



TESTE DE CISALHAMENTO EM CHAPAS DE AÇO ELÉTRICO

Marley Anúnciação Magella

Universidade Federal de Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais
Cx. Postal 476, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
marley@pg.materiais.ufsc.br

Rodrigo Villas Boas Della Torre

Embraco – Empresa Brasileira de Compressores
Processamento de Chapas
Cx. Postal D-27, CEP: 89219-901, Joinville, SC, Brasil
rodrigo_v_torre@embraco.com.br

Ingeborg Kühn

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. Postal 476, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
ingeborg@emc.ufsc.br

Pedro A. N. Bernardini

Universidade Federal de Santa Catarina
Departamento de Engenharia Mecânica
Cx. Postal 476, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC, Brasil
pedro@materiais.ufsc.br

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo mostrar a importância dos elementos de liga dos aços elétricos de grão não-orientado semi e totalmente processado, tais como, Si, Mn e P, bem como o tamanho de grão desses aços na avaliação de sua puncionabilidade. Amostras desses aços foram submetidas aos ensaios de tração e de estampagem. Os resultados obtidos permitem concluir que o silício eleva de forma significativa os valores de resistência dos aços totalmente processados, sobrepondo-se ao efeito do tamanho de grão. Observou-se também, que o deslocamento total do punção até a ruptura foi o mesmo para os dois aços. Desta forma, a maior formação de rebarba normalmente apresentada pelo aço totalmente processado não pode ser atribuída ao maior deslocamento antes da ruptura, como era acreditado na indústria.*

Palavras-chave: *aços elétricos, puncionabilidade, estampagem*

1. INTRODUÇÃO

As lâminas para fabricação de núcleos de motores e transformadores são produzidas principalmente a partir de aço elétrico de grão não-orientado dos tipos semi e totalmente processados. Os do tipo totalmente processados são recozidos na siderúrgica, onde as características magnéticas finais são desenvolvidas.

No caso dos aços semi-processados, o recozimento para desenvolvimento das características magnéticas é feito pelo fabricante de motores elétricos, após a operação de estampagem das lâminas de rotor e de estator. A otimização das propriedades magnéticas finais com o recozimento se deve principalmente ao considerável crescimento de grão, redução do teor de carbono, alívio de tensões internas e desenvolvimento de textura apropriada - $\langle 100 \rangle$. Nas siderúrgicas, estes aços são submetidos apenas a uma pequena redução de espessura (passe de encruamento) da ordem de 3 a 8%.

A característica de puncionabilidade dos aços elétricos é a combinação de propriedades que resultam numa maior vida útil da ferramenta e numa formação mínima de rebarba. É uma das mais importantes características físicas dos aços silício (Acesita², 1998). Para que seja alcançada, pode, muitas vezes, envolver o sacrifício de algumas propriedades magnéticas de forma a obter-se vida mais longa da matriz ou outra vantagem de uma boa puncionabilidade.

Para um bom desempenho na operação de puncionamento das lâminas constituintes dos núcleos dos motores e transformadores, os aços elétricos devem possuir alta razão elástica (razão entre o limite de escoamento e o limite de resistência), sendo desejáveis valores superiores a 85%. Esse requisito deve estar associado a uma dutilidade não muito alta, para que, no puncionamento, a quantidade de rebarba de corte seja pequena e o atrito entre a ferramenta de corte e o aço seja minimizado e haja, conseqüentemente, uma condição que prolongue a vida útil do equipamento de corte (Marra, 1999).

Com a evolução da operação de estampagem, observa-se que em conseqüência do desgaste da ferramenta de corte (punção e matriz), ocorre uma redução da precisão dimensional dos núcleos e um aumento da altura da rebarba. Quando a altura da rebarba atinge um valor preestabelecido, as ferramentas de corte são reparadas ou substituídas. Sendo assim, o número de golpes entre afiações se torna o principal parâmetro de desempenho. Vários fatores afetam a formação da rebarba, podendo ser citados (IPT, 1997):

- as propriedades mecânicas do aço (principalmente o limite de escoamento e de resistência, que determinam a razão elástica (σ_e/σ_r));
- a folga entre o punção e a matriz;
- o estado de afiação das ferramentas; e,
- a rigidez da prensa.

