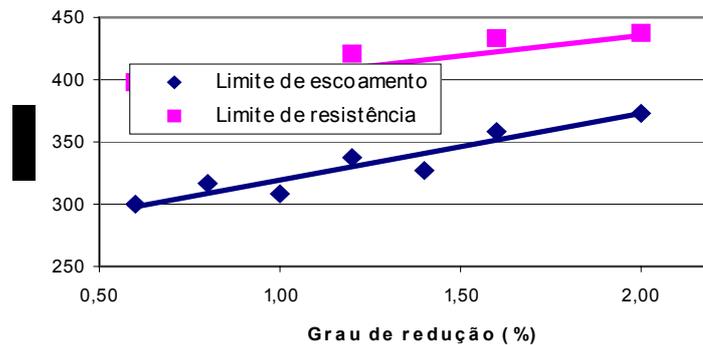


Figura 1. Variação do limite de escoamento e limite de resistência em função do grau de redução no laminador de encruamento para o aço CSN 4130 sem revestimento.

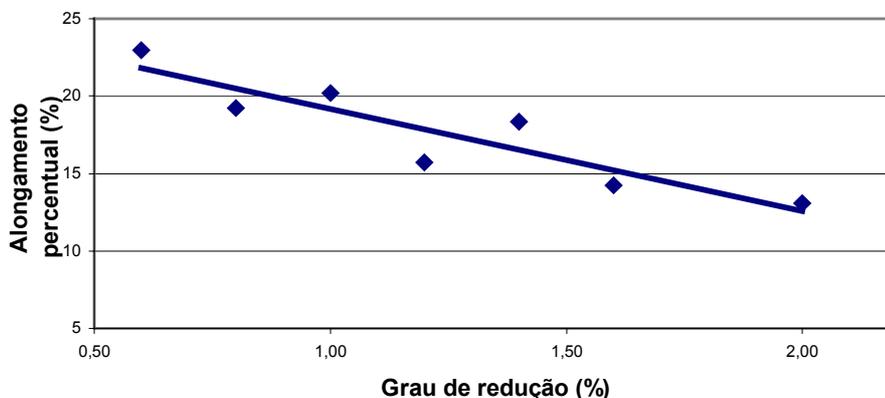


Figura 2. Variação do alongamento em função do grau de redução no laminador de encruamento para o aço CSN 4130 sem revestimento.

A Figura 3 apresenta o gráfico com os valores do limite de escoamento obtidos nos ensaios de tração do material com e sem revestimento. Para este ensaio avaliou-se o comportamento do material revestido com redução até 2,0%. Como no caso anterior, pode-se observar que a influência da redução também afeta o produto final. Com 0,6% de redução tem-se um limite de escoamento médio de 377 MPa e com 2,0% o valor apresentado é de 420 MPa (aumento de 10 %). Verifica-se um incremento médio de 60 MPa do limite de escoamento do material após o revestimento devido ao envelhecimento do material durante processo.

A especificação deste material determina que o limite de escoamento deve estar na faixa de 340 a 440 MPa e o alongamento maior que 16%. Com os resultados dos ensaios verifica-se que o material acima de 1,4% de redução não atinge o valor especificado.

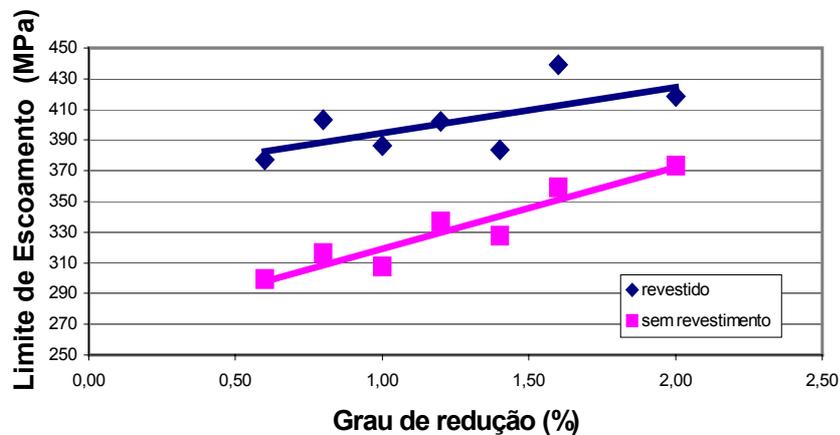


Figura 3. Variação do limite de escoamento em função do grau de redução no laminador de encruamento para o aço CSN 4130 com e sem revestimento.

