

INFLUÊNCIA DO GRAU DE ENCRUAMENTO E TRATAMENTOS TÉRMICOS DE RECOZIMENTO NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DO AÇO ABNT 1006¹

Eduardo Corassini²
 Rodrigo Magnabosco³

Resumo

Baseado na norma ABNT NBR 5007, o presente trabalho consiste na análise da influência de diferentes condições de encruamento e ciclos térmicos de recozimento subcrítico nas propriedades mecânicas e tamanhos de grão do aço ABNT 1006, acalmado com alumínio e sem silício, utilizado para estampagem. O material foi laminado a frio em diferentes graus de encruamento e recozido em diferentes condições de tempo e temperatura. Para a caracterização da matéria-prima, realizou-se análise de composição química e propriedades mecânicas iniciais. Ao retirar amostras na direção longitudinal de cada redução, antes e após recozimento, realizam-se ensaios de tração, dureza, embutimento Erichsen e análise metalográfica. Após levantamento das propriedades mecânicas e tamanhos de grão do material em todas as condições de encruamento, e todos os ciclos de recozimento, foi possível obter curvas comparativas que auxiliam na interpretação do grau de encruamento e ciclo térmico necessários para se obter as propriedades mecânicas desejadas ao produto final, partindo-se de uma espessura inicial conhecida.

Palavras-chave: Aço ABNT 1006; Estampagem; Encruamento; Recozimento subcrítico.

INFLUENCE OF STRAIN HARDENING AND SUBCRITICAL ANNEALING HEAT TREATMENTS ON MECHANICAL PROPERTIES OF ABNT 1006 STEEL

Abstract

Based on ABNT NBR 5007 standard, the present work evaluates the influence of different conditions of work hardening and subcritical annealing thermal cycles on the mechanical properties and grain sizes of ABNT 1006 steel, with aluminum and without silicon, used for sheet metal forming. The material is cold rolled to different degrees of strain hardening and annealed under varying conditions of time and temperature. For the characterization of the raw material, chemical composition and mechanical properties were obtained. By taking samples in the longitudinal direction of each reduction, before and after annealing, tensile mechanical properties, hardness, Erichsen draw ability and grain size were determined. It was possible to obtain comparative curves which help in the interpretation of the degree of strain-hardening and thermal cycle needed to obtain the mechanical properties desired in end product, starting from a known initial thickness.

Key words: ABNT 1006 steel; Stamping; Hardening; Subcritical annealing.

¹ *Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro de Materiais, FEI, São Paulo, SP, Brasil; orassini987@hotmail.com.*

³ *Prof. Dr., Departamento de Engenharia de Materiais, Centro Universitário da FEI, São Paulo, SP, Brasil; rodrmag@fei.edu.br.*

1 INTRODUÇÃO

Os aços baixo carbono são o material metálico mais produzido no mundo. Embora grande parte da sua produção seja utilizada em aplicações simples, sua tecnologia de processamento e propriedades tem ganhado interesse.⁽¹⁾

O foco deste trabalho é o aço ABNT 1006 acalmado com alumínio e sem silício, na forma de chapas, destinado principalmente a aplicações que envolvam estampagem profunda ou conformação mecânica a frio, como por exemplo, carrocerias de automóveis de um modo geral.⁽²⁾

Por se tratar de aplicações que exijam determinada resistência mecânica, dureza e diferentes espessuras, é preciso conhecer o processo de relaminação pelo qual o material vai ser submetido para chegar à espessura e às propriedades mecânicas desejadas para o produto final, a partir de uma espessura inicial conhecida. É preciso conhecer também o efeito de diferentes ciclos de recozimento sobre as propriedades mecânicas e tamanho de grão deste.

A laminação a frio provoca o encruamento do material, sendo que quanto maior for o grau deste, espera-se que menor seja o tamanho de grão após recozimento e melhores as propriedades mecânicas alcançadas.⁽³⁾ O recozimento é um tratamento térmico intermediário, realizado com o intuito de facilitar o trabalho mecânico a frio posterior e melhorar as propriedades mecânicas, através de fenômenos como recuperação, recristalização e crescimento de grão.⁽⁴⁾

Inclusões de silicatos e sulfetos, resultantes ou não do processo de fabricação, se alongam na direção da laminação. Como exemplo dessas, têm-se o sulfeto de manganês (MnS), que prejudica a maleabilidade da fase ferrita por comprometer a continuidade de deformação da matriz.⁽⁵⁾

