

TENSÕES RESIDUAIS EM CHAPAS METÁLICAS

Prof. José Divo Bressan, Eng.Mec., M.Sc., Ph.D.

Departamento de Engenharia Mecânica – Centro de Ciências Tecnológicas – FEJ/UEDESC
Campus Universitário, Cx. P. 631 – 89.223-100 – Joinville – SC – Brasil .

Eráclito Meireles da Silva Junior, Eng. Mec.

Fábrica de Componentes – Bl. 14 - EMBRACO

Rua Rui Barbosa 1020 , Cx. P. 91 - 89.219-901 – Joinville – SC – Brasil

***Resumo** : O presente trabalho trata da análise de tensões e dos métodos experimentais do furo cego e das franjas de Shadow-Moiré para se medir as tensões residuais em chapas de materiais policristalinos sob carregamento elástico. Divide-se as tensões residuais em tensões de membrana e tensão de flexão afim de se poder determina-las. Descreve-se os processos que geram as tensões residuais internas na chapa.*

O enfoque da presente análise é a descrição dos defeitos geométricos e do método experimental para a determinação das tensões residuais em peças do rotor e estator de motor elétrico que são fabricadas a partir de chapas finas de aço elétrico de 0,5 mm. As tensões residuais afetam a qualidade geométrica das peças, circularidade e planicidade, e alteram seu desempenho de magnetização e conseqüente rendimento elétrico do motor. São feitas comparações dos resultados experimentais das tensões residuais máxima e mínima com os valores medidos dos defeitos de empenamento e de ovalização de peças de teste.

***Palavras-chave** : Chapas Metálicas, Defeitos, Tensões Residuais, Método de Shadow-Moiré.*

1. INTRODUÇÃO

Nos processos de fabricação de lâminas para motores elétricos dois efeitos indesejáveis são observados:

- a) O erro de circularidade, ou ovalização, do furo interno das lâminas do estator e do contorno externo das lâminas do rotor, que tendem a assumir a forma elíptica;
- b) O erro de planicidade, ou empenamento, das lâminas para o rotor e estator que tendem a assumir a forma de um parabolóide.

Estas deformações afetam negativamente os processos de montagem, bem como o desempenho elétrico dos motores. O erro de forma que ocorre nas lâminas, seja o empenamento ou a ovalização, é resultado da combinação dos efeitos da geometria da peça, da textura do material utilizado e do estado de tensões residuais existentes.

As lâminas para o estator são de formato retangular, com furos internos que representam em média 30 % da área delimitada pelo contorno externo da lamina. As espessuras variam

mais comumente entre 0,25 mm e 0,6 mm. Esta configuração não é favorável para resistir a esforços de flexão e torção.

A textura, ou orientação cristalográfica preferencial, pode se desenvolver em um metal ou liga durante uma ou mais operações de processamento, tais como fundição, laminação e recozimento. A textura final de deformação de uma peça, ou corpo de prova, depende principalmente da orientação inicial dos grãos antes da mudança de forma imposta na conformação e da temperatura em que o material foi deformado. Em condições ideais, na superfície da chapa a maioria dos grãos está orientada no plano cristalográfico (hkl), aproximadamente paralela ao plano da superfície da chapa, na direção [uvw], que é aproximadamente paralela a direção de laminação. Chapas para transformadores com grãos orientados apresentam comportamento magnético superior ao apresentado por chapas com distribuição aleatória dos grãos. Esta textura que maximiza as propriedades magnéticas, prejudica a estampabilidade. Quando uma chapa com grãos orientados é estampada, deformações indesejáveis na geometria final da peça podem ocorrer (A.F. Padilha e F. Siciliano Jr., 1995).

Durante o processo de fabricação de lâminas para motores elétricos, como laminação, estampagem e tratamento térmico, severos esforços são aplicados ao aço.

A laminação quando feita com rolos de diâmetro pequeno tende a deformar o metal plasticamente, produzindo ao longo da espessura, tensões residuais compressivas na superfície da chapa e trativas próximo ao plano central. Já rolos de diâmetro grande causam o efeito contrário, ou seja, tensões residuais trativas na superfície e compressivas próximo ao centro da chapa (Kalpakjian, 1995).

