

EFEITO DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A QUENTE SOBRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS FINAS DE AÇO I.F. LAMINADAS A FRIO ¹

Antonio Augusto Gorni ²
José Herbert Dolabela da Silveira ³
Célio de Almeida Filho ⁴

RESUMO

As condições sob as quais é feita a laminação a quente dos aços livres de intersticiais (*IF, interstitial free*) podem afetar as características desses materiais laminados a frio, especialmente do ponto de vista de sua estampabilidade, que é de importância capital neste tipo de produto. Uma correlação entre os parâmetros de laminação a quente aplicados nesse material e suas características mecânicas, efetuada para o produto feito na COSIPA, apresentou resultados interessantes. O ideal é que a microestrutura após a laminação a quente do material seja a mais refinada possível, o que recomenda a maximização do grau de redução, o uso de temperaturas de acabamento imediatamente acima do ponto Ar_3 do material e um aplicação imediata de alta velocidade de resfriamento. Além disso, teores de carbono, fósforo, enxofre e nitrogênio devem ser minimizados, bem como deve ocorrer estabilização do carbono e nitrogênio com titânio e maximização do grau de redução aplicada no laminador de tiras a frio.

Palavras-Chave: Aços IF, Laminação de Tiras a Quente, Propriedades Mecânicas

¹ Trabalho a ser apresentado ao 39º Seminário de Laminação - Processos e Produtos Laminados e Revestidos, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 23 a 25 de Outubro de 2002, Ouro Preto MG.

² Engenheiro de Materiais, M. Eng., D. Eng., Analista de Processos da Gerência de Suporte Técnico da Laminação a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. Endereço eletrônico: gorni@cosipa.com.br.

³ Engenheiro Metalurgista, M. Eng., Gerente da Laminação de Tiras a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ Técnico Metalurgista, Analista de Processos da Gerência de Tiras a Quente, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

- Introdução

Os chamados aços IF (*interstitial free*, ou livres de intersticiais) têm sido adotados com sucesso nos últimos anos na fabricação de painéis para carrocerias de automóveis. Eles apresentam níveis muito altos de estampabilidade em função de seus baixos teores de átomos intersticiais, como C e N, que são menores que 0,003 e 0,004%, respectivamente. Essa condição lhes proporciona baixo limite de escoamento e alta resistência à redução de espessura durante a deformação a frio. Os aços IF também não sofrem envelhecimento, uma vez que o carbono está totalmente combinado na forma de precipitados. As principais aplicações automotivas que tomam partido da alta estampabilidade das chapas de aço IF são cavidades no piso traseiro, alojamento do pneu sobressalente e a parte interior das portas frontal e traseira [1,2].

Um aspecto metalúrgico que afeta de forma vital o valor do coeficiente de anisotropia \bar{r} - e, 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 \bar{r} . Ela é diretamente proporcional à taxa de intensidade entre as texturas (111)/(001). Logo, todo o processo metalúrgico dos aços IF deve priorizar as condições que levem a essa condição.

Decorre desse fato a principal característica desse tipo de aço, ou seja, os baixos teores de elementos intersticiais como C e N. Sua presença promove a formação de planos {110} e {100}, que são desfavoráveis para o aumento do valor de \bar{r} . O ideal é que os teores de C e N sejam menores que 0,003 e 0,004%, respectivamente, como já foi afirmado no início deste trabalho [1].

O processo de laminação a quente não promove um desenvolvimento nítido de texturas cristalográficas no material, havendo na verdade uma “diluição” das mesmas durante a transformação austenita \rightarrow ferrita. Ainda assim o processo de laminação a quente pode influenciar no desenvolvimento da textura cristalográfica na chapa fina de aço IF. Sabe-se que quanto menor for o tamanho de grão da tira a quente, maior será o valor de \bar{r} na chapa de aço IF laminada a frio e recozida [1,3]. O tamanho de grão ideal para se conseguir uma textura cristalográfica final adequada para alta estampabilidade deve estar abaixo de 15 μm (ASTM 9 a 9,5) e, de preferência, em torno de 10 μm (ASTM 10 a 10,5).