3.2 Coeficientes de Encruamento e Resistência

Para obter os valores dos coeficientes de encruamento (n) do material para cada redução foi utilizada a relação (1):

$$\sigma_R = K\delta^n \quad (1)$$

A Tabela 2 apresenta os valores médios do coeficiente de encruamento e de resistência calculados através dos dados obtidos nos ensaios de tração.

Conforme citado por Klein e colaboradores⁽⁷⁾ um material que tenha um baixo índice de n , quando submetido a uma operação de estiramento, atinge o alongamento uniforme rapidamente e inicia cedo as deformações localizadas; já um material que tenha um índice n elevado, endurece rapidamente por deformação, transmitindo para as partes vizinhas os esforços a que está sujeito, podendo desta forma deformar-se uniformemente por um período mais longo que o primeiro, retardando o aparecimento de deformações localizadas. Portanto um material com elevado índice de n , indica um excelente comportamento em relação as operações de estiramento.

Na Figura 4 observa-se que quanto maior o grau de redução que aplicamos no material menor é o valor de n , portanto pior será o desempenho do material no processo de estampagem. Os resultados estão compatíveis com Hoggan e seus colaboradores,⁽⁶⁾ os quais realizaram experiência semelhante, onde constataram uma redução no valor do coeficiente de encruamento à medida que se aumenta o grau de redução no laminador de encruamento.

Tabela 2. Valores médios do coeficiente de encruamento e resistência do material após processo no laminador de encruado e revestimento.

Item	Redução	Após Laminação		Após ser revestido	
		n	K (Mpa)	n	K (Mpa)
1	0,60%	0,1585	617	0,1613	645
2	0,80%	0,1343	610	0,1409	642
3	1,00%	0,1160	552	0,1356	612
4	1,20%	0,1281	623	0,1277	629
5	1,40%	0,1085	565	0,1310	612
6	1,60%	0,1158	628	0,1181	658
7	2,00%	0,094	600	0,1131	632

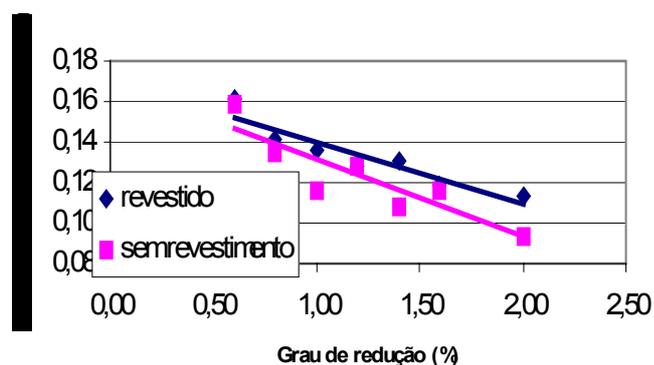


Figura 4. Curva representativa da variação do coeficiente de encruamento em função do grau de redução no aço CSN 4130 com e sem revestimento.

3.3 Anisotropia Normal e Planar

A Tabela 3 apresentam os valores de anisotropia normal e planar obtidos nos ensaios para os aços com 0,6, 1,0, 1,4 e 2,0% de redução nos laminadores de encruamento, sendo que foram ensaiados materiais com e sem revestimento. Com auxílio da Figura 5, observa-se que o valor de anisotropia normal sofre tendência de redução em função do aumento do grau de redução nos laminadores de encruamento, sendo que esta redução é observada no material com e sem revestimento.

Kishor e Kumar⁽⁸⁾ verificaram que elevados valores de r demonstram que o material tem uma excelente estampabilidade. O ideal é que o valor de r seja sempre superior a 1. Já o valor de Δr tem influência no orelhamento formado durante a estampagem do copo, portanto para um material isotrópico o valor de Δr apropriado seria igual a zero.

Tabela 3. Valores médios de coeficientes de anisotropia normal e planar do material após redução no laminador de encruamento e revestir.