Os processos de estampagem e corte de chapas deformam a estrutura cristalina do material, imbutindo tensões próximo a região de corte. Estas tensões dependem de fatores como fixação da chapa, folga entre punção e matriz e geometria da ferramenta de corte.

Este trabalho focaliza a análise em chapas finas de aço para motores elétricos, ou seja, aços de grãos orientados. Sendo assim, o efeito da textura não é significativo. Avaliaremos então o efeito das tensões residuais sobre a qualidade geométrica dos corpos de prova produzidos. As técnicas desenvolvidas, partiram da premissa de que o método de medição deve ser adequada à utilização no chão de fábrica, ou seja, fácil utilização, fácil interpretação e resposta rápida.

2. DETERMINAÇÃO DAS TENSÕES RESIDUAIS

Pela natureza das deformações, pode-se dividir a distribuição de tensões em chapas metálicas em dois modos:

- Tensões residuais de membrana, que ocorrem no plano da chapa, responsáveis pela deformação do furo interno das lâminas de estator e do contorno externo das lâminas de rotor.
- Tensões residuais de flexão, que ocorrem ao longo da espessura da chapa, responsáveis pelo erro de planicidade das lâminas de estator e rotor.

Dois técnicas foram desenvolvidas para a determinação das tensões residuais. A caracterização das tensões residuais de membrana foi elaborada a partir da metodologia clássica do furo cego (Kobayashi, 1987). Para a obtenção das tensões residuais de flexão foi desenvolvida uma outra técnica combinando o método óptico de análise de deslocamentos por Shadow-Moiré com técnicas de análise de imagens (Marco A. M. Cavaco, 1996).

2.1 Determinação das Tensões Residuais de Membrana

Dentro dos atuais requisitos de qualidade na fabricação de motores elétricos, deformações no diâmetro de até 800 $\mu\text{m}/\text{m}$ são aceitas, sendo assim o método do furo foi adaptado baseando-se na retirada de material em forma de um disco de uma chapa, Figura 1. Com a retirada do material, ocorrerá uma redistribuição ou relaxação das tensões em torno da área removida do disco. Através da medição dos deslocamentos da região do contorno do furo, é possível obter os valores das tensões residuais de membrana após o relaxamento das tensões. O modelo matemático utilizado (César Kanda Jr., 1999) é baseado na formulação de Kirsch cuja fórmula, em coordenadas polares, do deslocamento ocorrido no furo é :

$$U_r(r, \theta) = -\frac{1+\nu}{2E} r \left\{ \left[\left(\frac{R_0}{r} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \right] (\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) - (\sigma_1 + \sigma_2) \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \right\} \quad (1)$$

Onde:

$U_r(r, \theta)$ é o deslocamento radial [μm].

r e θ são as coordenadas polares.

ν é o coeficiente de Poisson do material.

E é o módulo de elasticidade do material [MPa].

R_0 é o raio do furo executado na peça para retirada do disco.

σ_1 e σ_2 são as tensões principais residuais no plano da chapa [MPa].

β é o ângulo das direções principais.

Esta equação pode ser reescrita como:

$$U_r(r, \theta) = A(r)(\sigma_1 - \sigma_2) \cos(2\theta - 2\beta) + B(r)(\sigma_1 + \sigma_2) \quad (2)$$

Onde:

$$A(r) = -\frac{1+\nu}{2E} r \left[\left(\frac{R_0}{r} \right)^4 - \frac{4}{1+\nu} \left(\frac{R_0}{r} \right)^2 \right]$$

$$B(r) = \frac{1+\nu}{2E} r \left(\frac{R_0}{r} \right)^2$$

Assim a circularidade (circ.) e a variação do raio médio (ΔR_m) podem ser associadas com os parâmetros da equação. Resolvendo o sistema de equações, obtemos as tensões residuais:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_m}{B(r)} + \frac{\text{circ.}}{A(r)} \right)$$

$$\sigma_2 = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta R_m}{B(r)} - \frac{\text{circ.}}{A(r)} \right) \quad (3)$$