Na análise do comportamento dos aços nas operações de estampagem, pelo menos três mecanismos de endurecimento podem ser considerados. São eles: endurecimento por solução sólida, encruamento e refino de grão.

Os aços semi e totalmente processados apresentam comportamento bastante diferenciado quando submetidos a operações de estampagem. Essa diferença de comportamentos é observada no desgaste das ferramentas de corte e conseqüentemente na formação da rebarba.

2. ESTAMPAGEM DE CHAPAS

O projeto e a realização do processo de estampagem de chapas para a confecção de estatores e de rotores (*blanking process*), estão atualmente baseados principalmente no conhecimento empírico do processo. Os modelos analíticos disponíveis (Zhou & Wierzbicki *apud* Brokken et al, 1998) não contemplam toda a fenomenologia envolvida. Para descrever o comportamento da chapa durante a

operação de estampagem, vários parâmetros podem ser utilizados tais como o estado de encruamento do material, sua morfologia metalúrgica e sua textura cristalográfica, entre outros (Hambli, 2001).

O processo de estampagem é um dos mais empregados nas operações de chapas metálicas. Nele, o produto é separado da chapa por um punção. O processo em si pode ser caracterizado por uma grande quantidade de deformação localizada seguida de fratura dútil. Na prática, a forma do produto próxima ao eixo de corte, é indubitavelmente sua mais importante propriedade. Quatro zonas características podem ser distinguidas nesta região, as quais são descritas e mostradas na Figura 1:

- i* – a zona estirada (*roll-over*) que é a parte da chapa estirada pelo punção;
- ii* – a zona cisalhada que é a região conformada pelo punção antes do início da fratura dútil. Geralmente a superfície apresenta-se bastante lisa nesta região;
- iii* – a zona de fratura. Nesta região a superfície é rugosa como resultado da fratura do material causada pelo contínuo movimento do punção através da chapa.
- iv* – uma rebarba é formada em consequência da localização específica do início da fratura.

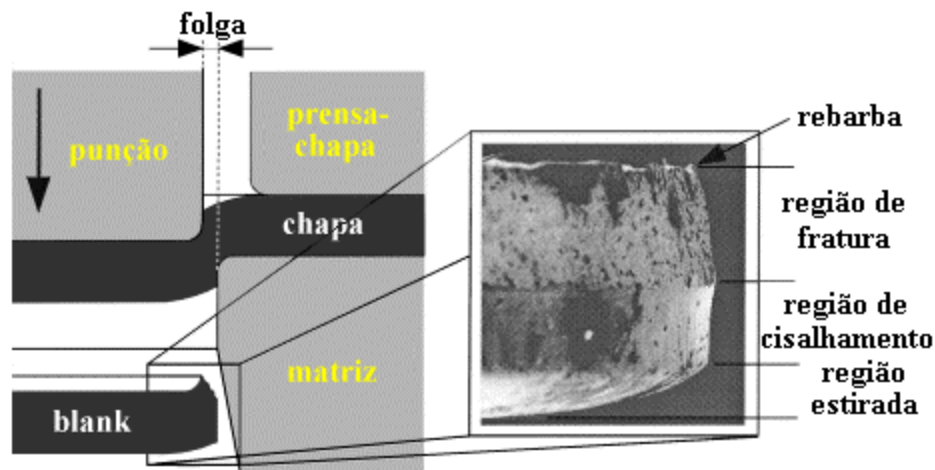


Figura 1. Representação esquemática da operação de estampagem mostrando em detalhe as regiões decorrentes do corte: estirada, cisalhada (aspecto liso) e de fratura (rugosa), e rebarba.