Contudo, o tamanho de grão da tira a quente não é o único fator que afeta a estampabilidade do produto a frio. O material também deve apresentar crescimento de grão durante o recozimento após a laminação a frio, mas de forma seletiva, favorecendo determinadas orientações cristalográficas. A formação de pequenos precipitados reduz esse crescimento devido ao bloqueio da migração dos contornos, limitando o valor de r que poderia ser conseguido na chapa laminada a frio. Logo, é recomendado que os precipitados não sejam finos demais, de forma a manter a mobilidade dos contornos de grão durante o recozimento da bobina a frio e favorecendo a formação de uma intensa textura cristalográfica {111} no produto final [1,4].

O baixíssimo teor de C dos aços IF eleva sua temperatura Ar_3 em relação ao observado nos aços convencionais. De acordo com os resultados operacionais observados na COSIPA, a temperatura Ar_3 de seus aços IF deve estar por volta de 880 a 900°C. É necessário evitar que o material seja laminado no campo intercrítico, entre as temperaturas Ar_3 e Ar_1 , pois a transformação da austenita juntamente com a deformação a quente instabiliza o processo de laminação, provavelmente pelo fato de ela ocorrer de forma heterogênea, iniciando-se nas bordas do material, que estão mais frias [5]. O problema fica particularmente sério nas últimas cadeiras do trem acabador, onde a

tira está mais fina; os problemas de planicidade, posicionamento e tensionamento do material tornam-se mais sérios. Logo, a temperatura de acabamento tem de estar imediatamente acima de Ar_3 , garantindo-se que a tira seja deformada no estado plenamente austenítico.

A determinação dos efeitos específicos para cada parâmetro do processo é complicada, pois eles dependem da interação entre eles, da composição química do aço IF e dos processos de laminação a frio e recozimento. De toda forma, seus principais efeitos estão resumidos a seguir.

Temperatura de Reaquecimento: a análise de vários trabalhos da literatura indica que o abaixamento da temperatura de reaquecimento melhora ligeiramente os valores de \bar{r} e, ainda assim, só abaixo de 1150°C. Um abaixamento da temperatura de reaquecimento desde 1250 para 1100°C aumenta o valor de \bar{r} de 0,3 [1].

Temperatura de Acabamento: No caso do material laminado integralmente no campo austenítico consegue-se tamanho de grão mínimo quando a temperatura de acabamento fica imediatamente acima de Ar_3 [1,6,7].

Velocidade de Resfriamento: Maiores taxas de resfriamento após a laminação contribuem para refinar o tamanho de grão da tira a quente. Logo, em tese, ocorrerá aumento da estampabilidade do produto final laminado a frio. Contudo, foi constatado na prática que esse efeito não é muito grande: um aumento na taxa de resfriamento de 40 para 120°C/s refinou o tamanho de grão do aço IF de apenas 0,5 unidades ASTM. Isto decorre da rapidez da transformação de austenita para ferrita típica para esse tipo de aço, em função de sua alta temperatura Ar_3 . Obtém-se melhores resultados em termos de estampabilidade da chapa fina se for adotada a estratégia de resfriamento adiada, ou seja, aplicação de resfriamento forçado tão logo o material deixe o trem acabador [1,7]. A adoção dessa estratégia elevou em 0,2 o valor de \bar{r} do material [1]. Além disso, o efeito da temperatura de acabamento sobre as propriedades do aço IF diminui, bem como aumenta a homogeneidade microestrutural do aço.

Temperatura de Bobinamento: Nos aços IF microligados exclusivamente ao Ti, como é o caso da COSIPA, a temperatura de bobinamento ideal para maximizar o valor de \bar{r} obtido na chapa fina a frio dependerá do teor em solução (ou seja, em excesso) desse elemento após ter-se combinado com o C, N e S da liga. Nos casos onde o teor de titânio solúvel for relativamente alto, da ordem de 0,055%, conseguem-se valores máximos de \bar{r} , da ordem de 2,05, usando-se temperaturas de bobinamento menores que 650°C [1].

O objetivo deste trabalho foi confirmar a intensidade desses possíveis efeitos do processo de laminação de tiras a quente sobre as propriedades mecânicas das chapas de aço IF laminadas a frio e recozidas produzidas pela COSIPA.

