

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DE RECOZIMENTO EM CAIXA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE AÇOS PARA ESTAMPAGEM DE LIMITE DE ESCOAMENTO MÁXIMO DE 230 MPa¹

*Elias Pereira da Silva²
Roberta de Oliveira Rocha³
Dagoberto Brandão dos Santos⁴*

Resumo

A crescente demanda da indústria automobilística por materiais funcionais e de melhor estética aos seus produtos exige aços que atendam a elevados requisitos de propriedades mecânicas e qualidade quando conformados a frio. A evolução de mercado aponta uma tendência cada vez maior para materiais que garantam uma boa estampabilidade na produção de painéis com formatos complexos. Nesta classe de aços se visa valores baixos de limite de escoamento e elevados de coeficiente de anisotropia. O presente trabalho visa estudar a influência dos parâmetros do processo de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas dos aços de estampagem extra profunda com limite de escoamento máximo de 230 MPa a partir da inserção do encharque intermediário na rampa de aquecimento. Os resultados não evidenciaram nenhuma influência significativa nos valores de propriedades mecânicas do aço estudado.

Palavras-chave: Estampagem; Recozimento; Limite de escoamento; Coeficiente de anisotropia.

STUDY ON THE INFLUENCE OF PARAMETERS IN BOX ANNEALING IN MECHANICAL PROPERTIES OF STEEL FOR DRAWING OF MAXIMUM YIELD STRENGTH OF 230 MPa

Abstract

The increasing demand of the automotive industry for materials functional and better aesthetics of their products requires steels that meet high standards of quality, mechanical properties, and cold drawing. The evolution of the market shows an increasing tendency to materials a good formability for the production of panels with complex shapes. In this class of steels is aimed at low values of yield strength and high coefficient of anisotropy. The present work aims to study the influence of process parameters on the box annealing on the mechanical properties of steel extra deep drawing with maximum yield strength of 230 MPa from the insertion intermediate soak in heating ramp. The results did not show any significant influence on the values of mechanical properties of steel studied.

Key words: Drawing; Annealing; Yield strength; Coefficient of anisotropy.

¹ *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

² *CQE ASQ, Engenheiro de Materiais, Me., Gerência de Engenharia Industrial de Laminação a Frio e Revestidos da Usiminas, Ipatinga, MG.*

³ *Membro da ABM, Engenheira Metalurgista, Dra., Gerência de Controle Integrado do Produto da Usiminas, Ipatinga, MG.*

⁴ *Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Dr., Prof. Associado Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da UFMG, Belo Horizonte, MG.*

1 INTRODUÇÃO

O segmento mais importante, economicamente falando, dos aços laminados a frio é voltado à estampagem, principalmente de aços de baixo teor de carbono. A estampagem de chapas de aço é um processo largamente aplicado na indústria automobilística. A utilização dos aços de estampagem se deve em geral às boas propriedades mecânicas, como a capacidade de adquirir formas complexas.^(1,2)

Os processos de estampagem tem grande importância econômica. Analisando a produção de chapas (laminados a frio) nos últimos cinco anos, se observa que cerca de 15% da produção siderúrgica do país é destinada a estes processos.⁽³⁾

A crescente demanda da indústria automobilística por materiais mais funcionais e de melhor estética requer aços que atendam a características de conformação a frio. Para tanto, são produzidos aços destinados à estampagem média (EM), estampagem profunda (EP) e estampagem extra profunda graus 1/2/3/4 (EEP Graus 1/2/3/4) que têm requisitos de propriedade mecânica e qualidade no que tange a conformação.

A evolução de mercado aponta uma tendência para exigência de materiais com características como boa ductilidade e conformabilidade que garantam um nível mínimo de estampabilidade à produção de painéis com formatos complexos. Um exemplo disso foi a revisão da norma NBR5915 G1:2008,⁽⁴⁾ exigindo a garantia de valores mínimos de coeficiente de anisotropia para as especificações EEP. O não atendimento a este requisito poderá resultar no rompimento do *blank* durante a confecção da peça.⁽⁵⁾

Neste trabalho objetiva-se estudar a influência dos parâmetros do processo de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas dos aços para estampagem extra profunda com limite de escoamento máximo de 230 MPa. Além disso, visa-se reduzir o índice de recusa por valores de limite de escoamento acima do máximo permitido.