Fatores importantes que interferem na estampabilidade são o tamanho, o formato e a orientação dos grãos (textura) em relação à direção de laminação, e a existência de microconstituintes que influenciam na profundidade e qualidade da superfície estampada. O tamanho de grão influencia muito a resistência ao escoamento de um aço baixo carbono, sendo que grãos finos possuem resistência ao escoamento e expoentes de encruamento elevados, porém formabilidade limitada. Já uma granulação grosseira tem melhor estampabilidade em função da menor resistência ao escoamento, porém gera superfície áspera, num fenômeno denominado como “casca de laranja”. Geralmente grãos na faixa de tamanho entre 7 ou 8, classificados conforme norma ASTM E112, apresentam um bom compromisso entre conformabilidade e aparência de superfície. Tamanhos de grão mais grosseiros, com números ASTM inferiores a 5, são considerados inaceitáveis para muitas aplicações. Quanto ao formato, geralmente grãos de ferrita equiaxiais, associados com a orientação preferencial destes, resultam em excelente formabilidade.⁽³⁾

Este trabalho tem como objetivo verificar a influência de diferentes graus de encruamento e ciclos de recozimento sobre a microestrutura e propriedades mecânicas do aço ABNT 1006, com a finalidade de se obter o melhor conjunto de propriedades para a espessura final desejada, partindo-se de uma bitola inicial específica.

2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Partindo-se do material de bitola inicial 5 mm e largura de 65 mm, fornecido pela empresa Mangels Industrial S.A., unidade aços, 5 rolos de um aço ABNT 1006 foram relaminados a frio. Cada metade de rolo passou por diferentes condições de

redução de espessura, sendo estas na faixa de 0 a 80%. Foram cortadas 5 amostras de 1 m da matéria prima e 8 amostras de 1 m de cada redução de espessura. Uma das amostras da matéria-prima foi separada para ensaio de composição química do material em estudo.

Posteriormente montou-se 4 conjuntos iguais, contendo 1 amostra de cada porcentagem de redução, que foram colocados na parte superior da pilha de bobinas em fornos à gás de alta convecção da Mangels Industrial S.A., e cada um deles foi submetido a diferentes condições de temperatura e tempo de tratamento térmico de recozimento subcrítico, sendo os seguintes ciclos: F (630°C, 6 horas); G (650°C, 8 horas); H-I (670°C, 8 horas) e J (700°C, 9 horas).

Para caracterização das propriedades mecânicas foram realizados ensaios de tração, dureza Vickers e embutimento Erichsen. Para os ensaios de tração, foram retiradas 3 amostras da matéria-prima e de cada redução, após laminação e após cada um dos tratamentos térmicos, que foram realizados no Centro Universitário da FEI, com intuito de obter as propriedades mecânicas principais do material em estudo, como limite de resistência a tração, limite de escoamento e ductilidade (alongamento total), conforme a norma ABNT NBR 6673.⁽⁶⁾

Para os ensaios de dureza Vickers com carga de 5 kgf foram retiradas pequenas amostras da matéria-prima e de cada redução, após a laminação e após cada ciclo térmico. As medições foram realizadas na empresa Mangels, conforme a norma ABNT NBR NM 188-1/2.⁽⁷⁾

Para os ensaios de embutimento Erichsen foram retirados corpos de prova, da matéria-prima e de cada redução após cada ciclo térmico, realizados no Centro Universitário da FEI, conforme a norma ABNT NBR 5902, com o intuito de verificar a profundidade de estampagem, obtendo resultados que indicam as condições de estampabilidade do material. Estes ensaios foram utilizados para avaliar a ocorrência ou não, do fenômenos “casca de laranja”.⁽⁸⁾

Para caracterização metalográfica, realizada no Centro Universitário da FEI, cortou-se pequenas amostras na direção longitudinal, da matéria-prima e de cada redução (após a laminação e após os ciclos térmicos), as quais foram embutidas em baquelite, lixadas com as lixas #220, #320, #400 e #600 e panos de polimento com abrasivo de diamante de 6µm, 3µm e 1µm. Foram posteriormente atacadas quimicamente com Nital 2% (98% de álcool etílico absoluto e 2% de ácido nítrico).

Também foram realizadas medidas do tamanho de grão da matéria-prima inicial e de cada redução para todas as amostras recozidas, através do programa Olympus-Analysis, utilizando-se o método dos interceptos médios. As medidas foram obtidas conforme a norma ASTM E112, e posteriormente convertidas para diâmetro médio planar, seguindo as recomendações da mesma norma.⁽⁹⁾

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A composição química obtida para o aço ABNT 1006 em estudo é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química real da matéria-prima proveniente de usina

Composição química (% peso)							
C	Mn	S	Al	Cr	Ni	Cu	Mo
0,044	0,27	0,013	0,058	0,016	0,039	0,036	0,004

Fonte: Instituto de Pesquisas e Estudos Industriais (IPEI), 2012.