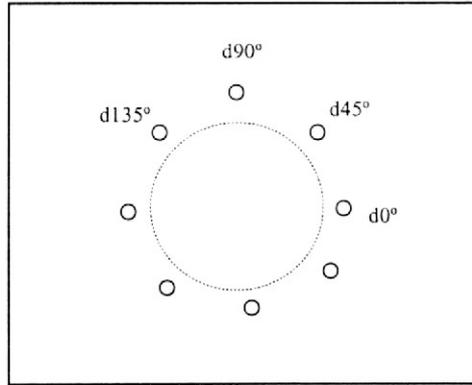


Fig.1 Corpo de Prova da Chapa para determinação das tensões residuais após a retirada do disco central.

O deslocamento radial $U_r(r,\theta)$ é determinado através da medição das distâncias entre os centros dos pequenos furos diametralmente opostos antes ($d0^\circ$) e depois ($d0''$) da retirada do disco central do corpo de prova.

A variação antes e depois das distâncias Δd entre os centros dos furos são:

$$\begin{aligned}\Delta d0^\circ &= d0'' - d0^\circ \\ \Delta d45^\circ &= d45'' - d45^\circ \\ \Delta d90^\circ &= d90'' - d90^\circ \\ \Delta d135^\circ &= d135'' - d135^\circ\end{aligned}$$

Essas variações são usadas para calcular os seguintes parâmetros:

a) Variação média do raio:

$$\Delta R_{\text{med}} = \frac{\Delta d0^\circ + \Delta d45^\circ + \Delta d90^\circ + \Delta d135^\circ}{4} \quad (4)$$

b) Circularidade (ou Ovalização) (maior diferença em relação ao raio médio) :

$$\text{Circ.} = \sqrt{(\Delta d0^\circ - \Delta d90^\circ)^2 + (\Delta d45^\circ - \Delta d135^\circ)^2} \quad (5)$$

c) Direção da máxima circularidade (em relação ao eixo dado por $d0'' - d0^\circ$):

$$\beta = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{\Delta d135^\circ - \Delta d45^\circ}{\Delta d0^\circ - \Delta d180^\circ}\right) \quad (6)$$

Destaca-se que os valores encontrados são relativos e não absolutos, ou seja, são parâmetros que servem de comparação entre as lâminas, isto porque foram utilizadas as hipóteses de chapa infinita, estado plano de tensões e material totalmente isotrópico, o que não é totalmente verdade.

2.2 Determinação das Tensões Residuais de Flexão

O modelo matemático desenvolvido para medir as tensões residuais de flexão (César Kanda Jr., 1999) baseia-se no raio de curvatura médio de empenamento observado nos vários diâmetros analisados dos discos. Quanto menor é o raio de curvatura, ou seja, quanto mais curvo estiver o disco, maior é a tensão residual de flexão presente. Pela teoria clássica da flexão em chapas finas é possível calcular a tensão mecânica equivalente na superfície da chapa que provocaria os mesmos raios de curvatura observados. Estas tensões são dadas por :

$$\sigma_1 = \frac{E.Z}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{\rho_1} + \nu \frac{1}{\rho_2} \right)$$
$$\sigma_2 = \frac{E.Z}{1-\nu^2} \left(\frac{1}{\rho_2} + \nu \frac{1}{\rho_1} \right) \quad (7)$$

Onde:

- ρ_1 é o maior raio de curvatura encontrado [mm]
- ρ_2 é o menor raio de curvatura encontrado [mm]
- E é o módulo de elasticidade do material [MPa]
- ν é o coeficiente de Poisson
- Z é a metade da espessura da chapa [mm]

Os raios de curvatura são calculados a partir da segunda derivada da altura ou cota w da chapa em relação à linha de cada diâmetro analisado no plano de referência. O empenamento é dado pela cota máxima da superfície da chapa deformada. Ver Figura 3.