1.1 Características Dos Aços De Estampagem Extraprofunda

Os aços produzidos para estampagem extra profunda são produtos laminados a frio. Suas propriedades de estampabilidade são altamente influenciadas pela composição química, sobretudo por baixos teores de carbono.⁽⁵⁾ Materiais laminados a frio quando submetidos ao processo de conformação são obrigados a possuir as seguintes características: boa ductilidade e estampabilidade adequada. Quanto maior o alongamento e menor o limite de resistência do aço, melhor é a ductilidade.⁽⁶⁾

A estampabilidade é regida pela textura do aço. A textura que melhor favorece a estampabilidade é a que abrange os planos da família {111}, paralelos à superfície da chapa de aço e/ou obtenção de grãos alongados na direção de laminação, dependendo do tipo de recozimento praticado. Estes planos cristalográficos são mais favoráveis a estampabilidade devido ao fato de possuírem maior densidade planar^(5,6).

Os aços para estampagem extra profunda podem ser produzidos na configuração acalmado ao alumínio (AA) ou *interstitial free* (IF). No aço AA quando processado no recozimento em caixa ocorre a precipitação do carbono durante o resfriamento. Ele apresenta grãos alongados no formato de panqueca, o que é favorável a estampabilidade. Já o aço IF demanda um processamento mais refinado na aciaria devido ao seu conceito de carbono extra baixo, da ordem de algumas dezenas de

ppm. Após processamento no recozimento em caixa, o aço AA apresenta características excelentes com relação à estampabilidade, tais como:⁽⁷⁻⁹⁾

- Baixos valores de limite de escoamento (LE);
- Altos valores de alongamento total (A_t);
- Altos valores de coeficiente de anisotropia transversal à direção de laminação (r_{90});
- Elevados valores de expoente de encruamento (n_{90}).

As Tabelas 1 e 2 mostram, respectivamente, os requisitos de composição química e de propriedades mecânicas dos aços EEP Grau 1.

Tabela 1. Requisitos de composição química dos aços EEP Grau 1 (% em massa)⁽⁴⁾

Aço	C	Mn	P	S	Al
EEP Grau 1	≤ 0,08	≤ 0,45	≤ 0,03	≤ 0,03	≥ 0,02

Tabela 2. Requisitos de propriedades mecânicas dos aços EEP Grau 1⁽⁴⁾

Aço	LE (MPa)	Limite de Resistência-LR (MPa)	A_t (%)	r_{90}	n_{90}
EEP Grau 1	140~230	270~350	≥ 38	≥ 1,7	≥ 0,19

1.2 Fatores que Influenciam nas Propriedades Mecânicas dos Aços para Estampagem Extraprofunda

Uma série de variáveis influenciam nas propriedades mecânicas dos aços para estampagem extraprofunda. São elas:^(10,11)

- composição química;
- temperatura de acabamento e bobinamento na laminação a quente;
- redução a frio;
- temperatura e velocidade de aquecimento no recozimento;
- laminação de encruamento (*skin pass*).

1.3 Influência do Encharque Intermediário no Processo de Recozimento em Caixa

O alumínio é o elemento que confere resistência ao envelhecimento pela combinação com o nitrogênio e é também o responsável pela formação de uma forte textura preferencial. A influência do alumínio na estampabilidade é determinada pelo teor disponível para combinar com o nitrogênio. Por sua vez, a estampabilidade também é afetada pela velocidade do aquecimento no recozimento. Para o aço com o teor de alumínio acima de 0,030%, durante o aquecimento lento do recozimento em caixa, ocorre a precipitação do nitreto de alumínio (AlN) antes da recristalização.⁽¹¹⁾ Essa situação é a ideal, pois nela os grãos são grandes e alongados na direção de laminação (*pancake grains*) e a textura preferencial tem predominância da intensidade dos planos {111}.

A Figura 1 mostra a influência conjunta do alumínio e nitrogênio no valor do coeficiente de anisotropia normal médio (r_m). Conforme pode ser visto, também nesse caso existe uma composição ótima dada por alumínio 0,030% e nitrogênio 0,0080% que determina uma relação Al/N próxima de quatro.⁽¹¹⁾

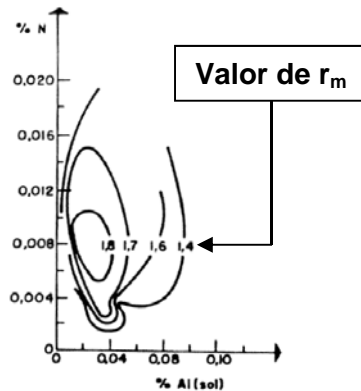


Figura 1. Influência dos teores de alumínio e nitrogênio (% em peso) no valor r_m de aços AA.⁽¹¹⁾

Conforme Deva, JHA e Mishra,⁽¹²⁾ o encharque intermediário realizado na temperatura próxima de 550°C (Figura 2) pode maximizar a precipitação do AlN antes da recristalização. Em outro artigo os mesmos autores⁽¹³⁾ fazem um comparativo entre os ciclos longos e curtos no recozimento em caixa e certifica que para aços de estampagem extra profunda deve-se praticar o ciclo longo de aquecimento, em torno de aproximadamente 54 horas.

