

EVOLUÇÃO DA TEXTURA E DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM AÇO DE MÉDIO TEOR DE CARBONO, PARA ESTAMPAGEM PROFUNDA, DURANTE A LAMINAÇÃO A FRIO E POSTERIOR RECRISTALIZAÇÃO¹

Clara Herrera²

Nelson Batista de Lima³

Ronald Lesley Plaut⁴

Antenor Ferreira Filho⁵

Angelo Fernando Padilha⁴

Resumo

Os aços de médio teor de carbono são usados em aplicações simples, no entanto, novas aplicações têm sido desenvolvidas para as quais se exige boa estampabilidade. Esta classe de aços possui uma baixa capacidade de conformação. Para o trabalho foi escolhido um aço de médio teor de carbono SAE 1050, laminado a quente. O aço foi laminado a frio, com reduções de espessura entre 7 e 80%. As amostras obtidas foram usadas para determinar as curvas de endurecimento por deformação. Nas amostras com 50 e 80% de redução em espessura foi realizado um tratamento térmico de recozimento com o objetivo de promover a recristalização. A caracterização do material nos diferentes estados, “como recebido”, laminado a frio e recozido, foi realizada utilizando diferentes técnicas como: microscopia óptica, difração de raios X (textura), dureza Vickers e ensaios de tração. Para altos graus de encruamento, o aço SAE 1050 apresentou baixo alongamento, menor que 2%, e limites de escoamento e de resistência por volta de 1400MPa. A textura no estado “como recebido” apresentou componentes fortes no plano {001}, nas direções <100>, <210> e <1 $\bar{1}$ 0>. Após laminação a frio, para deformações baixas, a textura não apresentou mudanças significativas, todavia, para altos graus de deformação, a textura mudou completamente. Para deformações altas as fibras alfa e gama foram fortalecidas. Após recozimento e recristalização do aço, a fibra α pouco se alterou para o aço deformado 50%, enquanto que para o deformado 80% a intensidade aumentou. As fibras γ e γ' desapareceram com o recozimento para as duas deformações.

Palavras-chave: Aço de médio teor de carbono; Textura; Propriedades mecânicas; Estampagem.

TEXTURE AND MECHANICAL PROPERTIES EVOLUTION OF MEDIUM CARBON STEEL FOR DEEP DRAWING DURING THERMOMECHANICAL PROCESSING

Abstract

Medium carbon steels are mostly used for simple applications; nevertheless new applications have been developed for which good sheet metal formability is required. This class of steels has an inherent low formability. A low carbon hot rolled SAE 1050 steel has been selected for this study. This has been cold rolled with reductions in the 7 to 80% range. Samples have been used to assess the cold work hardening curve. For samples with a 50 and 80% thickness reduction, an annealing heat treatment has been performed to obtain recrystallization. The material has been characterized in the “as received”, cold rolled and annealed conditions using several methods: optical metallography, X-ray diffraction (texture), Vickers hardness and tensile testing. For large thickness reductions, the SAE 1050 steel presented low elongation, less than 2%, and YS and TS around 1400 MPa. Texture in the “as-received” condition showed strong components on the {001} plane, in the <100>, <210> and <1 $\bar{1}$ 0> directions. After cold rolling, for small thickness reductions, texture did not present any significant changes, however, for large reductions texture changed completely. For large reductions alpha and gamma fibers have been strengthened. On annealing and recrystallizing the SAE 1050 steel, there was little change in the alpha fiber for the 50% reduction, while for the 80% reduction its strength increased. Both gamma and gamma prime fibers vanished on annealing for both reductions.

Key words: Medium carbon steels; Texture; Mechanical properties; Deep drawing.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Pós-Doutorado Industrial. Engenharia de Desenvolvimento de Produtos da Brasmetal Waelzhoz S/A. Diadema, SP.

³ Professor, Pesquisador do IPEN-CNEN/SP, São Paulo, SP.

⁴ Professor do Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais da EPUSP, São Paulo, SP.

⁵ Engenheiro Metalurgista e de Produção, Dr.Eng., Diretor Industrial da Brasmetal Waelzhoz S/A., Diadema, SP.

