

DESENVOLVIMENTO DE UM AÇO ULTRA BAIXO CARBONO IF PARA FOLHAS METÁLICAS UTILIZANDO O RECOZIMENTO CONTÍNUO¹

Eric Jeronimo de Oliveira Alvarez²

Luciano Pessanha Moreira³

William Ribeiro dos Santos⁴

Paulo Roberto Campissi de Souza⁵

Resumo

A necessidade da ampliação do portfólio de produtos de Folhas Metálicas com propriedades mecânicas de alta estampabilidade, proporcionou o desenvolvimento deste trabalho, motivando assim a busca por novas tecnologias de processamento e/ou novas rotas de produção. Desta forma foi observada a possibilidade de desenvolver um material via recozimento contínuo com propriedades mecânicas obtidas atualmente no processo de recozimento em caixa, vislumbrando uma maior produtividade das linhas de recozimento. Para proporcionar tais características de propriedades mecânicas, há de ser feito um grande esforço nos parâmetros de Aciaria e Laminação, tanto à Quente como à Frio, para facilitar o processamento nas linhas de recozimento contínuo. A escolha da composição química do Aço foi a primeira etapa, desta forma, foi verificado que para o atendimento de alta estampabilidade via recozimento contínuo se faz necessário de que seja aplicado um Aço Ultra Baixo Carbono tipo Livre de Intersticiais, mais conhecido com IF. A altíssima capacidade de deformação plástica nas aplicações da indústria automobilística neste tipo de aço direcionará toda a metodologia deste projeto, tendo como grande desafio a adequação aos fatores limitantes de produção, principalmente o recozimento contínuo.

Palavras-chave: Folhas metálicas; Aço IF; Recozimento contínuo.

DEVELOPMENT OF ULTRA LOW CARBON STEEL SHEETS METAL FOR IF USING CONTINUOUS ANNEALING

Abstract

The need to expand the product portfolio of sheet metal with mechanical properties of high formability, enabled the development of this work, thus motivating the search for new processing technologies and/or new production routes. It was thus observed a possibility of developing a material via continuous annealing equipment with mechanical properties currently in the box annealing process, viewing lines greater productivity annealing. To provide such characteristics of mechanical properties is to be made a great effort on the parameters of Steelmaking and the hot and cold rolling, to facilitate processing of continuous annealing lines. The choice of the chemical composition of the steel was the first step in this way, it was found that for the care of high formability via continuous annealing becomes necessary to apply an Ultra Low Carbon Steel type Interstitial Free, better known as IF. The high capacity of plastic deformation applications in the automotive industry in this type of steel will direct all the methodology of this project, with the challenge to the adequacy of the limiting factors of production, especially the continuous annealing.

Keywords: Metallic sheets; IF Steel; Continuous annealing.

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 *Eng. Metalúrgico, 3M do Brasil, Rod. Anhanguera, Km 110, Cep 13181-900, Sumaré, SP, Brasil. E-mail: ericalvarez12@gmail.com*

³ *Eng. Mecânico, D.Sc., Universidade Federal Fluminense, Av. dos Trabalhadores, 420, Cep 27255-125, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: luciano.moreira@metal.eeimvr.uff.br*

⁴ *Administrador, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua 4, 33, Cep 27265-610, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: williamr@csn.com.br*

⁵ *Eng. Metalúrgico, MSc, Companhia Siderúrgica Nacional, Rua 4, 33, Cep 27265-610, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: pcampissi@csn.com.br.*

1 INTRODUÇÃO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar as propriedades mecânicas de um Aço Ultra Baixo Carbono – IF produzido na aciaria da CSN durante o processamento de recozimento contínuo de chapas. A partir deste desenvolvimento experimental, será possível determinar os parâmetros necessários para que ocorra a recristalização completa deste material após seu processamento nas linhas de recozimento contínuo, assim, aumentando o portfólio de produtos da CSN, além de reduzir os tempos de leanmanufacturing para produtos de alta estampabilidade de Folhas Metálicas, tendo como principal aplicação as embalagens metálicas de 2 peças, ou seja, possuem somente corpo e tampa.