Ao comparar as porcentagens dos elementos químicos, obtidos através da análise química, com os valores especificados na pela norma ABNT NBR 5007⁽⁸⁾ para esse aço, observa-se que o carbono presente no aço está praticamente na mínima concentração, contribuindo para diminuição do limite de resistência mecânica, aumento de tenacidade e conseqüentemente maior formabilidade para este aço. Os demais elementos de liga, principais e residuais estão dentro da faixa especificada para esse aço e somados, não ultrapassam o teor máximo de 1%, contribuindo para melhor formabilidade na estampagem.

A Figura 1 mostra a microestrutura original da matéria-prima proveniente da usina.

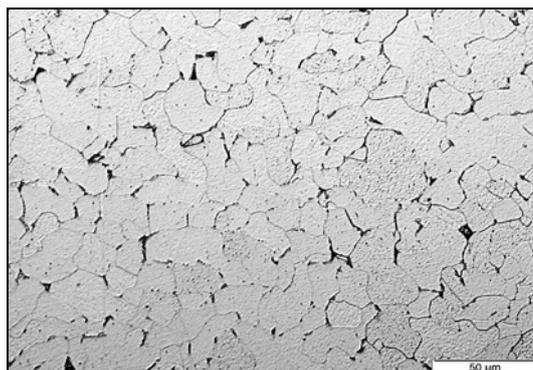


Figura 1. Microestrutura do aço ABNT 1006 com Al sem Si, proveniente da usina. Nital 2%, 500X.

A microestrutura da matéria-prima apresenta grãos finos de ferrita com pouca perlita presente preferencialmente em contorno de grão. Para conhecer o tamanho dos grãos de ferrita deste aço, com a estrutura original proveniente de usina, foi obtida a distribuição de tamanhos conforme mostra a Figura 2.

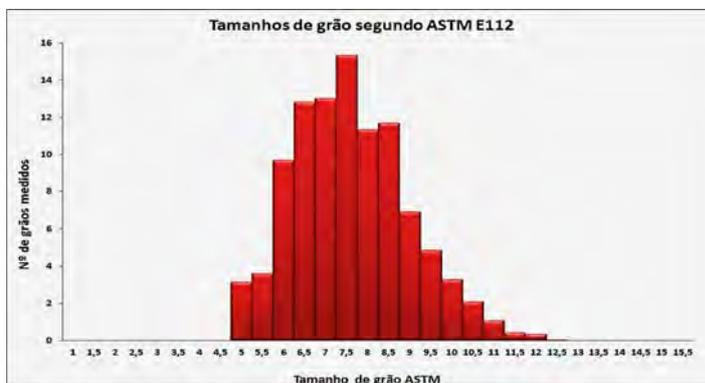


Figura 2. Distribuição de tamanhos de grão da matéria-prima proveniente da usina.



Figura 3. Embutimento Erichsen da amostra referente ao material original proveniente da usina.

O gráfico acima mostra que o tamanho de grão médio é de aproximadamente 7,5 ASTM, que resulta num diâmetro médio planar de aproximadamente 26 μm , conferindo ao material original boas condições para o processamento de laminação a frio e recozimento posterior, pois apresenta boa relação entre formabilidade e aparência de superfície de partida (Figura 3).

A Figura 4 mostra as microestruturas das amostras laminadas na direção longitudinal, na sequência de cada porcentagem de redução de espessura, desde 5% até 80% (Figura 4).

