

# COMPARAÇÃO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA DE UM AÇO IF APÓS LAMINAÇÃO CONVENCIONAL E ASSIMÉTRICA

*Nina do Amaral Sardinha\* e Luiz Paulo Brandão*

*1Instituto Militar de Engenharia, Seção de Engenharia Mecânica – Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270, Praia Vermelha, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.*

*\*ninasardinha@yahoo.com.br*

## RESUMO

A indústria automobilística tem grande interesse e necessidade de desenvolver chapas de aço capazes de suportar altos níveis de deformação sem afetar suas propriedades mecânicas, de modo que as chapas possam adquirir diferentes formatos durante o embutimento. Um aço bastante utilizado para este tipo de aplicação são os aços livres de intersticiais (interstitial free – IF). A textura cristalográfica desenvolvida durante a laminação de chapas de aços IF tem um papel fundamental na conformabilidade destas chapas. Como ainda são pouco conhecidas as diferenças microestruturais e, principalmente, texturais dos aços IF após a laminação convencional e assimétrica diante de grandes reduções, o presente trabalho visa contribuir com o entendimento sobre a evolução da textura cristalográfica resultante destes processamentos após 70, 80 e 90% de redução.

**Palavras-chave:** laminação convencional, laminação assimétrica, aço IF, textura.

## ABSTRACT

The automotive industry has a great need and interest to develop steel sheets able to withstand high levels of strain without affecting its mechanical properties, so that the sheets may acquire different shapes during deep drawing. A widely used steel for this type of application are interstitial free steels (interstitial free - IF). The crystallographic texture developed during the rolling of IF steel sheets have a central role in formability of these sheets. As it is not well known the microstructural differences, specially the textural differences, caused by conventional and asymmetric rolling after great reductions, this study aims to contribute to the understands of the evolution of crystallographic texture resulting from these rolling process after 70, 80 and 90% reduction.

**Keywords:** conventional rolling, asymmetric rolling, IF steel, texture.

## INTRODUÇÃO

A indústria automobilística (RAY et. al, 1994) assim como a indústria de embalagens (HIROKI, 2007), tem grande interesse e necessidade de desenvolver chapas de aço capazes de suportar altos níveis de deformação sem afetar suas propriedades mecânicas, de modo que as chapas possam adquirir diferentes formatos. Um dos processos de conformação mais agressivos é a estampagem profunda, onde o material precisa ter não só uma boa embutibilidade, mas também um ótimo estiramento, sendo esta a principal aplicação dos aços livres de intersticiais.

Nos aços livres de intersticiais (IF – interstitial free), o teor dos elementos C e N variam de 0,002 % a 0,010 %, e devido a adição de elementos microligantes, Ti e/ou Nb, esses elementos formam carbeto e nitreto, de modo que a matriz ferrítica do aço fique completamente livre desses elementos, tornando-se mais dúctil e tenaz.

Uma das etapas mais importantes na fabricação de chapas para estampagem é a laminação, pois sabe-se que os parâmetros da laminação influenciam as propriedades finais dessas chapas. Os parâmetros definidos desde a laminação de acabamento a quente até o recozimento final da chapa têm forte influência na determinação da textura e nas propriedades mecânicas relacionadas com a estampabilidade.

A textura cristalográfica desenvolvida durante a laminação desse material tem papel fundamental na conformabilidade dessas chapas, sendo esperado o desenvolvimento de fibra  $\gamma$ , com os planos {111} paralelos a direção normal (RAY et. al, 1994 e HUTCHINSON, 1999) de laminação a quente, grau de deformação, temperatura de laminação de acabamento, temperatura de recozimento, entre outros, tem grande influência em sua característica final

A laminação assimétrica (LA) consiste num método alternativo de laminação no qual é possível a produção de uma maior deformação cisalhante no material para um mesmo grau de deformação aplicado no processo convencional, proporcionando um aumento do gradiente de textura através da espessura da chapa laminada (LEE, 2001). Outra vantagem observada refere-se a aplicação de menores força e torque para um mesma deformação quando comparada à laminação convencional (LC). Para se introduzir assimetria durante as operações de laminação, devem ser impostos nos cilindros de laminação, superior e inferior, as seguintes diferenças: velocidades de rotação; diâmetros e/ou coeficientes de atrito (LEE, 2001, e JI, 2009).

Apesar de existirem muitos trabalhos indicando a LA como um processo alternativo de laminação, especialmente no caso de ligas de Al, o resultado da LA em aços IF diante de grandes reduções ainda é pouco estudado. Não foi identificado na literatura nenhum estudo que compare os dois processos, LA e LC, para o mesmo grau de redução, sendo este o principal objetivo do presente trabalho.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foi utilizado um aço IF Ti-Nb fornecido pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) na forma de tira resultante da laminação a quente, com 4,9 mm de espessura. A placa de origem possuía 257 mm de espessura, e foi recozida por 218 min à 1248 °C antes de ser laminada a quente. A

temperatura de acabamento e bobinamento aplicada foram de 952 e 730 °C, respectivamente. Na Tab. 1 está disponível a composição química do material que foi estudado.