Atualmente os produtos de Folhas Metálicas se classificam primeiramente como Folhas-de-Flandres, Folhas Cromadas e Folhas não-revestidas. A segunda classificação é relacionada a “Têmpera” do material, ou seja, a dureza e/ou limite de escoamento, que está diretamente ligada ao tipo de Recozimento a ser aplicado no material, assim, esta segunda classificação será explorada durante todo o projeto.

Para proporcionar tais características de propriedades mecânicas, há de ser feito um grande esforço nos parâmetros de Aciaria e Laminação, tanto à Quente como à Frio, para facilitar o processamento nas linhas de recozimento contínuo.

A escolha da composição química do Aço foi a primeira etapa, desta forma, foi verificado que para o atendimento de alta estampabilidade via recozimento contínuo se faz necessário de que seja aplicado um Aço Ultra Baixo Carbono tipo Livre de Intersticiais, mais conhecido com IF. A escolha se fez entre dois Aços IF, sendo estabilizados ao Ti ou Nb, que será melhor descrita ao decorrer do trabalho.

A altíssima capacidade de deformação plástica nas aplicações da indústria automobilística neste tipo de aço direcionará toda a metodologia deste projeto, tendo como grande desafio a adequação aos fatores limitantes de produção, principalmente o recozimento contínuo.

A pesquisa e o desenvolvimento dos aços IF, livre de intersticiais, teve início na década de 1970⁽¹⁾ com o objetivo principal de fornecer aos aços características de maior conformabilidade para a aplicação em chapas. O primeiro aço IF com características comerciais foi produzido por volta de 1970, como um aço com extra-baixo teor de carbono estabilizado ao titânio.⁽²⁾ Com o surgimento de modernos equipamentos de desgaseificação a vácuo foi possível a produção de aços com teores de carbono e nitrogênio menores que 0,003%, resultando na redução da quantidade da adição de nióbio e/ou titânio.⁽³⁾

A alta conformabilidade dos aços IF está associada à textura ($\{111\}_{uvw}$) e, também, à baixa resistência mecânica apresentada por esses tipos de aços. Isso implica em menores valores para limites de escoamento e resistência (LE e LR) e, conseqüentemente, elevados valores de alongamento total e coeficientes de anisotropia normal e de encruamento (AL, r e n , respectivamente). Se os intersticiais carbono e nitrogênio estão estabilizados na forma de precipitados, o material não apresenta envelhecimento por deformação (*strain aging*),⁽⁴⁾ Isso é devido à adição de elementos estabilizadores, como titânio e/ou nióbio.

Um aspecto metalúrgico que afeta de forma vital o valor do coeficiente de anisotropia r , portanto, a estampabilidade da chapa, é a orientação dos planos cristalográficos do material, ou seja, sua textura cristalográfica. A predominância dos planos cristalinos $\{111\}$ após o recozimento da bobina laminada a frio eleva o valor de r . Um dos requisitos mais decisivos nesse sentido é a manutenção de teores ultrabaixos de elementos intersticiais como C e N. A presença desses elementos

promove a formação de planos {110} e {100}, que são desfavoráveis para o aumento do valor de r .⁽⁴⁾

Os teores mínimos de elementos de microliga que se fazem necessários para eliminar completamente C e N solúveis na microestrutura dependem da concepção da liga e podem ser calculados a partir das relações abaixo:

- Aços IF ao Ti: $\%Ti_{\min} = 4\%C + 3,42 \%N + 1,5\%S$
- Aços IF ao Nb: $\%Nb_{\min} = 7,75\%C - 6,65(\%N - Al_{\text{acid sol}}/1,93)$
- Aços IF ao Ti-Nb: $\%Nb_{\min} = 7,75 \% C$; $\%Ti_{\min} = 3,42 \% N + 1,5 \% S$

Também é possível aumentar a resistência mecânica dos aços IF pela adição de quantidades de Nb e Ti superiores aos teores mínimos necessários para combinar com C e N solúveis do aço.⁽⁵⁾ Dessa forma a liga é reforçada pelos elementos de microliga de forma análoga à que ocorre com por meio de refino de grão, precipitação e solução sólida.⁽⁶⁾

No processo de laminação, o controle da temperatura final de acabamento, afeta diretamente na propriedade mecânica do material e microestrutura. Retardadores de resfriamento aumentam o espaço interlamelar da perlita e aumenta a quantidade relativa de ferrita, podem também minimizar a supersaturação de C e N que resulta devido ao rápido resfriamento, ou seja, acima do equilíbrio.⁽⁴⁾

Estudos mostram a relação que a adição destes elementos influenciam diretamente na temperatura de recristalização do material, como visto na Figura 1.