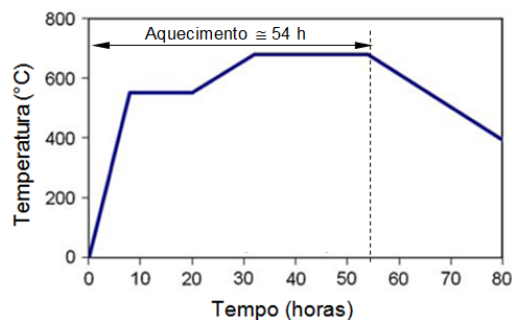


Figura 2. Representação esquemática do ciclo do recozimento em caixa praticado na Usina Siderúrgica de Bokaro, Índia.⁽¹³⁾

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho será analisado o efeito do encharque intermediário e do tempo de encharque final na textura, microestrutura e propriedades mecânicas no aço EEP Grau 1 com limite de escoamento máximo de 230 MPa.

2.1 Simulação do Encharque Intermediário no Processo de Recozimento em Caixa

O programa experimental foi desenvolvido em escala industrial com um aço acalmado ao alumínio, grau 1 de estampagem extra profunda, com composição química conforme Tabela 1. A seguir são descritas as etapas do experimento.

2.1.1 Seleção das amostras processadas em escala industrial

A bobina usada para retirada das amostras teve suas variáveis monitoradas nos processos anteriores ao recozimento da seguinte forma:

- laminação a quente – temperaturas de acabamento e bobinamento monitoradas conforme padrão de processo para esta classe de aço;

- decapagem – retirada de oxidação superficial através de banho em ácido clorídrico. Este processo não influencia nas propriedades mecânicas visadas no material;
- laminação a frio – a redução foi monitorada conforme padrão de processo para esta classe de aço.

Após a laminação a frio foram retiradas 33 amostras com as dimensões 0,82 mm x 220 mm x 400 mm (espessura x largura x comprimento).

2.1.2 Processamento das amostras em escala piloto

As amostras citadas foram separadas em 11 lotes com três amostras. Cada lote, denominado carga, foi submetido a um processo de tratamento térmico em escala piloto. Os ciclos térmicos de recozimento em caixa foram realizados em um forno tipo caixa com as seguintes especificações:

- dimensões: 410 mm x 300 mm x 800 mm (largura x altura x comprimento)
- velocidade de aquecimento: 30°C/h (forno vazio)
- potência instalada: 45 kW
- atmosfera interna: HN

Os ciclos térmicos foram simulados fixando a taxa de aquecimento e resfriamento para todas as cargas e variando a temperatura do encharque intermediário e o tempo do encharque final (Figura 3). As condições simuladas estão estratificadas na Tabela 3.

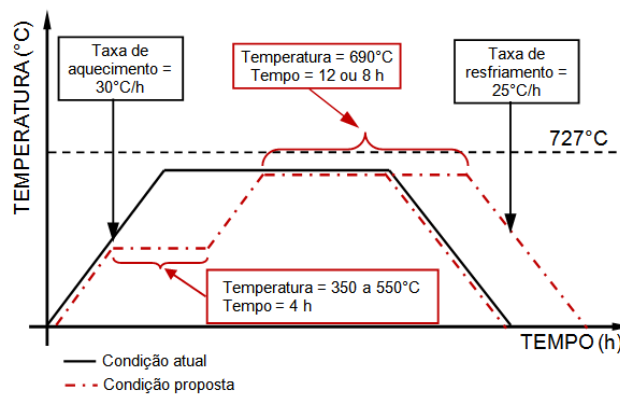


Figura 3. Condição atual e proposta para o tratamento térmico.⁽¹⁴⁾

Tabela 3. Variáveis controladas no tratamento térmico⁽¹⁴⁾

Carga	Encharque Intermediário		Encharque Final		Quantidade de Amostras
	Temperatura (°C)	Tempo (h)	Temperatura (°C)	Tempo (h)	
1	-	-	690	12	3
2	350	4		12	3
3				8	3
4	400			12	3
5				8	3
6	450			12	3
7				8	3
8	500			12	3
9				8	3
10	550			12	3
11				8	3

Após os ciclos térmicos, as amostras foram processadas no laminador piloto simulando o *skin pass* com o mesmo valor de redução de 1,0%.