- Procedimento Experimental

Foram analisados dados de processo e propriedades mecânicas de 53 bobinas a quente de aço IF ao Ti processadas industrialmente na COSIPA entre outubro de 2000 e abril de 2001. Os parâmetros analisados foram a análise química da corrida (C, Mn, Si, P, S, Al, Ti e N), grau de deformação total aplicado durante a laminação a quente, temperatura de acabamento, velocidade de resfriamento forçado, temperatura de bobinamento, grau de deformação total aplicada durante a laminação a frio e propriedades mecânicas (limite de escoamento e resistência, alongamento total, coeficiente médio de anisotropia \bar{r} e coeficiente de encruamento n). A estratégia de resfriamento adotada após a laminação foi adiada para todas as bobinas a quente. Todas as bo-

tada após a laminação foi adiantada para todas as bobinas a quente. Todas as bobinas a frio foram recozidas conforme o mesmo ciclo de tempo e temperatura.

Foram incluídos na análise alguns parâmetros metalúrgicos de interesse para o processo de laminação a quente dos aços IF. Um deles foi o teor de titânio solúvel Ti^* presente no material, ou seja, o teor desse elemento em excesso, além do necessário para a estabilização do aço IF, calculado estequiometricamente. Ele é dado pela fórmula

$$Ti^* = Ti_{total} - (4 C + 3,42 N + 1,5 S)$$

Também foi incluída na análise o valor da temperatura de não-recristalização T_{nr} , ou seja, a temperatura abaixo da qual a recristalização da austenita entre passes passa a sofrer retardamento em função da precipitação de elementos de micro-liga. Ela foi calculada pela fórmula de Boratto e outros [8]:

$$T_{nr} = 887 + 464 C + (6445 Nb - 644 \sqrt{Nb}) + (732 V - 230 \sqrt{V}) + 890 Ti + 363 Al - 357 Si$$

A temperatura de início de transformação da austenita, Ar_3 , foi incluída na análise. Ela foi calculada de acordo com a fórmula de Ouchi e outros [9]:

$$Ar_3 = 910 - 310 C - 80 Mn - 20 Cu - 15 Cr - 80 Mo + 0,35 (h_f - 8)$$

onde h_f é a espessura da tira a quente em milímetros.

- Resultados Experimentais e Discussão

Foi constatado que alguns dos parâmetros do processo da laminação a quente influenciaram os valores de coeficiente de anisotropia \bar{r} obtidos. As demais propriedades mecânicas das chapas finas a frio de aço IF não foram afetadas. As correlações significativas observadas entre \bar{r} e parâmetros de laminação a quente estão descritas a seguir.

O coeficiente de anisotropia \bar{r} aumentou a medida que se elevou o grau de deformação total a quente ($\Sigma \epsilon_Q$), ou seja, placa \rightarrow tira a quente. Muito provavelmente essa correlação, que pode ser observada graficamente na figura 1, foi provocada pelo maior refino de grão na tira a quente decorrente de um intensificado grau de redução a quente. Contudo, este não é um parâmetro que possa ser modificado facilmente, um vez que a espessura das placas é fixa em 210 mm. Logo, o grau de deformação total a quente normalmente pouco varia e será função da espessura final da tira a quente.

O valor do coeficiente parcial de correlação r obtido neste caso foi de 0,42. É um valor que pode ser considerado significativo ao se lembrar os inúmeros fatores de processo que afetam o produto ao longo de sua laminação a quente, a frio e recozimento em caixa, bem como da origem industrial dos dados. O mesmo se aplica às demais correlações estatísticas listadas neste trabalho.

Conforme mostra a figura 2, quanto mais elevado o valor da temperatura de não-recristalização (T_{nr}), maior foi o coeficiente de anisotropia \bar{r} , resultado que já era esperado a partir da literatura [1]: quanto maior for o grau de deformação a quente aplicado abaixo da temperatura de não-recristalização do material maior será a geração de bandas de deformação. Estas, por sua vez, favorecem o surgimento de texturas cristais

lográficas durante o recozimento da bobina a frio de aço IF que melhoram a estampabilidade do material, além de maior refino de grão da microestrutura final. O coeficiente de correlação entre T_{nr} e \bar{r} foi significativa: 0,36. É interessante notar que as temperaturas de acabamento no trem acabador de todas as bobinas a quente estavam abaixo de T_{nr} . Os valores de T_{nr} aqui calculados apresentaram boa concordância com os determinados na literatura usando-se ensaio de torção a quente [10,11].