**Tabela 1.** Composição química do aço estudado.

%C	%Mn	%P	%Ti	%S	%Cu	%Ni	%Sn	%Al	%N	%Nb
0,002	0,104	0,011	0,06	0,009	0,003	0,003	0,001	0,035	0,004	0,002

O material recebido foi cortado na forma de chapas retangulares medindo 20 x 12 mm adequadas para a realização da laminação. Além da LC, foi realizada a LA com razão de cilindros de 1,26, com o objetivo de investigar a influência deste parâmetro na estampabilidade dos aços IF. As chapas foram laminadas a frio, no laboratório de fundição do IME, utilizando um laminador FENN MFG até atingir reduções na ordem de 70%, 80% e 90%.

Após a laminação todas as chapas foram submetidas ao recozimento com objetivo de torná-las mais dúcteis, aliviar as tensões e promover o desenvolvimento de textura de fibra  $\gamma$ , características desejáveis durante a estampagem profunda.

O recozimento foi realizado em forno de banho de sal, a uma temperatura de 850 °C por 120 segundos, seguido de resfriamento ao ar, de modo a simular as taxas comumente aplicadas no recozimento contínuo.

Para avaliação da textura foram extraídas amostras medindo 20 x 20 mm de cada uma das chapas resultante dos diferentes estados de processamento aplicados: tira quente recebida; após a laminação a frio em cada um dos seus diferentes graus de redução; e após o recozimento de cada uma das chapas. Para medição da textura cristalográfica foi utilizado um equipamento X'PERT PRO MPD da PANalytical com tubo de raios-X cerâmico e anodo de cobalto com detector PIXcel de 255 canais.

As figuras de pólo dos planos {110}, {200} e {211} foram obtidas através do programa X'PERT TEXTURE, e as funções de distribuição de orientação cristalina (FDOC) foram calculadas utilizando os programas PHILCONVERT e POPLA. Serão usadas notações de Bunge para analisar a intensidade de incidência de grãos com o plano do paralelo ao plano de laminação e a direção cristalográfica paralela a direção de laminação.

## RESULTADO E DISCUSSÃO

As seções  $\varphi_2 = 45^\circ$  das FDOC obtidas para as amostras laminadas convencionalmente antes e após o recozimento são apresentadas na Figura 1. Após a laminação – C70, C80 e C90 – verifica-se que com o aumento do percentual de redução, ocorre a intensificação da fibra  $\alpha$ , enquanto que a fibra  $\gamma$  se intensifica até 80% e depois perde intensidade. O recozimento posterior – RC70, RC80 e RC90 – acarreta a perda da intensidade dos componentes pertencentes a fibra  $\alpha$ , em todas as amostras, e intensificação da fibra  $\gamma$  das amostras RC80 e RC90.

O componente de cubo rodado, (001) $\langle$ -110 $\rangle$ , que é indesejável para as operações de estampagem, está presente em todas as amostras laminadas, mas desaparece com o recozimento. O desenvolvimento de componentes localizados nas

proximidades da fibra  $\gamma$  e a diminuição da intensidade do cubo rodado após o recozimento estão relacionados à presença de heterogeneidades cristalinas ou bandas de cisalhamento (RUIZ-APARICIO, 2001).

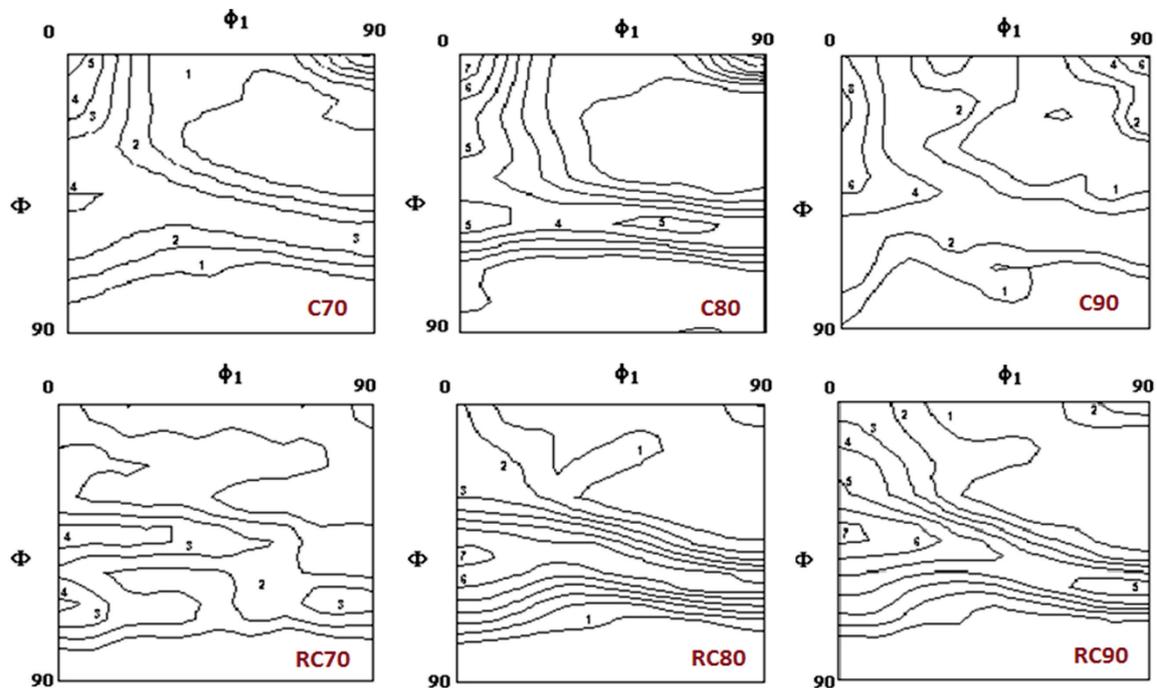


Figura 1. FDOCs da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  das amostras laminadas convencionalmente antes e após o recozimento.