2.2 Verificação das Propriedades Mecânicas

Após processamento das amostras no forno e laminador pilotos, foram retirados corpos de prova para ensaio de tração conforme norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ a fim de mensurar os valores de LE, LR, A_t , valor r_{90} e valor n_{90} . Para a caracterização destas propriedades mecânicas foi feito o teste de tração utilizando-se a máquina Instron 5882/10t. Foi adotada a norma ASTM A370⁽¹⁵⁾ para determinação dos valores de LE, LR e A_t ; a norma ASTM E517⁽¹⁶⁾ para a determinação dos valores de r_{90} e a norma ASTM E646⁽¹⁷⁾ para determinação dos valores de n_{90} .

2.3 Caracterização da Microestrutura e da Textura

Foi feita análise metalográfica das amostras em seção longitudinal em relação à direção de laminação para verificação do tamanho de grão através do método de interseção linear, conforme norma ASTM E112:1996.⁽¹⁸⁾ Para análise da microestrutura foi utilizado o microscópio óptico ZEISS, modelo Axio Imager A1m. Para a análise de textura foi utilizado o difratômetro de raios X Bruker, modelo D8 Advance.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Propriedades Mecânicas

Os valores de propriedades mecânicas obtidos na direção transversal de laminação são mostrados nas Figuras 4 a 8. Onde lê-se EI = Encharque Intermediário (Cargas 2 a 11), SEI = Sem Encharque Intermediário (carga 1), EF = Encharque Final.

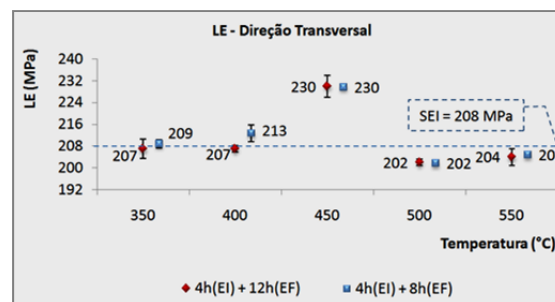


Figura 4. Gráfico com os valores obtidos de LE.⁽¹⁴⁾

Na Figura 4 observa-se que todas as cargas apresentaram valores médios de LE iguais ou abaixo do valor máximo especificado pela norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ de 230 MPa. Observa-se também que a inserção do encharque intermediário na temperatura de 350°C e 400°C não favoreceu nenhum incremento nos valores de LE, uma vez que mantiveram-se próximo do obtido na carga 1 onde não se inseriu o encharque intermediário. Vale ressaltar que a carga 1 representa o ciclo padrão de recozimento que é praticado atualmente. Acredita-se que até essa temperatura não ocorreu precipitação do AlN. Com a inserção do encharque intermediário na temperatura próxima de 450°C observa-se que os valores de LE ficaram acima do

esperado. Este fato está possivelmente associado ao início de precipitação ao AlN, porém com característica fina, o que dificulta o coalescimento de grãos e com isso propicia maiores valores de LE. Por fim, verifica-se que a inserção do encharque intermediário a partir de 500°C, conforme simulado por Deva, JHA e Mishra,⁽¹²⁾ indica uma ligeira tendência de menores valores de LE, o que está possivelmente associado ao coalescimento dos precipitados de AlN. Estes precipitados apresentam aspecto grosseiro, o que por sua vez contribui para a formação de textura preferencial com predominância da intensidade dos planos {111} conforme Meyzaud e Parnieri.⁽¹¹⁾

Na Figura 5, observa-se dos valores de LR encontrados.

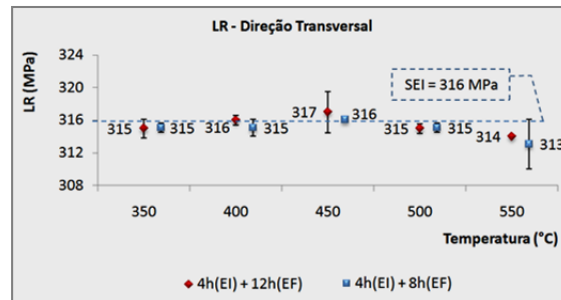


Figura 5. Gráfico com os valores obtidos de LR.⁽¹⁴⁾

Apesar dos valores de LR mostrados na Figura 5 estarem ligeiramente menores que o valor obtido por Deva, JHA e Mishra⁽¹²⁾ de 321 MPa, verifica-se que não houve variações entre as diferentes condições de temperatura de inserção do encharque intermediário. Todas as cargas apresentaram valores de LR abaixo do valor máximo especificado pela norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ de 350 MPa.

