

CARACTERIZAÇÃO DE UM AÇO IF APÓS A RELAMINAÇÃO NO LAMINADOR DE ENCRUAMENTO¹

Antônio Fabiano de Oliveira²

André Paulo Tshipstschin³

Ronald Lesley Plaut³

Karl Kristian Bagger⁴

Resumo

Este trabalho tem por objetivo estudar os efeitos da relaminação de encruamento na estampabilidade de chapas de um aço Intersticial Free - IF microligado ao titânio. Após o processo de relaminação, foi realizada a caracterização do material através de ensaios para avaliar as propriedades mecânicas, a microestrutura, a textura cristalográfica (FDO) e determinou-se a curva limite de conformação (CLC). Os resultados mostram que os limites de escoamento e de resistência aumentam e o coeficiente de encruamento reduz com a relaminação de encruamento. Para as reduções de relaminação estudadas, a dispersão dos pontos em torno da CLC, não evidencia influências significativas.

Palavras-chave: Aço IF; Laminação de encruamento; Relaminação; Textura; Estampabilidade.

CHARACTERIZATION OF SKIN-PASS MILL OVER-ROLLING ON A IF STEEL¹

Abstract

The present work studies the effect of over-rolling performed on a skin-pass mill on the drawability of a Ti-stabilized IF steel. Tests have been carried out with increasing skin-pass reductions (up to about 1%) and the corresponding mechanical properties, microstructures, textures and related forming limit curves (FLC) have been assessed. The results have shown that the yield strength increased, the strain-hardening coefficient (n) decreases, with increasing skin-pass over-rolling. The FLC results presented results where the scatter showed no marked effect, for the studied range of over-rolling.

Key words: IF steel; Skin pass rolling; Over-rolling; Texture; Stampability.

¹ *Contribuição técnica ao 64º Congresso Anual da ABM, 13 a 17 de julho de 2009, Belo Horizonte, MG, Brasil.*

² *Engenheiro Metalurgista; Departamento de Laminação a Frio da Usiminas; Cubatão, SP.*

³ *Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e Materiais da Escola Politécnica da USP, SP.*

⁴ *Engenheiro Metalurgista; Departamento de Laminação a Frio da Usiminas; Cubatão, SP.*

1 INTRODUÇÃO

O aço IF é hoje uma opção muito importante para a indústria, principalmente a automobilística. Este nome é dado ao aço com baixíssimo teor de carbono (*Interstitial Free*). Segundo Almeida⁽¹⁾ o aço IF apresenta características fundamentais para a confecção de peças complexas com menores quantidades de operações, onde embutimentos profundos e grandes reduções de espessura são necessárias.

Os aços *interstitial free* (IF) microligados ao titânio é citado por Pinto⁽²⁾ como sendo amplamente utilizados em aplicações de estampagem por não serem envelhecíveis, possuírem baixo limite de escoamento, alto alongamento uniforme associado a um coeficiente de encruamento elevado e a uma textura cristalográfica adequada a estampabilidade quando comparado com outros aços baixo carbono.

Após processamento completo na linha de laminação a frio pode ter a necessidade de ser processado novamente no laminador de encruamento, processo chamado de relaminação de encruamento, para melhoria da qualidade quanto à forma e às características superficiais. Entretanto, quando se relaminam materiais para estampagem como os aços IF, os mesmos podem encruar de forma a apresentar suas propriedades mecânicas (limite de escoamento - LE, limite de resistência - LR e outras propriedades), fora das especificações e se tornarem inadequadas para aplicações que envolvem estampagem, segundo Fonseca.⁽³⁾

Foi, então, desenvolvida uma metodologia para análise das propriedades mecânicas e cristalográficas, tal que, caso seja necessário uma relaminação no laminador de encruamento, não seriam comprometidas as propriedades do aço, aumentando assim a confiabilidade da operação e correção dos defeitos e aprovação do produto para o cliente.

Assim, o objetivo do trabalho é verificar o efeito da relaminação de encruamento do aço IF após vários graus de redução, a influência no tamanho de grão, anisotropia, coeficiente de encruamento, e avaliação das propriedades mecânicas e aspectos cristalográficos do material.

2 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Produziram-se, em escala industrial, duas bobinas de 20 t cada, de um aço IF-Ti laminada a frio, chamada de Bobina-Produto-Encruada - BPE, com identificação Nº 073351000 e 073352000 e dimensões de 0,75x1200 mm de espessura e largura, respectivamente. Durante o processo de encruamento foi objetivada uma redução com 0,5% de redução. Em seguida, a BPE foi relaminada adicionando cinco graus diferentes de redução, sendo 0,2%; 0,4%; 0,6%; 0,8% e 1,0%, gerando-se então a Bobina-Relaminada-Encruada – BRE com cinco regiões respectivamente BRE02, BRE04, BRE06, BRE08 e BRE10, referentes aos respectivos graus de redução.

