

EFEITO DE NOVAS ROTAS DE PROCESSAMENTO NA RELAÇÃO TEXTURA CRISTALOGRÁFICA X PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CHAPAS DE AÇO MICROLIGADO AO Nb E Ti¹

Almir Turazi²
Carlos Augusto Silva de Oliveira³
Hamilton Ferreira Gomes de Abreu⁴

Resumo

Materiais policristalinos podem apresentar direções preferenciais dos seus cristais (textura). Esta característica afeta as propriedades mecânicas em algumas direções e pode ser proveniente de vários fatores, entre eles a deformação plástica, o recozimento e o refino do grão ferrítico. O objetivo deste trabalho foi o de estudar o efeito do refino de grão de um de aço microligado ao Nb e Ti na textura cristalográfica e nas propriedades mecânicas. Neste estudo foram comparados os materiais com grãos grosseiros (como produzido atualmente) e com grãos finos (nova rota de processamento desenvolvida). A nova rota desenvolvida refinou o grão ferrítico de 15,3 para 7,7 μm . Os resultados das propriedades mecânicas obtidas, do levantamento das FLC's, do coeficiente de anisotropia normal e planar e a análise de textura pela FDOC indicam uma pequena redução da estampabilidade na região de embutimento, um aumento da estampabilidade na região de estiramento e uma menor anisotropia de propriedades das chapas obtidas pelo novo processamento.

Palavras-chave: Refino de grão; Textura; Estampabilidade.

THE EFFECT OF NEW PROCESSING ROUTES IN THE RELATIONSHIP BETWEEN TEXTURE AND MECHANICAL PROPERTIES ON THE Nb-Ti STEEL

Abstract

Policrystalline materials can generate preferential directions on the crystals (texture). Texture affect the mechanical properties in some directions and it can be originated by the plastic deformation, by the thermal treatment and by the size of ferrite grain. The objective of this study was to analyze the effect of grain size reduction in a Nb-Ti steel, on the texture and mechanical properties. This work compared the initial material and industrial test material. The new developed route showed that the grain decreased from 15,3 to 7,7 μm . The results of the mechanical properties, FLC's and texture analysis by CODF indicate a small reduction on the formability in the inlaying situations, an increase of the formability in the stretching situations and a lower anisotropy of properties of the material generate with new process.

Key words: Grain size; Texture; Formability.

¹ Contribuição técnica ao 63º Congresso Anual da ABM, 28 de julho a 1 de agosto de 2008, Santos – SP, Brasil.

² Mestrando PGMAT, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: almirturazi@hotmail.com.

³ DSc, Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, e-mail: carlosa@emc.ufsc.br.

⁴ DSc, Professor Associado, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade Federal do Ceará, e-mail: hamilton@dem.ufc.br.

1 INTRODUÇÃO

O refino de grão de chapas de aço representa, hoje, um dos meios mais eficazes para a melhoria das propriedades mecânicas com baixos custos de produção. A relação entre o limite de escoamento e o tamanho de grão, por exemplo, já é bem conhecida, podendo ser expressa pela equação de Hall-Petch:⁽¹⁾

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{D}}$$

Onde: σ = Tensão de escoamento; σ_0 = Tensão de fricção interna do material; k = Constante; D = Diâmetro médio dos grãos.

Para se refinar o grão com baixos custos, modificações nos processos são realizadas, como por exemplo, na quantidade de deformação e nas temperaturas de recozimento. Porém, durante processos de conformação e tratamentos térmicos de recozimento, outro fator se torna importante e está relacionado à formação de textura no material. A textura se caracteriza pela existência de uma direção preferencial na disposição dos cristais podendo influenciar nas propriedades dos materiais tanto positivamente como negativamente.⁽²⁾

Nos aços baixo carbono, por exemplo, a alta estampabilidade⁽³⁾ está associada à presença de grande quantidade de planos {111} paralelos à superfície da chapa enquanto a baixa estampabilidade está associada à grande incidência de planos {100} paralelos à superfície da chapa.⁽⁴⁾