1 INTRODUÇÃO

Os aços ao carbono, particularmente os planos laminados, são de longe os materiais metálicos mais produzidos no mundo. Embora, grande parte de sua produção seja usada em aplicações simples, a sua tecnologia de processamento e suas propriedades têm passado por um contínuo processo de aperfeiçoamento e evolução. O segmento mais importante, economicamente falando dos aços planos laminados é o voltado à estampagem, principalmente o dos aços de baixo teor de carbono, que são amplamente aplicados na indústria automobilística além de possuírem uma grande quantidade de artigos disponíveis.^[1] Entretanto estes aços podem ser apenas limitadamente submetidos a tratamentos termoquímicos, e devido ao seu baixo teor de carbono não são beneficiados, ou seja, temperados e revenidos. Portanto, o nível de resistência mecânica atingido é baixo, limitando sua utilização, sendo necessário o uso de aços de médio e alto teor de carbono.

Atualmente uma grande quantidade de novas aplicações em aços de médio e alto teor de carbono tem sido desenvolvida para os quais também se exige estampagem profunda. Estes aços possuem uma baixa capacidade de conformação e as condições tornam-se ainda mais críticas a medida de que se eleva o teor de carbono, pois a capacidade de conformação cai substancialmente. Em aços de médio e alto teor de carbono, a morfologia lamelar da perlita, conduz a propriedades mecânicas indesejáveis para transformações a frio de componentes de alta sollicitação, enquanto, uma morfologia globular da cementita produz benefícios como alta tenacidade, boa conformação a frio e usinabilidade.^[2]

A estampabilidade depende principalmente da anisotropia, e conseqüentemente da textura. Um material CCC possui textura ideal para estampagem quando um elevado número de grãos está orientado com seu plano $\{111\}$ paralelo ao plano da chapa, conhecida como fibra γ , $\langle 111 \rangle // DN$.

A textura dos aços de alto e médio teor de carbono em diferentes estados, laminado a quente, deformado ou recozido, não tem sido muito pesquisada. Storojeva e co-autores^[2] pesquisaram a evolução da textura e a microestrutura de um aço médio carbono (0,36%C-0,53%Mn-0,22%Si) deformado a morno. Eles concluíram que a textura não muda para diferentes temperaturas de deformação e bobinamento, sendo caracterizada pelas fibras γ e α , com um máximo na componente $\{112\}\langle 110 \rangle$. Walenteck e co-autores^[3] estudaram a evolução da textura num aço de alto teor de carbono (0,79%C-0,9%Mn-0,26%Si) após uma redução de 74% na espessura. Eles concluíram que a textura de deformação obtida é uma textura típica dos materiais CCC laminados a frio, caracterizada pelas fibras γ e α , mas a intensidade é mais fraca quando comparado com a intensidade de um aço baixo carbono. O desenvolvimento da textura de deformação nos aços de baixo e alto teor de carbono é afetado pela diferença da textura inicial e a presença de uma segunda fase, no caso a cementita, no aço de alto teor de carbono. A textura de deformação foi simulada para os dois aços e os resultados sugerem que a interação entre os grãos tem maior influência na textura de deformação, que o efeito causado pela presença de uma segunda fase, as lamelas de cementita.

O objetivo deste trabalho é estudar a textura e as propriedades mecânicas de um aço de médio teor de carbono em diferentes etapas do seu processamento, visando entender seu comportamento para estampagem.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Foi escolhido um aço de médio teor de carbono SAE 1050, laminado a quente na espessura nominal de 2,65mm produzido no país pela CST. A tabela 1 apresenta a composição química do material estudado.

Tabela 1- Composição química (% em peso) do aço SAE 1050 estudado.

C	S	Mn	Si	P	Al	Mo	N	Ni
0,472	0,0044	0,705	0,1966	0,0155	0,0361	0,001	0,025	0,0106
Cr	Ti	Nb	V	Cu	Pb	Sn	B	W
0,0212	0,0023	0,0011	0,0003	0,017	0,0003	0,0008	0,0002	0,0022

O aço foi laminado a frio, com reduções de espessura entre 7 e 80%, com o objetivo de determinar a curva de endurecimento por deformação. A laminação foi feita em um laminador industrial “quádruplo” reversível da empresa Brasmetal Wäelzholz.

Nas amostras com 50 e 80% de redução na espessura foi realizado um tratamento térmico de recozimento a 700°C, por 13 horas, em forno industrial de atmosfera 100% H₂, com o objetivo de promover a recristalização completa.