Para os valores de A_t observados na Figura 6, apesar de os valores médios demonstrarem um comportamento semelhante ao obtido no LE, sobretudo na temperatura próxima de 450°C, não pode-se inferir que a inserção do encharque intermediário influenciou numa variação dos valores encontrados, uma vez que houve uma dispersão considerável. Verifica-se também que todas as cargas apresentaram valores de A_t acima do mínimo especificado pela norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ de 38%.

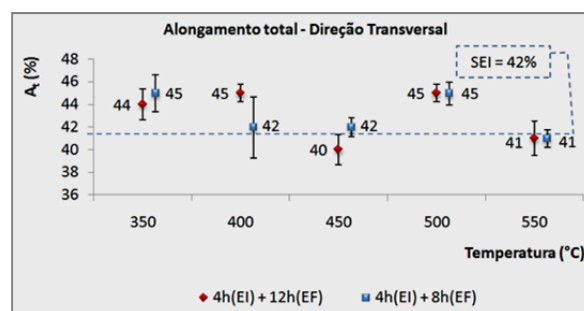


Figura 6. Gráfico com os valores obtidos de A_t .⁽¹⁴⁾

Analisando os valores de n_{90} mostrados no gráfico da Figura 7, verifica-se que em virtude da maior dispersão dos resultados não é possível afirmar que houve incremento em função da inserção do encharque intermediário. Verifica-se que as cargas apresentaram valor acima do mínimo especificado pela norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ de 0,19.

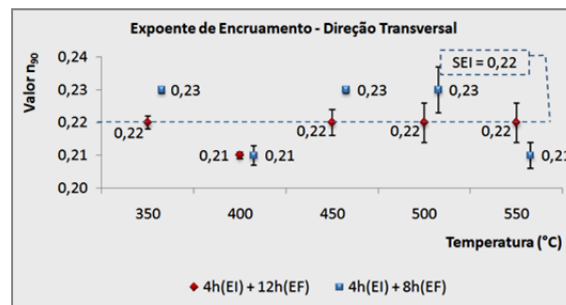


Figura 7. Gráfico com os valores obtidos de valor n_{90} .⁽¹⁴⁾

Os resultados de r_{90} analisados na direção transversal de laminação são mostrados na Figura 8.

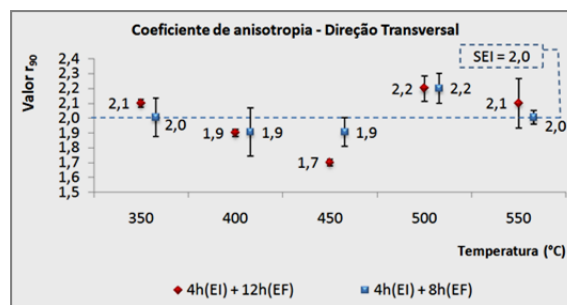


Figura 8. Gráfico com os valores obtidos de r_{90} .⁽¹⁴⁾

Apesar da maior dispersão dos resultados, verifica-se um comportamento semelhante ao observado para o LE, isto é, a inserção do encharque intermediário na temperatura de 350°C não favoreceu nenhum incremento nos valores de r_{90} , uma vez que mantiveram-se próximo do obtido na carga 1. Com a inserção do encharque intermediário na temperatura próxima de 400°C e de 450°C, observa-se que os valores de r_{90} ficaram abaixo do esperado. Por fim, verifica-se que a inserção do encharque intermediário a partir de 500°C indica uma tendência muito branda de maiores valores de r_{90} . Associam-se as razões para tal comportamento às mesmas apresentadas para os valores de LE. Verifica-se também que todas as cargas apresentaram valor de r_{90} igual ou acima do mínimo especificado pela norma NBR5915 G1:2008⁽⁴⁾ de 1,7.