Como o produto e a chapa são cortados simultaneamente, estas áreas acima mencionadas podem ser identificadas em ambos. As dimensões da zona fraturada e da rebarba são itens que não podem ser convenientemente preditos por modelos empíricos, uma vez que estas dimensões são freqüentemente determinadas pela fratura dútil. Do ponto de vista de manufatura, no entanto, eles são importantes parâmetros de qualidade na maioria das vezes.

Johnson e Slater (*apud* Zhou & Wierzbicki, 1996), a partir das observações de Chang e Swift (*idem*), avaliaram qualitativamente o diagrama força do punção x deslocamento do punção típico decorrente do processo de estampagem. Estes autores identificaram vários regimes distintos, conforme pode ser visto na Figura 2. A deformação plástica se desenvolve entre A e C. A força do punção aumenta sobre a porção AB devido ao encruamento de material. A força do punção atinge o seu máximo em B, diminuindo a seguir. Conforme a literatura, o pico de carga é devido à instabilidade plástica, atribuída à redução da área de cisalhamento conforme o modelo de Atkins (*ibidem*). Durante a fase de pós-instabilidade, o escoamento plástico continua de B até C, quando vazios podem ser nucleados. Após C, há uma queda brusca da força do punção devido ao coalescimento de vazios e sua subsequente propagação. No percurso restante, EFG, o efeito da fricção aumenta para um nível residual de resistência. Para alguns materiais, tais como os aços, o ponto C está próximo à carga de pico, e o início da redução de carga pode levar ao término do processo.

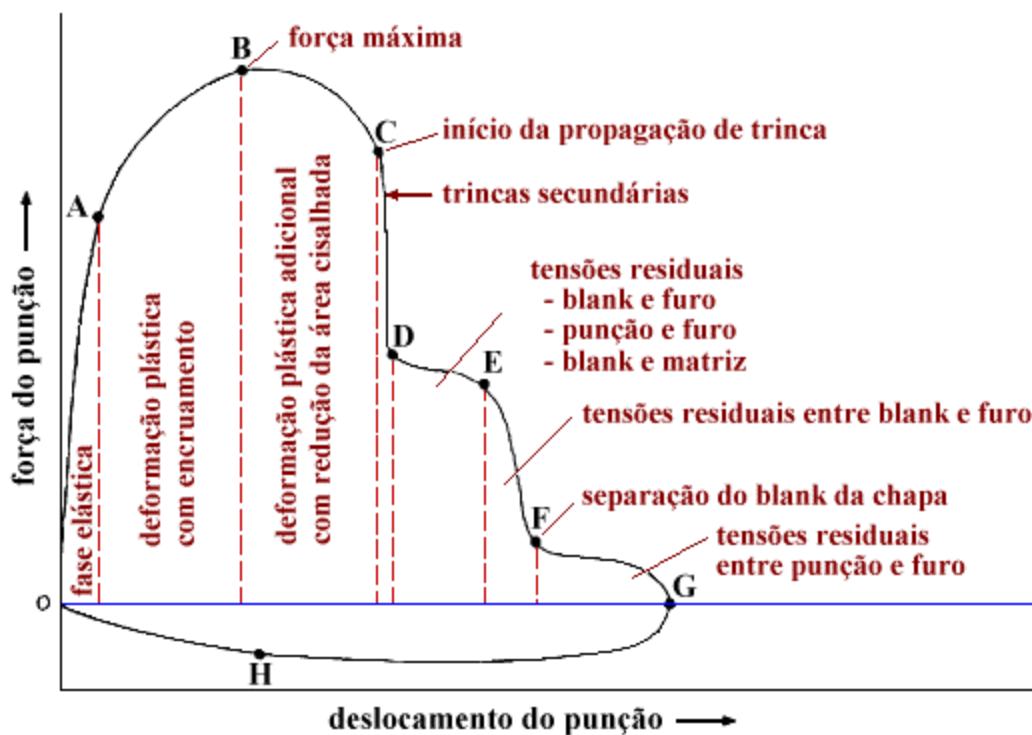


Figura 2. Representação esquemática do diagrama força do punção x deslocamento do punção.

