

AUMENTO DA PRODUTIVIDADE DO AÇO IF PROCESSADO VIA RECOZIMENTO CONTÍNUO*

Nissandro Domingues¹
Rafael Ricardo Magalhães²
Jetson Lemos Ferreira³

Resumo

Foi avaliada a possibilidade de aumentar a produtividade do aço IF processado via recozimento contínuo. Amostras laminadas a frio desse aço foram submetidas a ciclos térmicos de recozimento em escala laboratorial, empregando-se menores temperaturas de encharque e maiores velocidades de processamento que as praticadas industrialmente. Foram, então, medidas as propriedades mecânicas em tração e caracterizada a microestrutura do aço. A partir dos resultados mais promissores, bobinas foram processadas industrialmente nas mesmas condições simuladas em escala laboratorial. Em amostras dessas bobinas, foi avaliada, além das propriedades mecânicas e da microestrutura, a conformabilidade de *blanks* visando à garantia de atendimento dos requisitos de aplicação no cliente. Com os resultados obtidos, verificou-se que é possível produzir o aço IF satisfatoriamente, preenchendo todos os requisitos de aplicação, com um incremento de 10% na velocidade de processamento e uma diminuição de até 30°C, na temperatura de encharque. Esses resultados representam considerável ganho em produtividade no processamento do aço IF.

Palavras-chave: Aço IF; Recozimento contínuo; Produtividade.

PRODUTIVITY INCREASE OF IF STEEL PROCESSED IN CONTINUOUS ANNEALING LINE

Abstract

The possibility to increase the productivity of IF steel processed in Continuous Annealing Line was evaluated. Cold rolled IF steel samples were subjected to annealing thermal cycles with higher processing speed and lower soaking temperatures than the industrial standard condition. Then the mechanical properties were measured and the microstructure was analyzed. From the best results found in laboratorial analysis, coils of IF steel were processed in the Continuous Annealing Line in the same line speed and soaking temperature simulated in laboratory. Samples were again taken from these annealed coils and the mechanical properties were measured and the microstructure was characterized. The formability of blanks was evaluated to ensure customer requirements. It was found the IF steels can be processed with 10% higher processing speed with a decrease of 30°C in soaking temperature. These results represent considerable productivity increase in IF steel processing.

Keywords: IF Steel, Continuous Annealing, Productivity.

¹ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., MBA, CQE/ASQ; Pesquisador, Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.

² Engenheiro Metalurgista, CQE/ASQ; Engenheiro de Produção, Gerência Técnica de Laminação a Frio, Usiminas, Ipatinga, MG.

³ Engenheiro Metalurgista, M.Sc., MBA; Pesquisador, Centro de Tecnologia Usiminas, Ipatinga, MG.

1 INTRODUÇÃO

Na busca por competitividade, a Usiminas tem tomado ações para aperfeiçoar seus processos produtivos. Visando ao fornecimento de tiras a frio com a qualidade requerida pelos clientes, com o máximo em produtividade, faz-se necessário aumentar a capacidade produtiva. Dentre algumas ações tomadas, cita-se a otimização de rotas de processamento de aços, a redução da incidência de defeitos superficiais nos produtos, dos custos com manutenção, da utilização de insumos siderúrgicos e do tempo de processamento dos aços nas linhas de produção, sendo necessárias, frequentemente, alterações nos ciclos térmicos de recozimento. Nesse sentido, diversos projetos têm sido conduzidos visando compreender o efeito de ciclos térmicos nas propriedades mecânicas dos aços processados nas linhas de recozimento, verificando se, após alterações, os aços ainda preenchem os requisitos de qualidade exigidos, de modo que ciclos térmicos mais econômicos sejam aplicados.

A Linha de Recozimento Contínuo da Usiminas produz uma série de aços C-Mn destinados a diversas aplicações, sendo um dos principais, o *Interstitial Free* (IF), fornecido para o setor automotivo. O aço IF tem como característica particular o fato de possuir quantidade desprezível de elementos em solução sólida intersticial, o que requer teor ultra baixo de elementos como C e N na sua composição química, o que resulta em elevada capacidade de deformação plástica ao aço [1-3]. Na sua rota de fabricação, a tira encruada é submetida a um ciclo de recozimento que envolve um rápido aquecimento e encharque a temperaturas usualmente entre 700 e 820°C para completa recristalização da ferrita, seguido de resfriamento e permanência durante certo tempo na temperatura de superenvelhecimento, resfriamento rápido até a temperatura ambiente e laminação de encruamento visando o ajuste final de suas propriedades mecânicas.

Para aumento da velocidade de processamento do aço IF na Linha de Recozimento Contínuo, há um consenso na literatura [1,2,4] de que a temperatura de encharque deve ser aumentada para compensar o menor tempo de permanência no forno de recozimento. No entanto, o risco de ocorrência de enrugamento durante o processo de recozimento pode ser um limitador para o aumento da temperatura de encharque. Além disso, provoca-se desgaste acentuado nos tubos radiantes, diminuindo a vida útil deles, o que aumenta a probabilidade de ocorrência de defeitos na superfície das tiras. Logo, o aumento da temperatura de encharque não seria, em princípio, a melhor alternativa para aumentar a produtividade do aço e outras soluções seriam requeridas para atender a essa necessidade industrial.