3.2 Caracterização da Microestrutura e da Textura

Os resultados do tamanho de grão são mostrados no gráfico da Figura 9. Verifica-se que todas as cargas apresentaram valor de TG acima do valor obtido por Deva, JHA e Mishra⁽¹²⁾ de 11,50 μm . Percebe-se também que a inserção do encharque intermediário na temperatura próxima de 500°C demonstra uma ligeira tendência de aumento no tamanho de grão. Esse fato contribui para a mesma tendência de incremento nos valores de LE próximo desta temperatura e, possivelmente, está associado à grande precipitação de AlN antes do término da etapa de recristalização favorecendo o crescimento dos grãos alongados na direção de laminação (*pancake grains*), conforme Meyzaud e Parnieri.⁽¹¹⁾

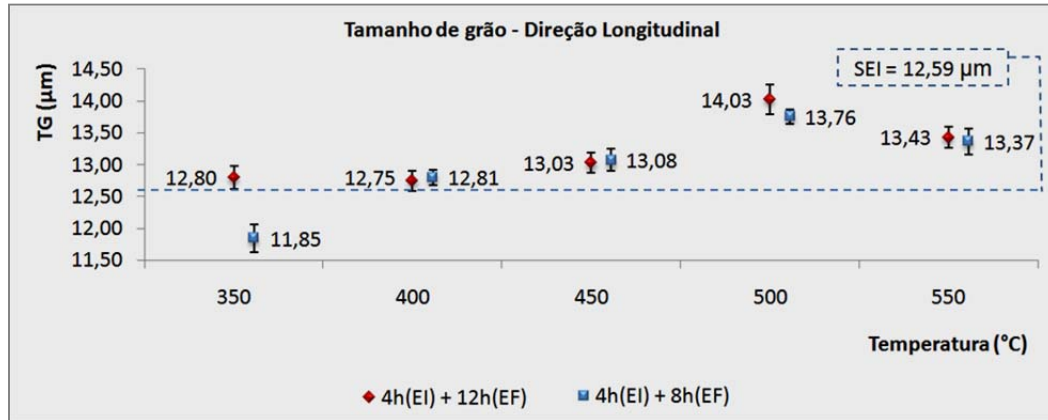


Figura 9. Gráfico com os valores obtidos de TG medidos na direção de laminação.⁽¹⁴⁾

O aspecto típico da microestrutura do aço EEP Grau 1 com limite de escoamento máximo de 230 MPa, referência da literatura de Deva, JHA e Mishra⁽¹²⁾ e obtida nos ensaios realizados (cargas 1, 8 e 9), é mostrado na Figura 10, onde nota-se que as microestruturas apresentam as mesmas características com relação ao formato de grãos alongados na direção de laminação. Percebe-se também que as microestruturas das cargas 8 e 9, processadas com a inserção do encharque intermediário na temperatura próxima de 500°C, que apresentaram desempenho ligeiramente superior de propriedade mecânica, se comparadas com a carga 1, possuem as mesmas características com relação ao formato de grãos alongados na direção de laminação. Estas características, conforme comentado anteriormente, são favoráveis à estampabilidade do aço.