A estampabilidade depende da resistência ao afinamento na espessura da chapa durante estampagem. Essa resistência pode ser avaliada pelos coeficientes de anisotropia médio (\bar{R}) e planar (Δr) definidos pelas seguintes equações(2):

$$\bar{R} = \frac{1}{4} (R_{0^\circ} + 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ})$$

$$\Delta r = \frac{1}{2} (R_{0^\circ} - 2R_{45^\circ} + R_{90^\circ})$$

Onde R_{0° , R_{45° e R_{90° são os coeficientes de anisotropia a 0° , 45° e 90° em relação à direção de laminação.

A determinação dos valores de R (fator de anisotropia ou coeficiente de Lankford) em cada direção, podem ser obtidas pela razão entre a deformação verdadeira na largura (ϵ_w) e a deformação verdadeira na espessura (ϵ_t) na região de alongamento uniforme em um corpo de prova submetido a um ensaio de tração:

$$R = \epsilon_w / \epsilon_t = \ln(W_f/W_0) / \ln(t_f/t_0)$$

Para aplicações de estampagem profunda procura-se sempre obter o valor de \bar{R} o maior possível e de Δr o mais próximo de zero.⁽³⁾

Em geral, existe uma excelente correlação entre a anisotropia normal (\bar{R}) e a relação de intensidades (I_{111}/I_{100}) medida por difração de raios-X na superfície da chapa.⁽⁴⁾ Uma das formas de medição dessas intensidades é através da Função de Distribuição de Orientação Cristalográfica (FDOC), que indica a probabilidade de um cristal ter determinadas orientações $\{hkl\}\langle uvw \rangle$.⁽⁵⁾

No caso estudado, o desenvolvimento de novas rotas de processamento termomecânico para refino de grão e melhoria das propriedades mecânicas, gera modificações na textura do material. Com isso pretende-se avaliar o efeito do refino de grão na textura cristalográfica e na variação das propriedades mecânicas de chapas de aço microligado ao Nb e Ti. Este estudo foi realizado em duas etapas. A primeira referente ao desenvolvimento de material com grão mais fino, que não será apresentada aqui, e envolveu a simulação de novas rotas em laboratório e aplicação

na indústria, e a segunda etapa referente à comparação, entre os materiais inicial e final, quanto à textura e propriedades mecânicas.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo foi realizado em chapas de aços fornecidas pela empresa Brasmetal Waelzholz S.A. cuja composição química é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1- Composição química do aço fornecido pela indústria (% em peso).

Aço	C	Mn	P	S	Si	Al	Nb	Ti	N
ML Nb+Ti	0,10	0,9	0,021	0,008	0,28	0,047	0,022	0,074	0,0053

O material foi produzido conforme a norma NBR 6656. Inicialmente, com 2mm de espessura foi laminado a frio e recozido para uma espessura final de 1mm. Este aço, assim produzido será denominado de PA.

O material de grão fino foi produzido introduzindo-se uma têmpera intercrítica antes da laminação a frio com redução de 50% de espessura.⁽⁶⁾ A espessura final desta chapa também foi de 1mm. Este material produzido será denominado de TI.

A caracterização destes dois materiais foi feita através de metalografia, utilizando como reagente nital 2%. Os tamanhos de grãos foram determinados através da norma ASTM E 112-96 em imagens obtidas por microscópio eletrônico de varredura.

Os ensaios realizados foram: microdureza (microdurômetro Vickers marca SHIMADZU – mod. HMV) com carga de 2,9418 N e penetrador piramidal de diamante, ensaios de tração, determinação do coeficiente de anisotropia, textura cristalográfica e levantamento de CLC's (ensaio "Nakazima").