Os ensaios de tração foram realizados conforme a norma NBR 6673⁽⁴⁾ com base de medida de 80 mm. Os valores do limite de escoamento, limite de resistência e alongamento total foram obtidos pela média de seis corpos de prova, amostrados na direção transversal de laminação. Os valores de anisotropia normal, planar e o coeficiente de encruamento foram determinados pela média dos resultados de 18 ensaios, seis em cada uma das direções longitudinal, transversal e diagonal ao sentido de laminação conforme a norma EN10130.⁽⁵⁾ Os ensaios Erichsen foram realizados através de três embutimentos para todas as condições conforme a norma NBR5902.⁽⁶⁾ Esses ensaios objetivaram comparar laminação de encruamento das condições de BPE com BRE. Seguem abaixo as Tabelas 1e 2, referentes ao material em estudo.

Tabela 1. Composição química (% em peso)

| Aço | C | Mn | P | Ti | S | Nb | Si | Al |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| IF | 0,020 | 0,250 | 0,020 | 0,010 | 0,020 | 0,001 | 0,030 | 0,040 |

Tabela 2. Parâmetros de Processo do Aço IF (valores médios)

| Temp. Acabamento (°C) | Temp. Bobinamento(°C) | % Redução TCM | Temp. Recozimento (°C) |
|-----------------------|-----------------------|---------------|------------------------|
| 920 | 630 | 82 | 700 |

Os ensaios para amostragem foram realizados conforme processo ilustrado na Figura 1.

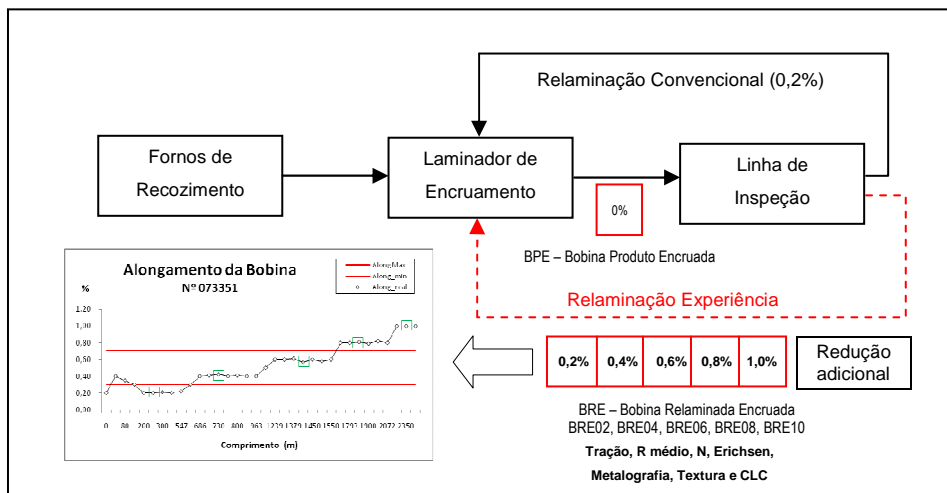


Figura 1. Esquema do procedimento experimental com os principais parâmetros operacionais usados e os ensaios realizados.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 2a a 2f mostram a influência do grau de deformação nas propriedades mecânicas do material.