Foi proposto, então, verificar se a velocidade de processamento do aço IF na Linha de Recozimento Contínuo pode ser aumentada, sem que a temperatura de encharque fosse aumentada. Adicionalmente, verificar se a temperatura de encharque, até então empregada para o aço IF poderia ser reduzida e qual seria essa temperatura mínima para operação para essa linha de recozimento, sem colocar em risco as propriedades mecânicas desse aço e as condições operacionais de produção.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foram avaliados aços IF ao Ti para duas aplicações distintas, um de estampagem extra profunda, EEP 230, de 1,1 mm de espessura, e o outro de estampagem peça crítica, PC 200, com espessura de 0,9 mm. Os aços foram lingotados, laminados a quente, decapados e laminados a frio em escala industrial, nas condições padronizadas de processamento. As composições químicas dessas duas aplicações estão mostradas na Tabela 1, referenciadas de acordo com a norma NBR 5915 [5].

Tabela 1. Composição química das duas aplicações do aço IF avaliadas (Valores máximos em % em massa).

C	Mn	P	S
0,12	0,60	0,045	0,045

Os ciclos térmicos foram simulados em escala laboratorial no forno do equipamento HDPS (*Hot Dip Galvanizing Simulator*) de acordo com o perfil mostrado na Figura 1, utilizando-se amostras de tiras laminadas a frio de 220 mm de comprimento e 120 mm de largura. As velocidades de processamento do aço EEP 230 avaliadas foram de 164, 180, 200 e 220 m/min e, a do aço PC 200, 194, 210 e 220 m/min, diminuindo-se o tempo do ciclo térmico. Para essas maiores velocidades, as temperaturas de encharque (TE) avaliadas foram de 780, 760, 730 e 700°C para ambas as aplicações, mantendo-se fixas as demais temperaturas nos pontos de controle do ciclo, mostradas também na Figura 1. Ao final do recozimento, os aços foram submetidos à laminação de encruamento, em escala piloto, empregando-se 0,8% de deformação nas amostras orientadas na direção de laminação.

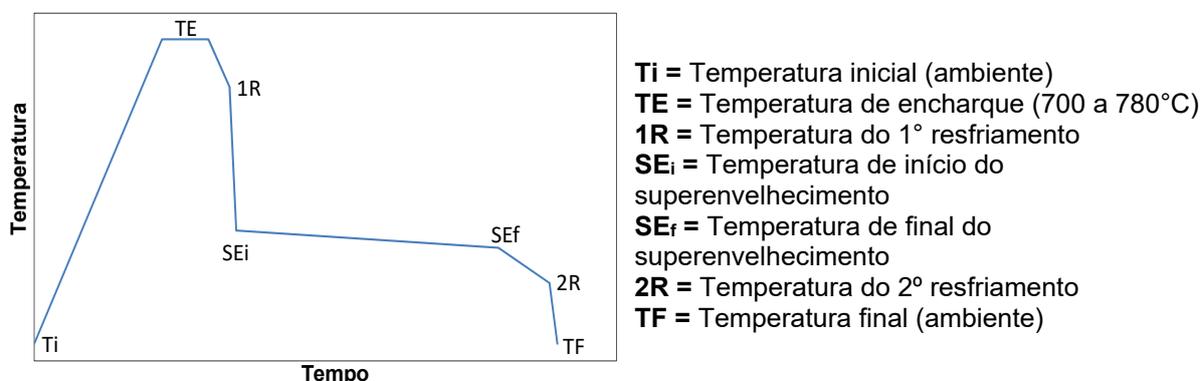


Figura 1. Ciclo térmico de recozimento industrial simulado em laboratório.

A microestrutura dos aços foi analisada após laminação de encruamento. As seções metalográficas foram orientadas na direção de laminação, ao longo da espessura das tiras, e atacadas com reagentes à base de ácido nítrico e peróxido de hidrogênio para revelação dos contornos de grão ferrítico. Foi medido o diâmetro médio do grão ferrítico, conforme a norma ASTM E112 [6]. Análises de textura cristalográfica também foram realizadas na região subsuperficial das amostras e os resultados foram apresentados em figuras das fibras α e γ .

Foram realizados ensaios de tração, segundo a norma ASTM E8 [7], em corpos de prova com 25 mm de base de medida, conforme norma ASTM A370 [8], orientados transversalmente (T) e no sentido de laminação (L). Foram medidos os limites de escoamento (LE) e de resistência (LR), os alongamentos uniforme (Alu) e total (Alt), o expoente de encruamento de Hollomon, n , a 8% de deformação, e o coeficiente de

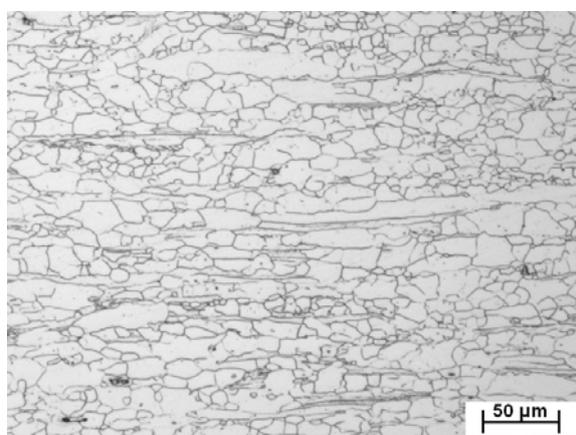
anisotropia, ou Lankford, r , a 15% de deformação. Os resultados do Alt foram convertidos de 25 mm para 50 mm de base de medida. Para essas propriedades, serão apresentados apenas os valores médios devido à sua pequena dispersão, confrontando-os com as principais especificações de aplicação.