A caracterização do material nos diferentes estados, “como recebido”, laminado a frio e recozido, foi realizada utilizando diferentes técnicas como: microscopia óptica, difração de raios X (textura), dureza Vickers e ensaios de tração.

A textura nos diferentes estados foi estudada 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 ($\lambda = 0,7093$ Å). Para a obtenção das FDO (função de 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 de laminação das chapas.

Os ensaios de tração foram realizados em uma máquina de tração universal da marca Zwick modelo-1475, equipada com garras hidráulicas e extensômetro. 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) índice de anisotropia plástica normal (r_m) e índice de anisotropia plástica planar (Δr).

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O aço SAE 1050 no estado “como recebido” apresentou uma microestrutura constituída de perlita e ferrita (Figura 1), com dureza de 226,7HV. A tabela 2 apresenta as propriedades mecânicas no estado “como recebido”. A textura foi caracterizada pelas componentes fortes no plano {001}, nas direções $\langle 100 \rangle$, $\langle 210 \rangle$ e $\langle 1\bar{1}0 \rangle$, TR=4,1. As fibras α e γ não estão presentes (Figura 2).

O endurecimento por deformação foi estudado por meio de medidas de dureza Vickers na seção normal à direção de laminação. O aço SAE 1050 apresenta um endurecimento por deformação muito baixo, ou seja, a dureza tem pouca variação para os diferentes graus de deformação (Figura 3). Para deformações altas, acima de 30%, o aumento de dureza tende a saturar.

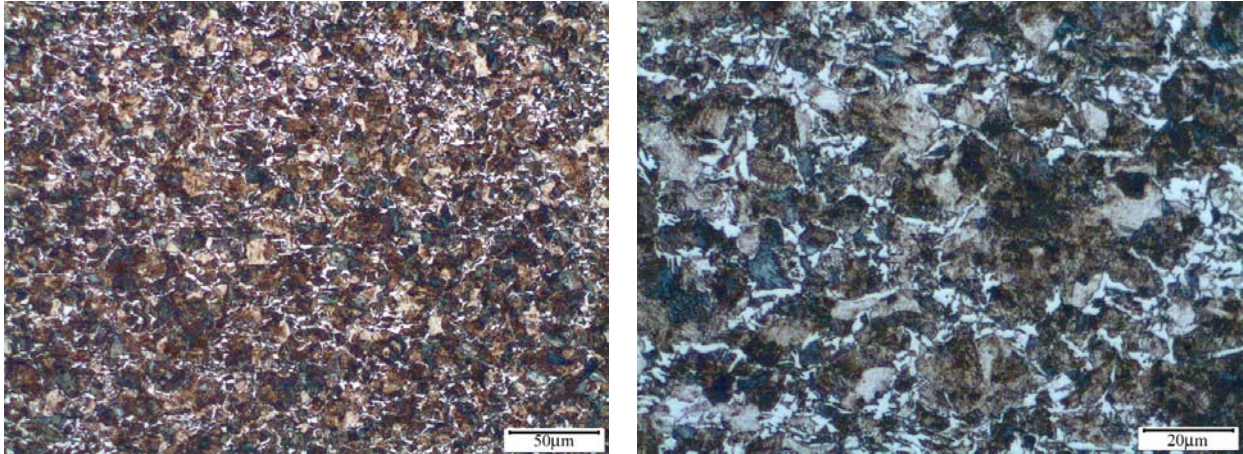


Figura 1 – Microestrutura do aço SAE 1050 no estado “como recebido”.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1050 no estado “como recebido”

LE (N/mm ²)	LR (N/mm ²)	Al80 (%)	Dureza (HV)
665,33	833,18	7,82	226,7

LE = Limite de Escoamento; LR = Limite de Resistência; Al(80) = Alongamento em 80 mm.

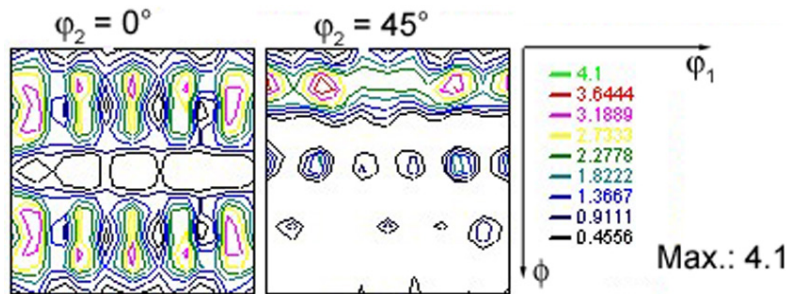


Figura 2 – ODF do aço SAE 1050 no estado “como recebido”.

