

EFEITO DA TEXTURA CRISTALOGRÁFICA NA ANISOTROPIA PLÁSTICA PLANAR EM AÇOS PARA ESTAMPAGEM PROFUNDA¹

Antenor Ferreira Filho²
Ronald Lesley Plaut³
Mauricio Franco Bomfim⁴
Nelson Batista de Lima⁵

Resumo

A conformação de chapas, dentre os processos que ocasionam mudança de forma de um material metálico, está entre os processos que experimentou um dos maiores desenvolvimentos nos últimos anos. A crescente demanda da indústria automobilística no sentido de requisitar um material mais funcional e que proporcione uma melhor estética aos seus produtos foi a principal força motriz deste desenvolvimento. Ao se produzir peças simétricas axialmente por estampagem profunda de um blank circular, a anisotropia plástica planar conduz a formação do “orelhamento”, bem como diferenças na espessura de parede. Para uma melhor conformação e otimização no consumo, um material isotópico apresentaria vantagens, garantindo um fluxo uniforme de material em todas as direções. Isto pode ser atingido através do controle de textura do material. O presente trabalho tem como objetivo principal analisar o efeito da textura cristalográfica na anisotropia, em aços de baixo teor de carbono laminados a frio e recozidos, utilizados em processos de estampagem.

Palavras-chave: Textura cristalográfica; Anisotropia; Estampagem.

¹ Contribuição Técnica ao XXXXII Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos da ABM; Santos – SP, 25 a 28 de outubro de 2005.

² Engenheiro Metalurgista e de Produção, MSc., Diretor Industrial da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. – afilho@brasmetal.com.br

³ Professor Associado, PhD.– EPUSP- S.Paulo – rlplaut@usp.br.

⁴ Engenheiro Metalurgista, Supervisor de Engenharia e Planejamento da Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. – mbomfim@brasmetal.com.br.

⁵ Dr.Tecnologista Sênior IPEN/CNEN-SP - nblima@net.ipen.br

1 INTRODUÇÃO

Texturas em chapas laminadas não são somente de interesse acadêmico, são também muito importantes sob o ponto de vista prático e econômico para uma série de aplicações. As texturas sempre se tornam significativas quando as propriedades anisotrópicas são fundamentais para o produto final. A existência das texturas, entendidas como sendo um desvio da distribuição randômica (ao acaso), são mais uma regra do que uma exceção,⁽¹⁾ inclusive no caso de chapas laminadas. Estas texturas significam que, no agregado policristalino, os grãos se apresentam com orientações preferenciais. A textura é, portanto, a distribuição de todas as orientações dos grãos (cristais) dentro da amostra. Texturas descritas por $\{hkl\}\langle uvw \rangle$ significando que os planos $\{hkl\}$ estão paralelos ao plano da chapa e que a direção $\langle uvw \rangle$ esteja alinhada com a DL, ocorrem nos materiais em diferentes estágios do processamento, como na deformação plástica, recristalização e crescimento de grão, transformação de fases, etc.⁽²⁾ Distinção deve ser feita entre a macrotextura e a microtextura. Na macrotextura os grãos de um policristal são tratados como uma população estatística, sem levar em conta quaisquer relações entre grãos. Na microtextura, a natureza e a orientação relativa entre grãos individuais dentro da população são tratadas com maiores detalhes.^(1,3,4)

No caso de chapas de aço de baixo teor de carbono destinadas a estampagem profunda, a estampabilidade depende largamente da anisotropia e, em consequência, da macrotextura. Os elevados requisitos relativos da estampabilidade têm conduzido à necessidade de marcante redução de todos os elementos residuais, e também no sentido de se obter aços com baixo limite de escoamento (LE). Tal fato leva na direção dos aços livres de intersticiais (IF) e dos aços ELC (*extra low carbon*) e os ULC (*ultra low carbon steels*). Em comparação com estes tipos de aços, os aços microligados ao nióbio ou titânio, apresentam valores mais elevados de LE e, portanto, afetando a estampabilidade. Assim, resumidamente, a estampabilidade é afetada pelo LE, pelo coeficiente de anisotropia (r e Δr) e pelo coeficiente de encruamento (n), aspectos estes discutidos em maior detalhe em outras publicações.^(1,4,5)

Também é de conhecimento geral que, para valores crescentes de n (na faixa $0.14 < n < 0.26$), verifica-se um aumento correspondente de r (na faixa de $0.9 < r < 2.2$). Portanto, valores crescentes de r e de n , em conjunto com o decréscimo no valor do LE, conduzem a melhorias na estampabilidade.