A Figura 2 mostra a distribuição dos componentes da fibra  $\alpha$  ao longo do ângulo  $\Phi$ , sendo apresentada num mesmo gráfico a distribuição dos componentes para cada uma das condições estudadas, material recebido, R, logo após a redução de 70%, 80%, e 90%, aplicada durante a laminação convencional, e posterior ao recozimento subsequente. De acordo com os estudos desenvolvidos por HUTCHINSON (1999), HUMANE (2010) e ZHANG (2010), com o aumento do percentual de deformação a frio aplicado, a intensidade da fibra  $\alpha$  também aumenta. Este comportamento também é obtido neste trabalho, comprovado pelas intensidades máximas obtidas ao longo da fibra  $\alpha$  que foram: 6,4 para 70% de redução; 7,6 para 80% de redução; e 8,8 para 90% de redução, exibidas na Figura 2.

O componente de maior intensidade na fibra  $\alpha$  é observado em C90 estando localizado em  $\Phi = 20^\circ$ , a  $5^\circ$  do componente  $(113)\langle 110 \rangle$ . Após o recozimento da amostra RC90, este componente perde intensidade, reduzindo para 5, enquanto que verifica-se que o componente mais intenso passa a ser  $(223)\langle 110 \rangle$ , com 7,1 de intensidade.