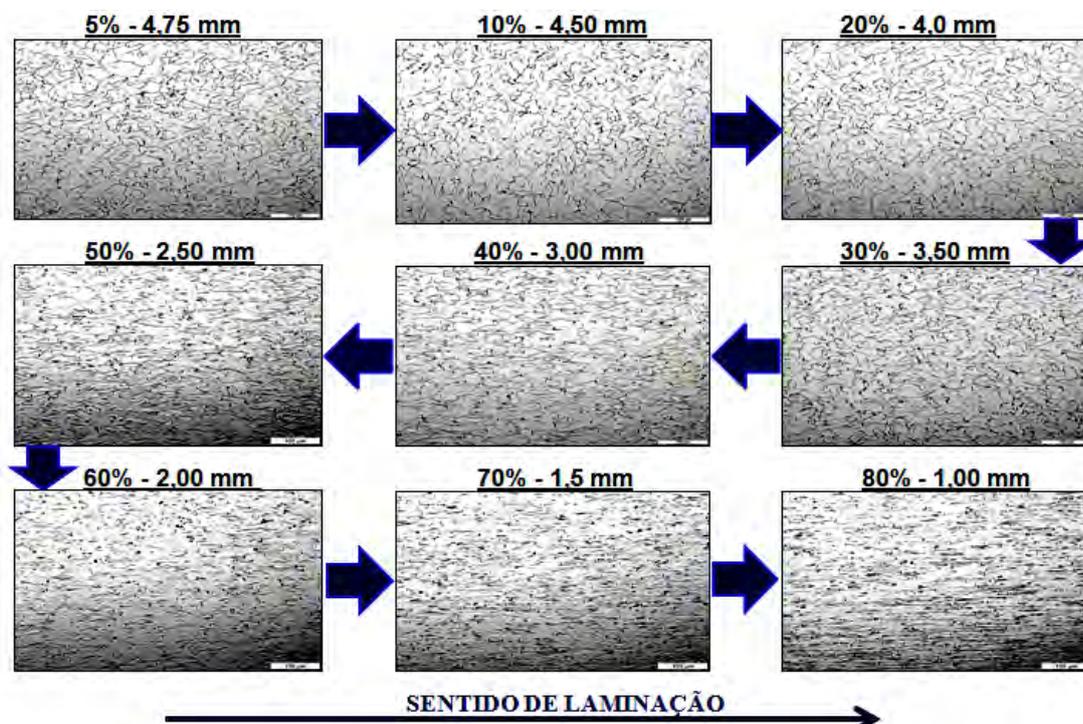


Figura 4. Micrografias após laminação, desde 5% até 80%, mostrando a comparação de microestruturas e formatos de grão. Nital 2%, 200X.

Após etapas de relaminação a frio e tratamentos térmicos de recozimento subcrítico, em 4 diferentes condições de tempo e temperatura, foram obtidas no centro das chapas, as respectivas microestruturas conforme Figura 5.

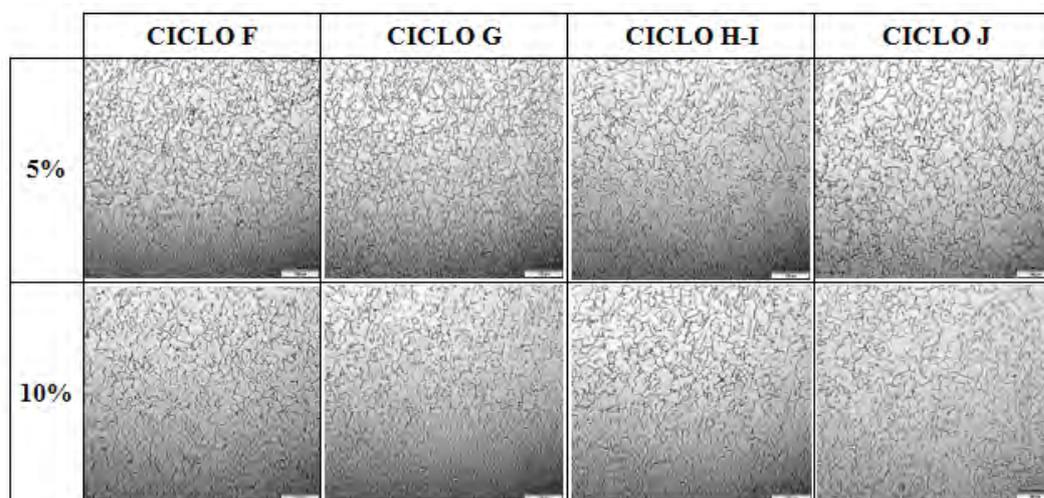


Figura 5. Microestruturas obtidas de 4 condições de tempo e temperatura distintos, em função do grau de encruamento anterior ao recozimento. Nital 2%, 200X.