Para os ensaios de tração e anisotropia utilizou-se uma máquina de ensaio de tração-compressão marca EMIC, modelo DL 10000, de acordo com as normas ASTM E8M-97 e ASTM E517-81, respectivamente. Nos ensaios de anisotropia foram utilizados corpos-de-prova (CP) a 0°, 45° e 90° em relação a direção de laminação, com geometria retangular (E517-81 - tipo C).

Para a determinação da textura, as amostras foram cortadas, em retângulos de 20X20 mm com indicação da direção de laminação. As superfícies das amostras foram lixadas até lixa #600 e atacadas com uma solução de ácido fluorídrico diluído em peróxido de hidrogênio 30%. Utilizou-se, para a análise, um aparelho de raios-X, com câmara de textura (equipamento: Philips XPERT –XPRO) e radiação Co (com monocromador) $K\alpha$ ($\lambda = 1,79\text{\AA}$) com filtro de ferro. A Função de Distribuição de Orientação Cristalográfica (FDOC) de cada amostra foi calculada com software LABOTEX que usa o processo conhecido como ADC.

Com o ensaio proposto por Nakazima (norma ASTM E2218-02) pode-se avaliar os estados de deformações desenvolvidos nas chapas estampadas e assim obter as curvas limites de conformação (CLC) dos materiais.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização

A Figura 1 mostra a microestrutura obtida por microscopia eletrônica de varredura (MEV) do aço ML Nb+Ti na condição PA. O material apresenta uma matriz ferrítica de granulação grosseira.

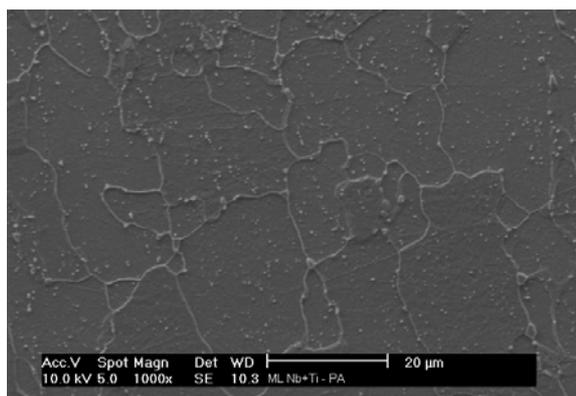


Figura 1- Microestrutura do material na condição PA

Os resultados do tamanho de grão e de microdureza Vickers do aço na condição PA são mostrados nas Tabelas 2 e 3. Nas Tabelas 4 e 5 estão dispostos os resultados dos ensaios de tração e anisotropia. Esta caracterização do material serviu de base para avaliação do novo material produzido, com grão fino, condição TI.

Tabela 2- Tamanho de grão do aço na condição PA.

TAMANHO DE GRÃO (μm)	DESVIO PADRÃO
15,3	3,4

Tabela 3- Microdureza Vickers do aço na condição PA.

MICRODUREZA (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
168	4

Tabela 4- Resultados do ensaio de tração do aço na condição PA.

PROPRIEDADES	VALORES
Se (MPa)	418
Sr (MPa)	493
e_p (%)	18,65

Tabela 5- Resultados do ensaio de anisotropia do aço na condição PA.

PROPRIEDADES	VALORES
Se-0° (MPa)	425
Se-45° (MPa)	423
Se-90° (MPa)	465
n_{0°	0,14
n_{45°	0,11
n_{90°	0,11
\bar{n}	0,12
r_{0°	1,20
r_{45°	2,00
r_{90°	1,20
\bar{R}	1,59
Δr	-0,80

O valor de \bar{R} indica que este aço possui propriedades favoráveis a estampagem profunda (\bar{R} maior que 1, conforme mencionado anteriormente).⁽³⁾ O valor de Δr de -0,80 indica que há possibilidade, durante a estampagem, de formação de “orelhas”, devido a anisotropia de propriedades no plano da chapa. Quanto mais próximo de zero for este valor menor é esta possibilidade.