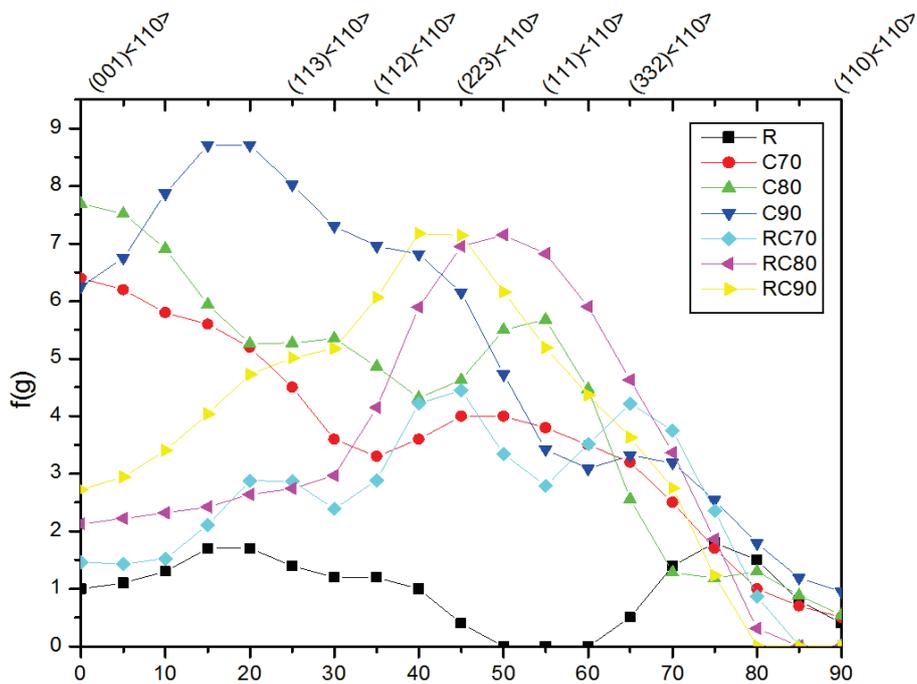


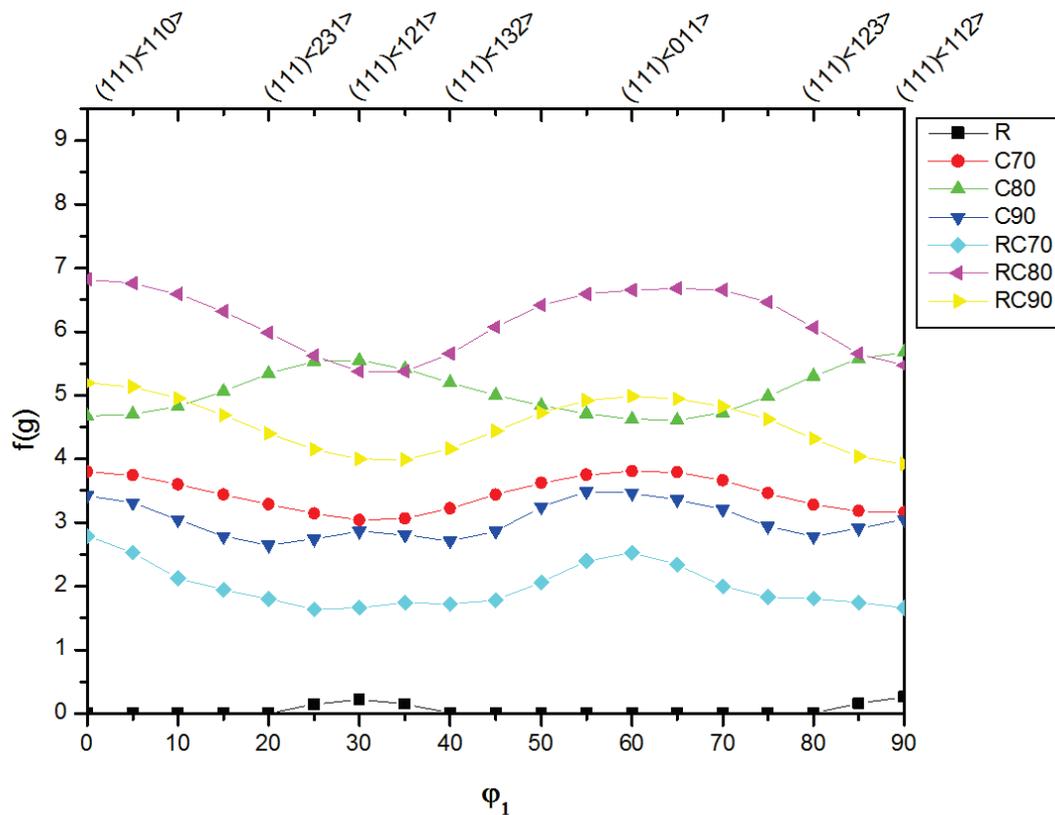
Figura 2. Distribuição das Intensidades de textura dos componentes da seção  $\phi_2 = 45^\circ$  ao longo da fibra  $\alpha$  das amostras que sofreram laminação convencional

Ainda analisando as amostras após a laminação, verifica-se que o componente  $(001)\langle 110 \rangle$  é o mais intenso tanto em C70 quanto em C80 com valores de 6,4 e 7,6 respectivamente. Após o recozimento verifica-se que RC70 e RC80 apresentam intensidade de 1,5 e 2, respectivamente, próximo a  $(001)\langle 110 \rangle$ . Para RC70 a máxima intensidade é 4,2, situada em  $\Phi = 45^\circ$ , próximo a  $(223)\langle 110 \rangle$ . Já para RC80 a máxima intensidade obtida após o recozimento é 7, em  $\Phi = 50^\circ$ , a  $4^\circ$  de  $(111)\langle 110 \rangle$ .

Diante do exposto acima, pode-se concluir que houve um forte desenvolvimento da fibra  $\alpha$  após a laminação, entretanto após o recozimento ocorreu a redução da intensidade dos componentes pertencentes a esta fibra, até  $\Phi = 35^\circ$ , e desenvolvimento dos componentes de nas proximidades da fibra  $\gamma$ ,  $40^\circ < \Phi < 70^\circ$ . O aumento das intensidades dos componentes localizados próximos à fibra  $\gamma$ , assim como o decréscimo de intensidade do componente de cubo rodado  $(001)\langle 110 \rangle$  após o recozimento está relacionado com a presença de heterogeneidades cristalinas ou bandas de cisalhamento na matriz deformada (RUIZ-APARICIO, 2001).

O decréscimo da intensidade do componente  $(001)\langle 110 \rangle$  em consequência do recozimento observado em todas as amostras é benéfico para o aço IF, uma vez que este componente pode deteriorar as propriedades de embutimento (RAY et. al, 1994). Este componente é responsável pela formação de orelhas a  $45^\circ$  durante o embutimento.

HUMANE (2010) e ZHANG (2010) também avaliaram o comportamento da fibra  $\gamma$  após a laminação e verificaram que esta fibra se desenvolve até cerca de 75 – 80%, quando atinge seu máximo de intensidade, e com o aumento da deformação ocorre o seu enfraquecimento. Este comportamento também foi verificado neste trabalho como pode ser comprovado por meio da Figura 3, onde é apresentada a distribuição dos componentes ao longo da fibra  $\gamma$ .



**Figura 3.** Distribuição das Intensidades de textura dos componentes da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  ao longo da fibra  $\gamma$  das amostras que sofreram laminação convencional

A amostra recebida, R, não possui nenhuma intensidade ao longo da fibra  $\gamma$ , entretanto após 70% de redução ocorre um aumento de intensidade atingindo-se 3,8 em  $\varphi_1 = 0^\circ$  e  $\varphi_1 = 60^\circ$ , próximo às direções  $\langle 110 \rangle$  e  $\langle 011 \rangle$ , respectivamente. O aumento da deformação para 80% intensificou ainda mais a presença fibra  $\gamma$  atingindo-se 5,55 e 5,68 em  $\varphi_1 = 30^\circ$  e  $\varphi_1 = 90^\circ$ , próximo às direções  $\langle 121 \rangle$  e  $\langle 112 \rangle$ . Para esta amostra o mínimo de intensidade observado é 4,6. Em linha com o que foi verificado por HUMANE (2010) e ZHANG (2010), com o aumento da deformação para 90% houve o decréscimo da intensidade máxima obtida para C90, 3,4 em  $\varphi_1 = 0^\circ$  e  $\varphi_1 = 55^\circ$ .