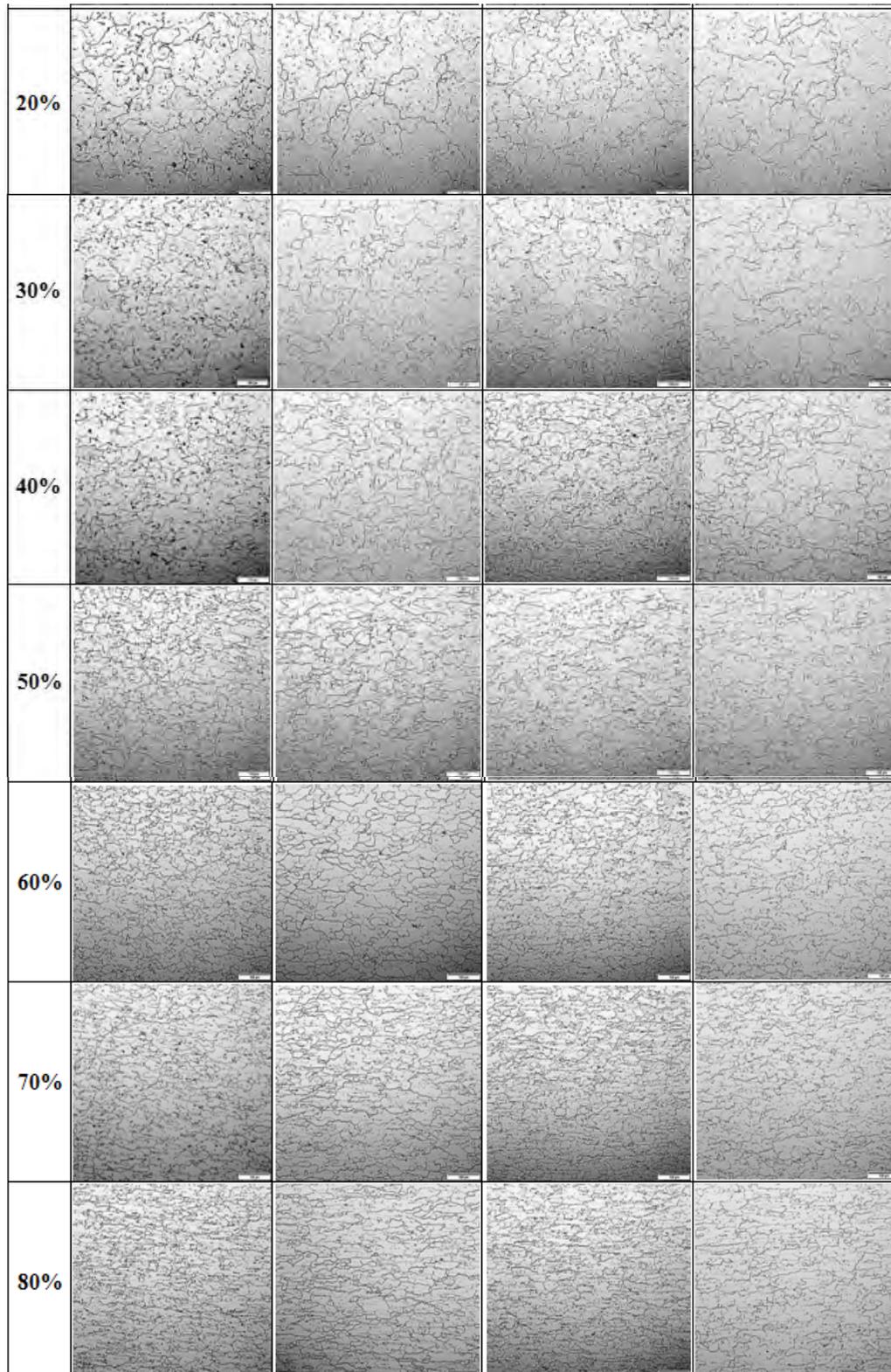


Figura 5. Microestruturas obtidas de 4 condições de tempo e temperatura distintos, em função do grau de encruamento anterior ao recozimento. Nital 2%, 200X (Continuação).

A Figura 6 mostra o aspecto visual das superfícies após embutimento Erichsen, para cada grau de encruamento, dos 4 ciclos de recozimento estudados.