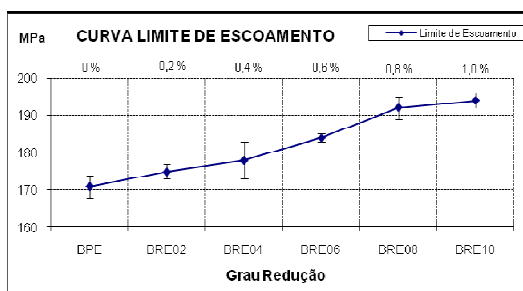


Figura 2a. Curva Limite de Escoamento

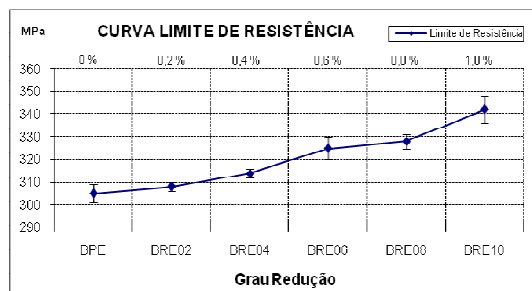


Figura 2b. Curva Limite de Resistência

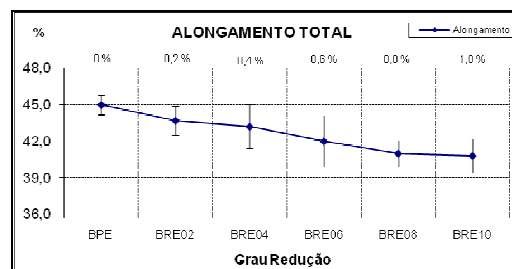


Figura 2c. Curva Alongamento Total

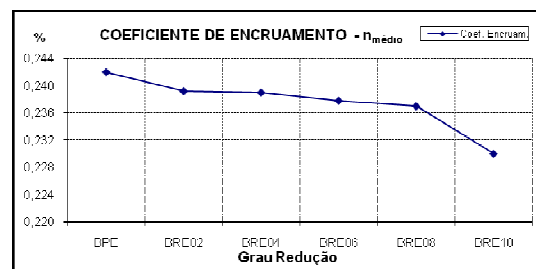


Figura 2d. Curva Coeficiente de Encruamento

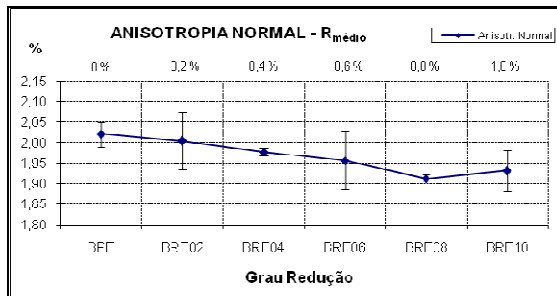


Figura 2e. Curva Anisotropia Normal

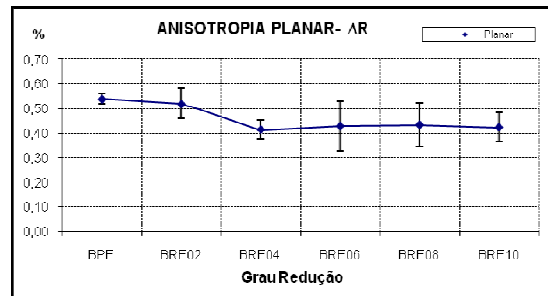


Figura 2f. Curva Anisotropia Planar

Através da análise estatística, verificou-se que as propriedades mecânicas, mostradas nas figuras acima, tiveram a mesma tendência de variação de outros trabalhos de outros autores^(3,7,8) que apresentam situações referentes a uma única laminação de encruamento.

Segundo Padilha⁽⁹⁾ esta variação é explicada pelo aumento da densidade de discordâncias provocadas pela laminação de encruamento, que interagem entre si, provocando o aumento da resistência do material e a diminuição da ductilidade. Nesse raciocínio, o Alongamento deveria diminuir. Entretanto, o fato do Alongamento decrescer pouco com pequenas deformações na laminação de encruamento se deve ao fato, do material ser processado em escala industrial tornando o decréscimo do alongamento imperceptível pela análise, conforme Fonseca.⁽³⁾

A Tabela 3 apresenta grau de redução em relação à norma NBR5915⁽¹⁰⁾ (grau EEP-IF).

Tabela 3. Propriedades mecânicas do material bobina BE em relação à norma NBR 5915

| Propriedades | % Red. Adicional | LE (MPa) | LR (MPa) | AL* (%) | R _{médio} | ΔR | n _{médio} | Embutimento | |
|--------------|------------------|-----------|-----------|---------|--------------------|-------|--------------------|----------------------------|----------|
| | | | | | | | | Espessura do material (mm) | IEE (mm) |
| Grau EEP-IF | - | 140 - 180 | 270 - 350 | 38 min. | 1,80 min. | - | 0,220 | 0,700 | > 10,4 |
| BPE | 0,0 | 171 | 305 | 45,0 | 2,020 | 0,540 | 0,242 | 0,750 | 10,9 |
| BRE02 | 0,2 | 175 | 308 | 43,7 | 2,004 | 0,520 | 0,239 | 0,748 | 10,8 |
| BRE04 | 0,4 | 178 | 314 | 43,2 | 1,978 | 0,415 | 0,239 | 0,746 | 10,8 |
| BRE06 | 0,6 | 184 | 325 | 42,0 | 1,956 | 0,430 | 0,238 | 0,744 | 10,8 |
| BRE08 | 0,8 | 192 | 328 | 41,0 | 1,913 | 0,435 | 0,237 | 0,742 | 10,7 |
| BRE10 | 1,0 | 194 | 342 | 40,8 | 1,933 | 0,425 | 0,230 | 0,740 | 10,6 |

*Base de medida = 80 mm.

O tamanho de grão foi determinado segundo a norma ASTM E112⁽¹¹⁾ (TG = 8,0 μm) para as condições com a Bobina-Produto-Encruada-BPE e para as relaminações BRE02, BRE04, BRE06, BRE08 e BRE10. Os resultados encontrados referente à medição de tamanho de grão, conforme Tabela 4 com respectivo valor de desvio padrão e variação percentual (VP).

Tabela 4. Tamanho de grão das amostras para as condições de processo: BPE e BRE

| Amostra | | Tamanho de grão | |
|--------------|-------|-------------------|-------|
| Bobina 73351 | | (μm) | VP(%) |
| BPE | | $8,0 \pm 1,0$ | - |
| BRE | BRE02 | $8,3 \pm 1,0$ | 3,8% |
| | BRE04 | $8,2 \pm 1,9$ | -1,2% |
| | BRE06 | $8,4 \pm 0,7$ | 2,4% |
| | BRE08 | $8,5 \pm 0,9$ | 1,2% |
| | BRE10 | $8,2 \pm 0,8$ | -3,5% |

Avaliou-se a textura do aço IF através de figuras de função de distribuição de orientação (FDO) para as condições BPE e para as condições com aumento progressivo dos graus de deformação na relaminação.

3.1 Textura

A Figura 3 apresenta a macrotextura (FDO) do aço IF após na condição BPE e BRE, medidos na superfície das amostras por difração de raios-X.