Na produção de peças estampadas com geometria axi-simétricas (tipo copo), partindo de um esboço circular (*blank*), observa-se a formação de um “orelhamento” em conjunto com uma variação na espessura da parede do copo, apesar de que se tenha aplicado uma tensão uniforme e simétrica através do prensa chapa. Este orelhamento conduz a indesejáveis variações na espessura da parede do copo, além de requerer operações subseqüentes de corte ou usinagem.

No caso de aços baixo carbono, as orelhas encontram-se situadas a 0° e 90° da direção de laminação (DL), conduzindo a 4 orelhas. No caso dos aços de maior resistência (maior LE), estes apresentam orelhas a 30° , 45° ou ainda a 75° da direção de laminação, conduzindo a 6 ou até 8 orelhas.⁽⁶⁻⁹⁾

A formação de orelhas é, portanto, causada pelo escoamento diferenciado em relação à direção de laminação. No caso dos aços para estampagem, um balanceamento entre

as componentes de textura E e F, como veremos a seguir na figura 3, conduz a menores valores de Δr .⁽¹⁰⁾

Portanto é de grande interesse que quando se objetive uma melhor estampabilidade, se busque uma baixa anisotropia planar (Δr), assegurando um escoamento uniforme em todas as direções.

Um aço “quase-isotrópico”, portanto não tendo orelhas, pode ser obtido em processos onde o grau de redução a frio, que precede o recozimento, seja baixo (25% em espessura) ou muito alto (85% em espessura) evitando assim o orelhamento, embora seja um processo de risco e inapropriado para fins industriais.⁽¹¹⁾ Outra forma mais segura é através do uso de aços com composições químicas contendo baixos teores de carbono e adições de microligantes do tipo nióbio ou/ e titânio, pois, nestes aços, formam-se precipitados (coerentes e/ou incoerentes) que interferem (atrasam) a cinética de recristalização.⁽¹²⁾

Os valores de r , determinados em ensaios de laboratório, conforme norma ASTM E517-2000, possibilitam obter a relação entre a deformação na direção transversal e na espessura de um corpo de prova de tração, medido em três direções (na direção de laminação, na transversal a laminação e a 45° da direção de laminação), obtendo-se, respectivamente, r_0 , r_{90} r_{45} . A combinação destes, resulta nos parâmetros r_m (anisotropia normal) e Δr (anisotropia planar), como ilustra a Figura 1.

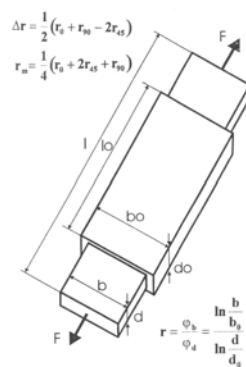


Figura 1. Definições dos parâmetros de Lankford para r_m (anisotropia normal) e Δr (anisotropia planar).⁽⁴⁾

Nos copos, em particular nas regiões que apresentam maiores valores de r (maior resistência ao afinamento), verifica-se um escoamento lateral do material vindo das áreas adjacentes, formando as orelhas, com simultânea redução na espessura da chapa.

A anisotropia planar Δr (como indicado na Figura 1), tem relação direta com a altura do orelhamento, como ilustra a Figura 2. Normalmente, verifica-se que para $\Delta r > 0$, o orelhamento ocorre a 0° e 90°, enquanto que para $\Delta r < 0$ o orelhamento ocorre a 45°, em relação à DL.

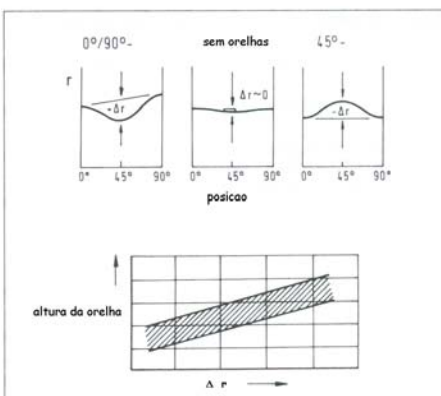


Figura 2. Relação entre a anisotropia planar e o orelhamento. ^(12,13)

O desenvolvimento de texturas em chapas de aço laminadas a frio e recozidas é controlado tanto pela composição química, como pelos parâmetros de processo que incluem o tamanho de grão a textura e a temperatura de bobinamento do laminado a quente, além do grau de redução a frio, velocidade e temperatura de aquecimento no recozimento.