2.3 Procedimento Experimental

Para se determinar o nível de tensões nas laminas seguiu-se o seguinte roteiro:

1. Coletar material para os corpos de prova após os rolos endireitadores das prensas;
2. Estampar lâminas com aço das regiões próximas as de coleta de material para corpos de prova;
3. Estampar o primeiro estágio dos corpos de prova (conforme Figura 1);
4. Medir, em máquina de medir por coordenadas, as distâncias entre centros dos pequenos furos diametralmente opostos;
5. Estampar o segundo estágio dos corpos de prova;
6. Medir, em máquina de medir por coordenadas, as novas distâncias entre centros dos furos diametralmente opostos;
7. Alimentar o modelo matemático para avaliar as tensões de membrana;
8. Medir a variação de planicidade dos discos centrais através do método de Shadow-Moiré;
9. Alimentar o modelo matemático para avaliar as tensões de flexão;
10. Medir o erro de planicidade das lâminas estampadas no passo 2;
11. Comparar os resultados.

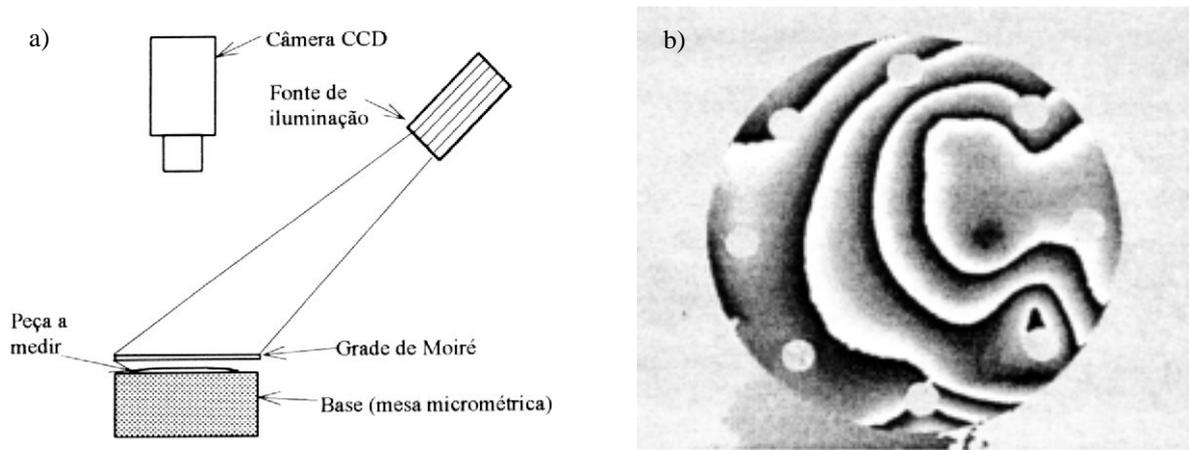


Fig.2 a) Esquema do Método Experimental de Shadow-Moiré. b) Franjas de Moiré.

O Método de Shadow-Moiré :

Para a quantificação das tensões residuais fora do plano ou de flexão, pela técnica de Shadow-Moiré, padrões de franjas ou mapas de fase podem ser observados quando uma lente reticulada, chamada de rede padrão (master grating), é posicionada próximo a uma superfície empenada enquanto esta superfície é iluminada por uma fonte de luz segundo um ângulo específico. O resultado final é um conjunto de franjas, como um “mapa de curvas de nível” que representam o empenamento desta chapa. A quantificação do empenamento é feita através do número de franjas formadas neste disco. Nos experimentos foi utilizada uma grade com 12 linhas por milímetro e a quantificação do número de franjas foi feita através de um microcomputador com placa de processamento de imagem acoplado a uma câmara filmadora. As tensões residuais são então calculadas através do campo de deslocamentos observado no disco. A Figura 3 abaixo mostra um esquema desta montagem.