Ao contrário do que ocorreu com as amostras RC80 e RC90, que após o recozimento tiveram um fortalecimento da fibra  $\gamma$ , a amostra Db perdeu intensidade, apresentando máximo igual a 2,8 em  $\varphi_1 = 0^\circ$ . Este não é um resultado esperado, mas foi identificado a presença de uma fibra ao longo de  $\Phi = 60^\circ$ , o que sugere que a fibra  $\gamma$  se desenvolveu em ângulos maiores de  $\Phi$ . RC80 teve seu máximo de 6,7 em  $\varphi_1 = 0^\circ$  e  $\varphi_1 = 55^\circ$ , próximo as componentes  $(111)\langle 110 \rangle$  e  $(111)\langle 011 \rangle$ , enquanto que RC90 teve máximo igual a 5,2 em  $\varphi_1 = 0^\circ$ .

Para as amostras laminadas assimetricamente além da camada central – AXX-2 – também foram estudadas as superfícies inferior – AXX-1, que ficou em contato com o rolo de menor diâmetro, e a superfície superior – AXX-3 –, que ficou em contato com o rolo de maior diâmetro. As FDOCs das amostras após 70, 80 e 90 % de deformação assimétrica são apresentadas nas Figuras 4, 5 e 6, respectivamente.

No geral, a superfície inferior foi a que desenvolveu a textura mais fraca, en-

quanto que a superfície superior desenvolveu uma textura mais forte, sendo comparável aos resultados obtidos para a LC. Em relação à camada central, verifica-se que não é encontrado nenhum componente ao longo de  $\Phi = 54,7^\circ$ , posição original da fibra  $\gamma$ .

A distribuição das intensidades dos componentes da fibra  $\alpha$  resultantes das amostras que sofreram LA é apresentada na Figura 7. Pode ser constatado que na camada central aqui avaliada, a distribuição dos componentes da fibra  $\alpha$  é bem semelhante para quase todas as amostras, caracterizadas por baixas intensidades, próximas a zero, a  $5^\circ$  do plano (113), entre  $\Phi = 50^\circ$  e  $\Phi = 60^\circ$  e quando  $\Phi > 80^\circ$ . Para demais posições, (001)<110>, (223)<110> e a  $5^\circ$  de (332)<110>, são observados máximos intensidade de, 4, 1,5 e 2, respectivamente. Apenas RA90-2 se mostrou contrária a esta tendência, apresentando comportamento semelhante a C90, com máxima intensidade 8,5 próximo a (113)<110>, e intensidade de 7 em (001)<110>. O posterior recozimento ocasiona a perda de intensidade tanto para os componentes pertencentes a fibra  $\alpha$  quanto a fibra  $\gamma$ .

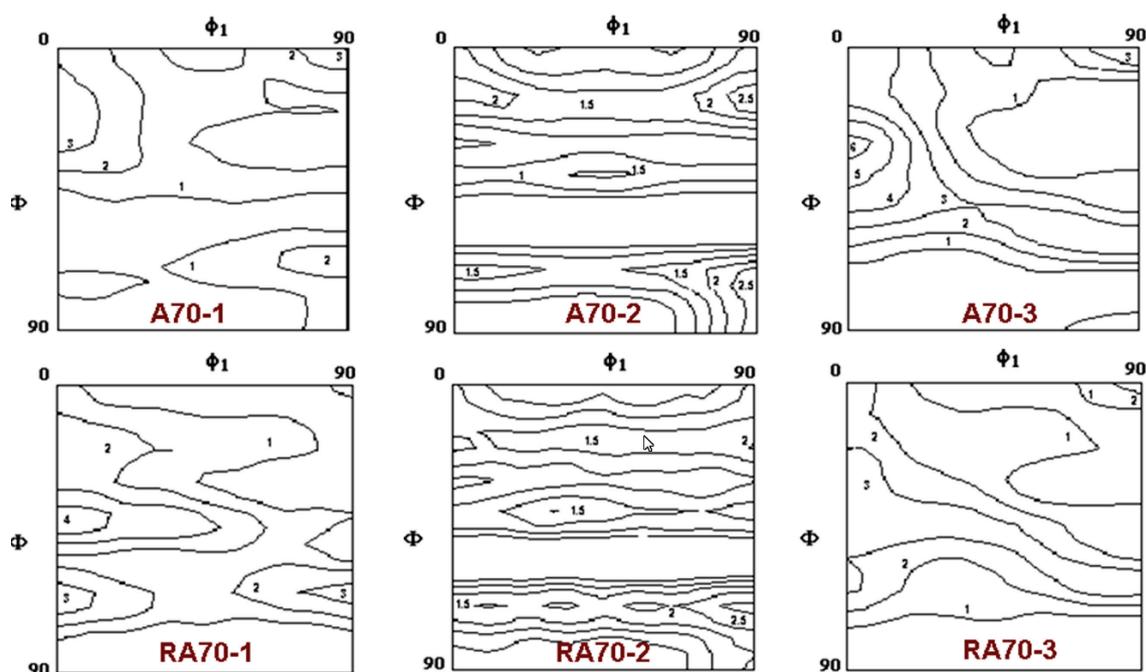


Figura 4. FDOCs da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  das amostras laminadas assimetricamente após 70% de redução antes e após o recozimento.