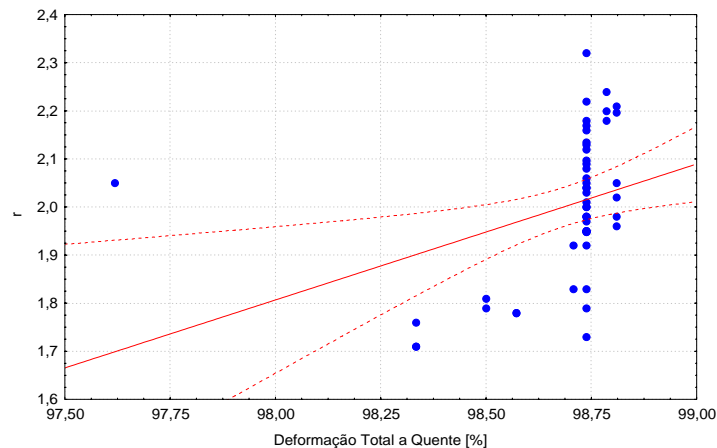


Figura 1: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e o grau de deformação total a quente $\Sigma\epsilon_Q$.

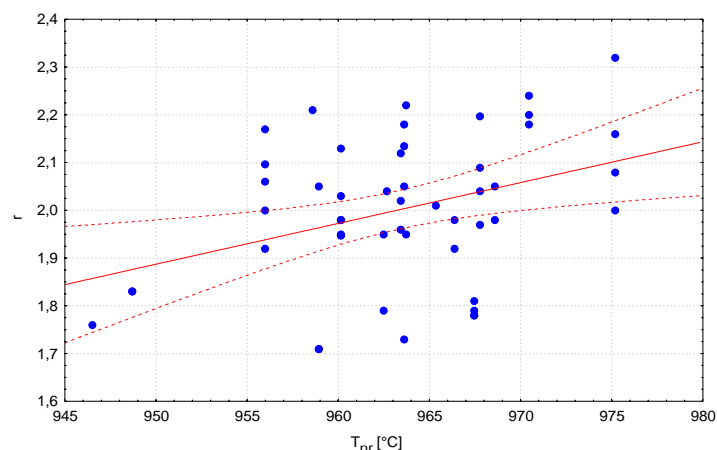


Figura 2: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e a temperatura de não-recristalização T_{nr} .

Foi constatado que a elevação da taxa de resfriamento na mesa de saída do trem acabador (V_{resf}) melhorou a estampabilidade das chapas de aço IF laminadas a frio, conforme mostra a figura 3. Esse fato é metalurgicamente coerente, uma vez que espera-se que a tira a quente apresente tamanho de grão mais refinado após ter sido exposta a uma velocidade de resfriamento mais elevada. Apesar do valor do coeficiente dessa correlação ter sido significativo (0,34), há alguma suspeita de que esta tenha sido uma correlação espúria, uma vez que a correlação entre a taxa de resfriamento e o grau total de deformação a quente também foi muito elevada (0,89). Suspeita-se, portanto, que a possível correlação entre a velocidade de resfriamento e \bar{r} seja, na verdade, um reflexo da correlação de \bar{r} com o grau total de deformação a quente. Essa suspeita é reforçada por evidências existentes na literatura: aparentemente a taxa de res-

friamento não é um fator que influencie significativamente o coeficiente de anisotropia \bar{r} [7].

Por outro lado, outros parâmetros de laminação a quente não exerceram influência significativa sobre as características das chapas de aço IF laminadas a frio. Um deles foi a temperatura de acabamento a qual, segundo as observações da literatura, deve ficar imediatamente acima do ponto Ar_3 , ocasião em que se inicia a transformação da austenita durante o resfriamento. Foi constatado que, em média, a temperatura de acabamento ficou 14°C acima de Ar_3 , com desvio padrão de $5,0^\circ\text{C}$. Nos casos extremos ela oscilou entre -12 e $+29^\circ\text{C}$. Esta amplitude parece ter sido insuficiente para provocar alterações significativas nas propriedades do material.