Na Figura 2 está apresentado o resultado da FDOC do material na condição PA para $\phi_2=45^\circ$. A Figura 3 mostra as intensidades das orientações principais analisadas. Tal textura representa um material com boas características em aplicações de estampagem profunda, já que para tal deseja-se sempre textura $\{1\ 1\ 1\}$.

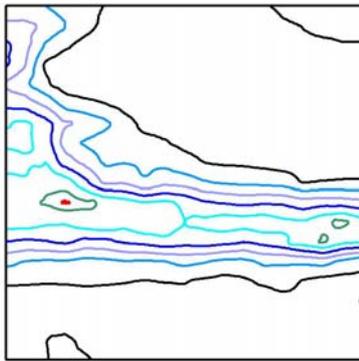


Figura 2- FDOC do aço na condição PA para a seção de $\phi_2=45^\circ$.

No	ODF	Orientation
1	5,507	{ 1 1 1 } < 0 1 -1 >
2	5,388	{ 1 1 1 } < -1 -1 2 >
3	5,064	{ 1 1 2 } < 1 -1 0 >
4	3,550	{ 1 1 3 } < 1 -1 0 >
5	2,315	{ 2 3 3 } < 0 1 -1 >
6	2,064	{ 0 0 1 } < 1 1 0 >
7	1,479	{ 3 2 3 } < 1 -3 1 >
8	1,191	{ 1 0 1 } < 5 2 -5 >
9	1,035	{ 1 2 2 } < 2 -2 1 >
10	1,002	{ 0 1 3 } < 1 0 0 >
11	0,976	{ 5 2 5 } < 1 -5 1 >
12	0,922	{ 1 1 0 } < 0 0 1 > goss
13	0,530	{ 1 1 0 } < 1 -1 1 >
14	0,510	{ 0 0 1 } < 1 0 0 > cube

Figura 3 - Resultados da intensidade das principais orientações.

A intensidade máxima foi de 5,5 para a orientação $\{1\ 1\ 1\} \langle 01-1 \rangle$ e de 5,3 para a orientação $\{1\ 1\ 1\} \langle -1-1\ 2 \rangle$. Este fato representa resistência ao afinamento da espessura e alguma possibilidade de formação de “orelhas” no processo de estampagem profunda,⁽²⁾ conforme já observado no ensaio de anisotropia.

A curva de limite de conformação levantada para o material na condição PA está apresentada na Figura 4. Ela representa as combinações entre as deformações principal, máxima e mínima (ϵ_y e ϵ_x , respectivamente), a que o material pode ser submetido sem que haja estrição.

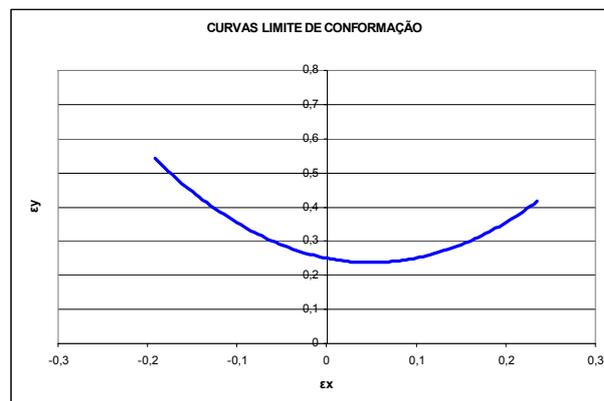


Figura 4 – CLC - material ML Nb+Ti PA

3.2 Comparativo entre o material TI e o PA

Nas Figuras 5 e 6 são apresentadas as micrografias do aço ML Nb+Ti após têmpera intercrítica e após recozimento, respectivamente.