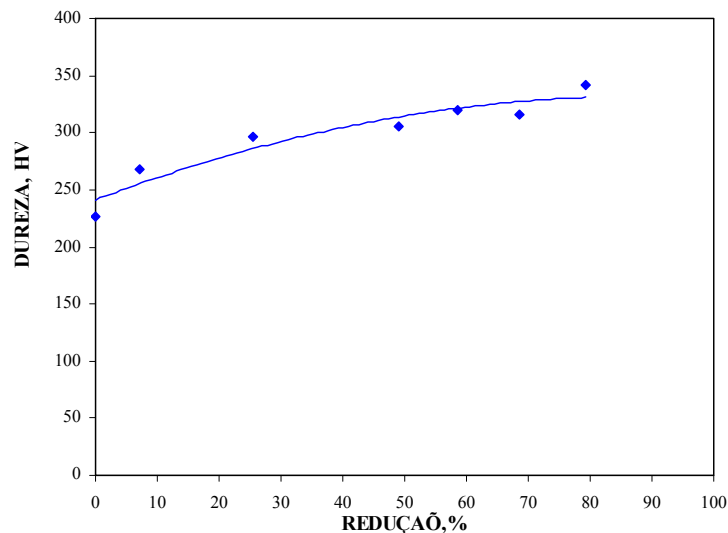


Figura 3 – Curva de endurecimento por deformação

A Figura 4 apresenta a variação das propriedades mecânicas, limite de escoamento, de resistência e alongamento, com a redução a frio. Com o aumento da deformação, a diferença entre o limite de escoamento e de resistência diminui, ou seja, a carga necessária para que o material apresente ruptura esta muito próximo do limite de escoamento do material. Para altos graus de encruamento, o aço SAE

1050 apresenta baixo alongamento, menor que 2%, e limites de escoamento e de resistência por volta de 1400MPa. O aço apresenta no estado encruado baixa ductilidade, ou seja, suporta altas cargas mas seu alongamento é muito baixo, devido à microestrutura do material, ferrita mais perlita. A cementita dificulta a movimentação das discordâncias, por tal razão é necessário aplicar cargas altas para movimentá-las.

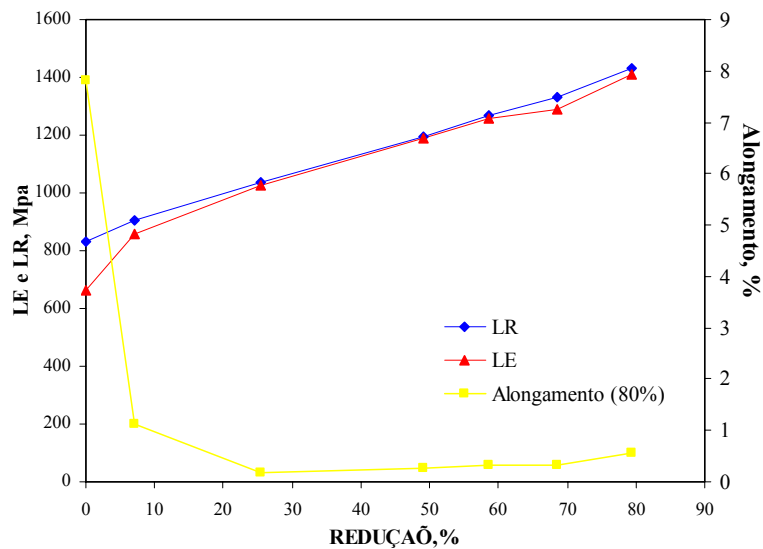


Figura 4 – Variação das propriedades mecânicas com a redução.

Nas Figuras 5 a 7 são apresentadas as ODFs do aço SAE 1050 para 3 reduções na espessura, 50, 70 e 80%. Em geral, o aço apresentou texturas típicas dos materiais cúbicos de corpo centrado laminados a frio.