Com o objetivo de influenciar na intensidade da anisotropia planar de aços para estampagem profunda, o grau de laminação a frio (redução a frio) é um dos fatores de importância decisiva, requerendo, de acordo com o tipo do aço, reduções acumuladas superiores a 75%.^(10,14-16) Controles adicionais, efetuados na temperatura final de laminação a quente (e na velocidade de esfriamento), interferem na cinética de precipitação quer do AlN, Nb (C,N) ou do Ti (C,N), refinando o tamanho de grão austenítico, podendo vir a propiciar a formação de uma textura mais forte no componente {111}. No caso do Nb em solução sólida, este terá efeito retardador muito acentuado na recristalização. Para diferentes níveis de redução a frio haverá a correspondente temperatura de recristalização que evite/minimize a formação do orelhamento, inclusive função da composição e do tipo de recozimento disponível (em caixa ou contínuo).⁽¹⁷⁾

A distribuição de orientações dos cristais em materiais policristalinos é chamada de textura. Esta textura é descrita tradicionalmente pelas figuras de pólos (que apenas revelam aspectos qualitativos), e, modernamente, pelas figuras de distribuição de orientação (FDO), oriundas das primeiras, através de transformações que envolvem funções esféricas.^(18,19) Assim, a partir de quatro figuras de pólos (incompletas) tipicamente do tipo (200), (220), (111) e (310), obtêm-se as FDO's, representadas em um espaço Euleriano (formado por três ângulos φ_1 , Φ e φ_2). As informações nas FDO's estão contidas em um espaço tridimensional, o qual normalmente é apresentado em um conjunto de seções paralelas de $0 < \varphi_2 < 90^\circ$. A seção $\varphi_2=45^\circ$ contém as informações características de maior relevância e necessárias para uma análise quantitativa mais detalhada da intensidade destas texturas. De maior importância, destacam-se as fibras α (que têm a direção $\langle 011 \rangle // DL$) e a fibra γ (que têm a direção $\langle 111 \rangle // DN$).^(15,19-21)

A medição da textura (macrotextura) é, usualmente, efetuada em um goniômetro de textura, empregando a difração de raios-X (mais comum) ou de nêutrons (menos freqüente). Por outro lado, para a medição da orientação relativa entre grãos (em uma

área reduzida), o tamanho e distribuição de grãos individuais, emprega-se a difração de elétrons em microscópio eletrônico de varredura (MEV) (micro e meso-textura).^(1,22) Na análise de texturas, a Figura 3 é empregada com freqüência.

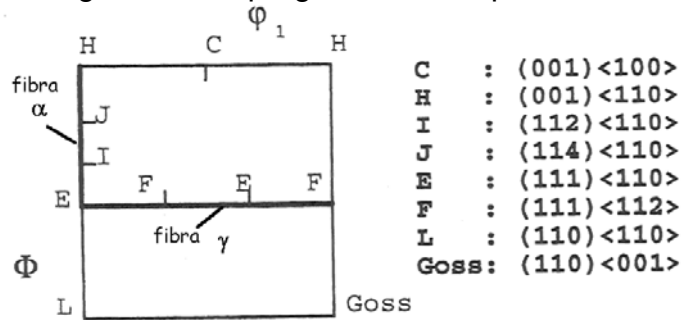


Figura 3. Componentes de textura mais importantes ($\phi_2 = 45^\circ$)

Para o estudo da anisotropia planar, no caso de aços microligados, quando do controle sobre o orelhamento, destaque especial deve ser dado a relação entre as intensidades entre os componentes de textura I e E, ou seja a relação entre $\{112\}\langle 110\rangle / \{111\}\langle 110\rangle$, salientando a necessidade do controle sobre estes componentes, como ilustra a Figura 4. Observa-se que um balanceamento entre estes componentes conduz a um baixo orelhamento. Vários trabalhos efetuados tanto pelo grupo do Prof. Van Houtte,^(6,23) como por outros pesquisadores,^(9,24) demonstraram que a presença acentuada do componente E ($\{111\}\langle 110\rangle$) está associada à formação acentuada de copos com 6 orelhas.⁽¹²⁾