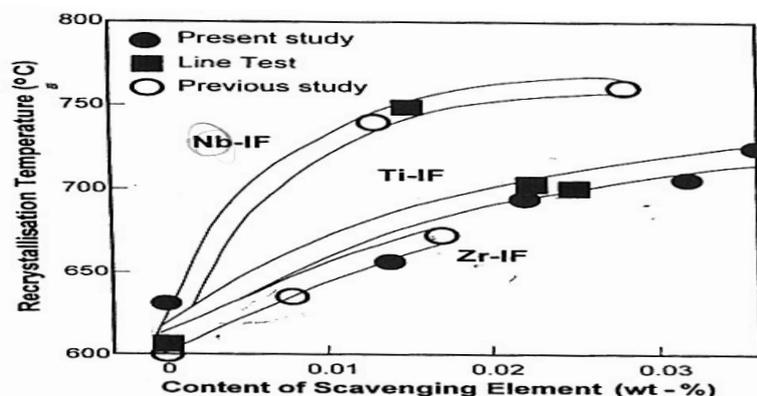


Figura 1 - Efeito dos elementos de limpeza em relação a Temperatura de Recristalização de um Aço IF.⁽⁷⁾

Observando a Figura 1 podemos verificar que os teores de Nb adicionados ao Aço promovem uma maior temperatura de recristalização em comparação ao material estabilizado ao Ti. Levando em consideração a realidade aplicada nos fornos de recozimento via contínuo da CSN, foi selecionado o Aço IF estabilizado ao Ti.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

O desenvolvimento deste trabalho tem como início a escolha da composição química do aço para que seja atendida à duas necessidades básicas para que o projeto seja viabilizado, propriedades mecânicas de Alta Estampabilidade e que seja Recozido via Contínuo. Foram disponibilizadas três opções iniciais de Aço, estabilizadas ao Ti, Ti-Nb ou Nb-Ti, no entanto, a escolha se deu pelo Aço estabilizado ao Ti, que permite segundo a literatura uma temperatura de Recozimento mais baixa em comparação às outras duas composições químicas disponíveis. Na Tabela 1 segue a seguinte tabela de composição química abaixo, sendo estes elementos determinados via Combustão e Espectrometria de Emissão Ótica.

Tabela 1. Composição Química (% peso)

Amostra	C	Mn	P	S	Al	N	Ti
IF -Ti	0,0034	0,08	0,010	0,010	0,04	0,0040	0,06

Os corpos de prova gerados após a Laminação à Frio Piloto foram recozidos nos fornos de recozimento do Centro de Pesquisas da CSN, utilizando parâmetros que simulem o processamento em escala industrial, assim, foi possível fazer um levantamento da curva de recristalização do material. Desta forma, tendo como resultado as faixas de trabalho possíveis para serem aplicadas nos fornos de recozimento contínuo. Os parâmetros relacionados a Laminação à Quente, como: Temperatura de Acabamento (TA) e Temperatura de Bobinamento (TB) foram aplicados conforme padrão utilizado atualmente para as Folhas Metálicas de Alta Estampabilidade.

2.2 Procedimento Experimental

A proposta para o procedimento experimental será dividida conforme a sequência de trabalho a seguir, onde serão realizados testes em escala piloto de laminação à frio em um trecho de uma Bobina à Quente – BQ que possuía uma espessura inicial de 3,5 mm, aplicando reduções de 80% até 90%, afim de se obter uma caracterização microestrutural e de propriedades mecânicas, além do parâmetro principal em análise que é a Temperatura de Recristalização.

2.3 Laminação à Frio Piloto

Foi aplicado reduções à frio em uma BQ de 3,5mm com Tamanho de Grão Médio de 8,5 ASTM em um laminador piloto no Centro de Pesquisas da CSN de 80% à 90% com variação de 1% em 1% e uma redução até 0,17mm. Vale ressaltar que foram feitos vários passes até a obtenção da redução desejada.