Após 50% de deformação, a textura do aço mudou completamente a textura do estado “como recebido”. A textura de deformação é caracterizada pela fibra γ' , $\langle 223 \rangle // DN$, com as componentes $\{223\} \langle 110 \rangle$, $\{223\} \langle 472 \rangle$ e $\{223\} \langle 142 \rangle$ mais intensas, TR = 5,9, a fibra α , $\langle 100 \rangle // DN$ com as componentes $\{001\} \langle 110 \rangle$ e $\{001\} \langle 120 \rangle$, e a fibra α , $\langle 110 \rangle // DL$ apareceu fraca e heterogênea. A fibra γ' é característica de aços de baixo teor de carbono deformados; ela é uma variante da fibra γ , ou seja, uma rotação ao redor do eixo $\langle 111 \rangle$.^[4,5]

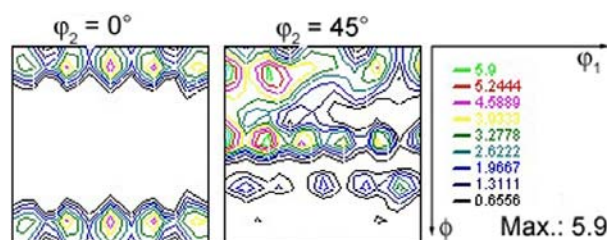


Figura 5 - FDO do aço SAE 1050 com uma redução na espessura de 50%.

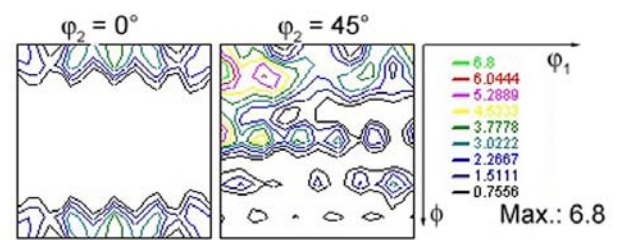


Figura 6 - FDO do aço SAE 1050 com uma redução na espessura de 69%.

Com o aumento da deformação, até 70% de redução na espessura, as fibras $\langle 100 \rangle // DN$ e γ' enfraquecem e as componentes $(001)[120]$, $(001)[110]$ e $(223)[1\bar{1}0]$ são intensificadas, TR = 6,8, as duas últimas componentes pertencem à fibra α . Com 80% de redução na espessura, a fibra α continua fortalecendo-se com as componentes $\{001\} \langle 110 \rangle$ e $\{223\} \langle 110 \rangle$ mais intensas, TR = 8. A fibra γ que não

apareceu com deformações inferiores, começa aparecer com uma dispersão desde (110)[1 $\bar{1}$ 0] até (554)[2 $\bar{2}$ 5] e a fibra γ' diminui a intensidade.

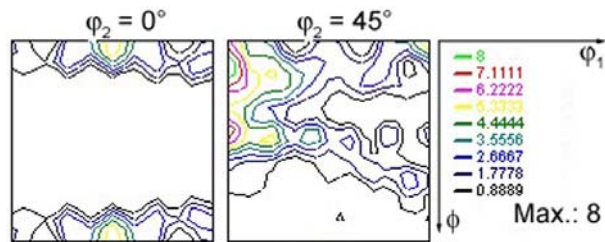


Figura 7 - FDO do aço SAE 1050 com uma redução na espessura de 80%.

A Figura 8 apresenta a microestrutura do aço SAE 1050 deformado 50 e 80% na espessura e recozido, caracterizada por uma matriz ferrítica com a cementita globulizada. A Tabela 3 apresenta as propriedades mecânicas do aço SAE 1050 após o recozimento para as duas deformações. Os limites de escoamento e de resistência apresentaram uma diminuição significativa após o recozimento, enquanto o alongamento aumentou em relação ao estado “como recebido”.

Na amostra deformada 80% e recozida, o limite de escoamento e de resistência, e o índice de embutimento são menores, enquanto, o alongamento em relação à deformada 50% e recozida é maior. Embora o valor de r_m tenha aumentado com a porcentagem de deformação, o elevado valor de Δr ira em detrimento da estampabilidade do aço, já que para estampagem profunda objetivase maximizar r_m e minimizar Δr ($\Delta r = 0$).^[6]