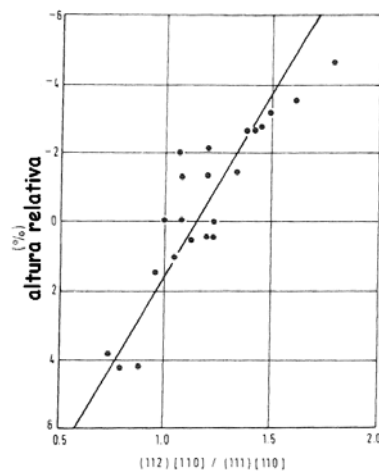


Figura 4. Relação entre componentes de textura (I/E) e altura relativa de orelhamento em um aço com Ti.^(12,13,25)

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho visa analisar um conjunto de aços, procurando relacionar diferentes parâmetros operacionais com as macrotexturas e seu desempenho no sentido de minimizar a formação de orelhas. Foram utilizadas 4 corridas de chapas de aço de

baixo teor de carbono, com espessuras variando de 0,2 a 1,25 mm. A Tabela 1 apresenta a composição química dos materiais estudados.

Tabela 1. Composição química (% em peso) dos aços estudados.

Aço	C	Mn	Si	P	S	Al	N	Microligante
1	0,040	0,25	0,070	0,009	0,008	0,027	0,0056	-
2	0,039	0,31	0,005	0,018	0,013	0,043	0,0037	-
3	0,040	0,25	0,007	0,010	0,004	0,042	0,0031	0,018
4	0,065	0,34	0,014	0,014	0,007	0,045	-	-

Os materiais foram laminados a frio (exceto o aço 4 que já foi adquirido na condição de laminado a frio), na empresa Brasmetal Waelzholz, em um laminador industrial, tipo quadro, reversível, com cilindros de trabalho de diâmetro 280 mm, utilizando como meio de resfriamento uma emulsão aquosa. Após a laminação foram realizados tratamentos térmicos de recristalização em um forno industrial de alta convecção (atmosfera de 100% Hidrogênio), seguido de passe de acabamento de aproximadamente 1,0 % de redução na espessura.

O aço 1, é um aço de baixo carbono de boa estampabilidade, utilizado neste trabalho somente para fins comparativos de textura. Este material foi laminado a frio de uma espessura inicial de 2,0 mm (70% em espessura) e recozido a 700°C pelo período de 3 horas.

O aço 2, é um aço de baixo teor de carbono de espessura nominal 0,20 mm. Ele foi adquirido da usina na condição de laminado a quente na espessura de 2,0 mm. Este aço foi laminado a frio na redução de 90% em espessura e recozido em caixa a uma temperatura de 680°C por um período de 3 horas.

O aço 3 foi adquirido da usina siderúrgica na condição de laminado a quente na espessura de 2,0 mm e foi laminado a 67% em espessura e recozido em caixa a 700°C pelo período de 8 horas.

Finalmente, o aço 4 é um aço de baixo teor de carbono para estampagem de procedência importada, obtido por recozimento contínuo.

A textura cristalográfica (macrot textura) dos diferentes aços estudados foi determinada usando a técnica de difração de raios-X. As análises foram realizadas em um goniômetro de textura horizontal da marca Rigaku, instalado no IPEN/CNEN-SP, com radiação de Mo K α 1 ($\lambda=0,7093\text{Å}$). Para a obtenção das FDO (função distribuição de orientações) foi empregado um programa desenvolvido por pesquisadores do laboratório de difração de raios-x do IPEN. As análises foram realizadas na superfície das chapas nas condições de produto acabado.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração universal da marca Zwick modelo-1475, equipada com garras hidráulicas e extensômetro. Os corpos de prova para o ensaio foram preparados por estampagem em uma prensa automática, em seguida suas bordas foram lixadas em dispositivo próprio, para eliminar o encruamento gerado durante o processo de estampagem. As dimensões dos corpos de prova utilizados estão de acordo com norma ABNT NBR 6673 -1980. A partir do ensaio de tração foram determinados os valores de: limite de escoamento, limite de resistência, alongamento total, coeficiente de encruamento (n) coeficiente de anisotropia plástica

normal (r) e coeficiente de anisotropia plástica planar (Δr). A determinação dos valores de n e r do trabalho foram realizados para deformações entre 10% e 20%, em intervalos de 2% de deformação.