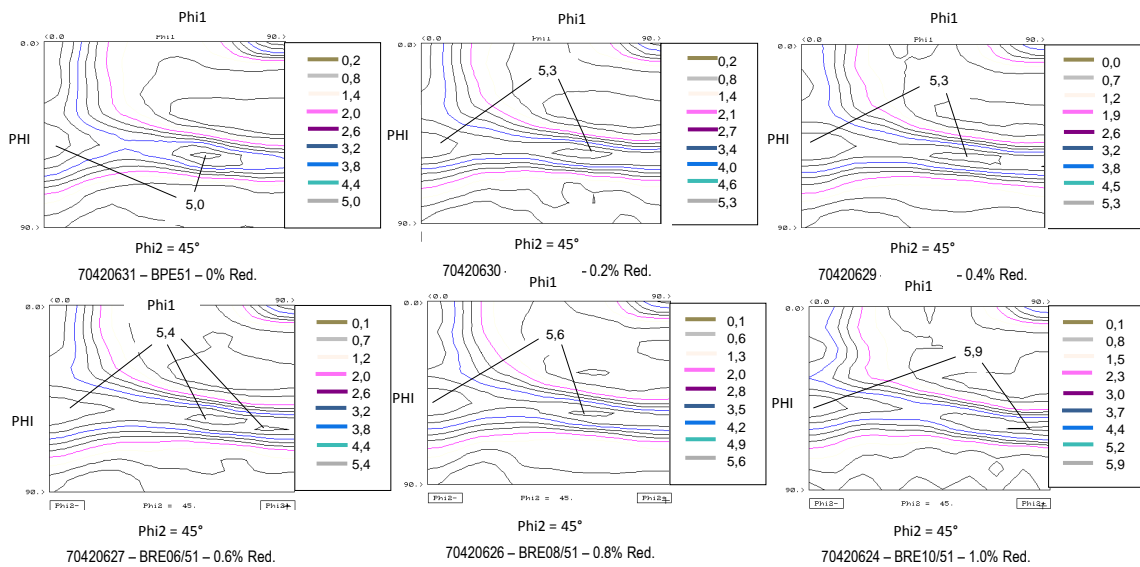


Figura 3. FDO $\text{Phi}2 = 45^\circ$ do aço em estudo na região superficial para as condições BPE e BRE.

A Figura 4 apresenta a macrotextura (FDO) do aço IF após na condição BPE e BRE, medidos na região central (50% da espessura) das amostras por difração de raios-X.

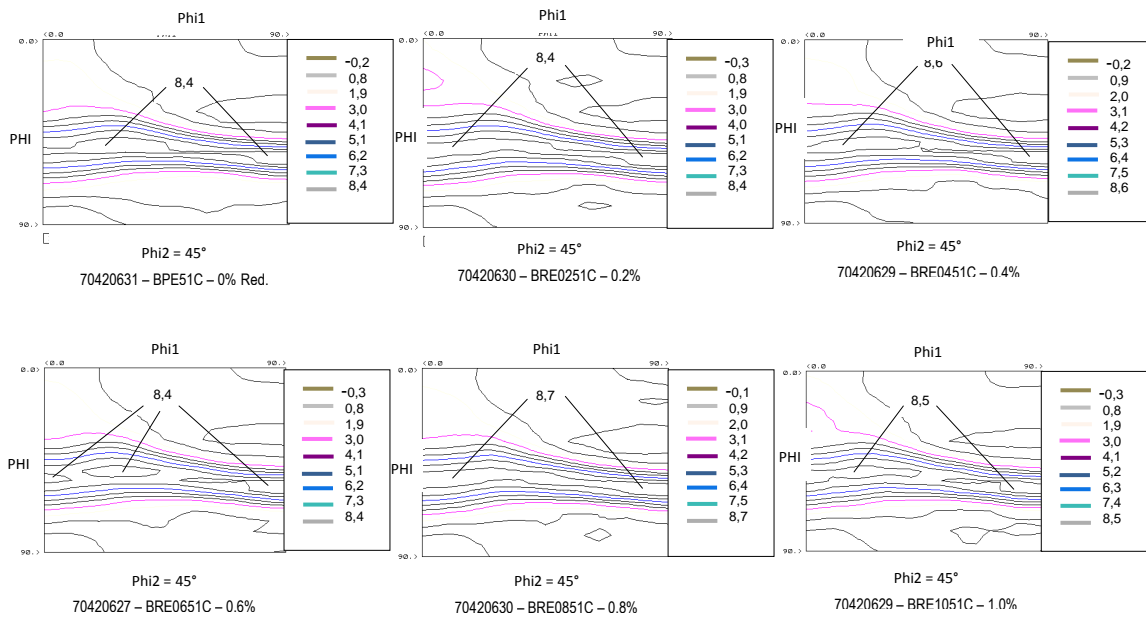


Figura 4. FDO $\Phi_2 = 45^\circ$ do aço em estudo na região central para as condições BPE e BRE.

As Figuras 5 a 8 apresentam a intensidade de textura segundo as fibras Alfa e Gama para as amostras avaliadas com e sem a interferência da relaminação de encruamento, avaliadas na superfície e região central das amostras respectivamente.

A preparação das amostras para análise na região central foi realizada através de lixamento até atingir 50% da espessura da amostra.