As pesquisas de Chang e Swift (*ibidem*) incluíram a estampagem de chapas com 0,5 mm de espessura dos metais chumbo, estanho, cobre, latão e aço comum baixo carbono. A partir de diagramas força do punção x deslocamento do punção, eles verificaram que a força do punção alcançou um máximo após o punção ter penetrado de 10 a 37% da espessura do corpo de prova. Também verificaram que o escoamento plástico foi mais intenso no centro da chapa do que nas suas superfícies.

3. EFEITO DOS ELEMENTOS DE LIGA/IMPUREZAS E DO TAMANHO DE GRÃO NA ESTAMPAGEM E NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dos elementos de presentes nos aços elétricos, o Si e o P são os que exercem maior influência nas propriedades mecânicas (σ_e e σ_r) e puncionabilidade, como é mostrado a seguir:

Silício

Bernardini (1999), Hou (1996) e Pickering (*apud* Hou, 1996), entre outros autores, já reportaram o efeito do Si no aumento da dureza do aço. Além disso, o Si reduz a ductilidade do aço e aumenta seu limite de resistência como decorrência de seu efeito de endurecimento por solução sólida.

A dureza conferida ao material pelo Si, quando em baixos teores, evita a afiação prematura das ferramentas, uma vez que materiais mais macios tendem a formar rebarbas mais rapidamente (Acesita¹, 1998). No entanto, apesar de conferir elevadas propriedades magnéticas, o aumento do teor de Si pode levar ao aumento no desgaste do ferramental devido a sua abrasividade.

Fósforo

A presença de P tende a melhorar a puncionabilidade do material pelo aumento da dureza, evitando afiações prematuras das ferramentas. Seu excesso, no entanto, também provoca conseqüências

negativas, pois o P, mesmo dissolvido na matriz ferrítica, tende a se concentrar nos contornos de grão, fragilizando o material (Bernardini, 1999).

De acordo com Yashiki (1992), as propriedades mecânicas dependem significativamente da porcentagem de P. O aumento do teor de P resulta num aumento de σ_e e σ_r e na dureza do aço.

Tamanho de grão

O tamanho de grão ferrítico possui um grande efeito sobre a tensão de escoamento de aço baixo carbono (Smith, 1993). Aços com grãos refinados apresentam maior resistência do que aços com grãos grosseiros. A razão para esse grande aumento na resistência é que em baixas temperaturas os contornos de grão atuam como barreira ao movimento das discordâncias.

Pelos estudos de Pinoy *et al* (1998), o recozimento e o tamanho de grão final exercem maior influência nas propriedades mecânicas e magnéticas do que a composição do aço.

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

As amostras utilizadas neste experimento foram os aços de grão não-orientado totalmente processado, identificado como **TP**, e semi processado, identificado como **SP**.

As matérias-primas foram caracterizadas quanto à composição química, tamanho de grão e propriedades mecânicas obtidas do ensaio de tração.

A preparação metalográfica das amostras para análise microscópica ótica seguiu o procedimento padrão de lixamento, polimento e ataque. Os reagentes utilizados foram o de Vilela e nital 4% para os aços **TP** e **SP**, respectivamente.

Para o ensaio de tração foram confeccionados três corpos de prova para cada aço. Os corpos de prova foram confeccionados segundo a norma NBR 6152 (antiga MB-4) para chapa fina, através de uma máquina de corte a laser. O equipamento utilizado na execução desse ensaio foi uma máquina MTS 810-T.

Para a realização do ensaio de estampabilidade foi confeccionado um dispositivo, que acoplado ao equipamento utilizado no ensaio de tração, permitia que o pino superior, quando em compressão, movesse o punção contra o corpo de prova. As flngas entre punção e matriz foram as mesmas que as utilizadas industrialmente na confecção de estatores de motores elétricos pela Embraco.

Este ensaio foi realizado em amostras com dimensões de 150 x 122,5 x 0,5 mm, tendo sido confeccionados três corpos de prova para cada um dos materiais ensaiados.