Foi utilizado o ensaio Swift para avaliar o grau de “orelhamento” dos aços estudados. O ensaio foi conduzido em uma máquina de embutimento Erichsen onde se utilizou como corpo de prova um blank de diâmetro 64 mm. Para conformação do copo se utilizou um punção plano com velocidade de 600 mm/min e um prensa chapas com força de 6,0 KN. O grau de orelhamento (O), foi avaliado através da relação de altura entre picos e vales medidos em quatro pontos do copo (média de quatro medidas). O grau de orelhamento (altura relativa O %) e o valor absoluto (Z_h em mm) foram avaliados conforme as equações abaixo:

$$Z_h(\text{mm}) = P - V$$

$$O\% = \frac{(P-V)}{((P+V)/2)} \times 100$$

A Figura 5 ilustra a forma de medição

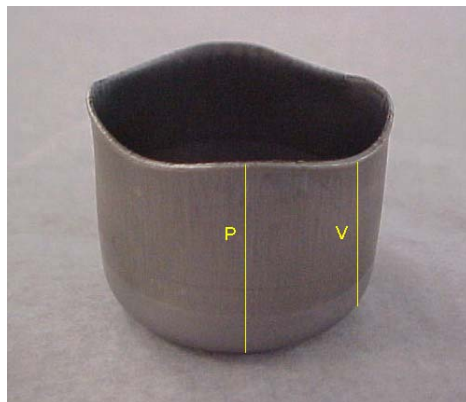


Figura 5. Avaliação do grau de “orelhamento” nos aços estudados pelo teste Swift.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

As propriedades mecânicas correspondentes aos aços estudados encontram-se resumidas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades mecânicas dos aços estudados.

Aço	LR(N/mm ²)	LE(N/mm ²)	Al(%)= I ₀ 80	n_m	r_m	Δr	Orelha (%)	Z_h (mm)
1	308	190	43	0,21	1,64	0,53	7,40	1,79
2	335	231	32	0,18	0,57	0,36	2,49	0,62
3	361	231	35	0,20	0,79	0,08	1,30	0,32
4	349	216	35	0,20	0,60	0,04	0,53	0,13

As figuras a seguir apresentam os resultados dos testes de orelhamento (ensaio Swift) para os aços estudados.