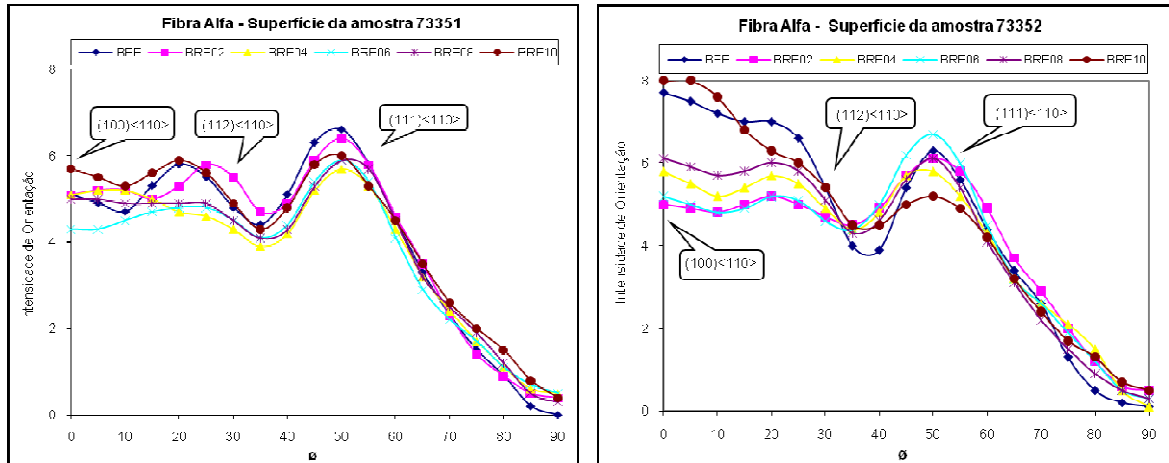


Figura 5. Representação da distribuição de orientação da fibra Alfa (α) na superfície da amostra.

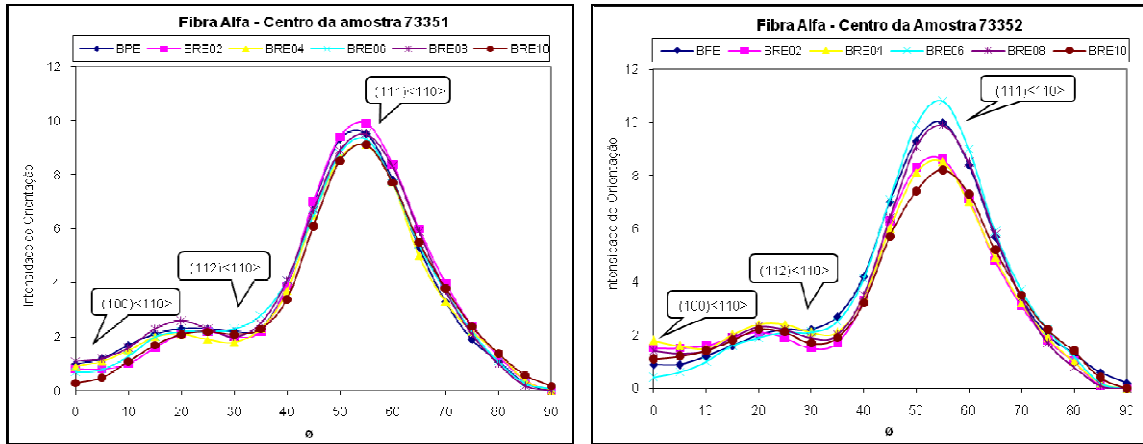


Figura 6. Representação da distribuição de orientação da fibra Alfa (α) na região central da amostra.

Para a fibra Gama (γ), o que se observou foi simplesmente uma atenuação da intensidade de todas as componentes de textura em função da aplicação do encruamento adicional.

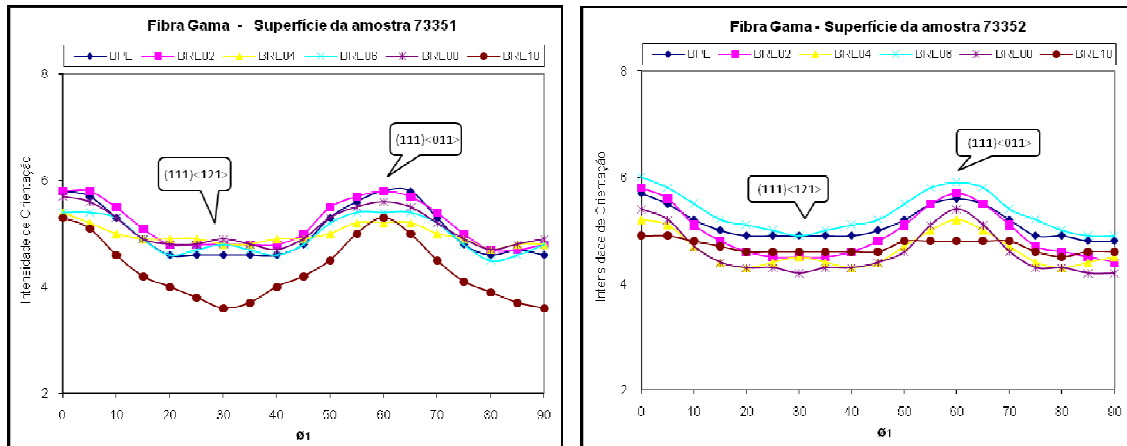


Figura 7. Representação da distribuição de orientação da fibra Gama (γ) na superfície da amostra.