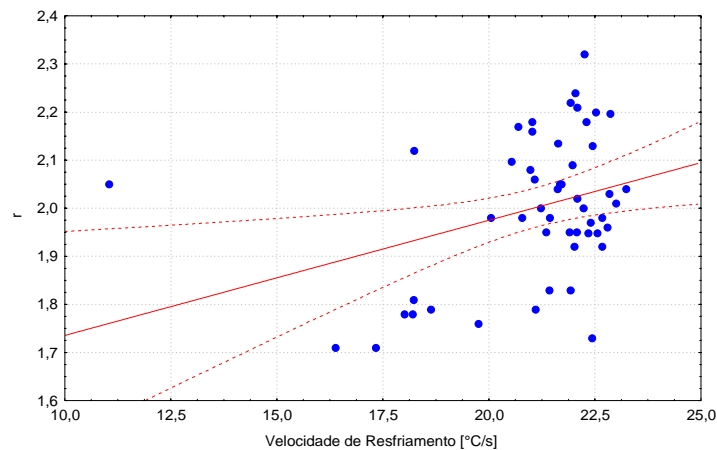


Figura 3: Correlação entre o coeficiente de anisotropia r e a velocidade de resfriamento na mesa de saída do Trem Acabador.

As variações na temperatura de bobinamento, que apresentou desvio padrão de 13°C , também foram insuficientes para provocar qualquer alteração nas propriedades das chapas de aço IF laminadas a frio. Isso já era esperado pois, conforme a literatura [1], aços IF com teores estequiométricos ou superiores de Ti são menos sensíveis a flutuações na temperatura de bobinamento.

Este trabalho, apesar de voltado para a análise do processo da laminação a quente sobre as propriedades de chapas de aço IF laminadas a frio, também logrou verificar outros efeitos relevantes sobre as características desse material, os quais serão vistos a seguir.

O teor de P alterou de forma significativa as propriedades mecânicas do material, elevando o limite de escoamento e de resistência, mas abaixando o valor do coeficiente de anisotropia \bar{r} e o coeficiente de encruamento n . Como se sabe, esse elemento endurece o ferro por solução sólida, às custas de alguma redução nos valores de \bar{r} e n [1,3]. A figura 4 mostra o efeito deletério desse elemento sobre \bar{r} , conforme observado nos materiais laminados na COSIPA.

Foi verificado ainda que, conforme esperado, a presença de N no aço é prejudicial à estampabilidade, conforme mostra a figura 5; o coeficiente de correlação obtido é da ordem de $-0,42$. De forma complementar, quanto maior o teor de Ti em excesso (Ti^*) mais elevado ficou o coeficiente de anisotropia \bar{r} , como mostra a figura 6; a reta obtida apresentou coeficiente de correlação igual a $0,37$.

Finalmente, a figura 7 permite verificar que maiores graus totais de deformação a frio também favorecem a estampabilidade do material, conforme previsto na literatura [1,3]. De fato, o coeficiente de anisotropia \bar{r} será tanto maior quanto menor o tamanho

de grão do laminado a quente e quanto maior for a redução no Laminador de Tiras a Frio; valores de \bar{r} superiores a 2,0 somente são conseguidos se a tira a quente apresentar tamanho de grão máximo de 10 μm e posterior redução total a frio de pelo menos 80%. O coeficiente de correlação aqui conseguido foi de 0,52.

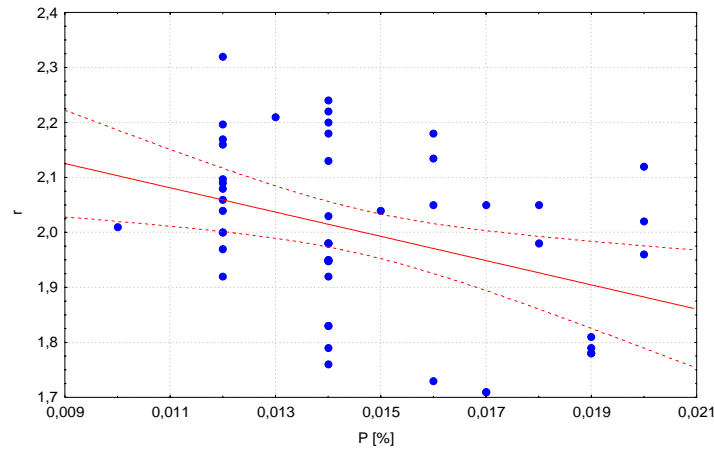


Figura 4: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e o teor de P no aço IF.