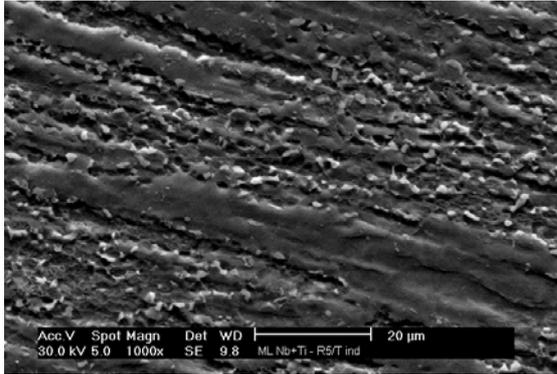


Figura 5- Aço ML Nb+Ti (MP) aquecido a 710°C e resfriado em banho metálico Pb+Bi (Equipamentos industriais).

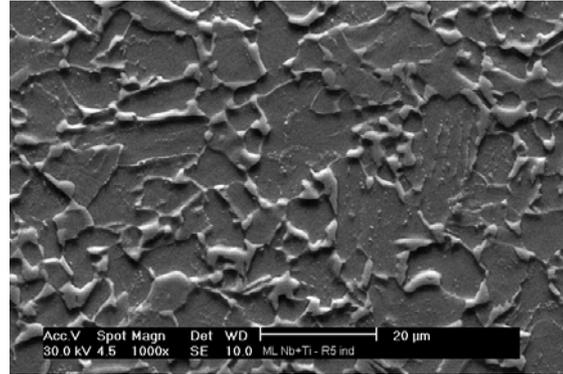


Figura 6- Aço ML Nb+Ti – Condição TI (Equipamentos industriais).

Percebe-se que o material final produzido, na condição TI, apresenta homogeneidade de forma e distribuição de tamanho de grãos ferríticos. Essa disposição tem grande influência na ductilidade e resistência mecânica.

Com o novo processo de fabricação submetido ao aço ML Nb+Ti na indústria, gerou-se os resultados para tamanho de grão, microdureza, ensaio de tração e ensaio de anisotropia mostrados nas Tabelas 6 a 9, respectivamente.

Tabela 6- Tamanho de grão – condição TI (teste industrial).

TAMANHO DE GRÃO (µm)	DESVIO PADRÃO
7,1	0,8

Tabela 7- Microdureza Vickers – condição TI (teste industrial).

MICRODUREZA (HV - 2,9418 N)	DESVIO PADRÃO
190	5

Tabela 8- Resultados do ensaio de tração uniaxial - condição TI (teste industrial).

PROPRIEDADES	VALORES
Se (MPa)	392
Sr (MPa)	483
ep (%)	16,49

Tabela 9- Resultados do ensaio de anisotropia - condição TI (teste industrial).

PROPRIEDADES	VALORES
Se-0° (MPa)	415
Se-45° (MPa)	436
Se-90° (MPa)	475
n0°	0,13
n45°	0,10
n90°	0,09
\bar{n}	0,11
r0°	1,48
r45°	1,12
r90°	1,60
\bar{R}	1,33
Δr	0,41

O processo industrial atualmente utilizado apresenta grãos de 15,3 μm e microdureza de 168 HV, como mostrado nas Tabelas 2 e 3. A nova rota apresentou, então, uma redução de 54 % no tamanho de grão e um aumento significativo de dureza (22 HV).

Os resultados do ensaio de tração não apresentaram melhoras como era o esperado, tendo até pequena redução. No caso do limite de escoamento (S_e) esta redução alcançou 6%. Entretanto, ao observar-se os valores de limite de escoamento obtidos pelos ensaios de anisotropia (Tabelas 5 e 9), verifica-se que os valores dos limites de escoamento a 45 e 90° com a direção de laminação apresentaram maiores valores para o material TI de grão mais fino.

O resultado do limite de escoamento, S_e , a 0° com a direção de laminação não alcançou o valor esperado em relação a grande redução do tamanho de grãos. Este fato deve estar associado com a textura cristalográfica do material, que aumentou o limite de escoamento na direção de forte orientação {111} (Figuras 2 e 3 e 7 e 8). A redução da textura {111} na amostra TI diminuiu o limite de escoamento a 0° com a direção de laminação e aumentou nas outras direções (Tabelas 5 e 9). Um outro indicativo do efeito da textura são os valores de microdureza obtidos (Tabelas 3 e 7), pois, apresentaram uma elevação sensível nas amostras com grãos mais finos. Este efeito se deve ao fato da microdureza não ser uma propriedade direcionada, como os valores obtidos do ensaio de tração e, portanto, serem pouco afetados pela textura.