2.4 Tratamento Térmico

Foram preparadas amostras de 5cm x 8cm de cada redução realizada, sendo o lado com 8cm indicando o sentido de laminação, e ensaiadas nos fornos de tratamento térmico do Centro de Pesquisas da CSN. As temperaturas trabalhadas foram de

540°C até 760°C, variando em 20°C em 20°C, com tempo de encharque de 60s, totalizando 144 amostras. A Figura 5 nos mostra a curva de recristalização do material.

2.5 Ensaio de Dureza

Os corpos de prova para ensaio de dureza foram os mesmos utilizados para o tratamento térmico. O ensaio de dureza foi realizado em uma máquina Wilson Instron Series 2000 de base de diamante, utilizando a escala HR30T (Rockwell Superficial) de acordo com a norma interna PR 170457 da CSN, em seu Centro de Pesquisa.

2.6 Curva de Recristalização

Após obtenção dos resultados de dureza, foi elaborada a Curva de Recristalização do material, afim de analisar a faixa de temperatura em que se ocorrerá o fenômeno microestrutural de recristalização.

2.7 Ensaio de Tração Uniaxial

Foram elaborados ensaios mecânicos de Tração Uniaxial afim de caracterizar as propriedades de LE, LR e AL(%) do material, para as reduções que se apresentavam recristalizados de acordo com os dados da Curva de Recristalização. As dimensões do corpo de prova de tração uniaxial foram tomadas segundo a norma NBR – 6673. Os corpos de prova referentes às reduções de 88% e 89%, não foram possíveis de serem ensaiados, pois não houve amostras suficientes para elaboração do ensaio. As amostras selecionadas são as que apresentaram o início da inclinação abrupta na Curva de Recristalização, assim, para cada redução foi verificado em qual temperatura se iniciava tal efeito.

2.8 Caracterização Microestrutural

A preparação e realização da caracterização microestrutural das amostras serão realizadas nos laboratórios de metalografia da CSN seguindo os métodos estabelecidos nas normas ASTM E-45 para determinação das inclusões e ASTM E112 para determinação do tamanho de grão. A caracterização microestrutural foi realizada após tratamento térmico nos fornos recozimento.

3 RESULTADOS

3.1 Dureza

A Figura 2 demonstra a dureza do material para cada temperatura ensaiada (560°C-760°C), em que podemos observar um comportamento linear e similar entre as quantidades de deformação de 560°C até 700°C (faixa superior do gráfico) e de 720° até 760°C (faixa inferior do material). A queda da dureza é explicada mais a frente pelo fenômeno de recristalização do material.

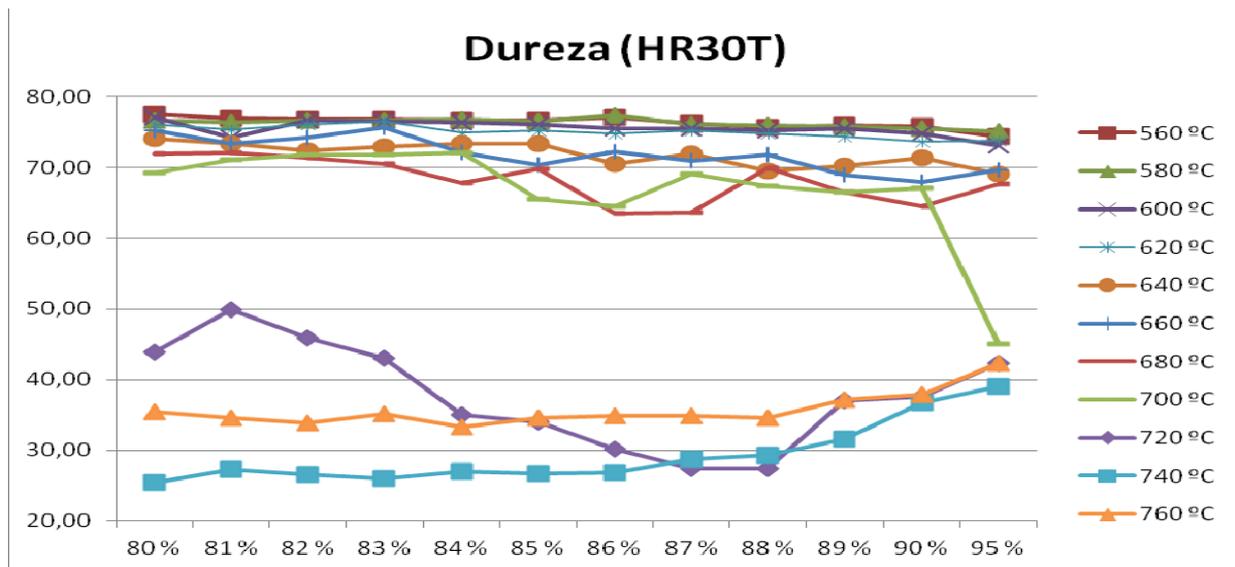


Figura 2. Ensaio de Dureza Rockwell HR30T.