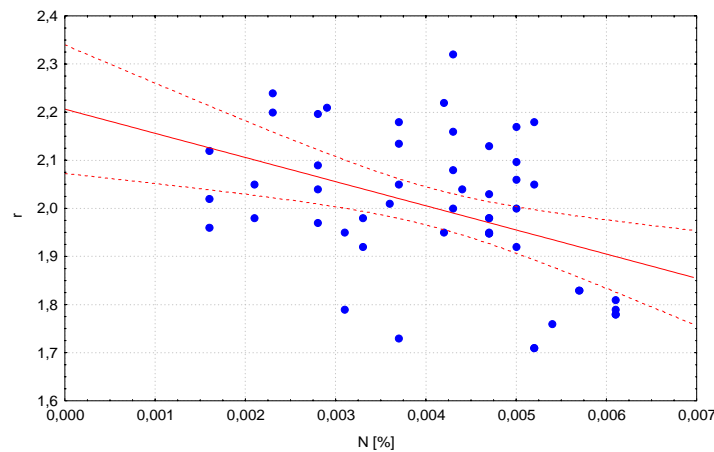


Figura 5: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e o teor de N no aço IF.

Uma análise de correlação múltipla *stepwise* demonstrou que a característica do produto mais sensível a flutuações de composição química e processo foi o coeficiente de anisotropia \bar{r} . O principal parâmetro que afetou essa característica foi a deformação total aplicada no laminador de tiras a frio ($\Sigma\varepsilon_F$); a seguir veio a temperatura de não recristalização T_{nr} da liga e seu teor de P. Foi obtida uma expressão com coeficiente de correlação igual a 0,68 e erro padrão da estimativa igual a 0,11. Ela confirma as conclusões obtidas anteriormente neste trabalho, ou seja, o efeito benéfico do refino microestrutural (aumento de T_{nr} e da deformação total aplicada a frio) e da minimização do teor de P na conformabilidade do material:

$$r = -6,54 - 21,04 P + 0,0087 T_{nr} + 0,92 \Sigma\varepsilon_F$$

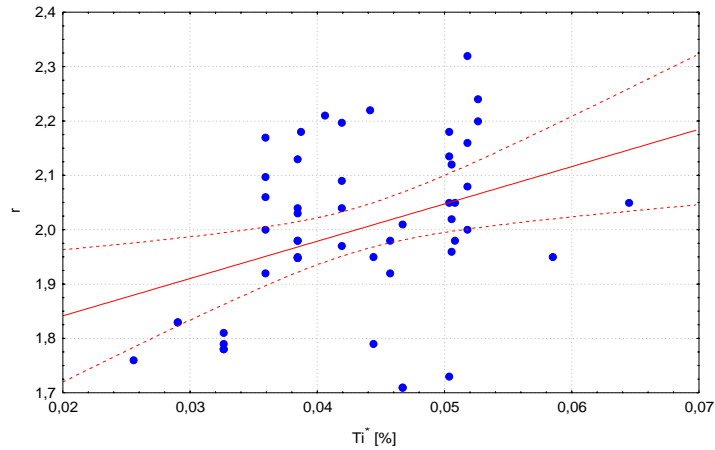


Figura 6: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e o teor de Ti solúvel no aço IF.

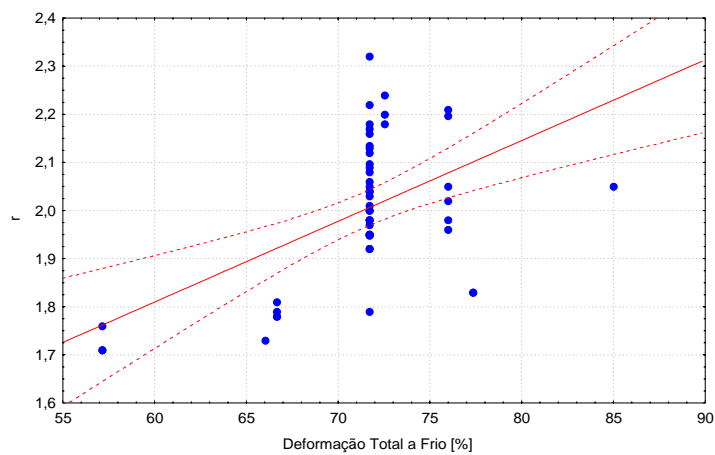


Figura 7: Correlação entre o coeficiente de anisotropia \bar{r} e o grau de redução total aplicado no Laminador de Tiras a Frio.