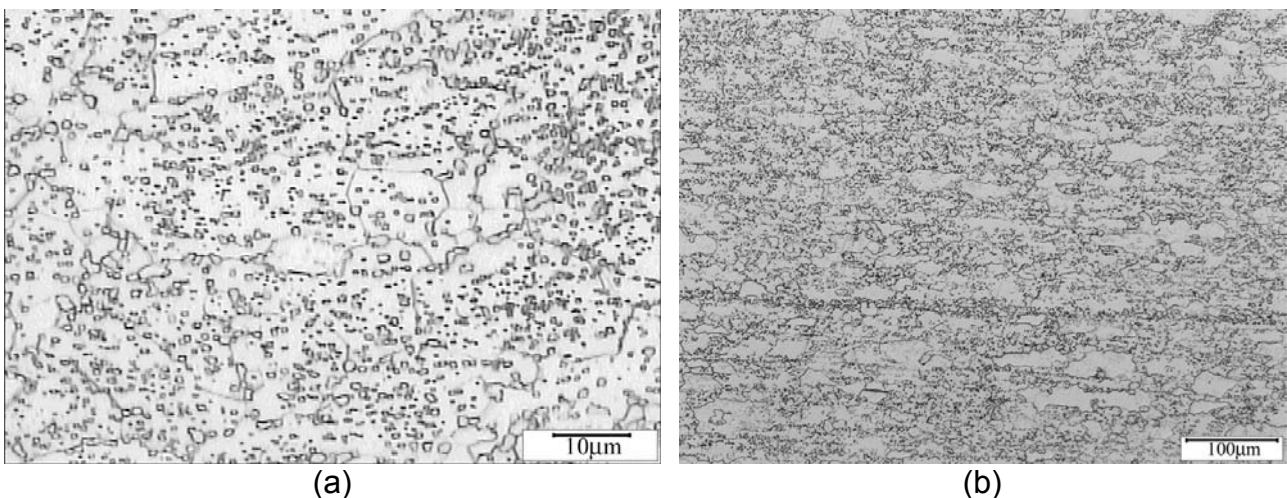


Figura 8 - Aço SAE 1050 deformado (a) 50% e (b) 80% e recozido.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do aço SAE 1050 deformado e recozido

% Def.	LE (N/mm ²)	LR (N/mm ²)	Al80 (%)	n	r_m	Δr	Dureza (HV)	I.E.(mm)
50	333,44	490,69	24,41	0,19	0,85	0,22	143,6	11,83
80	303,61	470,52	28,59	0,18	1,07	-1,28	142,2	9,0

LE = Limite de Escoamento; LR = Limite de Resistência; Al(80) = Alongamento em 80 mm; n=coeficiente de encruamento; r_m = índice de anisotropia normal.; Δr = índice de anisotropia planar; I.E. = Índice de Embutimento Erichsen.

As Figuras 9 e 10 apresentam as ODF do aço SAE 1050 deformado a 50 e 80% na espessura e recozido, respectivamente. O aço SAE 1050 deformado 50% e recozido apresentou as componentes $(001)[\bar{1}\bar{1}0]$ e $(223)[\bar{1}\bar{1}0]$ mais intensas, TR=6,2. Esta ultima componente pertence à fibra γ' , $\langle 223 \rangle // DN$, que está em menor intensidade, igual que a semi-fibra α , $\langle 011 \rangle // DL$. O aço SAE 1050 deformado 80% e recozido apresentou a semi-fibra α , $\langle 011 \rangle // DL$, com as componentes $(223)[\bar{1}\bar{1}0]$ e uma próxima de $(001)[\bar{1}\bar{1}0]$ mais intensa, TR = 9,5. A fibra γ não apareceu em nenhuma das duas amostras.

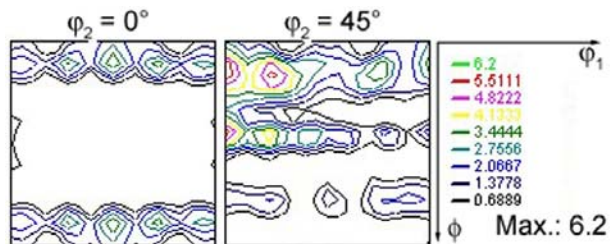


Figura 9 - FDO do aço SAE 1050 com uma redução na espessura de 50% e recozido.