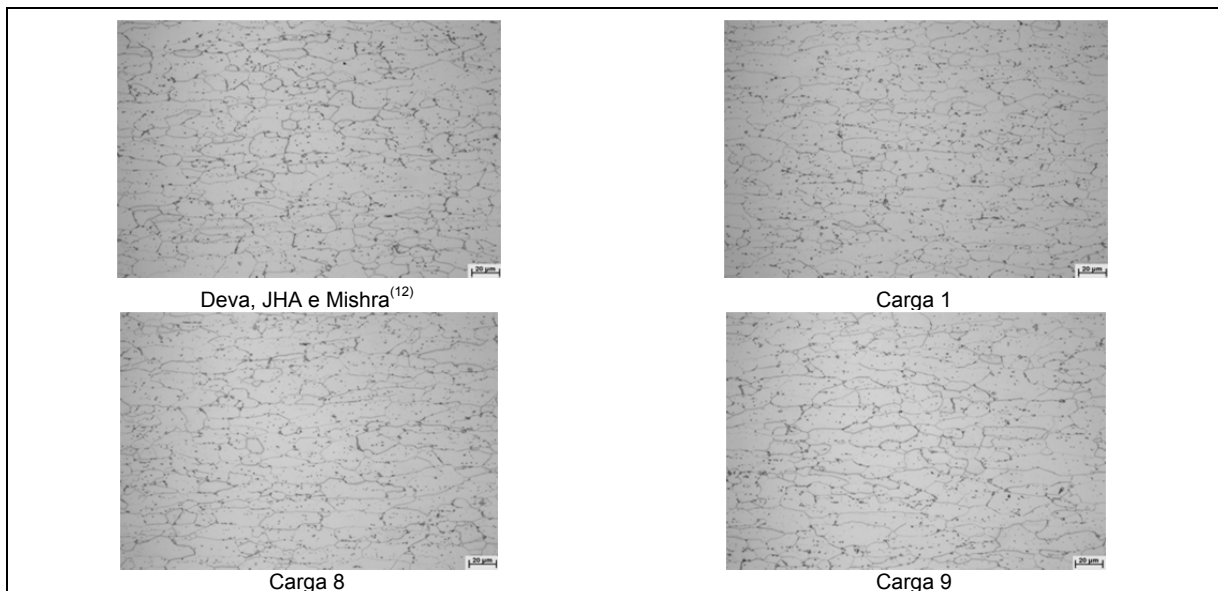


Figura 10. Microestruturas da literatura e das cargas 1, 8, 9 obtidas após a aplicação dos ciclos térmicos – aumento de 500x. Ataque com Peróxido de Hidrogênio + ácido sulfúrico 5% em água.⁽¹⁴⁾

Os diagramas ODF (*Orientation Distribution Function*) obtidos na direção de laminação das 11 cargas processadas apresentaram a mesma característica, o que indica que a inserção do encharque intermediário não afetou a textura do aço. A figura 11 mostra o digrama da carga 8, onde percebe-se a presença da fibra γ $\{111\}\langle uvw \rangle$ com intensidade máxima da componente $\langle 111 \rangle [1\bar{1}0]$, favorável à estampabilidade por conter planos da família $\{111\}$, paralelos à superfície da chapa

de aço, que possuem maior densidade planar, conforme Tsunoyama et al.⁽⁵⁾ e Araújo Neto et al.⁽⁶⁾

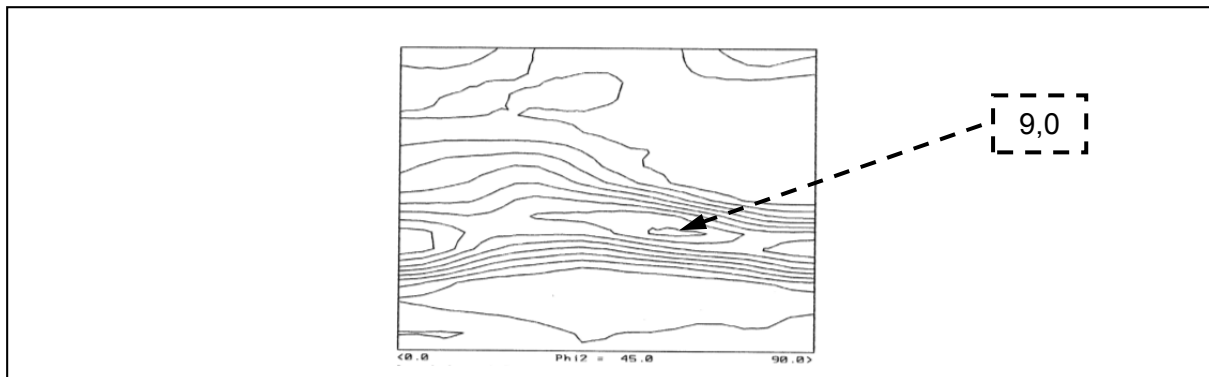


Figura 11. Diagrama ODF seção em $\Phi_2 = 45^\circ$ - intensidade máxima da fibra $\langle 111 \rangle [11\bar{0}]$ em torno de 9,0 (notação de Bunge).⁽¹⁴⁾

4 CONCLUSÕES

A inserção do encharque intermediário nos ciclos térmicos das cargas processadas não evidenciou uma influência significativa nos resultados de propriedades mecânicas do aço estudado. Verifica-se que a inserção do encharque intermediário na temperatura entre 400°C e 450°C não é recomendável, pois identificou-se a partir das simulações uma tendência de aumento no valor de LE o que é indesejável para esta classe de aço. Por outro lado, verificou-se que a inserção do encharque intermediário na temperatura de 500°C , demonstrou uma tendência de obtenção de propriedades mecânicas mais favoráveis ao processo de conformação mecânica. Isso demonstrou que o encharque intermediário realizado próximo desta temperatura pode maximizar a precipitação do AIN antes da recristalização, favorecendo as propriedades de conformabilidade do aço, conforme Deva, JHA e Mishra.⁽¹²⁾

A análise metalográfica e as principais componentes de textura cristalográfica indicam que o aço EEP Grau 1 com limite de escoamento máximo de 230 MPa manteve preservada suas características de boa conformabilidade após a inserção da etapa de encharque intermediário.