O tamanho de grão dos aços foi determinado pelo método comparativo. O diâmetro médio dos grãos foi determinado conforme as recomendações de Brooks e Choudhury (1993) e a quantidade de grãos por área conforme Smith (1993). Para essas análises, o aumento utilizado foi de 100 vezes. Foi utilizado o microscópio Olympus modelo Vanox.

A análise química quantitativa das amostras foi determinada pela técnica de espectrofotometria de plasma.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Tab. 1 mostra o resultado da análise do tamanho de grão ASTM para as amostras estudadas e os equivalentes diâmetros médios e grãos por polegada quadrada quando de uma ampliação de 100 vezes. A Figura 3 apresenta as microestruturas dos aços em análise.

O resultado da análise química é mostrado na Tab. 2. Já a Tab. 3 mostra os resultados do ensaio de tração.

Tabela 1. Tamanho de grão

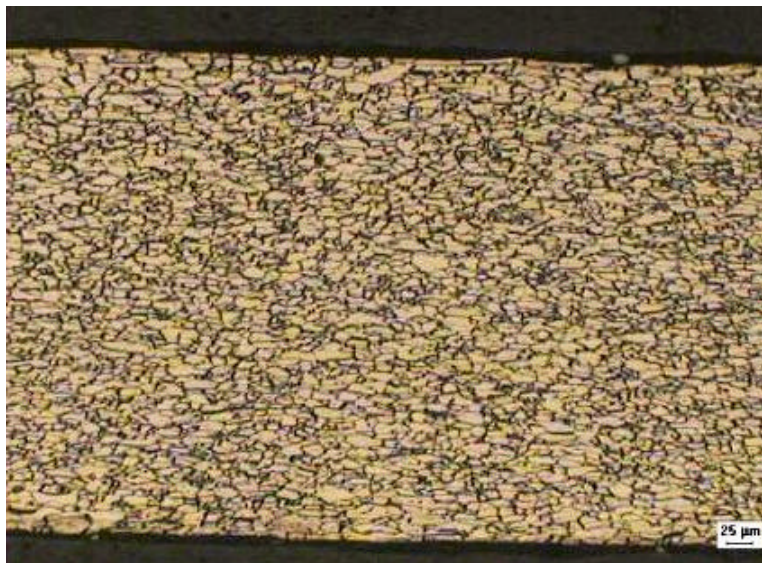
Material	Nº ASTM	Diâmetro médio (mm)	Grãos por polegada quadrada
TP	3 ~ 4	0,127 ~ 0,090	4 ~ 8
SP	8	0,0224	128

Tabela 2. Composição química dos aços estudados

Material	Composição química (%)			
	C	P	S	Si
TP	0,008	0,02	0,005	1,95
SP	0,032	0,02	0,002	0,011



(a)



(b)

Figura 3. Microestrutura dos aços (a) TP, (b) SP. Aumento 100 X.

Tabela 3. Propriedades mecânicas.

propriedade/material	TP	SP
σ_e (MPa)	274	298
σ_r (MPa)	417	323
ϵ_{pico} (%)	20,79	6,78
ϵ_{total} (%)	31,52	26,32
σ_e / σ_r	0,66	0,92

O aço TP, apesar do elevado tamanho de grão e da quase ausência de carbono, apresentou tensão de escoamento de 274 MPa e tensão de resistência de 417 MPa em decorrência do efeito do silício em solução sólida. Este efeito fica ainda evidenciado na quantidade de deformação sofrida pelo material após o estriccionamento.

Já o aço SP, embora seja um aço comum de baixíssimo teor de carbono, apresentou elevada tensão de escoamento (devido ao seu grau de encruamento e pequeno tamanho de grão) e relativamente elevada tensão de resistência (como resultado de seu pequeno tamanho de grão). A carga máxima foi alcançada após apenas 6,78% de deformação e a deformação total até a ruptura foi de apenas 26,32%.

Conforme pode ser observado, quanto menor é o valor da razão elástica (σ_e / σ_r) maior é deformação total até a ruptura.