Após processamento e realização dos ensaios e análises laboratoriais, nos casos de obtenção de resultados satisfatórios, foi realizado processamento na Linha de Recozimento Contínuo com base nas condições de recozimento mais apropriadas para produção industrial. Após processamento, mediu-se, novamente, as propriedades mecânicas em tração e foram realizados ensaios de conformabilidade. Dentre esses ensaios, determinou-se a altura para ocorrência de trincas em ensaio de estiramento biaxial Erichsen, conforme norma ISO 20482 [9], a razão limite de estampagem (RLE), para os diâmetros de *blank* de 90, 95, 100, 105 e 110 mm e levantadas as curvas limite de conformação (CLC), segundo a técnica de Nakajima à estricção, conforme recomendações da norma ISO 12004/2 [10]. Esses resultados também foram confrontados com os obtidos em escala piloto e com os requisitos de aplicação.

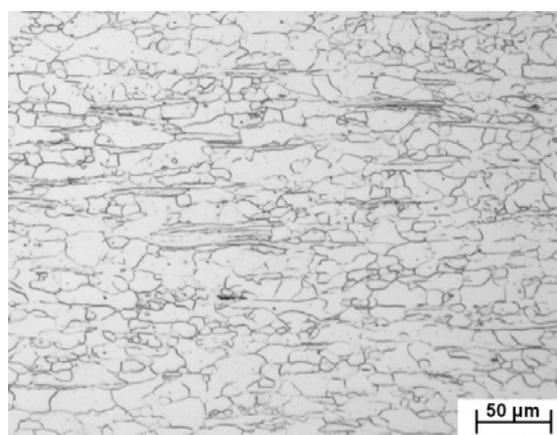
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Resultados comuns aos aços IF EEP 230 e IF PC 200

Após o processamento em escala piloto, a primeira constatação foi que, ao recozer o aço IF na temperatura de encharque de 700°C, nas velocidades de processamento entre 164 e 220 m/min, a microestrutura não se recristalizou completamente, permanecendo grande quantidade de grãos alongados, conforme exemplificado para a velocidade de 220 m/min na Figura 2. Também, não houve reforço adequado de componentes de textura pertinentes à fibra γ , o que é desejado para boa estampabilidade do aço, permanecendo ainda grande quantidade de grãos com componentes próximas a cubo rodado $\{100\}[011]$ na microestrutura, Figura 3. Conseqüentemente, propriedades mecânicas, como alongamento total e coeficiente de Lankford, Figura 4, mostraram-se baixas e insatisfatórias para aplicação, sendo esta representada entre as linhas em vermelho na figura 4(b) e nos demais gráficos a serem exibidos adiante no texto. Os resultados obtidos ao recozer na temperatura de encharque de 700°C foram, portanto, desconsiderados ao longo deste trabalho.



(a) Aço IF EEP 230



(b) Aço IF PC 200

Figura 2. Microestrutura parcialmente recristalizada do aço IF recozido a 700°C, representativa para todas as velocidades de processamento avaliadas.

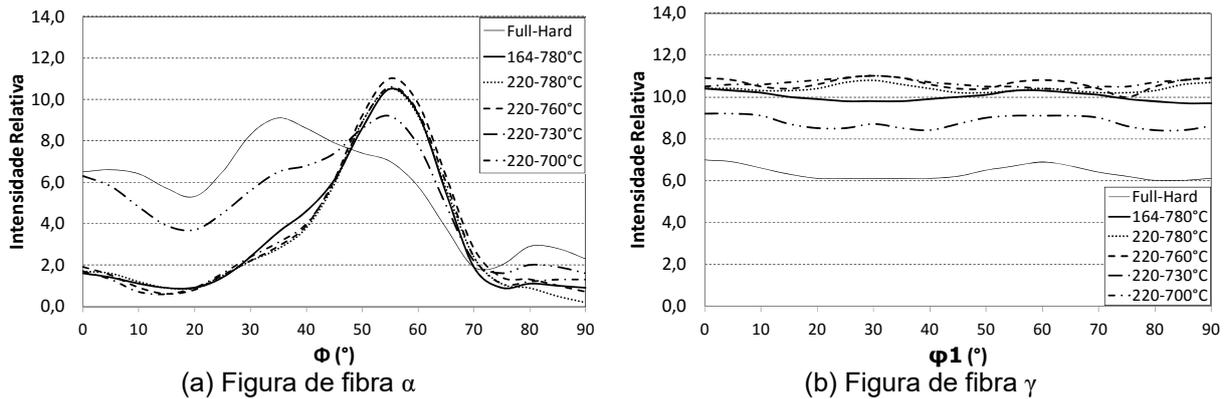


Figura 3. Principais componentes de textura cristalográfica do aço IF EEP 230 processado a 164 e 220 m/min em escala laboratorial, a diferentes temperaturas de encharque.