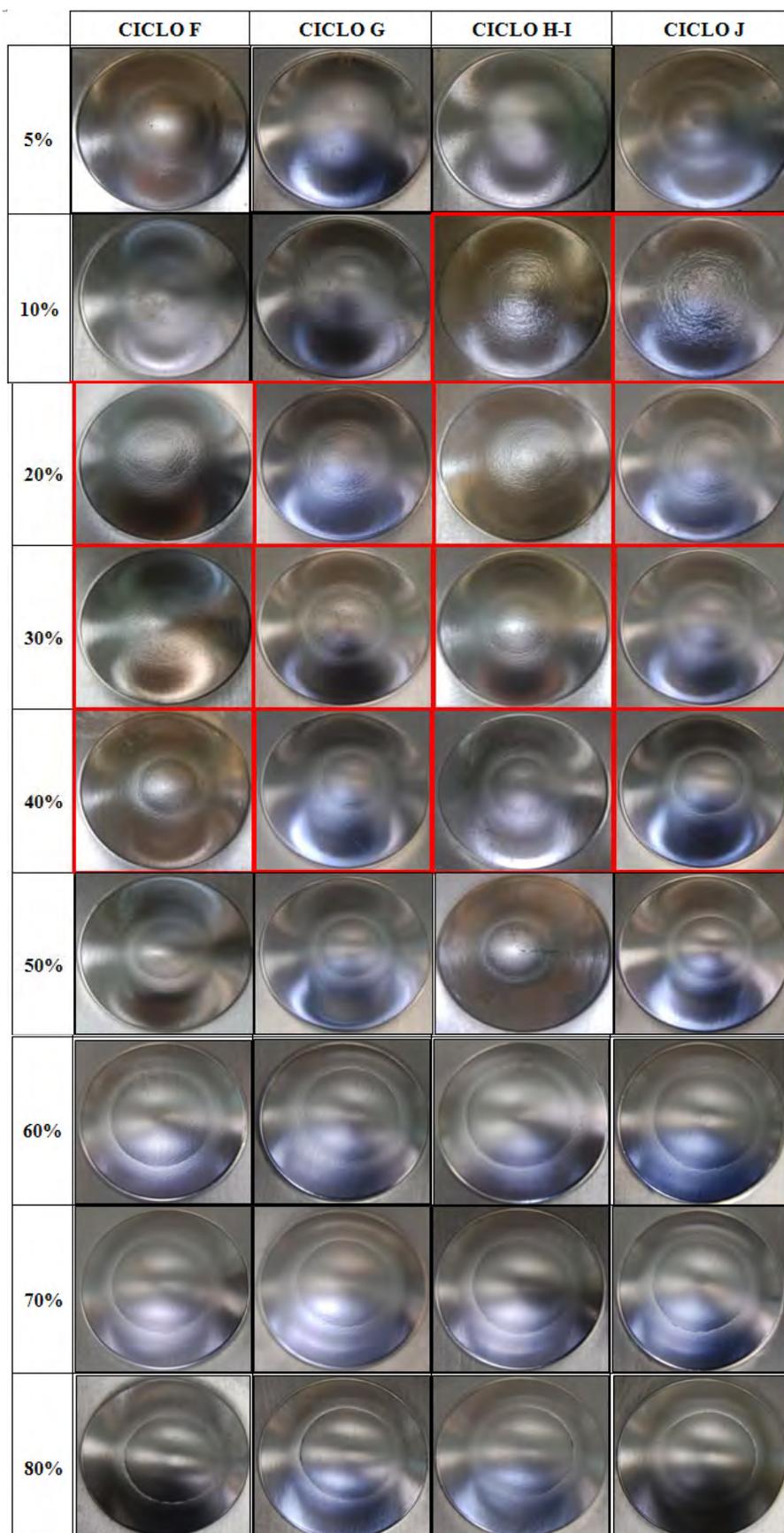


Figura 6. Fotografias da superfície estampada, mostrando a aparência superficial das amostras estudadas. As fotografias com bordas vermelhas correspondem às condições que apresentaram “casca de laranja” acentuada.

A Figura 7 mostra como varia o tamanho de grão em função do grau de encruamento e ciclo de recozimento. A Figura 8 mostra como varia a profundidade de estampagem em função do grau de encruamento.

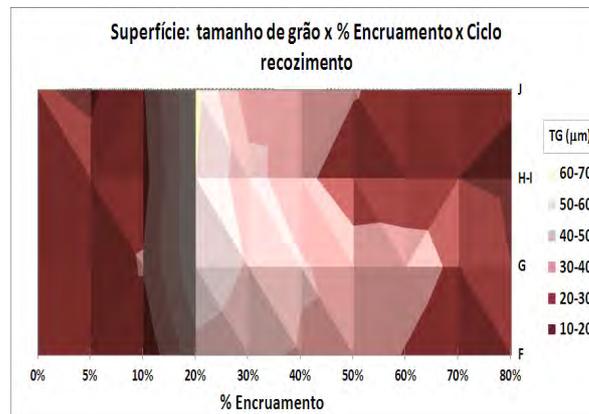


Figura 7. Superfície tamanho de grão x % Encruamento x Ciclo de recozimento.