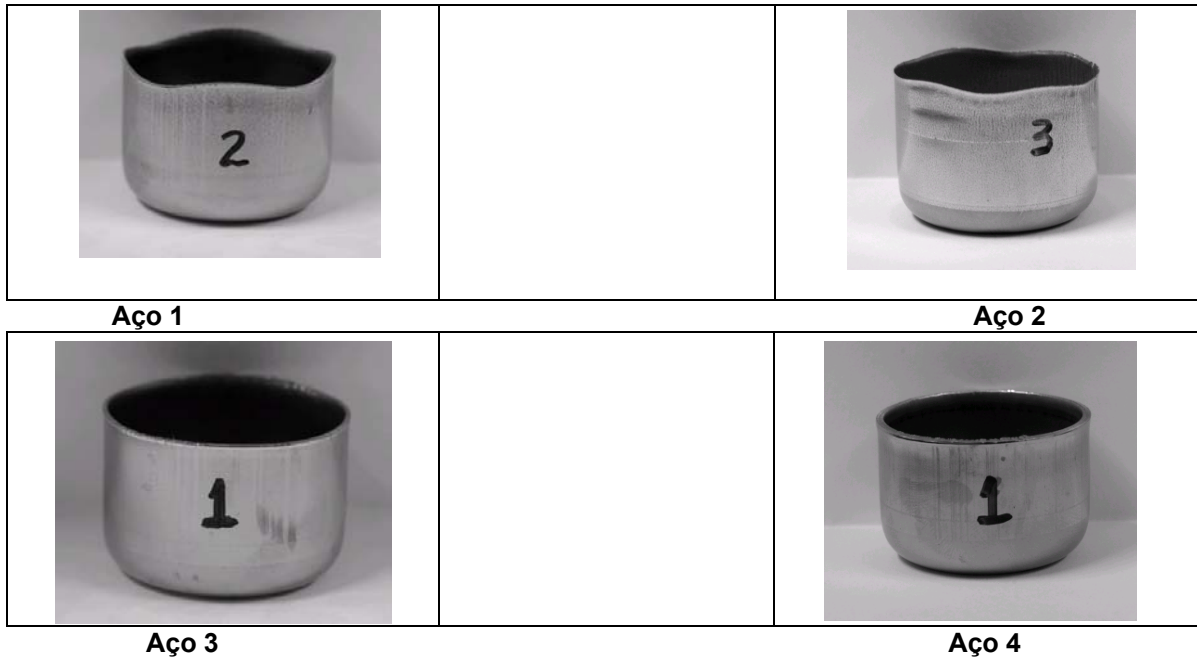


Figura 6. Copos estampados com os diversos materiais estudados no trabalho.

As figuras a seguir resumem os resultados das FDO's e os gráficos das fibras α e γ e os valores de J (índice de textura, ou seja, índice global de severidade da textura)⁽²⁶⁾ para os aços selecionados, na condição de laminado a frio e recozidos.

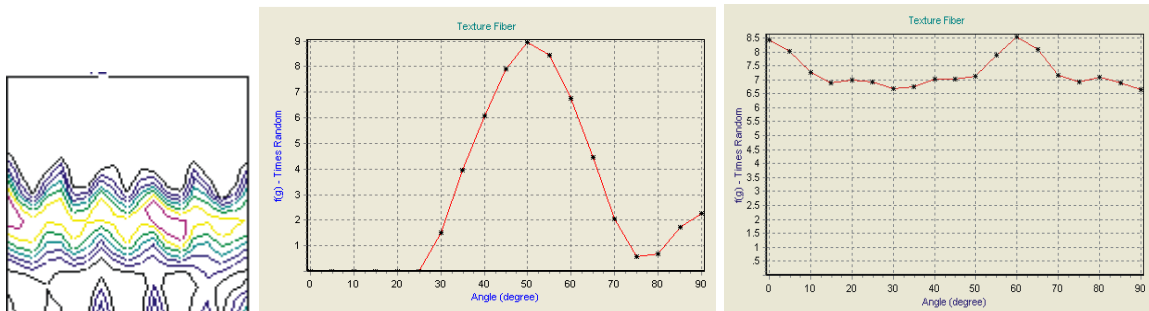


Figura 7. FDO e gráficos das fibras α e γ para o aço 1. ($J= 3.22$)

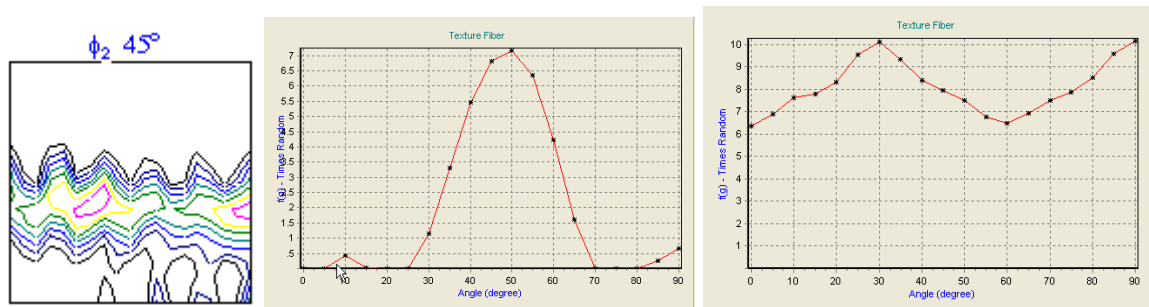


Figura 8. FDO e gráficos das fibras α e γ para o aço 2. ($J= 3.42$)