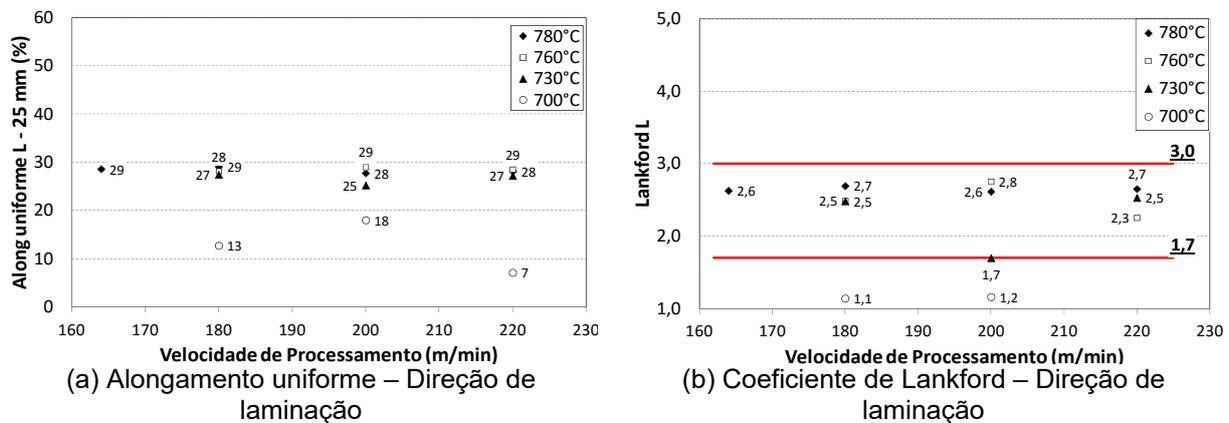
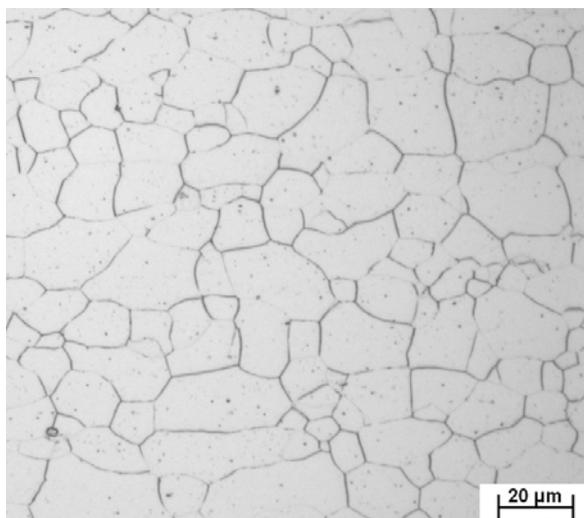
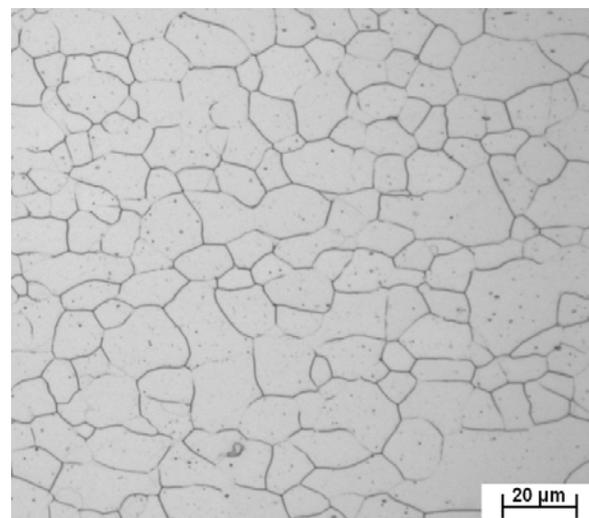


Figura 4. Alongamento uniforme e valor r do aço IF EEP 230 processado em escala laboratorial.

Nas demais temperaturas de encharque, os grãos apresentaram-se recristalizados e o diâmetro médio foi mais sensível a variações na temperatura de encharque do que em relação à velocidade de processamento. Na Figura 5, está mostrada exemplificadamente a microestrutura do aço IF EEP 230, recozido a 780 e a 730°C, processado a 220 m/min e, na Figura 6, os valores do diâmetro médio do grão ferrítico medidos em todas as condições de processamento avaliadas.



(a) Encharque a 780°C



(b) Encharque a 730°C

Figura 5. Microestrutura do aço IF EEP 230 processado em escala laboratorial a 220 m/min.

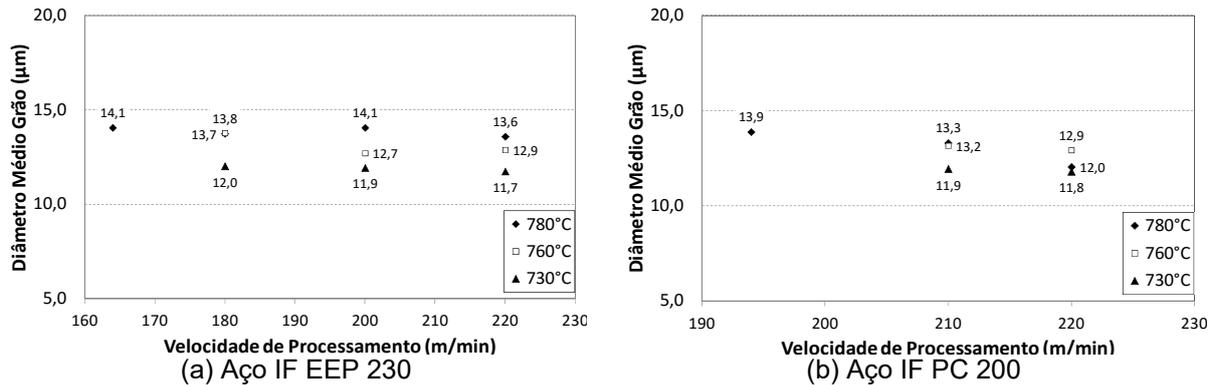


Figura 6. Diâmetro médio do grão ferrítico do aço IF processado em escala laboratorial.