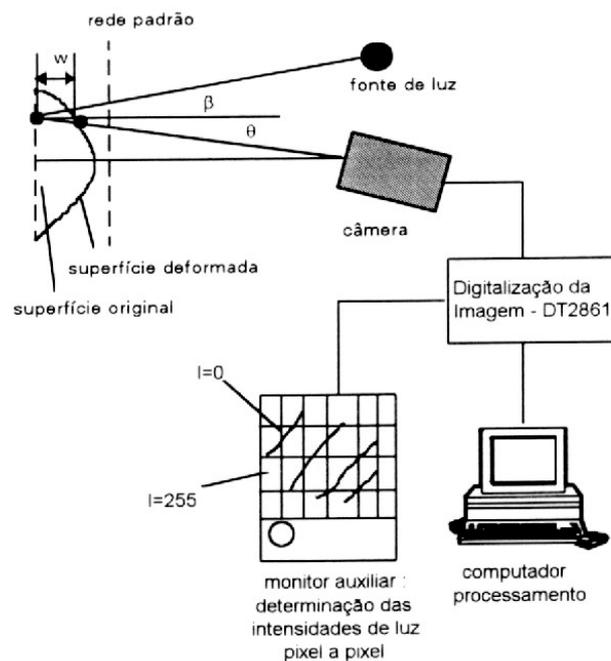


Fig.3 Esquema Geral da Obtenção das Franjas pelo Método de Shadow-Moiré.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 4 e 5 abaixo apresentamos os resultados experimentais das Tensões Residuais Máximas e Mínimas e seus efeitos sobre os defeitos de ovalização (ou circularidade) e empenamento (ou planicidade) obtidos dos corpos de prova das chapas metálicas conforme visto acima. Foram utilizados 36 corpos de prova de chapas de aço elétrico como amostragem para o presente estudo. As laminas obtidas para teste ainda não tinham sofrido o tratamento térmico de recozimento. Os resultados mostram grandes variações nas tensões residuais máxima ($\sigma_{\max} = \sigma_1$) e mínima ($\sigma_{\min} = \sigma_2$). Na Figura 4 mostramos os resultados das tensões de membrana usando-se o Método do Furo Cego que são calculadas a partir da equação (3). Conclue-se que as tensões residuais tem muito pouca ou nenhuma influência na ovalização (calculada através da equação (5)) das peças obtidas, pois as variações de tensões não correspondem às variações de circularidade.