3.2 Curva de Recristalização

Na Figura 3 observamos a Curva de Recristalização do material após tratamento térmico nos fornos de simulação.

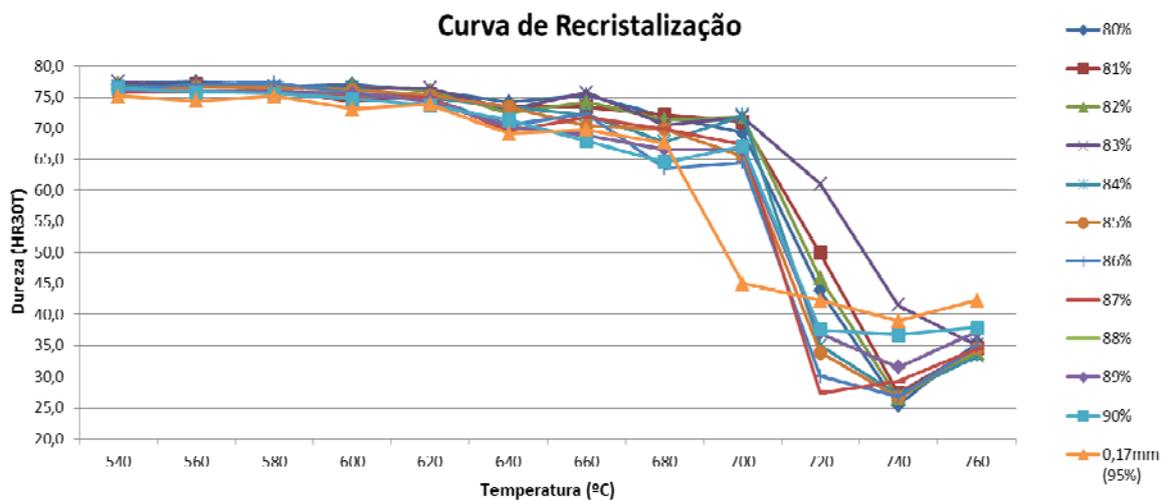


Figura 3. Curva de recristalização.

Analisando o gráfico, podemos observar que há o início de uma inclinação brusca das curvas por volta da temperatura de 700°C, caracterizando o início da recristalização do material, em que a estabilização da curva se dá entre as temperaturas de 720°C - 740°C. Nota-se que após 740°C existe uma pequena elevação da temperatura de recristalização e conseqüentemente da dureza do material, provavelmente devido a cinética química relacionada a formação ou dissolução dos compostos de Ti, como TiC e TiN promovendo retorno do C e N para os interstícios da estrutura cristalina, desta forma ocorre um leve aumento da dureza do material.

3.3 Propriedades Mecânicas

Desta forma para o corpo de prova de 0,17mm(95%) foram coletadas amostras à 700°C, 720°C e para os demais, somente 720°C e 740°C. Na Tabela 2 são apresentados os valores de LE, LR, AL(%) dos corpos de prova.

Tabela 2. Propriedades mecânicas

AÇO IF-Ti	LE (MPa)	LR (MPa)	AL (%)
0,17 (95%) - 700°C	128,6	311,9	26,2
85% - 720°C	121,6	309,2	33,0
86% - 720°C	116,4	315,1	39,2
87% - 720°C	118,0	307,9	42,8
90% - 720°C	118,4	319,9	40,0
0,17 (95%) - 720°C	122,7	307,3	27,0
85% - 740°C	114,8	310,5	46,4
86% - 740°C	105,3	308,9	45,2
87% - 740°C	112,4	310,4	46,0
90% - 740°C	110,2	310,8	46,4

Nota-se que para temperatura de 740°C as reduções entre 85% - 90% apresentam valores similares de LE, LR e AL. Para o caso do 0,17mm(95%) os valores de LE e LR tem um comportamento parecido com as demais reduções, porém o AL tem um valor bem mais baixo. Portanto, esta faixa de redução analisada apresenta indícios de similaridade nas propriedades mecânicas.