3.2 Propriedades mecânicas do aço IF EEP 230 obtidas em escala laboratorial

Tanto ao aumentar a velocidade de processamento de 164 para 220 m/min quanto ao diminuir a temperatura de encharque de 780 a 730°C, as variações em LE e LR foram muito pequenas, de modo que, em praticamente todas as condições de processamento, o aço atendeu aos requisitos de aplicação, Figuras 7(a) e (b). Conseqüentemente, as variações constatadas nos valores de Alu e Alt também apresentaram, na maioria dos casos, pouca variação, Figuras 7(c) e (d), e os aços ainda preencheram o requisito de alongamento exigido.

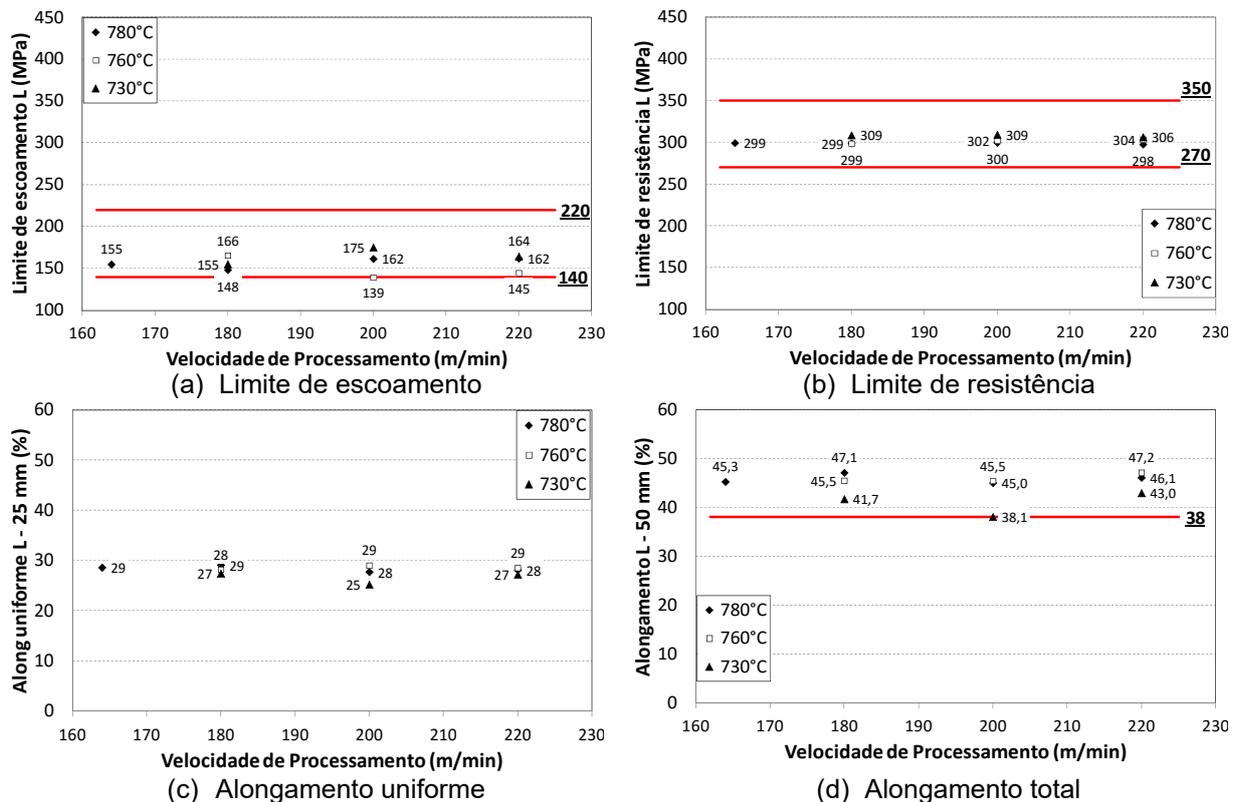


Figura 7. Propriedades mecânicas do aço IF EEP 230.

Assim como para o Alu, não foram verificadas alterações significativas no valor n do aço IF EEP 230, Figura 8(a), indicando que, em todas as condições de processamento avaliadas, o aço apresenta boa capacidade de conformação plástica, apresentando-se acima do valor mínimo requerido para a aplicação, 0,20. O

valor do coeficiente de Lankford, em todas as condições avaliadas, apresentou-se maior que o valor mínimo especificado para o aço, de 1,7, permanecendo entre 2,3 e 3,0, Figura 8(b).