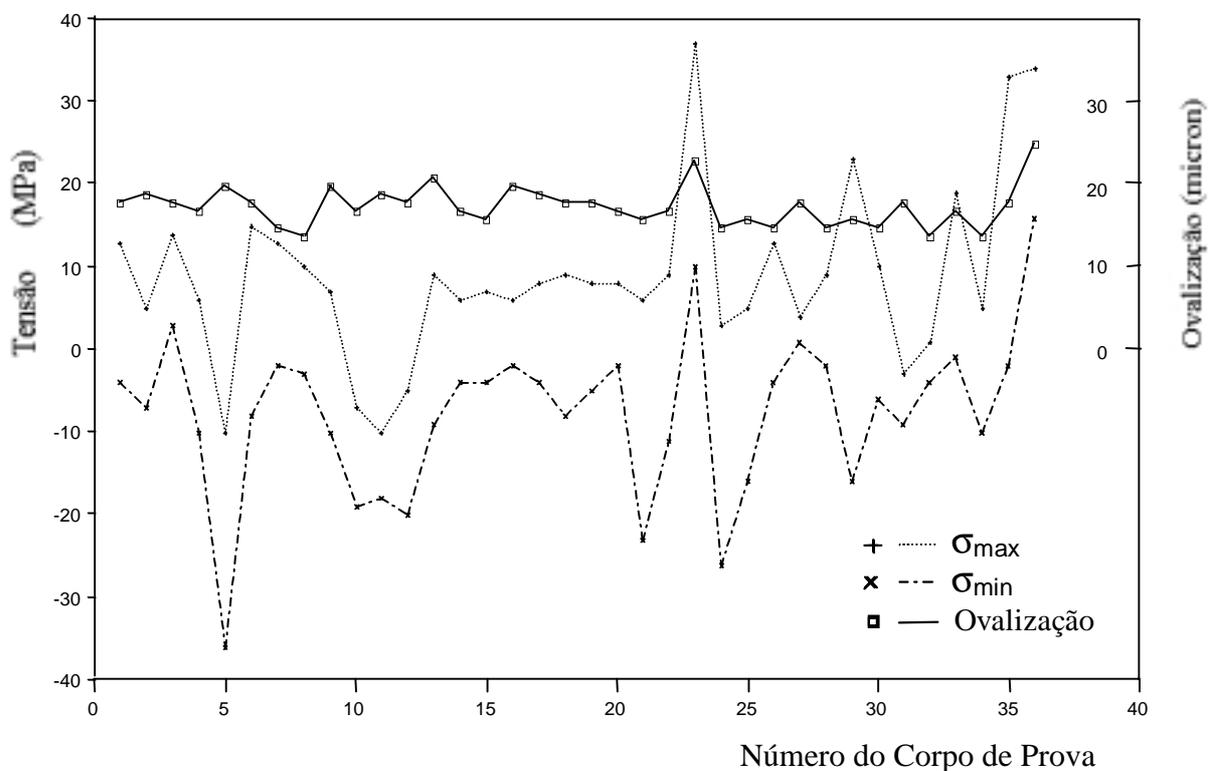


Fig.4 Resultados Experimentais das Tensões Residuais e Ovalização ou Circularidade, usando-se o método do furo cego antes do tratamento térmico das laminas do rotor.

Na Figura 5 abaixo apresentamos os resultados experimentais das tensões residuais devido a flexão calculados a partir da equação (7) e do empenamento máximo (w_{\max}) dos discos obtidos dos corpos de prova. Neste caso utilizamos o método de Shadow-Moiré dos mapas de fase e de acordo com o esquema geral visto na Figura 3 acima para determinação das tensões residuais e do empenamento máximo w_{\max} (cota máxima em relação ao plano inicial de referência). Para se determinar o maior raio ρ_1 e o menor raio ρ_2 foram usadas as equações das derivadas segunda da cota w em relação ao diâmetro d , conforme apresentado anteriormente pelo autores Marco A. M. Cavaco e outros, 1997.

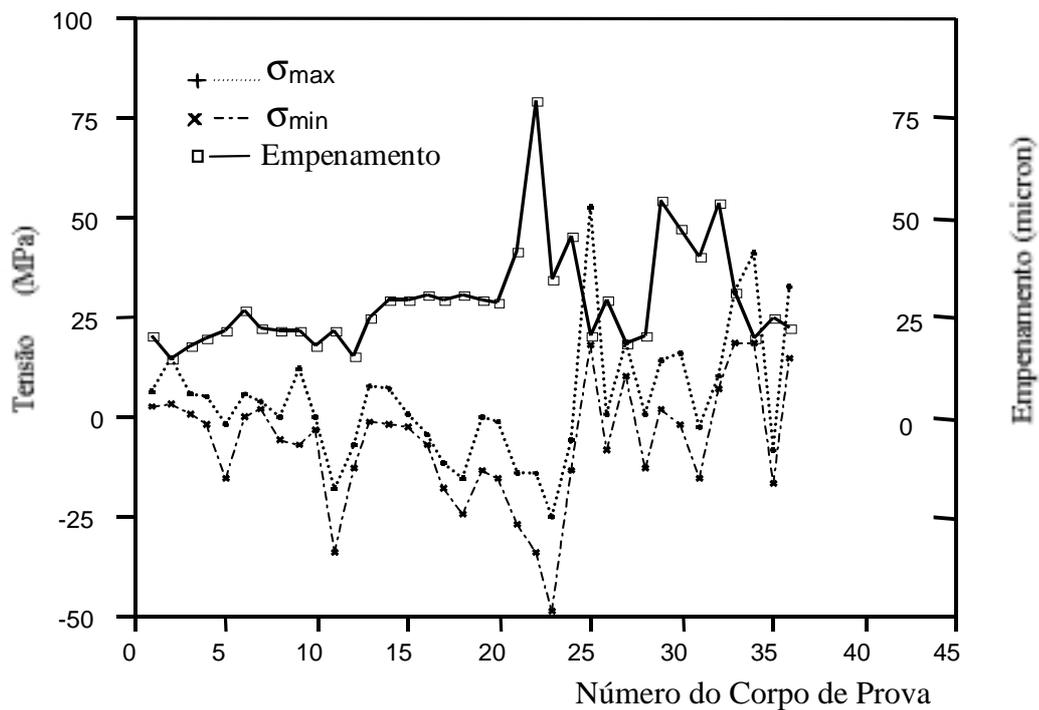


Fig.5 Resultados Experimentais das Tensões Residuais e Empenamentos pelo método de Moiré antes do tratamento térmico das laminas do rotor.