3.4 Análise Microestrutural

Na Tabela 3 estão as características observadas nos exames metalográficos de ambas as amostras, que foram analisadas pelos métodos estabelecidos nas normas ASTM E-45 para determinação das inclusões e ASTM E112 para determinação do tamanho de grão.

Tabela 3. Análise metalográfica

Amostra	Sulfetos	Aluminatos	Silicatos	Óxidos		Tamanho de Grão (ASTM E112)
				Fino	Grosso	
IF-Ti	-	-	-	1	-	10,5

Abaixo seguem metalografias das Temperaturas de 680°C, 700°C, 720°C e 740°C.
Para 680°C:

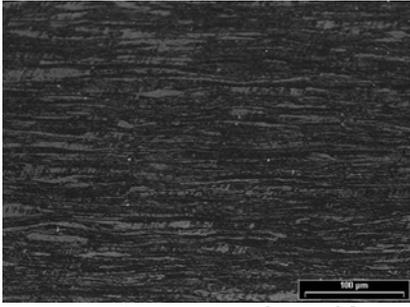


Figura 4. Redução de 80% à 680°C, ampliação de 200x.

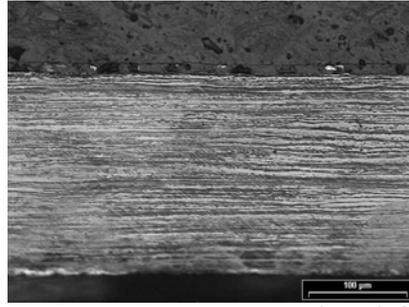


Figura 5. Redução de 0,17mm(95%) à 680°C, ampliação de 200x.

Para a temperatura de 680°C, o material se encontra encruado para todas as reduções, apresentando apenas alguns núcleos de recristalização, conforme Figura 4 e 5.

Para 700°C:

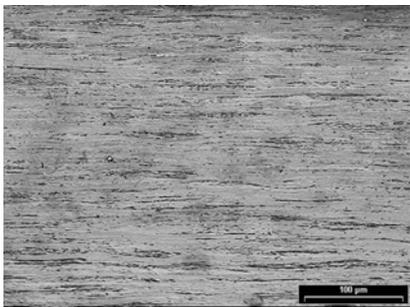


Figura 6. Redução de 90% à 700°C, ampliação de 200x.

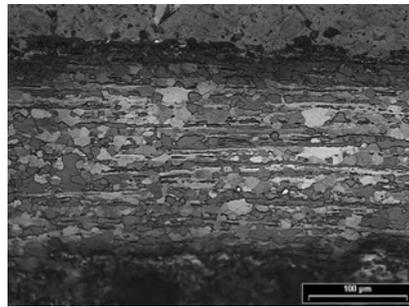


Figura 7. Redução de 0,17mm(95%) à 700°C, ampliação de 200x.

Pela análise das Figuras 6 e 7, podemos verificar que até a ampliação de 90% não há recristalização do material, porém a Figura 7 mostra uma recristalização parcial do material, havendo bandas de deformação e grãos recristalizados.

Para 720°C:

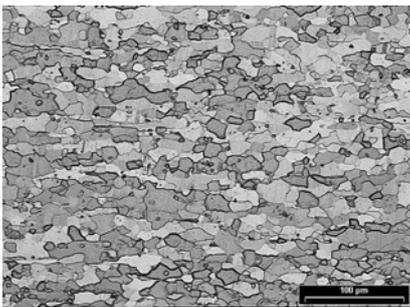


Figura 8. Redução de 80% à 720°C, ampliação de 200x.

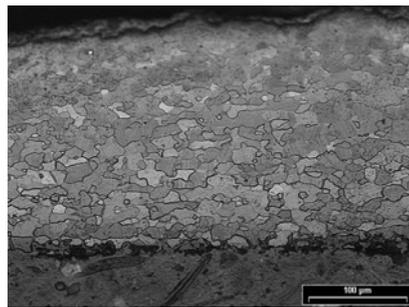


Figura 9. Redução de 0,17mm(95%) à 720°C, ampliação de 200x.