A redução da intensidade da fibra  $\alpha$  em relação ao comportamento resultante da LC, pode ser um indício da melhora nas propriedades relacionadas a estampagem, uma vez que se almeja o enfraquecimento desta fibra e fortalecimento da fibra  $\gamma$ .

Diferente do que é observado nas amostras após LC, a LA provoca um deslocamento da fibra  $\gamma$  para maiores valores de  $\Phi$ , não sendo verificado praticamente nenhuma intensidade ao longo da posição original desta fibra,  $\Phi = 54^\circ$ , conforme foi previsto no estudo desenvolvido por TÓTH (2012). Sendo assim a Figura 8 apresenta a distribuição da intensidade dos componentes ao longo da fibra  $\gamma$ , para  $\Phi$  variando de  $60^\circ$  a  $70^\circ$ , de acordo com a máxima intensidade apresenta para um mesmo ângulo.

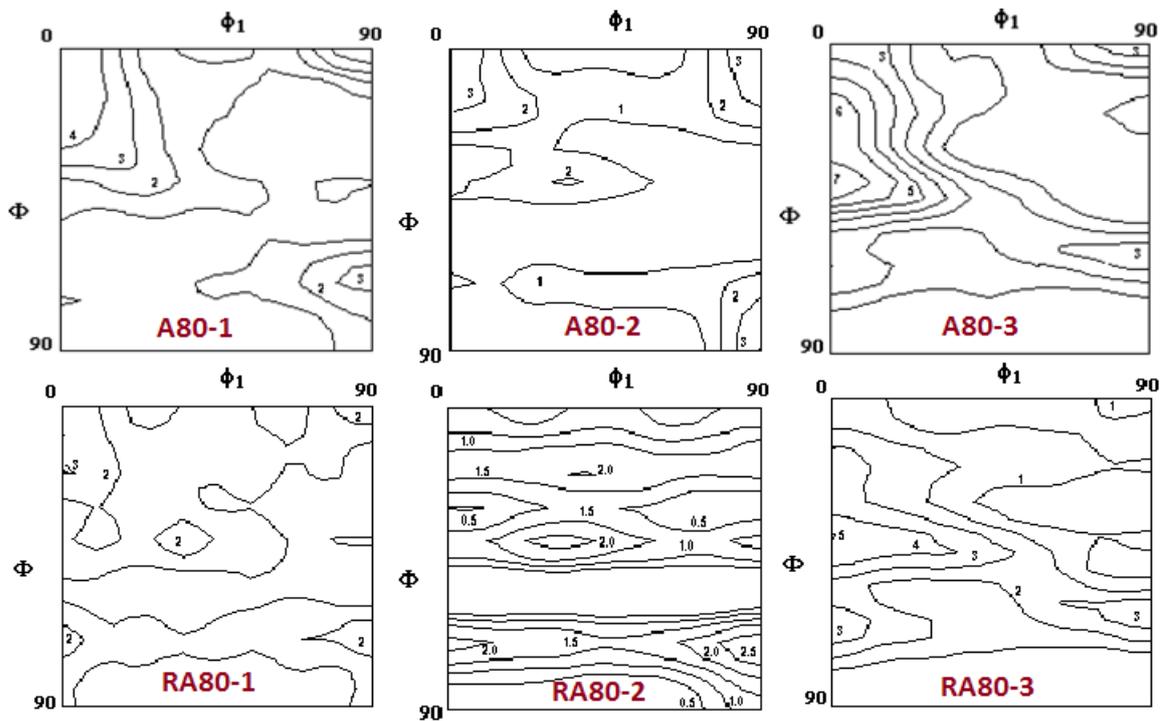


Figura 5. FDOCs da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  das amostras laminadas assimetricamente após 80% de redução antes e após o recozimento.