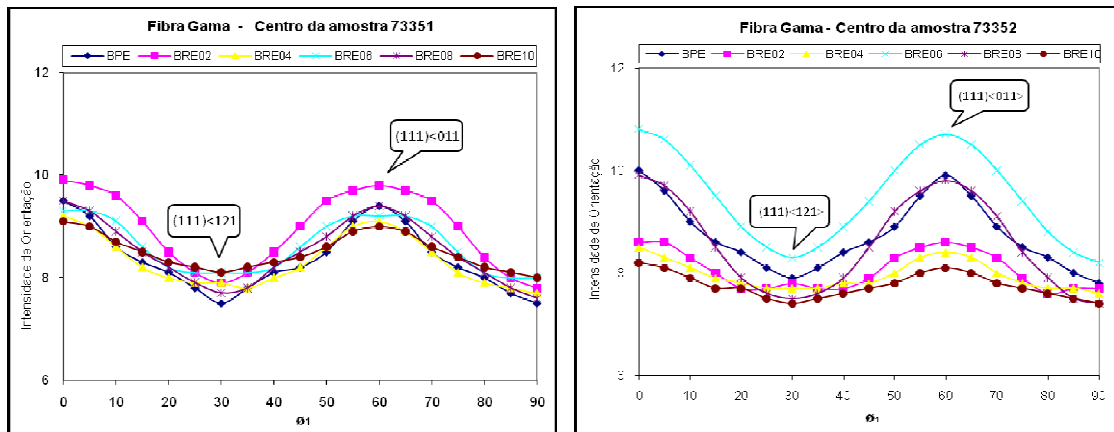


Figura 8. Representação da distribuição de orientação da fibra Gama (γ) na região central da amostra.

A Figura 9 mostra as orientações $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ que, para chapas laminadas de materiais do sistema cúbico, pertencem às fibras DL (Direção de Laminação) e DN (Direção Normal), em coordenadas de Bunge, como citado por Ghosh⁽¹²⁾ A seção de $\phi_2 = 45^\circ$ contém, para o sistema cúbico, todas as fibras e orientações de interesse.

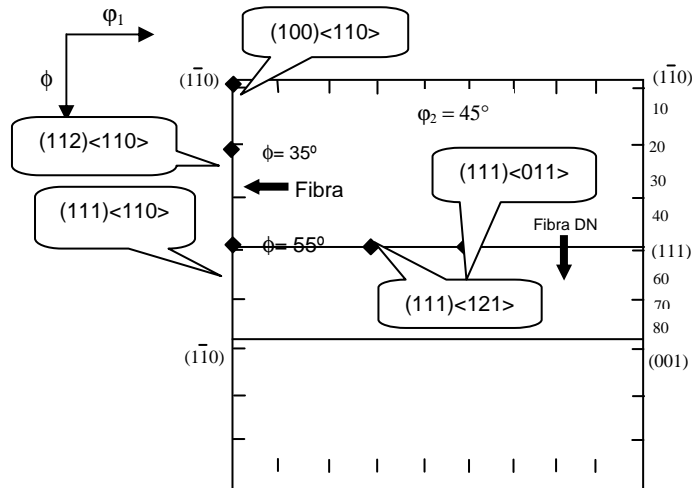


Figura 9. Seção de $\phi_2 = 45^\circ$ onde são mostradas as orientações pertencentes às fibras DL e DN.⁽¹³⁾

3.2 Curva Limite de Conformação

A curva limite de conformação (CLC) é um indicativo do nível e do tipo de deformação que uma chapa metálica pode suportar quando submetida a esforços de conformação. O limite de conformação de uma chapa é definido como sendo o estado em que se inicia o afinamento localizado, o qual culmina na fratura citado por Plaut.⁽¹⁴⁾

Para o levantamento dos dados da curva CLC, empregou-se a máquina de ensaios de estampagem Erichsen do Laboratório de Materiais da Usiminas - Cubatão, com um conjunto de corpos de prova de diferentes geometrias, foi utilizado um punção com raio equivalente de 100 mm, como ilustra a Figura 10. Foi utilizado como lubrificante graxa grafitada, e ensaios realizados de acordo com as Normas Internas da Usiminas.⁽¹⁴⁾

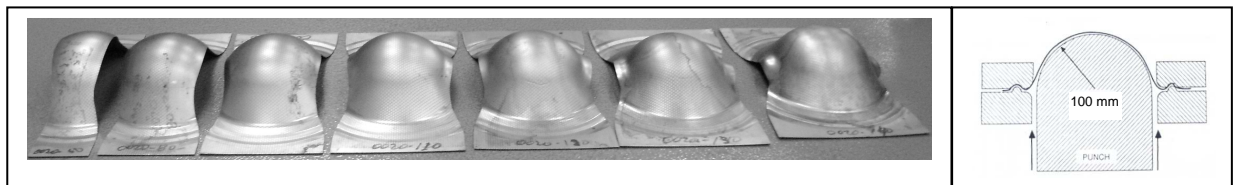


Figura 10. Diferentes geometrias de CP tipo Nakazima empregados para levantamento da CLC.