5.4. Estampagem

Fatores como a composição química do aço, a espessura da chapa, a dureza do aço, o tipo e a espessura da camada de revestimento (quando houver), as tolerâncias do punção e da matriz empregados na estampagem, o tipo do material usado na confecção do punção, o projeto do punção e muitos outros fatores, têm efeito significativo sobre a vida útil do conjunto punção-matriz. Dentro das limitações deste trabalho, apenas os fatores composição química e dureza do aço foram avaliados. Os demais fatores foram mantidos constantes.

Na Figura 4 pode-se observar que os fenômenos que ocorreram durante o processo de estampagem e que podem ser associados a cinco etapas distintas, a saber:

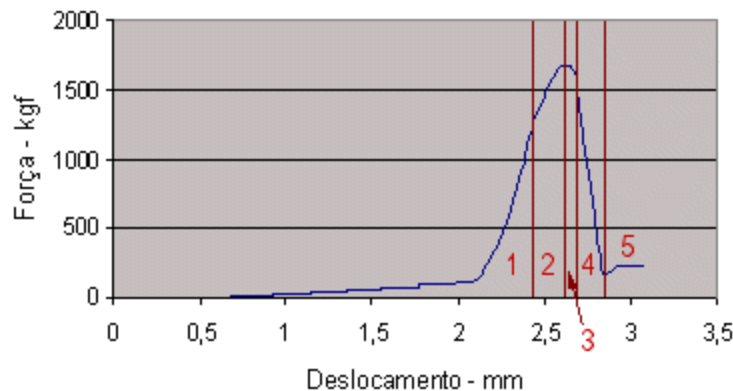


Figura 4 - Diagrama genérico força do punção x deslocamento do punção: 1 - estágio elástico, 2 - estágio elastoplástico, 3 - estágio elastoplástico no qual ocorre cisalhamento, 4 - início e propagação de trincas que levam a ruptura final, e 5 - tensões residuais.

1ª. etapa – a chapa de aço deforma-se elasticamente;

2ª. etapa – inicia-se a deformação plástica. O material escoar ao longo dos eixos de corte na direção de penetração do punção e também no interior da folga entre o punção e a matriz. O escoamento do material leva ao encruamento, o que resulta em um aumento da força de corte até um valor máximo de carga. De acordo com Breitling *at al* (1997), até este momento não ocorre redução de seção nem cisalhamento.

3ª. etapa – inicia-se o cisalhamento, uma vez que o material não consegue mais escoar. Como decorrência, há uma redução na seção transversal e a força de corte diminui apesar do aumento do encruamento do material;

4ª. etapa – inicia-se a fratura após excedida a tensão de cisalhamento de material. A força de corte decresce rapidamente durante esta fase;

5ª. etapa – embora o corte tenha terminado, as tensões radiais entre o punção e a chapa bem como entre o produto e a matriz induzem a um componente de força residual.

Comparando-se o comportamento dos aços elétricos TP e SP (Figura 5) pode-se observar que:

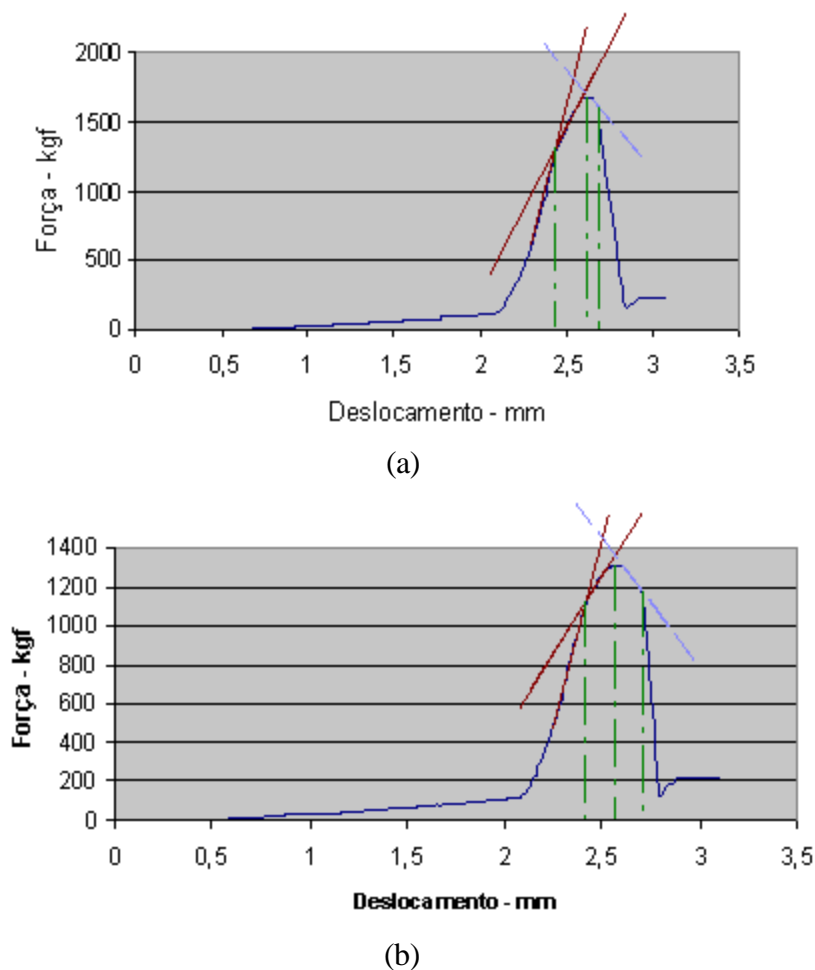


Figura 5 – Curvas força do punção x deslocamento do punção para os aços elétricos (a) TP e (b) SP.

- o deslocamento total do punção até a ruptura foi praticamente o mesmo;
- a força máxima de ruptura foi de aproximadamente 1300 Kgf para o aço SP, enquanto que para o aço TP foi de 1700 Kgf;

- as declividades das curvas (mostradas em marrom na figura) correspondentes as etapas 1 e 2, indicam que o aço TP sofreu maior deformação por encruamento que o aço SP; este, todavia, apresentou maior deformação quando em cisalhamento (região 3, em azul claro).

Esse comportamento pode ser relacionado a:

- ⇒ menor resistência mecânica do aço SP, logo menor força de corte;
- ⇒ a presença de um passe de encruamento da ordem de 3 a 8% no aço SP e assim a sua menor deformação na etapa 2;
- ⇒ a presença de ferrita de menor ductilidade (fragilizada pelo silício) e assim menor deformação por cisalhamento no aço TP. Note-se que o efeito de fragilização da ferrita pelo silício (aço TP) se sobrepôs ao efeito de refino de grão (aço SP).

6. CONCLUSÕES

Os resultados das análises efetuadas permitem concluir que:

- A maior tensão de escoamento do aço SP (298 MPa) relativamente ao aço TP (274 MPa) deve-se ao seu grau de encruamento; os valores de tensão de resistência mostram que o efeito do silício (417 Mpa para o aço TP) se sobrepõe ao efeito de tamanho de grão (323 Mpa para o aço SP);
- Devido ao encruamento, o aço SP apresentou pouca deformação antes do estiramento (6,78 %);
- O valor da razão elástica (σ_e / σ_r) mostrou-se inversamente proporcional a deformação total até a ruptura;
- Comparando os resultados do ensaio de punçabilidade dos aços elétricos, pode-se dizer que
 - o deslocamento total do punção até a ruptura foi praticamente o mesmo;
 - a força máxima de ruptura foi de aproximadamente menor para o aço U450;
 - as curvas força do punção x deslocamento do punção indicam que o aço TP sofreu maior deformação por encruamento que o aço SP; este, todavia, apresentou maior deformação quando em cisalhamento.

Estes resultados foram atribuídos à composição química e a microestrutura destes materiais;

- Embora os resultados do ensaio de punçabilidade não sejam conclusivos, pode-se inferir que a presença de silício no aço TP leve a um maior desgaste das ferramentas de estampagem.