Item	Redução	Após redução					Após revestir				
		r_0	r_{45}	r_{90}	r	Δr	r_0	r_{45}	r_{90}	r	Δr
1	0,60%	1,287	1,561	1,256	1,413	-0,289	1,063	1,372	1,172	1,245	-0,254
3	1,00%	1,192	1,607	1,386	1,448	-0,318	1,138	1,513	1,328	1,373	-0,280
5	1,40%	1,085	1,455	1,265	1,315	-0,281	1,000	1,798	1,149	1,441	-0,734
7	2,00%	0,735	1,121	1,058	1,067	-0,572	1,183	2,026	1,819	0,858	-2,335

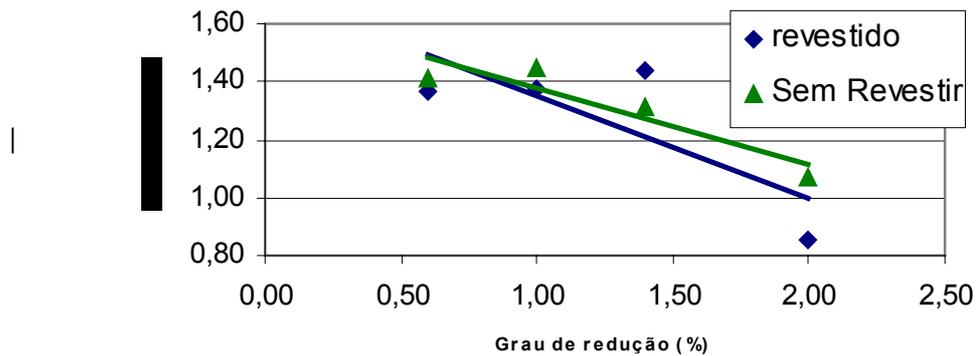


Figura 5. Curva representativa da variação da anisotropia em função do grau de redução no laminador de encruamento para o aço CSN 4130 com e sem revestimento.

Os materiais com reduções maiores que 1,4% apresentaram valores menores que 1, caracterizando-os como inadequados para estampagem.^(8,9) Na Figura 6, pode-se verificar que o aumento no grau de redução causa uma diminuição nos valores de anisotropia planar. Desta forma o material com redução abaixo de 1,4 %, apresentou-se adequado para estampagem.^(9,10)

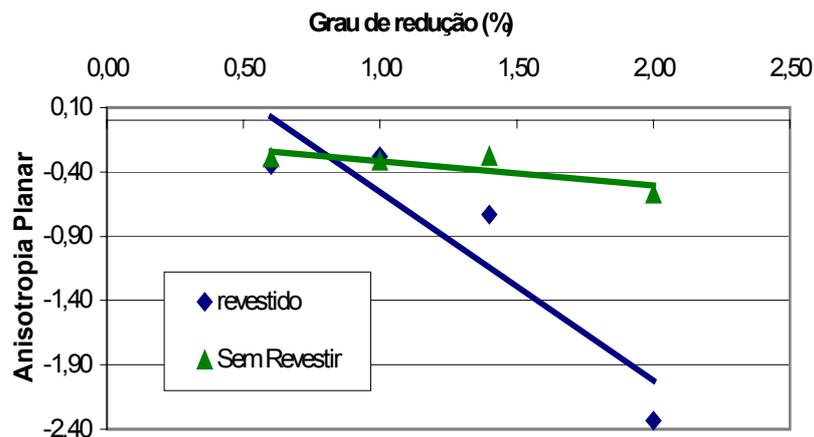


Figura 6. Variação da anisotropia planar em função do grau de redução no laminador de encruamento para o aço CSN 4130 com e sem revestimento.

Kishor e Kumar⁽⁸⁾ utilizaram um material com baixo teor de carbono para estampagem, cujos valores de $\Delta r = 0,551$ e $r = 1,43$ eram bastante satisfatórios. O material apresentou boa estampabilidade e acentuado orelhamento na posição de 0°

e 90° com relação à direção de laminação, correspondendo à expectativa do Δr positivo deste material.

3.4 Dureza Superficial Rockwell

Para avaliação da dureza Rockwell foram retirados corpos-de-prova após o passe de encruamento e após revestimento. Na Tabela 4 temos os valores médios de dureza do material revestido e sem revestir de acordo com o grau de redução.

