

ANÁLISE DE TENSÕES RESIDUAIS EM VÁLVULAS ESTAMPADAS POR MEIO DA DIFRAÇÃO DE RAIOS-X E DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS

Jairo Aparecido Martins

Associated Spring do Brasil Ltda.

C.P. 1288 - 13054-701 – Campinas – SP – Brasil

mjairo@asbg.com.br

Lisandro Pavie Cardoso

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física Gleb Wataghin

Departamento de Física Aplicada

C.P. 6165 - 13083-858 – Campinas – SP – Brasil

cardoso@ifi.unicamp.br

José Alfredo Fraymann

Universidade Estadual de Campinas

Instituto de Física Gleb Wataghin

Departamento de Física Aplicada

C.P. 6165 - 13083-858 – Campinas – SP – Brasil

jalfredo@ifi.unicamp.br

Sérgio Tonini Button

Universidade Estadual de Campinas

Faculdade de Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia de Materiais

C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brasil

sergio1@fem.unicamp.br

***Resumo** - A evolução dos materiais, de seus processos de transformação e de diversos componentes mecânicos vem requerendo cada vez mais o desenvolvimento de técnicas e métodos para sua análise. A transformação de materiais por deformação plástica origina tensões internas chamadas tensões residuais que podem vir a alterar a resposta do componente e/ou sistema quando em uso. Este trabalho tem como objetivo a análise dessas tensões residuais, em válvulas dinâmicas estampadas, por difração de raios-X e pelo método de elementos finitos. Dentro deste contexto, foi desenvolvido um método alternativo ao usual $\sin^2\psi$ para a determinação de tensões residuais por difração de raios-X em pequenas áreas. Esse utiliza o método de análise da difração de raios-X usualmente empregada na determinação de tensões residuais em filme finos. Os resultados obtidos na difração de raios-X mostraram-se compatíveis com o processo de deformação estudado e também com os resultados da simulação numérica pelo método de elementos finitos. A comprovação prática desses resultados deu-se pela realização de ensaios de durabilidade em bancada por flexão alternada reversa de uma válvula dinâmica nas seguintes condições de fabricação: a) estampada, b) estampada e deformada plasticamente em regiões de alta sollicitação*

mecânica e c) estampada, deformada plasticamente e com um processo abrasivo adicional empregado para a eliminação de regiões potencialmente danosas ao componente, previamente verificadas na simulação. Os resultados obtidos nesses ensaios comprovaram a validade dos métodos empregados para a análise das tensões residuais.

Palavras-chaves - Estampagem, Tensões residuais, Difração de raios-X, Método de Elementos Finitos.

1- INTRODUÇÃO

Os sistemas e produtos que possuem componentes mecânicos sujeitos a solicitações dinâmicas requerem constantemente o aumento do seu nível tecnológico. Na fabricação, a análise do comportamento metalúrgico dos materiais durante seu processamento é de grande valia, pois a escolha de um processo capaz de prover características de forma e metalúrgica é imprescindível para a adequação do produto físico às exigências do projeto, [1]. Além disso, os processos de transformação mecânica de estampagem e de acabamento de peças acarretam tensões residuais que afetam significativamente a vida útil dos produtos.

2- REVISÃO

2.1 – Corte por Estampagem

A estampagem é um processo de fabricação econômico capaz de gerar várias formas geométricas, de tamanho e acabamentos adequados, e originar produtos na forma de semi-acabados ou produto final, [2]. O processo de corte por estampagem é caracterizado pela grande deformação localizada seguido de uma fratura dúctil. Na região de corte, três ou quatro zonas se sobrepõem e podem ser distinguidas num processo de corte por estampagem. A zona de dobramento "roll-over zone", a zona de cisalhamento e uma zona de ruptura, (Figura 2.1) [3].

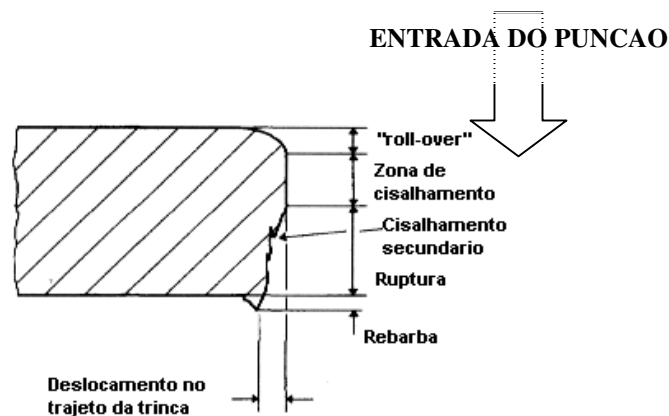


Figura 2.1 – Zonas características do processo de corte por estampagem, [2].