O coeficiente de encruamento normal (\bar{n}) calculado para o material não sofreu variação em função do refino de grão, indicando que em condições de estiramento o material deve manter seus limites de deformação.

Já para o coeficiente de anisotropia normal (\bar{R}) os resultados mostram uma redução com a nova rota, de 1,59 para 1,33, sendo indicativo de limites de deformação máxima menores em regiões com situações de embutimento profundo, em comparação ao aço na condição PA. O valor para Δr encontrado (0,41) é mais próximo de zero do que o obtido para o material na condição PA, que foi de -0,80, indicando que haverá uma menor possibilidade de formar “orelhas” durante a estampagem.

A textura está representada na Figura 7 através da FDOC e na figura 8 através das intensidades das orientações principais.

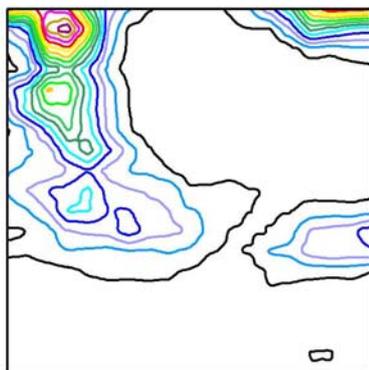


Figura 7- FDOC do aço na condição TI para a seção de $\phi_2=45^\circ$.

LaboTex - Texture - Qualitative Analysis Report		
User: hamilton		
Project: Demo		
Sample: SCAB		
Job: 2		
Date: 2007/03/09		
Time: 15:53:02		
No	ODF	Orientation
1	10.827	{ 0 0 1 } < 1 1 0 >
2	4.472	{ 1 1 1 } < -1 -1 2 >
3	2.243	{ 1 1 3 } < 1 -1 0 >
4	1.573	{ 1 1 2 } < 1 -1 0 >
5	1.261	{ 3 2 3 } < 1 -3 1 >
6	0.864	{ 1 1 1 } < 0 1 -1 >
7	0.665	{ 2 3 3 } < 0 1 -1 >
8	0.647	{ 1 2 2 } < 2 -2 1 >
9	0.521	{ 0 0 1 } < 1 0 0 > cube
10	0.521	{ 0.00, 0.00, 0.00 } Cursor !!!
11	0.514	{ 1 1 0 } < 1 -1 2 > brass
12	0.483	{ 1 1 0 } < 1 -1 1 >
13	0.323	{ 1 0 1 } < 5 2 -5 >
14	0.293	{ 1 2 3 } < 4 1 -2 >

Figura 8- Intensidade das principais orientações.

Percebe-se que a orientação $\{1\ 1\ 1\}$, desejada para material com boa estampabilidade, apresenta intensidade 4,4 e não é a orientação principal. A orientação preferencial do material TI é a $\{0\ 0\ 1\}$ com intensidade igual a 10,827. Isto indica estampabilidade inferior com relação ao material PA. Esta indicação de estampabilidade inferior também pode ser observada nos valores de \bar{R} obtidos.

Com relação ao ensaio Nakazima, a curva de limite de conformação do material na condição TI está disposta na Figura 9. A curva levantada na caracterização inicial do material também está mostrada para efeito de comparação.