Visando um alinhamento entre adequação das propriedades mecânicas do aço estudado, recomenda-se a utilização do encharque intermediário na temperatura de 500°C por 4 horas e do encharque final de 8 horas. Espera-se com isso manter o limite de escoamento abaixo do máximo de 230 MPa, objetivo deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 FERREIRA FILHO, A., LEITE, E., MARTINS, I., COLLANIERI, R. Tiras de aço laminadas a frio e fosfatizadas utilizadas em processos de estampagem crítica. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 44, 2007, Campos do Jordão. Anais. São Paulo: ABM e Tec Art Editora. p. 286-297.
- 2 FERREIRA FILHO, A., CUMINO, R. S. Tiras de aço médio e alto teor de carbono para estampagem profunda utilizadas em componentes automotivos. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS, 40, 2003, Vitória. São Paulo: ABM e Tec Art Editora Ltda, 2003. p. 34-46.

- 3 LUIZ, W.D., CAMPOS, H. B., MELO, T. M. F., RUBIO, J. C. C. Análise de métodos para determinação experimental da curva limite de estampagem (CLE) de chapas finas de aço para estampagem. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 61, 2006, Rio de Janeiro. Anais. p.1418-1426.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5915 - Bobinas e chapas finas a frio de aço carbono para estampagem - especificação. Rio de Janeiro, 2008.
- 5 TSUNOYAMA, K., OBARA, T., SATAH, S., ABE, H., SHIBASAKI, O., UESUGI, N. Development of extra-deep drawing cold rolled sheet steels for integrated automotive parts. In: Kawasaki Steel Technical Report, n.24, April, 1991. p. 84-90.
- 6 ARAÚJO NETO, J. B., SILVA, M. P., OTERO, G. M., ALVES, G. G. Elevação do nível de estampabilidade em aço laminado a frio com recozimento em forno caixa. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 60, Belo Horizonte. Anais. São Paulo: Tec Art Editora Ltda, 2005. p. 75-82.
- 7 AKISUE, O., HADA, T. Past development and future outlooks of automotive steel sheets. Nippon Steel Technical Report, nº 64, 1995. p. 1-6.
- 8 GUPTA, I., BHATTACHARYA, D. Metallurgy of formable vacuum degassed interstitial-free steels. Metallurgy of Vacuum Degassed Steels, 1990. p. 43-72.
- 9 PRADHAM, R. Cold-rolled interstitial-free steels: a discussion of some metallurgical topics. In: Proceedings of International Forum for Physical Metallurgy of IF Steels. ISIJ International, May, 1994. p. 165-177.
- 10 LOUREIRO, F. G., GONZALEZ, B. M., MEYER, L. C. O. Influência de variáveis operacionais nas propriedades mecânicas de aços IF ligados ao titânio. In: SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO, PROCESSOS E PRODUTOS LAMINADOS E REVESTIDOS – ABM, Curitiba, 2000. p. 231-240.
- 11 MEYZAUD, Y., PARNIERE, P. Le laminage a froid et le recuit des toles minces non allies. IRSID, Janvier, 1978.
- 12 DEVA, A., JHA, B. H., MISHRA, N. S. Microstructural evolution during bath annealing of boron containing aluminum-killed steel, Research and Development Centre for Iron and Steel, SAIL – Steel Authority of India Limited, Ranchi, India, 2009.
- 13 DEVA, A., JHA, B. H., MISHRA, N. S. Microstructural evolution during bath annealing of boron containing aluminum-killed steel, Research and Development Centre for Iron and Steel, Materials Science and Technology, Ranchi, India, 2008.
- 14 SILVA, E. P. Estudo da influência dos parâmetros de recozimento em caixa nas propriedades mecânicas de aços para estampagem de limite de escoamento máximo de 230 MPa, Proposta de Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, de Materiais e de Minas da UFMG, Belo Horizonte, 2013.
- 15 NORMA ASTM A370 - Standard test methods and definitions for mechanical testing of steel products, American Society For Testing and Materials. Philadelphia, 2011.
- 16 NORMA ASTM E517 - Test for Plastic Strain ratio r for Sheet Metal, American Society For Testing and Materials. Philadelphia, 1974.
- 17 NORMA ASTM E646 - Test for Tensile Strain-Hardening Exponents (n Values) of Metallic Sheet Materials, American Society For Testing and Materials. Philadelphia, 1978.
- 18 NORMA ASTM E112 - Standard test methods for determining average grain size. American Society For Testing and Materials. Philadelphia, 1996, revisão E2.