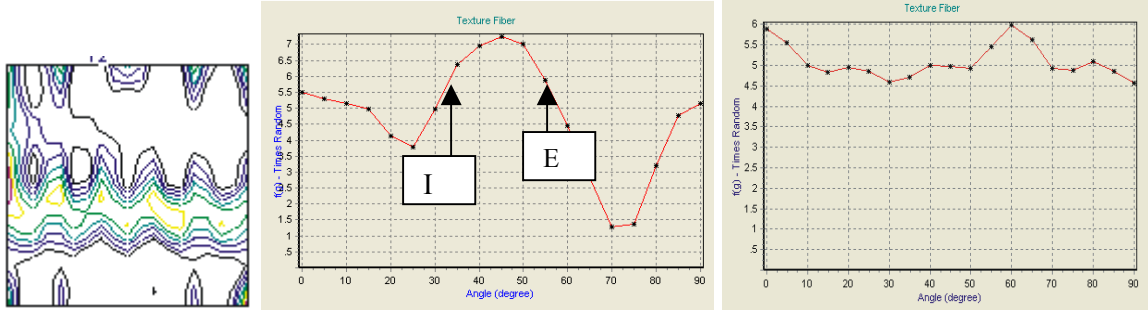


Figura 9. FDO e gráficos das fibras α e γ para o aço 3. ($J= 2.18$).

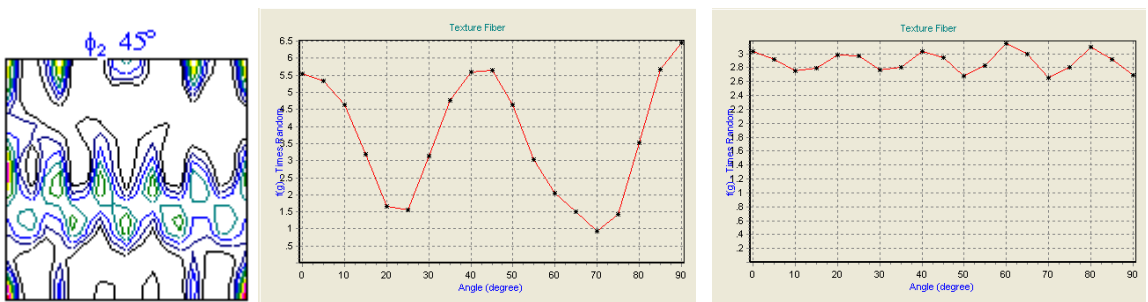


Figura 10. FDO e gráficos das fibras α e γ para o aço 4. ($J= 1.67$)

Da análise das figuras acima apresentadas podemos observar que as texturas dos aços 1 e 2 apresentam valores do índice de textura J , ou seja, intensidade global de textura, superiores a 3.0. Valores semelhantes foram observados nos aços de baixo carbono (semelhante ao aço 4), estudados por Singh,⁽²⁷⁾ ($J= 3.28$).

Por outro lado, o aço 4, obtido por recozimento contínuo, conduz a uma baixa intensidade de textura. A Brasmetal Waelzholtz, por não dispor de tal equipamento, obteve, por processo alternativo de laminação a frio e recozimento em forno de caixa (com atmosfera de Hidrogênio), um aço para estampagem, com índice de textura baixo e semelhante ao do material importado. Neste particular a presença do microligante atua no sentido do equilíbrio das componentes de textura, isto é, as componentes, I e E, como descritas nas Figuras 3 e 4, e propicia resultados semelhantes aos do aço 4.

4 CONCLUSÕES

Com base nas observações efetuadas acima podemos concluir que:

1- aços para estampagem podem apresentar um valor mais elevado do índice de anisotropia normal (R), porém, um índice de anisotropia planar (ΔR) também elevado, conduzindo ao orelhamento indesejável.(aços 1 e 2). Esta observação pode ser avaliada pelo índice de textura J , com valores superiores a 3.

2- aços com valores de J menores que 3, além de componentes de textura I e E balanceados, propiciam a obtenção de copos estampados com menor orelhamento, próximo de zero, quer por processamento empregando recozimento contínuo ou, como