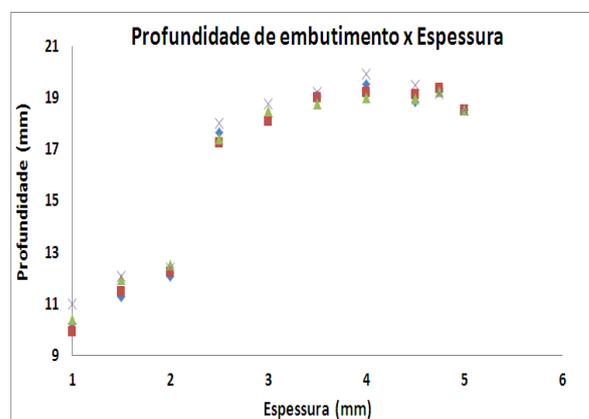


Figura 8. Gráfico da profundidade de estampagem em função da espessura.

Da superfície da Figura 7, observa-se que as amostras com 5% de encruamento apresentaram grãos com diâmetro médio de 20 a 30 μm , assim como as amostras com 70%, para todos os ciclos de recozimento estudados. As amostras com 20% de encruamento apresentaram os maiores valores de diâmetro médio dos grãos, em função do excessivo crescimento de grão, de 40 a 50 μm para o ciclo F e de 50-60 μm para os ciclos G e H-I e de 60-70 μm para o ciclo J, motivos pelos quais essas amostras apresentaram certo grau de “casca de laranja”, mostrado na Figura 6.

Quanto maior o grau de deformação, menor é o tamanho de grão após recozimento, independentemente do ciclo de recozimento aplicado. A Figura 8 mostra a equação da profundidade de estampagem Erichsen em função da espessura, como complementação da Figura 6. O gráfico indica que as menores profundidades de estampagem evidenciadas foram das amostras com elevado grau de encruamento. Isso ocorre por conta da profundidade Erichsen ser fortemente dependente da quantidade de material disponível para deformar. Sendo assim, quanto maior o grau de encruamento, maior é a redução de espessura e menor a quantidade de material para deformar, portanto menor o valor da profundidade Erichsen.

Pode-se observar também, uma grande discrepância entre 2 mm e 2,5 mm de espessura, que deve ser alvo de estudos futuros.

A Figura 9 mostra como variam as propriedades mecânicas em função do grau de encruamento e ciclos de recozimento.