As curvas apresentadas na Figura 7 mostram a influência do grau de redução nos resultados da dureza superficial. Pode-se verificar também a influência do processo de estanhamento na dureza deste material, pois caracteriza-se um aumento médio de 2,5 Rockwell 30T na dureza após revestimento.

A especificação deste material determina que a dureza do material revestido deve estar na faixa de 58 a 66 HR30T. Com os resultados verifica-se que os materiais com reduções superiores a 1,4% de redução não atingem o valor especificado em norma.

Tabela 4. Valores médios de dureza superficial Rockwell de acordo com o grau de redução no laminador de encruamento no aço CSN 4130 com e sem revestimento.

Item	Redução	Após Laminador HR 30T	Após ser revestido HR 30 T
1	0,60%	59,2	60,6
2	0,80%	58,7	62,3
3	1,00%	59,0	63,8
4	1,20%	59,7	64,5
5	1,40%	59,7	65,8
6	1,60%	62,8	67,3
7	2,00%	64,3	66,6

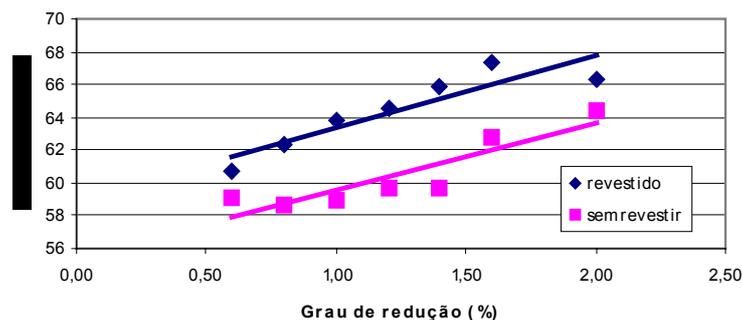


Figura 7. Curva representativa da variação da dureza superficial Rockwell em função do grau de redução no laminador de encruamento no aço CSN 4130 com e sem revestimento.

3.5 Microestruturas

A Figura 8 mostra as microestruturas do material após processo de recozimento e após a aplicação do passe de encruamento com reduções de 0,6, 1,4 e 2,0 %. De uma forma geral, observa-se uma microestrutura caracterizada por grãos ferríticos poligonais associados a partículas de cementita alinhadas na matriz.

Quando comparamos todas as microestruturas na Figura 8 é possível visualizar que os grãos não apresentam alterações quanto à morfologia.

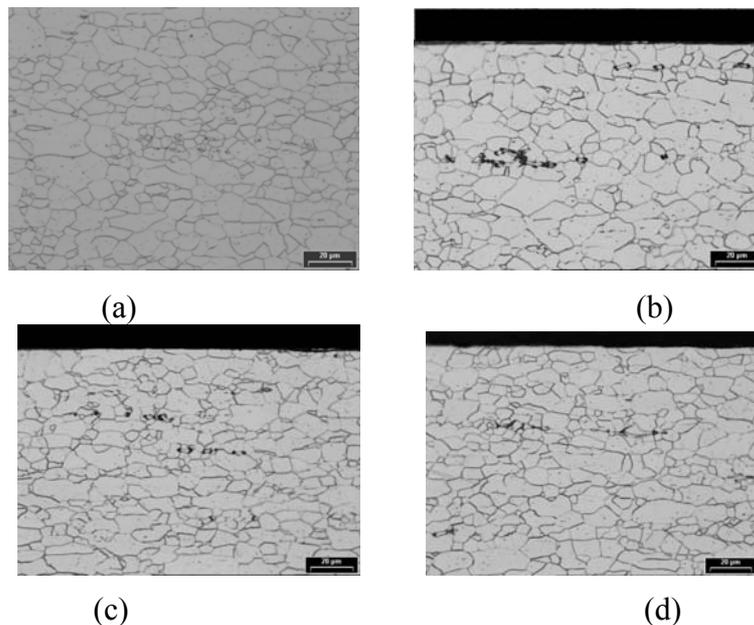


Figura 8. Microestrutura do material de acordo com o grau de redução no passe de encruamento: (a) material sem redução; (b) 0,60 % de redução; (c) 1,4 % de redução; (d) 2,0 % de redução.