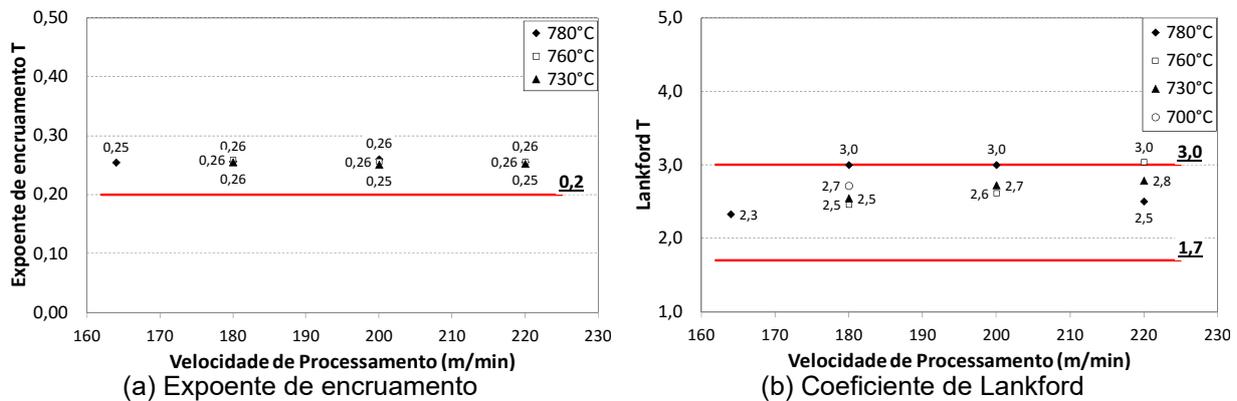


Figura 8. Exponente de encruamento e de coeficiente de Lankford do aço IF EEP 230.

3.3 Propriedades mecânicas do aço IF PC 200 obtidas em escala laboratorial

Assim como no aço IF EEP 230, praticamente não foram observadas alterações em LE, LR, Alu e Alt após aumentar a velocidade de processamento até 220 m/min e diminuir a temperatura de encharque até 730°C, Figura 9. Conseqüentemente, os requisitos de resistência mecânica e alongamento ainda são atendidos.

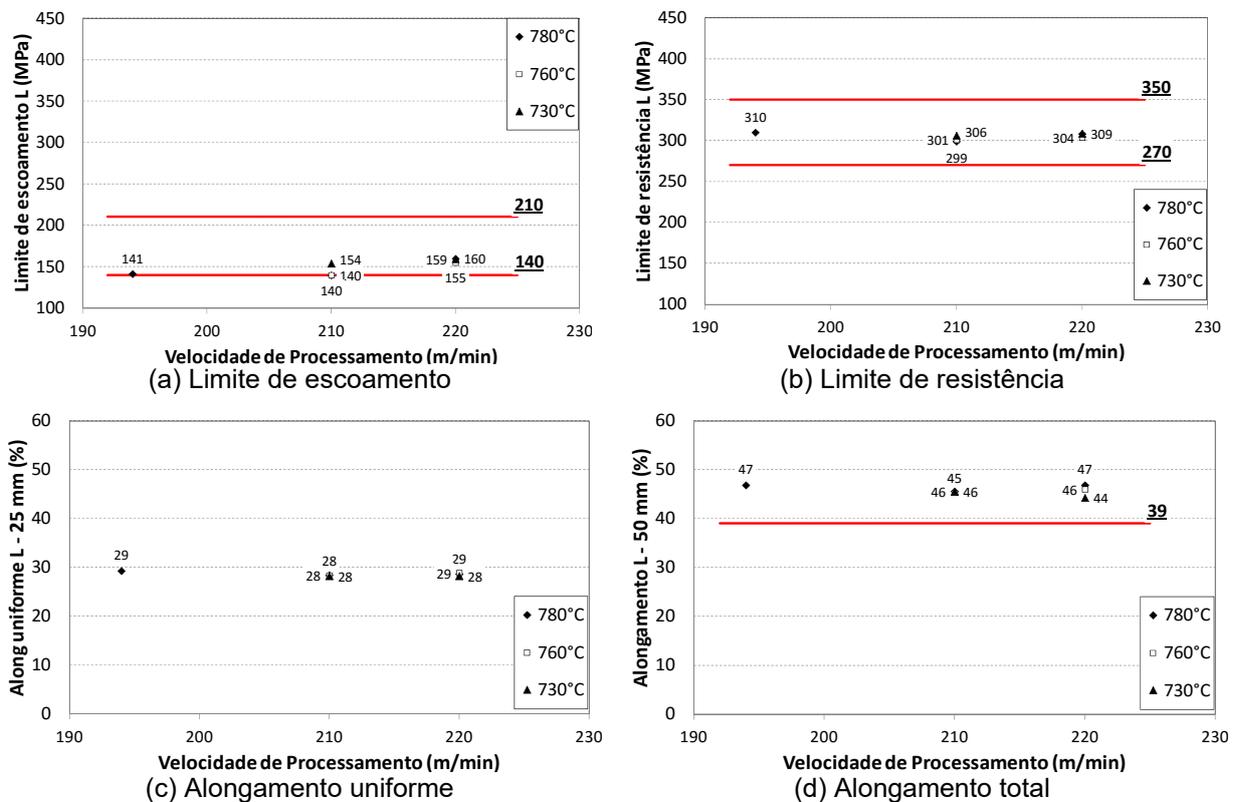


Figura 9. Propriedades mecânicas do aço IF PC 200.

Os valores n e r também não apresentaram variações significativas com a velocidade de processamento nem com a temperatura de encharque, Figura 10. O valor n apresentou-se em torno de 0,26 e o valor r , entre 1,9 e 3,0.