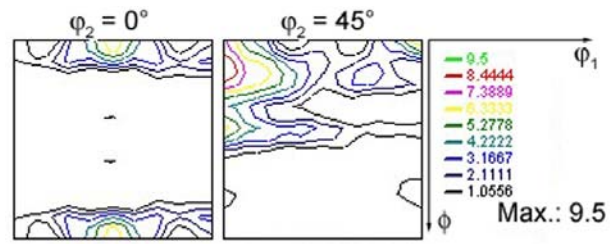


Figura 10 - FDO do aço SAE 1050 com uma redução na espessura de 80% e recozido.

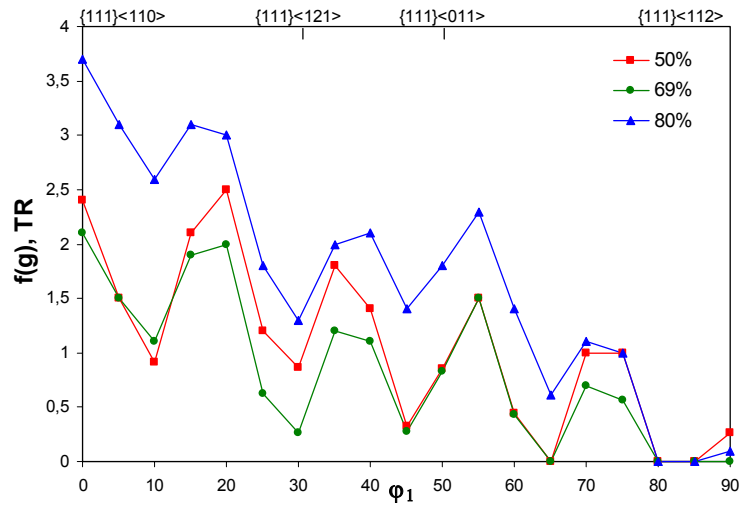
A Figura 11 apresenta um resumo da evolução da textura do aço nos diferentes estados, deformado e recozido, a partir das fibras γ , γ' , e α presentes no aço.

A fibra γ (Figura 11a) foi intensificada com o aumento na deformação, embora sua intensidade não seja muito alta comparada com a fibra α . Quando comparado este resultado com o de um aço alto carbono^[3] percebe-se que embora no aço de alto teor de carbono a fibra γ seja mais homogênea a intensidade da mesma é baixa, próxima de 5, ou seja a laminação de aços com uma segunda fase não produz texturas muito fortes. Após o recozimento a fibra γ desapareceu.

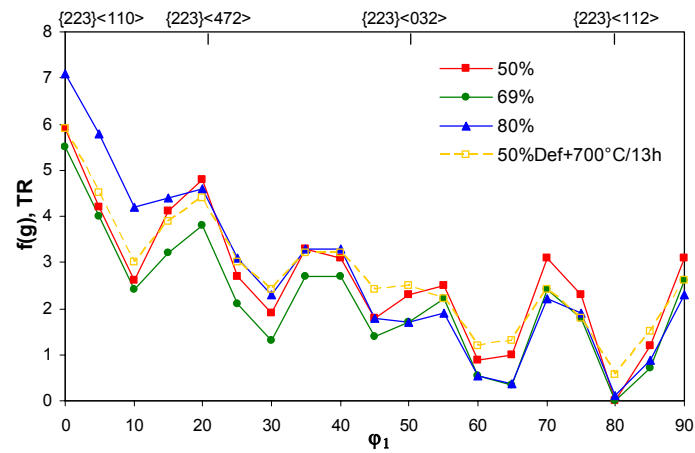
A fibra γ' (Figura 11b) não apresentou variações muito significativas para as deformações menores, enquanto que para deformações maiores, 80% de redução na espessura, sua intensidade cai. Após o recozimento, a fibra γ' no aço deformado 50% não apresentou muitas mudanças, enquanto, no aço com 80% de deformação ela sumiu.

A fibra α (Figura 11c) ficou mais intensa com o aumento da deformação, a componente $\{223\}\langle 110 \rangle$ e uma próxima de $\{001\}\langle 110 \rangle$ são as mais fortes. A componente $\{111\}\langle 110 \rangle$ que não apareceu nas reduções menores, aparece fracamente após 80% de redução na espessura. A fibra α , no aço deformado 50% e recozido, apresentou poucas diferenças em relação ao aço só deformado. No aço com 80% de deformação e recozido, a fibra α apresentou um fortalecimento da intensidade entre os planos $\{001\}$ e $\{112\}$.