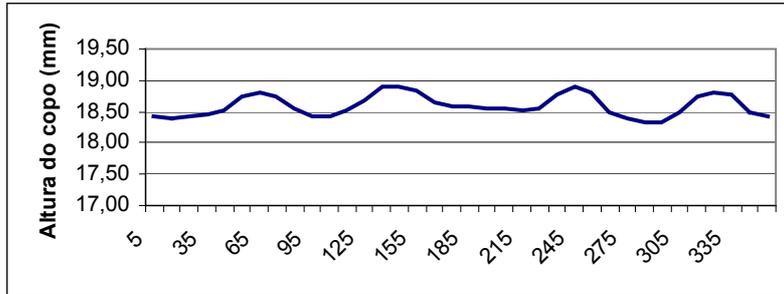
3.6 Ensaio Swift

Neste ensaio esboços com reduções de 0,6, 1,0, 1,4 e 2,0% foram estampados no ensaio Swift. Utilizou-se um diâmetro da matriz de 58 mm e um punção com 33 mm de diâmetro. A carga utilizada no “*prende-chapa*” foi de 5 kN. Na Tabela 5 temos os dados dos ensaios com a altura média de cada copo de acordo com o grau de redução no laminador de encruamento. A Figura 9 apresenta os perfis de altura dos copos de acordo com o grau de redução. Pode-se observar a variação do orelhamento em cada copo. Observa-se que os copos feitos com materiais com 0,6% e 1,0% de redução, representados pelas Figuras 9(a) e 9(b), apresentam a borda mais uniforme. Neles, a diferença entre a altura máxima e mínima do copo são menores. Observa-se ainda na Figura 9(d) que o copo 4 (redução de 2,0 %) apresenta uma variação no orelhamento menos uniforme apresentando em alguns pontos uma diferença maior entre a altura máxima e mínima.

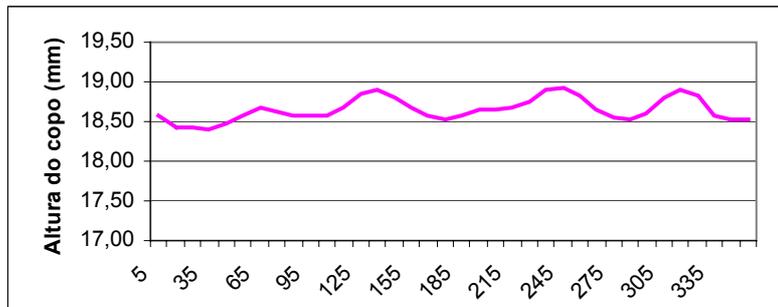
Os valores de r de Lankford fornecem uma boa indicação do material quanto ao comportamento durante a estampagem profunda.⁽¹¹⁾ Klein e seus colaboradores⁽⁷⁾ mostram que há uma correlação entre os valores obtidos no ensaio Swift e os parâmetros de Lankford. A relação entre os valores de Δr com os dados mostrados na Figura 9, indica que quanto menor a redução, mais próximo de zero foi o valor de Δr e mais uniforme foi o orelhamento na estampagem. Kishor e Kuman⁽⁸⁾ verificaram que um aço com baixo teor de carbono e apresentou boa estampabilidade para valores $\Delta r = 0,551$ e $r = 1,43$. Como se observa, os materiais com reduções iguais a 0,6% e 1,0% apresentam valores próximos aos encontrados por Kishor e Kuman (8) e apresentaram a melhor estampabilidade.

Tabela 5. Valores da altura média dos copos estampados no ensaio Swift para o material após redução.

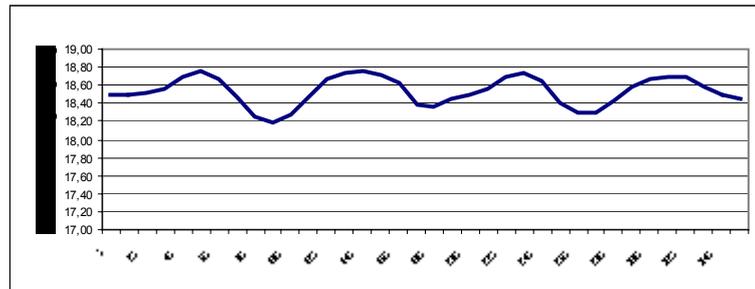
Copo	Grau de redução	Força (KN)	Altura média do copo (mm)
1	0,60%	9,3	18,594
2	1,00%	9,6	18,647
3	1,40%	9,4	18,537
4	2,00%	9,7	18,531