no caso da BW, empregando aço com microligante, redução a frio otimizada e forno de recozimento em caixa.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório do Centro de Pesquisas da ACESITA pela realização dos ensaios de embutimento Erichsen.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 R. CAHN - *in* Materials Sci. and Tech.. Ed. R.W.Cahn et al. v.15,1992, pp.429-477.
- 2 H-J BUNGE, steel research, v.62, n.12,1991, pp 530-541.
- 3 M. ABE , *in* Materials Sci. and Tech.. Ed. R.W.Cahn et al. v.7, 1992, pp.285-333.
- 4 R.L.PLAUT, Estampabilidade de chapas - *in* Textura e Relações de Orientação-deformação plástica, recristalização, crescimento de grão - II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação - EPUSP-IPEN-IPT- Ed. A. Tschipschin et al, 2003, pp.265-308.
- 5 W.F.HOSFORD, R.M. CADDELL *in* Metal Forming-Mechanics and Metallurgy, Prentice Hall, USA, 1983, pp. 276.
- 6 R.SCHOUWENAARS et al., Textures and Microstructures, v.26-27, 1996, pp. 553-570.
- 7 P.R. DAWSON, Int.Mat.Rev., v.48, n.2, 2003, pp.86-122.
- 8 H-J. BUNGE, Int.Mat. Rev. v.32, n.6, 1987, pp. 265-291.
- 9 H.INAGAKI, Z. Metallkunde, v.82, n.5., 1991, pp. 361-371.
- 10 Y.B.PARK, D.N.LEE, G.GOTTSTEIN, Mat. Sci.Tech,v.13, n.4, 1997, pp 289-298.
- 11 Metal Progress, v. 94, n.4, 1968.
- 12 W.ZIMNIK, et al, steel research, v.64, n 89, 1993, pp.420- 424.
- 13 R GROSSTERLINDEN et al., steel research, v.67, n.10, 1996, pp.456-463.
- 14 B.ENGL, K POLTE-SCHMIDT, Stahl und Eisen, v.114, n. 7, 1994, pp 47-53.
- 15 R.K.RAY, J.J.JONAS, Int. Met.Rev., v.35, n.1, 1990, pp 1-36.
- 16 R.K.RAY et al, Int. Met, Rev., v.39, 1994, pp 129-171.
- 17 W.B. HUTCHINSON, K.USHIODA, Scand. J. Met., v13, 1984, pp 269-275.
- 18 H-J BUNGE, Z.Metallkunde, v.76, n.7, 1985, pp.457-470.
- 19 G. J. DAVIES et al. – J. Inst. Met., v.101, 1973, pp.270-273.
- 20 F.J.HUMPHREYS *in* Recrystallization and Related Phenomena, Pergamon, 1996, pp 327.
- 21 P.I.WELCH, H.J.BUNGE, Mat Sci Tech., v.2, n.4, 1986, pp- 355-362.
- 22 V.RANDLE, Mat. Sci.Tech., v.6, n.12, 1990, pp.1231-1235.
- 23 R .SCHOUWENAARS et al., ISIJ Int. v.34, n.4, 1994, pp.-366-72.
- 24 H.MURAKAMI, T. SENUMA, ISIJ Int., v.38, n.6, 1998, pp. 653-660
- 25 W.ZIMNIK et al., Stahl und Eisen, v.112, n 11, 1992, pp.99-102.
- 26 H-J BUNGE- *in* Texture Analysis in Materials Science, Butterworths,1982, pp 137.
- 27 C.D. SINGH, Mat, Sci. Forum, v.273-275, 1998, pp. 609-616
- 28 J-C HERMAN et al., steel research, v.70, m 11, 1999, pp. 454-457.

EFFECT OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE IN THE PLASTIC ANISOTROPY IN DEEP DRAWING STEEL¹

*Antenor Ferreira Filho²
Ronald Lesley Plaut³
Mauricio Franco Bomfim⁴
Nelson Batista de Lima⁵*

Abstract

Sheet metal forming, amongst several processes, leads to shape changes in metallic materials and had significant developments in the last decades. Car industry has been putting significant demand onto materials having higher functionality and, simultaneously, better esthetics, leading to the driving force towards significant developments. Producing axisymetrical stampings by deep drawing of a circular blank, planar plastic anisotropy, leads to earing, and simultaneous thickness changes in the component. In order to attain a better working condition and performance, an isotropic material presents several advantages, conducting to a uniform material flow in all directions. This may be attained through the control of the materials texture. This work has as a main objective analyze the effect of the crystallographic texture on the anisotropy in low carbon steels, cold rolled and annealed, for these stampings.

Key words: Crystallographic texture; Anisotropy; Drawing.

¹ ABM 42 th Rolling Seminar-Processes and Rolled and Coated Products; Santos, São Paulo, 25 to 28 October 2005.

² Industrial Director, MSc. Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com. afilho@brasmetal.com.br

³ Associate Professor, PhD.- EPUSP- S.Paulo - rlplaut@usp.br

⁴ Metalurgical Eng.- Brasmetal Waelzholz S/A Ind. e Com.- mbomfim@brasmetal.com.br

⁵ Senior Tech, Dr.- IPEN/CNEN-SP - nblima@net.ipen.br