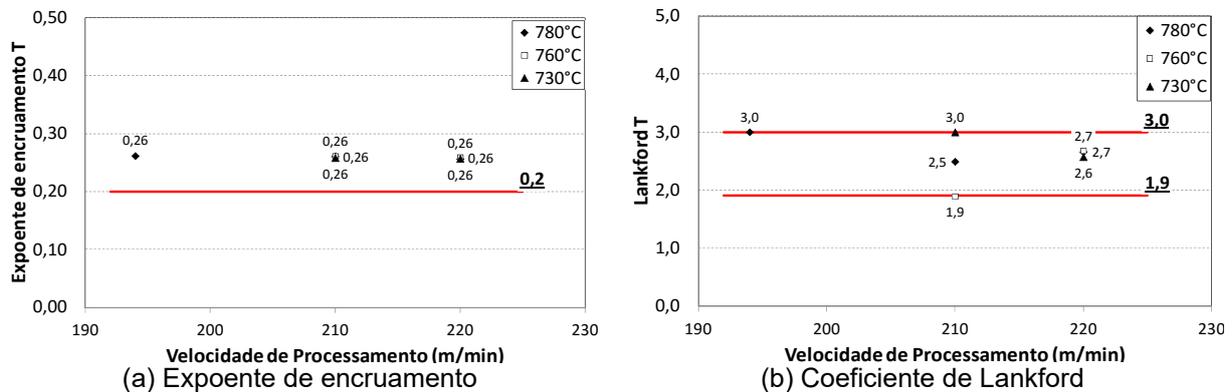


Figura 10. Exponente de encruamento e coeficiente de Lankford do aço IF PC 200.

3.4 Propriedades mecânicas e conformabilidade dos aços processados industrialmente

Após análise dos resultados obtidos em escala laboratorial, definiu-se que o aço IF EEP 230 fosse processado a 180 m/min e o aço IF PC 200, a 210 m/min na Linha de Recozimento Contínuo, ambos diminuindo a temperatura de encharque de 780°C para 750°C. Os resultados dos ensaios de tração das tiras processadas foram também confrontados com a especificação. Para ambos os aços, a microestrutura foi ferrítica e completamente recristalizada, Figura 11, exibindo um diâmetro médio de grão em torno de 12,0 μm , conforme obtido em escala laboratorial.

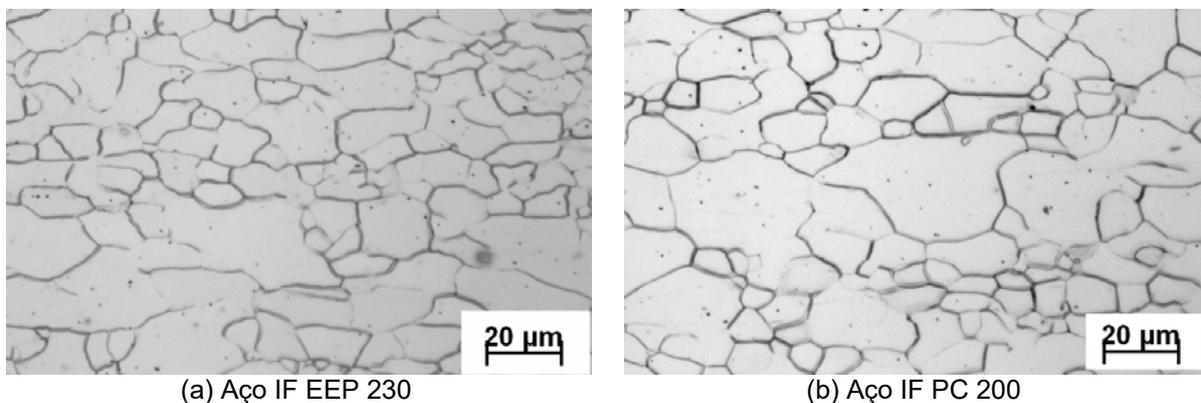
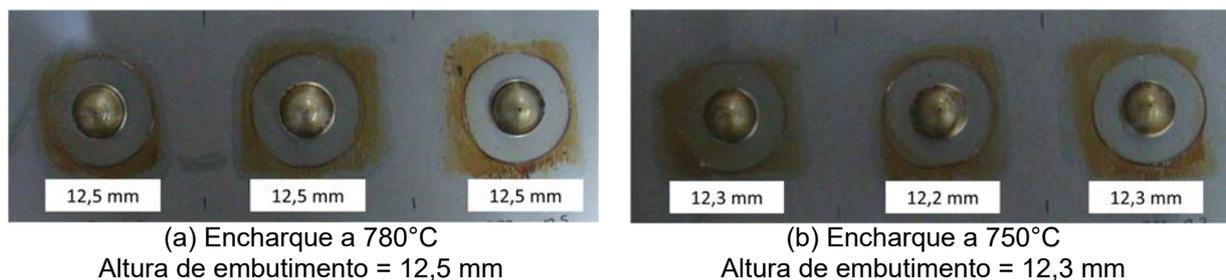


Figura 11. Microestrutura dos aços IF EEP 230 e IF PC 200 processados na Linha de Recozimento Contínuo.

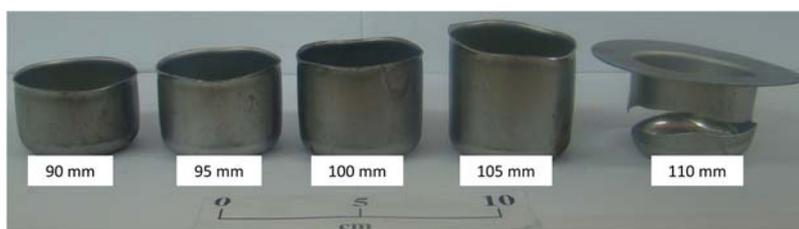
As propriedades mecânicas em tração foram próximas dos valores obtidos em escala laboratorial e atenderam aos requisitos do aço, Tabela 2. Ao avaliar a capacidade de se deformarem por estiramento biaxial, não foram observadas diferenças significativas entre os aços processados nas temperaturas de encharque de 780°C e 750°C, conforme resultados dos ensaios Erichsen mostrados exemplificadamente para o aço IF EEP 230 na Figura 12. As alturas de embutimento, até a ruptura, foram em torno de 12,4 mm para o aço IF EEP 230 e de 11,9 mm para o aço IF PC 200, independente da temperatura de encharque e velocidade de processamento empregada.