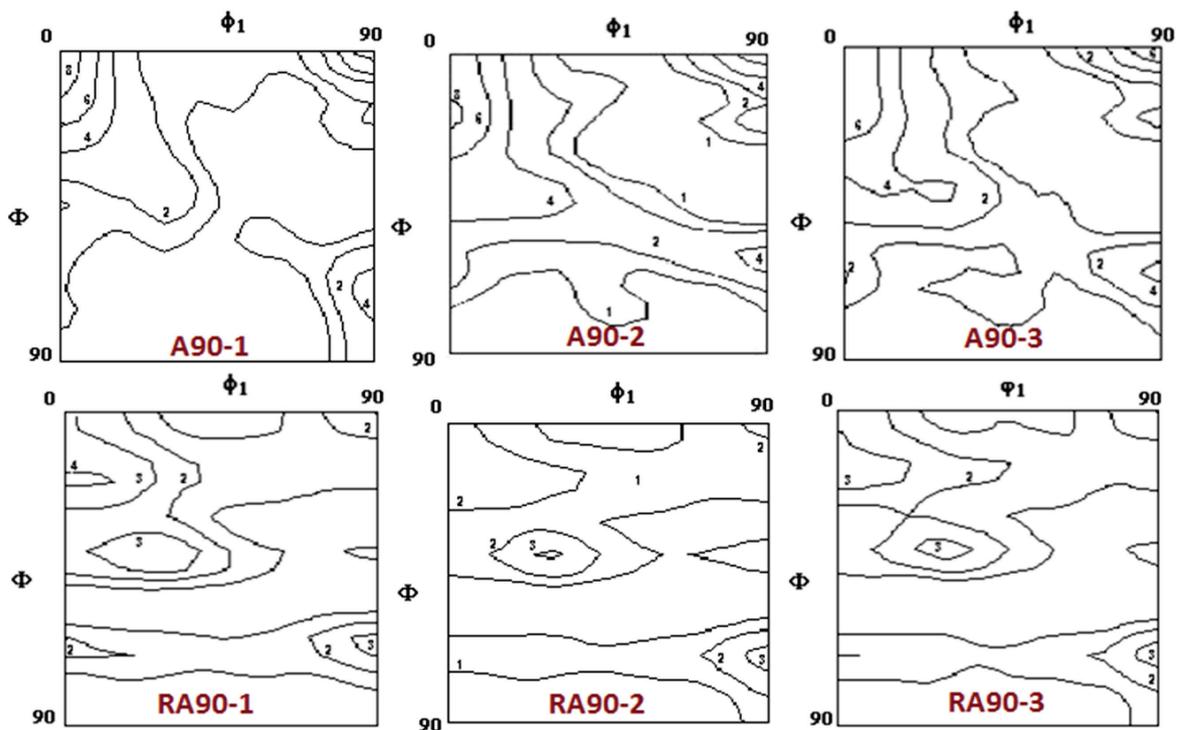


Figura 6. FDOCs da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  das amostras laminadas assimetricamente após 90% de redução antes e após o recozimento.

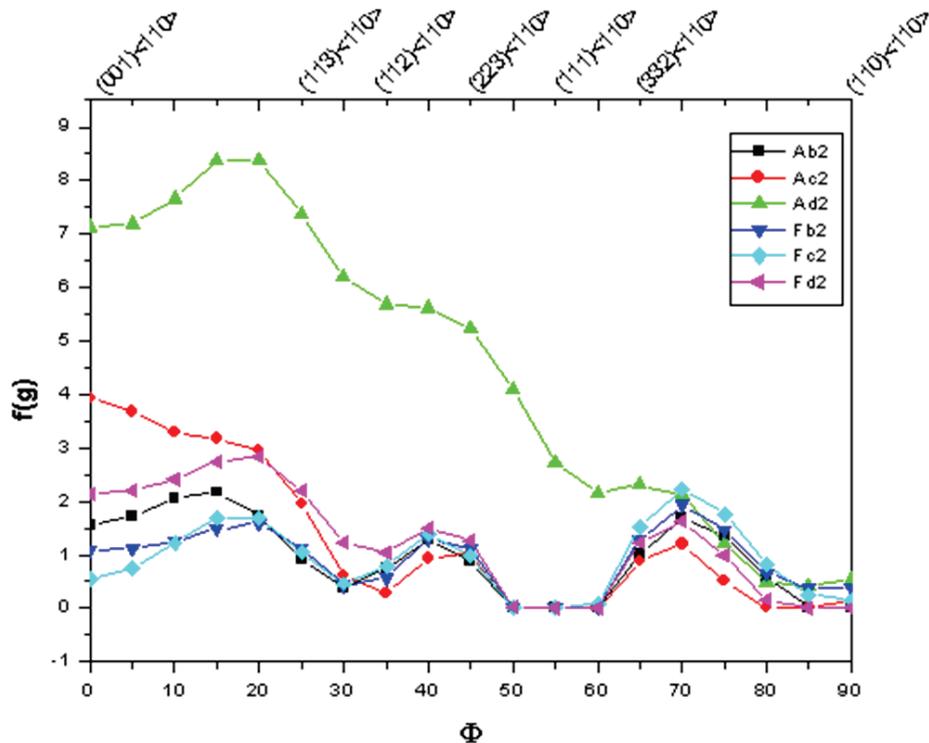


Figura 7. Distribuição das Intensidades de textura dos componentes da seção  $\varphi_2 = 45^\circ$  ao longo da fibra  $\alpha$  das amostras que sofreram laminação assimétrica.

A máxima intensidade verificada nas amostras laminadas assimetricamente foi de 4,6 para o componente (111)<112> da amostra RA90-2, enquanto que as amostras que foram laminadas convencionalmente atingiram um máximo de intensidade próximo a 7 para RC80,. Verifica-se uma intensidade média de 1,8 para  $0^\circ < \varphi_1 < 80^\circ$ , aumentando para 2,5 em  $\varphi_1 = 90^\circ$ , nas proximidades de (111)<112>. Apenas A90-2, diverge das demais amostras apresentando um máximo igual a 4,6 em (111)<112>.

É importante notar que, apesar do comportamento dos componentes, no centro, na superfície inferior e na superfície superior serem diferentes, as amostras demonstraram uma tendência de comportamento bastante semelhante em cada um destes locais.