Na Figura 11, apresenta a curva limite de conformação (CLC) utilizando o método Nakazima para as condições BRE02 e BRE10. Observa-se que os pontos experimentais do material BRE02 e BRE10 correspondem às curvas muito próximas, o que indica que o material após relaminação possui um campo de conformabilidade e uma estampabilidade semelhante à desse mesmo material sem os processamentos de relaminação.

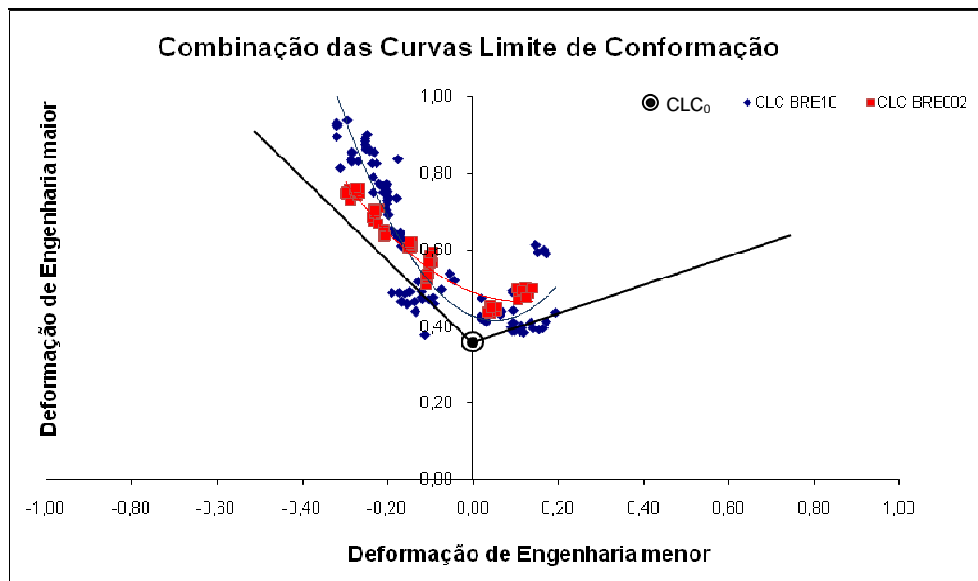


Figura 11. Curvas Limite Conformação das amostras na condição BRE02 e BRE10.

Visando simplificar a determinação experimental e teórica da CLC e, auxiliando na utilização ao nível da fábrica, o NADDRG⁽¹⁵⁾ (North American Deep Drawing Research Group) desenvolveu uma equação empírica (equação de Keeler-Brasier), para estimar o valor de CLC_0 em termos da deformação convencional, dada por:

$$e_0 = (23,3 + 14,2 * t) \left(\frac{n}{0,21} \right) \quad (1.10)$$

Onde: t é a espessura da chapa em mm, com $t < 3,1$ mm.

Aplicando a equação 1.10 de Keeler aos dados do material em estudo, temos:

- Espessura da chapa (aço IF) $t = 0,75$ mm
- Coeficiente de encruamento médio $n_{\text{médio}} = 0,235$

Substituindo na equação 1.10, temos:

$$e_0 = (23,3 + 14,2 * 0,75) \left(\frac{0,235}{0,21} \right)$$

Assim, obtemos o valor de $e_0 = 0,38$. Este valor está coerente com os dados experimentais observados na figura 10.

A Figura 12 compara os resultados experimentais com os de Muschenborn⁽⁸⁾ (na condição de 2% de redução na laminação de encruamento), na CLC de um aço IF-Ti.

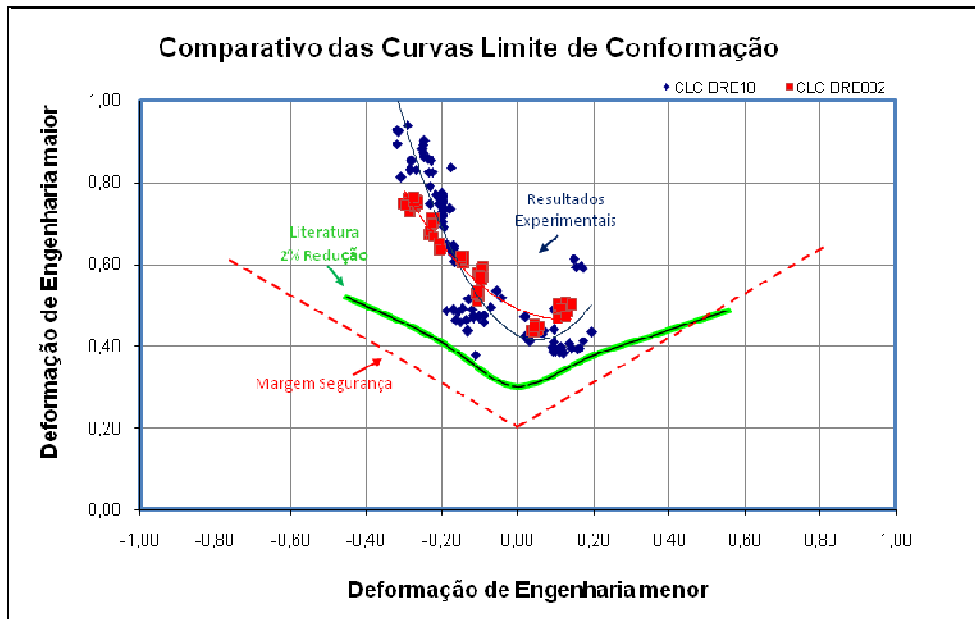


Figura 12. Comparativo das Curvas Limite Conformação experimentais e da literatura.