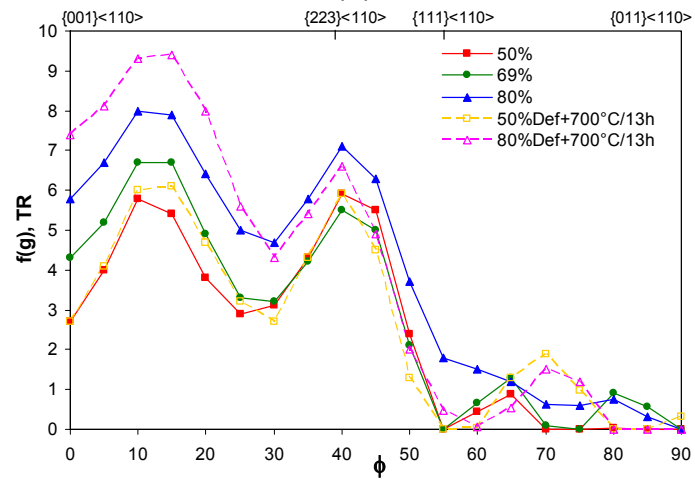
O recozimento do aço SAE 1050 após diferentes reduções não modifica significativamente a textura de deformação. Para deformações maiores, a textura de recozimento incrementou a intensidade da fibra α , enquanto, as fibras γ e γ' desapareceram. Uma deformação próxima de 50% produz uma textura melhor para estampagem, pois a fibra γ' esta próxima da fibra γ .



(a)



(b)



(c)

Figura 11 - Evolução das (a) fibra γ (b) fibra γ' e (c) fibra α do aço SAE 1050 para diferentes reduções na espessura e recozido.

4 CONCLUSÕES

- O aço SAE 1050 no estado “como recebido” apresentou uma microestrutura constituída de perlita e ferrita, com uma textura fraca, onde as fibras α e γ não estão presentes.
- O endurecimento por deformação do aço SAE 1050 foi muito baixo. Para altos graus de encruamento, apresentou baixo alongamento, menor que 2%, e limites de escoamento e de resistência por volta de 1400MPa. As texturas encontradas são típicas dos materiais cúbicos de corpo centrado laminados a frio.
- A textura após o recozimento não sofreu modificações significativas em relação à textura de deformação. Para deformações maiores, a textura de recozimento incrementou a intensidade da fibra α , enquanto as fibras γ e γ' desapareceram. Uma deformação próxima de 50% produz uma textura melhor para estampagem, pois a fibra γ' esta próxima da fibra γ .
- Após o recozimento, os limites de escoamento e de resistência diminuem, enquanto, o alongamento aumenta com o aumento da deformação prévia. O valor de r_m e Δr aumentaram com a porcentagem de deformação, o valor de Δr é negativo para as propriedades de estampabilidade do aço.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Brasmetal Wäelzholz pelo seu apoio na parte experimental e produção das amostras e à CNPq pelo apoio financeiro da bolsa de pós-doutorado industrial (Processo nº 308839/2005-6).

REFERÊNCIAS

- 1 BRANDÃO, L.; VIANA, C.S.; LOPES, A.M.: Características e tendências dos aços para estampagem. Aços: Perspectivas para os próximos 10 anos, Rio de Janeiro, p.45-53, 2002.
- 2 STOROJEVA, L.; PONGE, D.; KASPAR, R.; RAABE, D. Development of microstructure and texture of médium carbon steel during heavy warm deformation. Acta Materialia, 25, p. 2209-2220, 2004.
- 3 WALENTECK, A.; HU, X.; SEEFELDT, M.; VAN HOUTTE, P. Texture evolution cold rolling of low and high carbon steel. Measurement and simulation. Materials Science Forum, September 2005, v. 495-497, p. 369-374.
- 4 INAGAKI, H. Fundamental aspect of texture formation in low carbon steel. ISIJ International, 34 (4) (1994), 313-321.
- 5 DANIEL, D; SAVOIE, J; JONAS, JJ. Texture induced by tension and deep drawing in low carbon and extra low carbon steel sheets. Acta Metall. Mater., 41 (6) (1993), 1907-1920.
- 6 PLAUT, R.L. Estampabilidade de chapas: ensaios e aplicações. II Workshop sobre Textura e Relações de Orientação. 2ª edição, EPUSP, IPEN, IPT. São Paulo-SP, p.265-308, 2003.