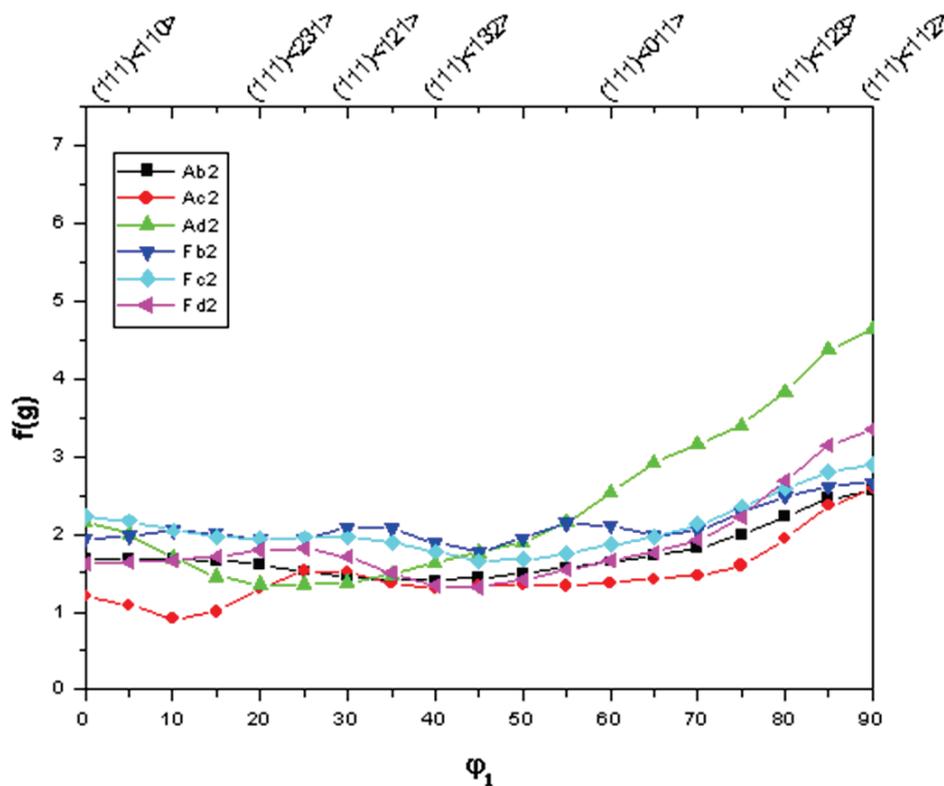


Figura 8. Distribuição das Intensidades de textura dos componentes da seção  $\phi_2 = 45^\circ$  ao longo da fibra  $\gamma$  das amostras que sofreram laminação assimétrica.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante do que pode ser observado nas FDOCs e nos gráficos de distribuição de intensidade aqui estudados, pode-se dizer que a laminação convencional promoveu o desenvolvimento das fibras  $\alpha$  e  $\gamma$  exatamente como é reportado na literatura. Houve um reforço da fibra  $\alpha$  com o aumento da deformação, e a fibra  $\gamma$  desenvolveu-se até 80% e então perdeu intensidade após 90%. Ressalta-se ainda a homogeneidade de distribuição dos componentes ao longo da fibra  $\gamma$ .

Já a assimetria aqui provocada, resultou na redução da intensidade dos componentes de fibra  $\alpha$ , principalmente na camada central das amostras o que é benéfico, todavia a fibra  $\gamma$  teve perda significativa de intensidade. A assimetria também provocou o deslocamento da fibra  $\gamma$  para maiores ângulos de  $\Phi$  – ente 60 e 75°.

Para uma melhor avaliação do resultado do trabalho, faz-se necessário a avaliação das propriedades mecânicas, principalmente dos coeficientes de anisotropia

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFIA

- Ray, K.R., Jonas, J.J., Hook, R.E. Cold rolling and annealing textures in low carbon and extra low carbon steels. *International Materials Reviews*, 39, p. 129-172, **1994**.
- Hiroki, I. in Saha, R., Ray, R.K. Effects of severe cold rolling on the texture and grain boundary character of a Ti-Nb IF steel. *Materials Letter* 62, p. 222-225, **2007**.
- Hutchinson, B.. Deformation microstructures and textures in steels. *The Royal Society*, 357, p. 1471-1485, **1999**.
- Lee, S.H., Lee, D.N. Analysis of deformation textures of asymmetrically rolled steel sheets. *International Journal Of Mechanical Sciences*, 43, p. 1997–2015, **2001**.
- Ji, Y.H., Park, J.J.. Development of severe plastic deformation by various asymmetric rolling processes. *Materials Science and Engineering A*, 499, p. 14–17, **2009**.
- Ruiz-Aparicio, L.J., Garcia, C.I., Deardo, A.J.. Development of {111} transformation texture in interstitial-free steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32, p. 2325-2334, **2001**.
- Humane, M. M., Minz, R.K., Paretkar, R.K., Peshwee, D.R. Effect of cold rolling and mode of annealing on textures, mechanical properties and formability limit diagrams in interstitial free steel sheets. *Transactions of the Indian Institute of Metals*, 63, p. 867-880, **2010**.
- Zang, P., Guo, Y., Wang, Z., Wang, G., Liu, X.. Texture evolution in ferritic rolled Ti-IF steel during cold rolling. *Journal of Iron and Steel Research*, 17, p. 44-48, **2010**.
- Tóth, L.S., Beausir, B., Orlov, D., Lapovok, R., Haldar, A.. Analysis of texture and R value variations in asymmetric rolling of IF steel. *Journal of Materials Processing Technology*,. 212, p. 509-515, **2012**.