4 CONCLUSÃO

As experiências realizadas em um aço IF – Norma NBR5915 com espessura de 0,75 mm relaminado, com reduções adicionais de até 1%, conduz aos seguintes resultados e conclusões:

- foi caracterizado o material IF-Ti relaminado em termos de propriedades mecânicas, conforme proposição do estudo através dos ensaios realizados e resultados apresentados;
- o tamanho de grão permaneceu estável durante os vários graus de relaminação aplicados nas BRE's, em torno de 8,0 μm semelhantes ao BPE;
- observou-se que para o grau de 0,6% de redução adicional ultrapassou o limite superior do limite de escoamento, segundo a tolerância da Norma. Portanto, até 0,4% de grau de redução o parâmetro LE fica dentro do estabelecido pela Norma. Referente à $R_{\text{médio}}$ e ΔR , verificou-se relação inversa com o aumento do grau de redução, influenciando nas características de estampabilidade;
- nas FDO's foi verificado aumento da intensidade da textura na superfície, sendo 5,9 para BRE10 e 5,0 para o BPE. Na região central da amostra, conforme esperado, não foi verificada alteração significativa da intensidade da macrotextura do aço IF;
- com base na CLC do material IF após a laminação de encruamento, verificou-se que o mesmo possui um campo de conformabilidade e uma estampabilidade semelhante à desse material sem a relaminação. Através da equação Keeler-Brasier pode-se estimar o valor do $CLC_0 = 0,38$ que está coerente com o valor experimental; e
- se for considerar somente o Limite de Escoamento como critério de avaliação de aplicação do produto conforme a norma, o material deveria ser rejeitado. No entanto, pelos outros procedimentos utilizados durante o estudo, tais como: CLC, textura, coeficientes de anisotropia e coeficiente de encruamento, não necessariamente o desvio deveria ocorrer.

Agradecimentos

Os autores desejam expressar seus agradecimentos aos professores da USP, à USIMINAS pela oportunidade, aos colegas do laboratório pelos ensaios, levantamento das curvas CLC e textura, assim como à gerência do Encruamento pela utilização do equipamento, possibilitando desta forma a concretização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 ALMEIDA, T. J. Estudo de Conformabilidade de Chapas de Aço Livre de Intersticiais em Prensa Hidráulica de Simples Efeito. Dissertação de mestrado UFMG, 1998.
- 2 PINTO, M. C.; KLEIN, L. N. T.; CASTRO, L. C; ALVES, A. C. Desenvolvimento de aços "Interstitial Free (IF)" pela Usiminas - Anais do Seminário da Colam, Belo Horizonte, Nov. 1991.
- 3 FONSECA, T. C. Estampabilidade de chapas de aços IF após a relaminação de encruamento e recozimento. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2003.
- 4 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6673: Produtos planos de aço: determinação das propriedades mecânicas a tração. Rio de Janeiro, 1981.
- 5 EUROPEAN STANDARD. EN 10130:1991+ A1:1998. Cold-rolled low-carbon steel flat products for cold forming - Technical delivery conditions, 1999.
- 6 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5902: Determinação do índice de embutimento em chapas de aço pelo método Erichsen modificado. Rio de Janeiro, 1980.
- 7 BARBOSA, A. H. A.; PEREIRA, J. F. B.; RIBEIRO, C. F. Influência das condições de encharque no recozimento contínuo nas propriedades mecânicas de aços *interstitial free-IF* microligados com Ti. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 56., Belo Horizonte, 2001.
- 8 MUSCHENBORN, W.; SONNE, H. M. Material properties controlling the strain. Conference: Sheet metal forming and formability, proceedings. 10th BIENNIAL CONGRESS, 17-21. Publ.: Portcullis Press Ltd, Redhill, Surrey, p. 193-201, 1978.
- 9 PADILHA, A. F.; SICILIANO JR. F. Encruamento, recristalização, crescimento de grão e textura. São Paulo: ABM, 1996.
- 10 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5915: Chapas finas a frio de aço-carbono para estampagem. Rio de Janeiro, 2002
- 11 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIAL. ASTM E112: Standard test methods for determining average grain size. 1996.
- 12 GHOSH, P.; BHATTACHARYA, B.; RAY, R.K. comparative study of precipitation behavior and texture formation in cold rolled-batch annealed and cold rolled-continuous annealed interstitial free high strength steels.
- 13 ASM – HANDBOOK – Vol. 14B – 2006 – p. 773.
- 14 PLAUT, R. L. Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações. II Workshop sobre textura e Relações de Orientação. IPEN, 2003. P.256-308.
- 15 NOT360026, NOP360112 / 1995 – NORMA TÉCNICA USIMINAS - Cubatão. Ensaio para levantamento da curva limite de conformação mecânica e frente máxima de deformação de materiais metálicos.
- 16 VANDERSCHUEREN, D. The mechanism of recrystallization of IF steel. In: PROCEEDINGS OF INTERNATIONAL FORUM FOR PHYSICAL METALLURGY OF STEELS, 1996, p.145-148.