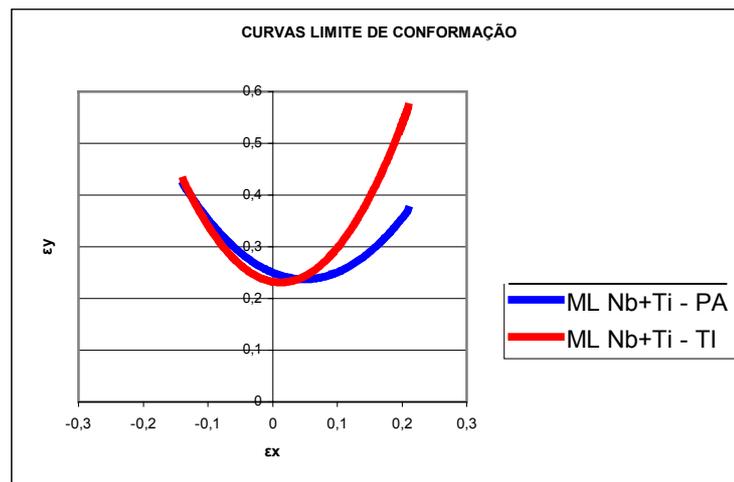


Figura 9- Curvas limite de conformação (linha de tendência 2° grau) - Material nas condições PA e TI.

Nota-se a melhoria, em boa parte do gráfico, dos limites de deformação para o aço ML Nb+Ti submetido ao teste com a nova rota proposta (TI). Mesmo com o material não apresentando variação significativa do seu coeficiente de encruamento normal (\bar{n}), calculado no ensaio de anisotropia, em situações que simulam estiramento (direita do gráfico) seus limites de deformação encontrados no levantamento das CLC's foram superiores. Isto está relacionado com a homogeneidade de forma e distribuição de tamanho dos grãos do material que, como já mencionado, tem forte influência na estampabilidade de aços.

Como previsto através da análise de textura e do cálculo de \bar{R} feito no ensaio de anisotropia, onde houve redução no valor de \bar{R} de 1,59 para 1,33, através das CLC's também se observa, que em algumas situações de embutimento profundo (esquerda do gráfico), houve pequena redução dos limites de deformação.

4 CONCLUSÃO

O grão mais refinado não melhorou significativamente as propriedades mecânicas como era o esperado e apresentou textura não favorável para processos de estampagem profunda.

Com a análise feita através dos resultados das propriedades mecânicas obtidas, do levantamento das CLC's, do coeficiente de anisotropia normal e planar e a análise de textura pela FDOC concluiu-se que o novo processo gerou uma pequena redução da estampabilidade na região de embutimento, um aumento da estampabilidade na região de estiramento e uma menor anisotropia de propriedades das chapas obtidas pelo novo processamento.

Agradecimentos

A Brasmetal Waelzholz S.A. Indústria e Comércio, em especial, ao doutor Antenor Ferreira Filho, pelo fornecimento de material, pelos ensaios industriais e pelo incentivo.

Ao CNPq, pelo financiamento do projeto.

A CAPES, pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

- 1 DIETER, G.E. **Metalurgia Mecânica**. 2ª ed., Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1981.
- 2 FREITAS, F. N. C.; RIBEIRO, J. E. M.; ABREU, H. F. G. **Adequabilidade das condições de laminação de um aço baixo-carbono à estampagem profunda**. Jornadas SAM, CONAMET, Simpósio Matéria, 2003, p. 278-281.
- 3 FILHO, E. B.; ZANAGLIA, C. A. C.; BUTTON, S. T.; GOMES, E.; NERY, F. A. C. **Conformação plástica dos metais**. 4ª ed., Editora Unicamp, Campinas-SP, 1991, cap.5.
- 4 RAY, R. K.; JONAS, J. J.; HOOK, R. E. **Cold rolling and annealing textures in low-carbon and extra low-carbon steels**. International Materials Reviews, v. 39, 1994, p. 129-171.
- 5 MAGNABOSCO, A. S. **Influência da microestrutura na formação da textura de chapas produzidas por recozimento rápido**. Tese de mestrado, IME, Rio de Janeiro, 1986.
- 6 TURAZI, A.; OLIVEIRA, C. A. S. **Refino de grão de aços C-Mn e ARBL através de processamento termomecânico**. 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, 2007.