Tabela 2. Propriedades mecânicas em tração dos aços processados em escala industrial.

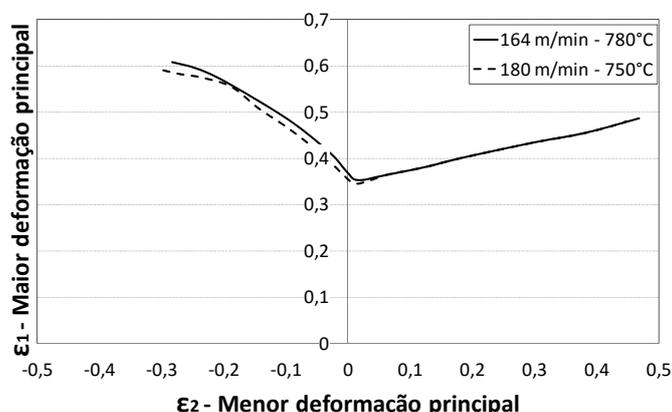
Aço IF	LE (MPa)	LR (MPa)	Alt (%)	n	r
EEP 230	167	310	49	0,23	1,9
PC 200	160	309	50	0,25	2,1

**Figura 12.** Resultados dos ensaios Erichsen realizados nos aços processados em escala industrial para o aço IF EEP 230.

Ao avaliar a RLE, constatou-se que alterações nas condições de recozimento também não provocaram mudanças na capacidade de embutimento do aço. O índice RLE para ambas as aplicações foi de 2,1, em qualquer condição de recozimento avaliada, para diâmetros de embutimento entre 90 e 105 mm, ocorrendo fratura antes do término do ensaio apenas para o diâmetro de 110 mm. Na Figura 13, está mostrado o aspecto dos corpos de prova do aço IF PC 200 recozido a 750°C após os ensaios, representativos também para o aço IF EEP 230 nas demais condições avaliadas.

**Figura 13.** Aspecto dos corpos de prova após ensaio de razão limite de estampagem, para diâmetros de *blank* entre 90 e 110 mm, representativo para os aços IF EEP 230 e IF PC 200.

Ao levantar as CLC dos aços, verificou-se que modificações nas condições de recozimento também não provocaram alterações significativas na capacidade de estampagem dos aços, conforme exemplificado para o aço IF EEP 230 na Figura 14.

**Figura 14.** CLC do aço IF EEP 230 recozido a 164 m/min-780°C e 180 m/min-750°C.

4 CONCLUSÕES

Para os dois aços IF avaliados neste estudo, verificou-se que há possibilidade de aumentar a produtividade via recozimento contínuo, continuando a atender todos os requisitos de propriedades mecânicas e de estampabilidade, nas seguintes condições de processamento:

- Aço IF EEP 230 – Aumento da velocidade de processamento de 164 para 180 m/min e diminuição da temperatura de encharque até 750°C.
- Aço IF PC 200 – Aumento da velocidade de processamento de 194 para 210 m/min e diminuição da temperatura de encharque, também, até 750°C.

Temperaturas de encharque inferiores a 730°C não são recomendadas devido à recristalização incompleta do aço. Consequentemente, as propriedades mecânicas, como alongamento e coeficiente de anisotropia normal, tornam-se insatisfatórias para aplicação.

REFERÊNCIAS

- 1 ALVAREZ MAV, PEREZ T, ACTIS F, SERÉ P, CERVELLINI G. Effect of Processing Conditions on Mechanical Properties of a Ti Interstitial Free Steel. *Materials Technology – Low Carbon Steels. Steel Research int.*, 2004; 75(6): 411-418.
- 2 TAKECHI H. Metallurgical Aspects on Interstitial Free Sheet Steel from Industrial Viewpoints. Department of Electronic Materials, Fukuoka Institute of Technology, ISIJ International, 1994; 34(1):1-8.
- 3 TOKUNAGA Y, KATO H, Application of Interstitial-Free (IF) Steel Sheets to Automobile Parts. *Metallurgy of Vacuum-Degassed Steel Products*, R. Pradhan. The Minerals, Metals & Materials Society, 1990: 91-108.
- 4 HWANG YH, CHEN HC, HORNG WR, CHOU TS. Metallurgy and Application of Interstitial-Free Steel. Steel and Aluminium Research and Development Department. China Steel Corporation. *China Steel Technical Report*, 1994; 8: 30-38.
- 5 NBR 5915 – Bobinas e Chapas Finas a Frio de Aço – Carbono para Estampagem – Especificação. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.
- 6 ASTM E112 – Standard Test Methods for Determination Average Grain Size. American Society for Testing and Materials International, 2010.
- 7 ASTM E8 – Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. American Society for Testing and Materials International, 2009.
- 8 ASTM A370 – Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. American Society for Testing and Materials International, 2009.
- 9 ISO 20482 – Metallic Materials – Sheet and Strip – Erichsen Cupping Test, 2013.
- 10 ISO 12004/2 – Metallic Materials – Sheet and Strip – Determination of Forming-Limit Curves, 2008.