Pelas Figuras 8 e 9, podemos verificar a recristalização total do material. Tal característica também é apresentada nas reduções que estão neste intervalo de 80% até 90%, conforme previsto pela Curva de Recristalização do material.

Para 740°C:

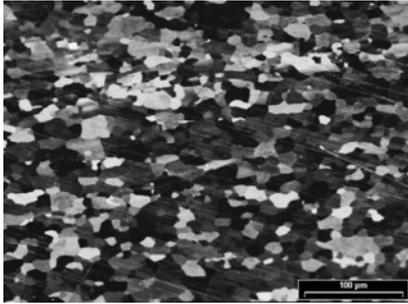


Figura 10. Redução de 80% à 740°C, ampliação de 200x.

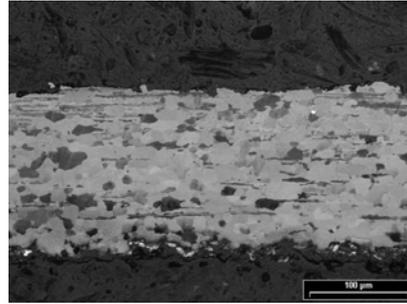


Figura 11. Redução de 0,17mm(95%) à 740°C, ampliação de 200x.

Pelas Figuras 10 e 11, podemos verificar a recristalização total do material, no entanto, a característica do grão possui um diferencial ao ser comparado com a temperatura de 720°C, possuindo neste momento grãos maiores e mais equiaxiais.

4 CONCLUSÃO

Os resultados analisados nos permitirão obter faixas de temperaturas seguras para a recristalização do material durante o processamento em escala industrial. Os parâmetros empregados para o processo de laminação à quente do material utilizado em escala piloto nos auxiliaram na obtenção dos valores de tamanho de grão médio na faixa de 10,5 ASTM, não havendo uma grande variação de seu tamanho médio para as reduções aplicadas neste trabalho. As temperaturas de Acabamento e Bobinamento tenderão a ser ajustadas de acordo os padrões utilizados para produtos de alta estampabilidade de Folhas Metálicas, tendo como base nos valores médios de TA (930 °C) e TB (720°C) aplicados no material em escala piloto.

As propriedades mecânicas obtidas de forma geral apresentam valores de LE, LR e AL bem similares. As temperaturas entre 720°C e 760°C para encharque são atendidas pelo recozimento contínuo de Folhas Metálicas da CSN, com isso os valores obtidos durante o tratamento térmico nos fornos do Centro de Pesquisas, demonstram que o material escolhido nos permite viabilizar o projeto.

REFERÊNCIAS

- 1 ELIAS, J.A., HOOK, R.E., Vacuum-Degassed Low Carbon Steel and its Production Method, U.S. Patent nº 3, 765, 874, patenteada pela Armco Steel Corporation, 1973.
- 2 FUKUDA, N., SHIMIZU, M., Effect of Titanium Addition on the Improvement of r-value in Cold-Rolled Sheet Steels, J Japan Society Tecnology Plasticity, v.13, p. 841-850 1972
- 3 HOOK, R. E., HECKLER, A.J., ELIAS, J.A., Texture in Deep-Drawing Columbium (Nb)-Treated Interstitial- Free Steels, Metallurgical Transaction A, 6A, 1975, p. 1683-1692.
- 4 DIAS, F. M. S. et al. Contribuição ao desenvolvimento do aço IF galvanizado, da classe EDDQ, com teor de carbono super ultra baixo e estabilizado ao titânio. In: CONGRESSO ABM INTERNACIONAL, 65., 2010, Rio de Janeiro. Proceedings... São Paulo: ABM, 2010. p. 3731-41.]
- 5 Gorni, A. A. Novos aços ferríticos garantem alta resistência e conformabilidade a chapas finas laminadas a frio. Corte e Conformação de Metais, set. 2010, p. 38-39.
- 6 YAMADA, N.; KITAHAMA, M. & NIKAIDO, H. Ultra-thin hot rolled strip. Kawasaki Steel Technical Report, no 42, p. 1-7, May 2000
- 7 KWAK, J.H. at al., Development of continuously annealed soft temper blackplate for drawn and ironed can an deep drawn vessels, Ironmaking ans Steelmaking, 1997, Vol. 24, N°5.