- Conclusões

Os parâmetros de laminação de tiras a quente aplicados para os atuais aços IF produzidos pela COSIPA mostraram-se adequados para as propriedades finais desse material, principalmente em termos de suas características de estampabilidade, ou seja, altos valores do coeficiente de anisotropia \bar{r} . Isto é atribuído, em primeiro lugar, pelo fato da temperatura de acabamento do material se encontrar imediatamente acima do ponto A_{r3} . Também a temperatura de bobinamento está compatível para a produção de chapas laminadas a frio com alto coeficiente de anisotropia \bar{r} , considerando o teor relativamente alto de Ti solúvel presente nas ligas desse tipo produzidas na COSIPA. O uso de resfriamento forçado adiantado após a laminação a quente também é recomendado, mas não houve como constatar realmente seu efeito, uma vez que esse padrão de resfriamento já é a regra para a laminação de tiras a quente de aços IF na COSIPA.

Outros fatores que contribuem para a produção de material com maior nível de estampabilidade são a minimização dos teores de C, P, S e N, a adequada estabiliza-

ção do C e N através da sua combinação com Ti e aumento do grau de redução a frio da tira.

- Referências Bibliográficas

1. HOILE, S. Materials Science and Technology, October 2000, 1079-1093
2. MAID, O e outros. Stahl und Eisen, 18 April 1988, 355-364.
3. HULKA, K. High Strength Extra Deep Drawing Quality Sheet, CBMM On-Line Technical Report, 2000 (http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/info/hsEDDQ/f_EDDQ.htm).
4. LOUREIRO, F.G. e outros. In: XXXVII SEMINÁRIO DE LAMINAÇÃO. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Curitiba, Setembro 2000, 231-239.
5. BLECK, W. e outros. Steel Research, August/September 1993, 396-400.
6. KWON, O. & MIN, K.Z. In: PHYSICAL METALLURGY OF IF STEELS. Proceedings. The Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, May 1994, 9-12.
7. SENUMA, T. et al. ISIJ International. June 1998, 587-594.
8. BORATTO, F. e outros. In: THERMEC '88. Proceedings. Iron and Steel Institute of Japan, Tokyo, 1988, p. 383-390.
9. OUCHI, C. et al. Transactions of the ISIJ, March 1982, 214-222.
10. RUIZ-APARICIO, L. et al. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON LOW-CARBON STEELS FOR THE 90's. Proceedings. TMS, Warrendale, 1993, 419-426.
11. SILVA, J.M.S. et al. In: II CONGRESSO INTERNACIONAL DE TECNOLOGIA METALÚRGICA E DE MATERIAIS. Anais. Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo, 1997.

INFLUENCE OF THE HOT ROLLING PROCESS OVER THE MECHANICAL PROPERTIES OF I.F. STEEL COLD ROLLED SHEETS ¹

Antonio Augusto Gorni ²
José Herbert Dolabela da Silveira ³
Célio de Almeida Filho ⁴

ABSTRACT

The hot rolling conditions used for interstitial-free steel processing can significantly affect properties of the resulting cold rolled sheets, specially its formability features, like the anisotropy coefficient r and strain hardening coefficient n , which have capital importance in this kind of product. The analysis of industrial hot rolling process data at COSIPA and the associated product mechanical properties showed interesting results. Strip microstructure got after hot strip rolling must be intensively refined; this fact requires maximization of total strain degree, finishing temperatures just above the A_{r3} temperature and immediate intensive cooling just after hot rolling. Besides that, the amounts of carbon, phosphorus, sulphur and nitrogen must be minimized; all carbon and nitrogen present must be stabilized with titanium and also the total strain degree applied during cold rolling must be maximized.

Palavras-Chave: I.F. Steels, Hot Strip Rolling, Mechanical Properties

¹ Paper to be presented at the 39° Rolling Seminar - Processes, Rolled and Coated Products, Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, Ouro Preto MG, October 23 to 25, 2002.

² ABM Member. Materials Engineer, M. Eng., D. Eng., Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Section, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP. E-Mail: gorni@cosipa.com.br.

³ ABM Member. Metallurgical Engineer, M. Eng., Manager of the Hot Strip Mill, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.

⁴ ABM Member. Metallurgical Technician, Process Analyst, Hot Rolling Technical Support Section, Companhia Siderúrgica Paulista - COSIPA, Cubatão SP.