7. REFERÊNCIAS

- ACESITA¹, 1998, “Aço silício como fator de conservação de energia”, Catálogo Técnico.
- ACESITA², 1998, “Aço silício para núcleos magnéticos”, Catálogo Técnico.
- Bernardini, P. A. N., 1999, “EMC 5102 - Materiais de construção mecânica II”, Apostila, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brazil.
- Breitling, J., Pfeiffer, B., Altan, T. & Siegert, K., 1997, “Process control in blanking”, J. of Materials Processing Technology, Vol. 71, pp. 187-192.
- Brooks, C. R.; Choudhury, A., 1993, “Metallurgical failure analysis”, Apêndice E – The relations between ASTM grain size average grain “diameter”.
- Brokken, D., Brekelmans, W. A. M., Baaijens, F. P. T., 1998, “Numerical modelling of the metal blanking process”, J. of Materials Processing Technology Vol. 83, pp. 192-199.

- Hambli, R., 2001, "Finite element model fracture prediction during sheet-metal blanking processes", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 68, pp. 365-378.
- Hou¹, C. K., 1996, "Effects of silicon on the loss separation and permeability of laminated steels", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 162, pp. 280-290.
- Hou², C. K.; Wang, P. C., 1990, "Effects of composition and process variables on core loss and hardness of low carbon electrical steels", Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Vol. 92, pp. 109-115.
- IPT, 1997, "Avaliação da fração de corte em amostras estampadas na Embraco", Relatório Técnico, Instituto de Pesquisas Tecnológicas da USP, São Paulo, Brazil.
- Marra, K. M.; Melo, E. G.; Ribeiro, C. F., 1999, "Série USICORE - Aços elétricos semi-processados", Proceedings of the 54^o Congresso Anual da ABM, São Paulo, Brazil, pp. 198-214.
- Pickering, F. B., 1978, "Physical metallurgy and the design of steels", Applied Science Publishers, London, UK, p.10.
- Pinoy, L., Elliot, K., Standaert, C., 1998, "Influence of composition and hot rolling parameters on the magnetic and mechanical properties of fully processed non-oriented low-Si electrical steels". Journal de Physique IV, Vol. 8, pp. 487-490.
- Smith, W. F., 1993, "Structure and properties of engineering alloys", McGraw-Hill, New York, USA, 527 p.
- Yashiki, H.; Kaneko, T., 1992, "Effect of alloying elements on response of nonoriented electrical steels stamping operations", Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 1, No. 1, pp. 29-34.
- Zhou, Q., & Wierzbicki, T., 1996, "A tension zone mode of blanking and tearing of ductile metal plates", Int. J. Mech. Science, Vol. 38 ,pp. 303-324.

SHEAR TEST IN ELECTRICAL STEEL SHEETS

Marley Anúciação Magella ¹ (marley@pg.materiais.ufsc.br)

Rodrigo Villas Boas Della Torre ² (rodrigo_v_torre@embraco.com.br)

Ingeborg Kühn ¹ (ingeborg@emc.ufsc.br)

Pedro A. N. Bernardini ¹ (pedro@materiais.ufsc.br)

¹ Federal University of Santa Catarina / P. O. Box 476, CEP: 88040-900, Florianópolis, SC, Brazil

² Embraco – Empresa Brasileira de Compressores / Cx. Postal D-27, CEP: 89219-901, Joinville, SC, Brazil

Abstract. *This work has as objective to show the importance of alloy elements in full and semi processed non-oriented electric steel, such as Si, Mn and P, as well as the effect of grain size in the punchability evaluation. Samples of these steels had been submitted to tension and stamping tests. The obtained results allow to conclude that silicon significantly raises the values of resistance of full processed steel, overlapping the effect of the grain size. It was also observed, that the total punch displacement until the rupture was the same for two steels. Therefore, the greater formation of burr normally presented by full processed steel cannot be attributed to a greater displacement before the rupture, as believed in industry.*

Keywords. *electrical steels, punchability, blanking*