4. CONCLUSÕES

O gráfico Tensão vs. Empenamento na Figura 5 acima mostra uma relação forte entre a tensão residual e o erro de planicidade da lâmina. Percebe-se que para valores de tensão elevados, sejam eles compressivos ou de tração, as lâminas sofrem a perda da planicidade, tanto maior quanto maior for o erro de planicidade. Confirmam-se então as hipóteses de que os valores de baixa textura dos aços de grão não orientado e a forma de processamento têm pouca influência sobre o empenamento.

Por outro lado, no gráfico da Figura 4 acima da Tensão vs. Circularidade, a relação entre tensão residual e o erro de circularidade não é tão percebida. A hipótese é de que, neste caso, a geometria da ferramenta de estampagem e a forma de processamento do material, mascaram os resultados finais. Supõem-se que a textura dos aços de grão orientado é afetada na região de corte e que esta nova textura afeta significativamente o erro de circularidade.

Fica também evidenciado que a decomposição da tensão residual em dois tipos, tensão residual de membrana e tensão residual de flexão é pertinente, já que os efeitos são distintos conforme visto acima nas Figuras 4 e 5.

Destaca-se que as observações feitas acima referem-se a tendência de comportamento do processo de corte de chapas finas de aço elétrico, isto porque o número de amostras ainda é pequeno e pouco representativo. A continuidade dos trabalhos de coleta de amostras e o incremento do banco de dados deverão ser encaminhadas com o objetivo de validar com maior embasamento o trabalho aqui exposto.

As Figuras 4 e 5 também constituem *Cartas de Controle* para se analisar e controlar o processo de corte de chapas continuamente.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à EMBRACO e ao Centro de Ciências Tecnológicas de Joinville – CCT/UEDESC pelo apoio financeiro recebido.

6. REFERÊNCIAS

- Cavaco, M. A. M. e Freire, J. L. F.; Avaliação da Integridade Estrutural de Componentes Mecânicos por Shadow Moiré. COTEQ/SEMINSF 96, Rio de Janeiro, 1996.
- Cavaco, M. A. M.; Gonçalves Jr., A. A.; Kanda, C. e Da Silva Jr., E. M.; Caracterização de Tensões Residuais em Chapas Finas. COTEQ 97/ V SAET, Rio de Janeiro, 1997.
- Kanda, C.; Desenvolvimento de uma Técnica para Caracterização de Tensões Residuais em Chapas Finas. Dissertação de Mestrado, UFSC, abril de 1999.
- Kalpakjian, S.; Manufacturing Engineering Technology. Ed. Addison-Wesley Publishing Company, 1995.
- Kobayashi, A. S.; Handbook on Experimental Mechanics. Ed. Prentice-Hall Inc., 1987.
- Padilha, A. F. e Siciliano Jr., F.; Encruamento, Recristalização, Crescimento de Grão e Textura. Ed. ABM. São Paulo, 1995.

RESIDUAL STRESS IN SHEET METALS

Abstract : *The present work is related to the stress analysis and the Shadow-Moiré fringes and hole methods to measure the residual stresses in polycrystalline sheet materials under elastic loading. The residual stresses are decomposed in shell stresses and bending or out of plane stresses in order to be evaluated. The processes that generates the internal residual stresses in the sheet metal are briefly discussed.*

The present approach is concerned with the description of the geometric defects and the experimental methods for the calculation of the residual stresses in the rotor and stator plates of an electric motor made from electric steel thin sheets of 0,5mm. The residual stresses affects the geometrical quality of the pieces, circularity and planicity, and modifies its magnetisation performance and consequent electric performance of the electric motor. Comparisons of the experimental results for the maximum and minimum residual stresses and the values for bending and circularity defects of the tested pieces are shown.

Key words: Residual stress, sheet metal, geometrical defects, Shadow-Moiré method.