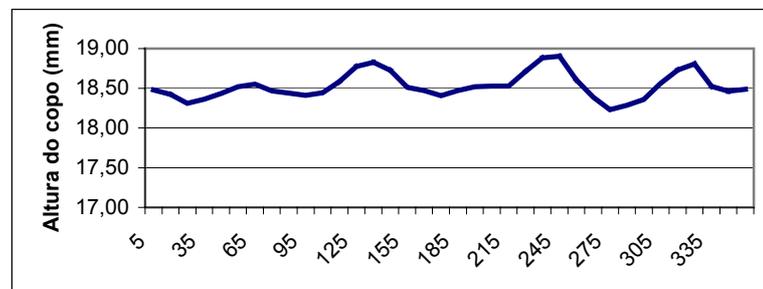
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 9. Curvas representativas do perfil de altura dos copos ao longo do perímetro no aço CSN 4130 após processo de encruamento em função do grau de redução: (a) 0,60 %; (b) 1,0 %; (c) 1,4 %; (d) 2,0 %.

4 CONCLUSÕES

1. O valor do coeficiente de encruamento n é reduzido com o aumento do grau de redução aplicado no laminador de encruamento (*skin pass*).
2. Os materiais com redução inferior a 1,0% apresentaram valores de anisotropia normal \bar{r} e planar Δr adequados ao bom desempenho na estampagem.
3. Os grãos praticamente não apresentam alterações morfológicas para reduções inferiores a 2%.
4. Os resultados do ensaio Swift mostram dependência da redução aplicada. Quanto maior a redução, menor a altura média do copo. Os resultados obtidos neste ensaio correlacionam-se diretamente com o índice de anisotropia planar, pois quanto menor este valor, maior a uniformidade do processo.
5. Após a análise de todos os ensaios, conclui-se que a condição mais adequada a ser utilizada no processo de estampagem para latas expandidas deve ser a aplicação de uma redução máxima de 1,0 % no laminador de encruamento (*skin pass*).

REFERÊNCIAS

- 1 Johnson, W., Mellor, P.B., 1973, Engineering Plasticity, VNR, London, 646p.
- 2 Honeycombe, R.W.K., 1985, The Plastic Deformation of Metals, Edward Arnold, London, 483p.
- 3 Ferreira Filho, A., Lima, L.M.G., Padilha, A.F. Lima, N.B., Controle da microestrutura e da textura de chapas de aço com baixo teor de carbono para estampagem, Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, São Paulo, p.189-203, Dez. 2001.
- 4 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, E 8M-95a. Standard for test methods for tension testing of metallic materials. Philadelphia, 1995, 21p.
- 5 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL, E517-96a. Standard for test methods for plastic ratio r for sheet metal. Philadelphia, 1997, 7p.
- 6 Hoggan, E.J., Scott, R.I., Barnett, M.R., Hodgson, P.D., Mechanical properties of tension leveled and skin passed steels, Journal of Materials Processing Technology, p.155-163, 2002.
- 7 Klein, L. N. T., Moreira, L. O. G., Carvalho, J. J. N., Maia, V. J., Estampabilidade de chapas finas a frio, VII simpósio da ABM, Belo Horizonte, Out. 1971.
- 8 Kishor, N., Kumar, D., R., Optimization of initial blank shape to minimize earing in deep drawing using finite element method, Journal of materials Processing Technology, Indian Institute of Technology Delhi, India, p. 20-30, 2002.
- 9 Asensio, J., Romano, G., Martinez, V.J., Verdeja, J.I., Pero-Sanz, J.A., Ferritic steels optimization of hot-rolled textures through cold rolling and annealing, Materials Characterization, v.47, p.119-129, 2001.

- 10 Souza, Sérgio Augusto de, Ensaio Mecânico de Materiais Metálicos. Fundamentos teóricos e práticos. São Paulo, p 45-59, 1982.
- 11 Plaut, R. L., Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações, II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação: Deformação Plástica, Recristalização, Crescimento de Grão, São Paulo, p.265-308, Dez. 2003.