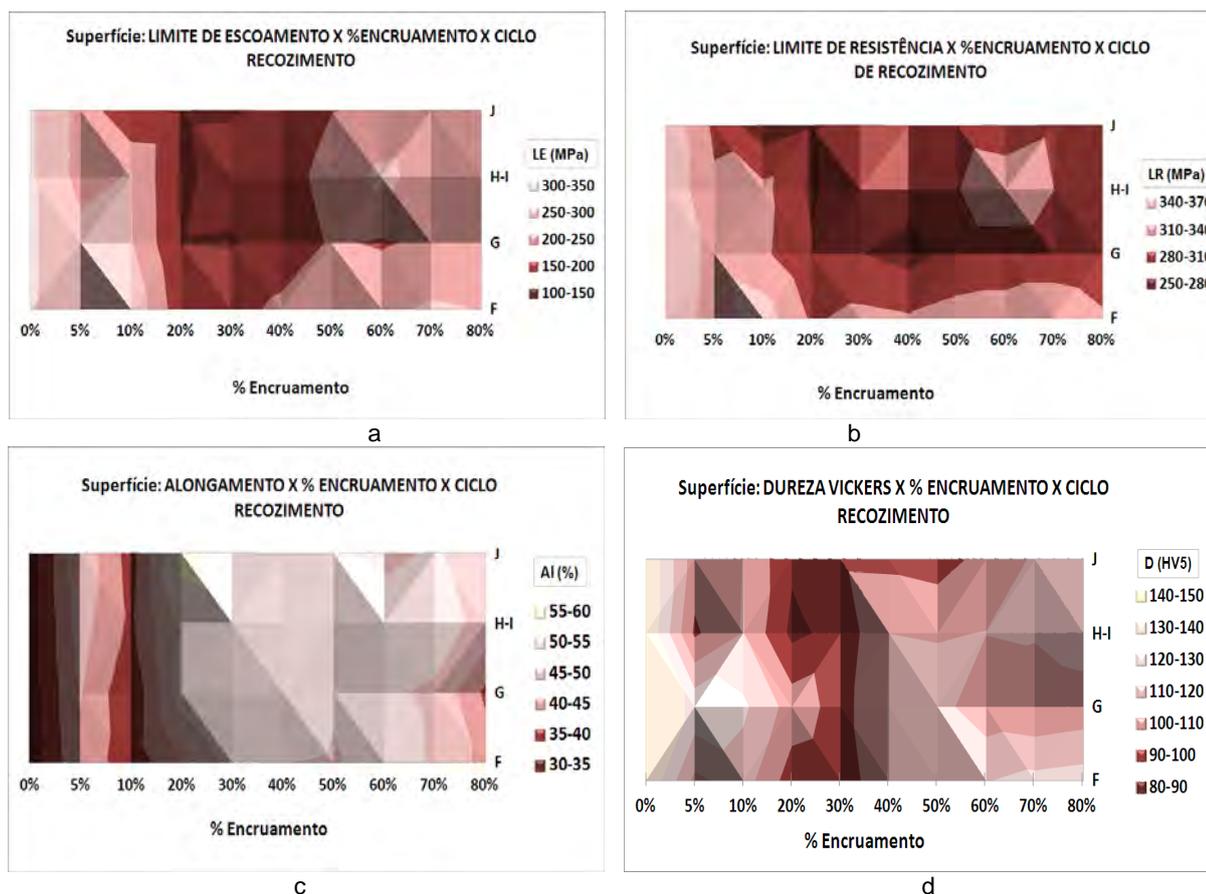


Figura 9. Superfícies da % Encruamento x Ciclo de Recozimento x Propriedades mecânicas: a) Limite de escoamento; b) Limite de Resistência; c) Dureza Vickers; d) Alongamento.

Pode-se observar que de um modo geral, para todas as condições de encruamento, as amostras recozidas a 630°C durante 6 horas (ciclo F) apresentaram maiores valores de limites de escoamento, por conta da menor temperatura e conseqüentemente menor tamanho de grão, quando comparado com os demais ciclos térmicos. O mesmo não ocorreu com as amostras laminadas a partir de 30% e posteriormente recozidas a 650°C durante 8 horas (ciclo G), as quais apresentaram limites de escoamento inferiores às amostras recozidas a 670°C durante 8 horas (ciclo H-I), por conta de menores tamanhos de grãos destas. De um modo geral, os menores valores de limite de escoamento foram evidenciados em todas as amostras recozidas a 700°C durante 9 horas (ciclo J), por conta dos maiores tamanhos de grão.

4 CONCLUSÕES

Do presente trabalho, pode-se concluir que:

- os limites de escoamento e resistência, dureza, o alongamento total em 50 mm e o embutimento Erichsen são dependentes do diâmetro médio de grão planar do aço ABNT 1006 com alumínio sem silício;
- partindo-se da matéria prima do aço ABNT 1006 com alumínio sem silício, com espessura inicial de 5 mm, limite de escoamento de aproximadamente 306 MPa, limite de resistência de aproximadamente 365 MPa e alongamento total em 50 mm de aproximadamente 32,5%, laminando-se a frio de 30% a

70% de encruamento e posteriormente recozendo-o de preferência a 700°C durante 9 horas, obtêm-se os maiores valores de alongamento, de aproximadamente 53%;

- todas as amostras laminadas a frio com alto grau de encruamento de 50% a 80%, não apresentam superfície “casca de laranja” de forma expressiva na superfície das chapas, após estampagem, devido ao menor tamanho de grão apresentado por estas amostras após o recozimento.

Agradecimentos

Agradecimentos aos funcionários da empresa Mangels Industrial S.A, em especial aos engenheiros metalúrgicos Sr. Carlos Roberto Gianini Junior e Sr. Fernando Kawata, que colaboraram com informações técnicas importantes e com os procedimentos experimentais deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 CALLISTER, William D. Ciência e engenharia de materiais. Uma introdução. 7 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008. cap. 11, p. 260.
- 2 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5007: Tiras relaminadas de aço de baixo teor de carbono para estampagem. Rio de Janeiro, 2008. 15 p.
- 3 AGGEN, G. et al. ASM Handbook: Properties and Selection: Irons Steels and High Performance Alloys. Vol. 1, 10 ed. USA: Copyright, 1993.
- 4 ARAI, Tohru et al. ASM Handbook: Heat Treating. Vol. 4, 10 ed. USA: Copyright, 1991.
- 5 CHIAVERINI, Vicente. Aços e ferros fundidos. 6 ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metais, 1990.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6673: Produtos planos de aço – determinação das propriedades mecânicas a tração. Rio de Janeiro, 1981. 22 p.
- 7 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 188-1/2: Materiais metálicos – Dureza Vickers. Rio de Janeiro, 1999. 8 p.
- 8 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5902: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. Rio de Janeiro, 1980. 7 p.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM E112-96: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. USA, 1996. 26 p.