2.2 – Tensão Residual

Geralmente, três tipos de tensão residual podem ser caracterizados num sólido de acordo com sua extensão, primeiro, denominado macroscópico, que se estende por vários grãos do material. Um segundo, denominado micro-tensão estrutural, que cobre a distância de um grão ou parte de sua extensão, podendo ocorrer, por exemplo, entre duas fases do material que contêm diferentes características físicas ou até mesmo em áreas que contêm partículas, como inclusões. E um terceiro, que cobre várias distâncias atômicas dentro dos limites do grão numa pequena fração do material [8].

Em linhas gerais, dois tipos de ensaios são utilizados na medição da tensão residual, ensaios destrutivos e ensaios não destrutivos.

Os ensaios não destrutivos baseiam-se na relação entre parâmetros físicos medidos pela difração de Raios-X ou Ultra-som. O princípio da determinação do estado de tensão passa pela análise do feixe monocromático de Raios-X que interage com um material cristalino, fazendo com que fótons incidentes difratem numa direção previamente conhecida, determinada pela equação de *Bragg ou lei de Bragg* [6].

$$n\lambda = 2d \text{ sen } \theta \quad (2.1)$$

Quando uma peça de material policristalino é deformada elasticamente, há uma deformação uniforme a distâncias relativamente longas entre os espaçamentos dos planos da rede cristalina onde estão contidos os cristalites (grãos) que mudam seu estado livre para algum novo valor correspondente a intensidade da tensão aplicada. Este novo espaçamento caracterizado pelo distanciamento entre grãos, para qualquer conjunto de planos igualmente orientados em relação à tensão aplicada, é medido pela difração de raios-X, [4].

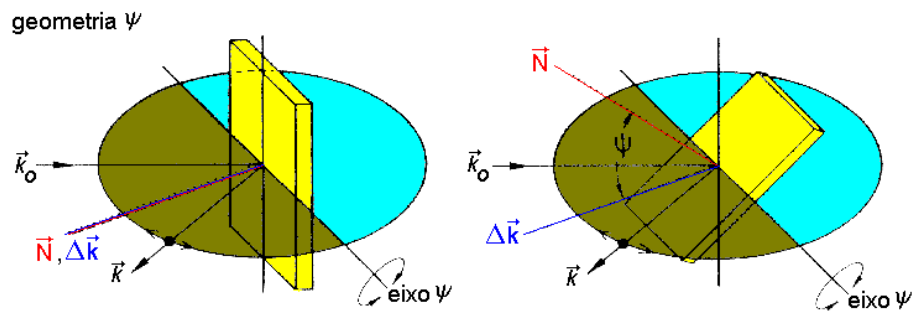


Figura 2.2- Figura demonstrativa do ângulo psi.

A determinação da tensão residual passa pela medida da deformação presente na família de planos hkl em algumas direções (ψ) (Figura 2.2) e da obtenção do seu tensor de tensão pelo equacionamento através da Mecânica dos meios contínuos [7,8]. Esse equacionamento (2.2 e 2.3) assume uma deformação dentro do limite elástico e um comportamento isotrópico do material, [4,5,8]. A determinação da variação interplanar e da tensão passa pelo seguinte equacionamento:

$$\varepsilon = \frac{d_i - d_n}{d_i} \quad (2.2)$$

$$\sigma_n = \frac{E}{(1+\nu)\text{sen}^2\psi} \left(\frac{d_i - d_n}{d_n} \right) \quad (2.3)$$

A determinação da deformação de um plano considerado pela difração de raios-X para um estado de tração uniaxial vem da definição da variação do seno do ângulo difratado θ , sendo:

$$\left(\frac{d_i - d_n}{d_n} \right) = \frac{\text{sen } \theta_n}{\text{sen } \theta_i} - 1 \quad (2.4)$$

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma = \frac{E}{(2\nu)} \varepsilon_z \quad (2.5)$$

onde E é o módulo de Elasticidade (Young), d_i ou d_0 é a distancia interplanar inicial, d_n é a distância interplanar na direção n , ν o coeficiente de Poisson, ψ o ângulo ψ e θ é o ângulo de incidência do feixe (ângulo de Bragg).

Em 1989, Scarminio [5] estudou a determinação dos níveis de tensões mecânicas em filmes de Pb/Pd apresentando um método simples para a medição da deformação de planos por difração de raios-X, aliada a cálculos analíticos e sem a utilização do método de *psi* quadrado. Segundo o mesmo autor, a lei de *Hooke* para materiais de comportamento linear e isotrópico, e para uma tensão planar e homogênea onde tem-se, $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$ e $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_z = 0$, a tensão residual pode ser determinada em referencia as equações (2.4) e (2.5) como sendo,

$$\sigma = \frac{E}{2\nu} \left(\frac{\sin \theta_n}{\sin \theta_i} - 1 \right) \quad (2.6)$$

3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 – Material

O material utilizado neste trabalho foi fornecido pela empresa Uddeholm. Foram utilizados dois aços para a análise do processo proposto, mostrados na Tabela 3.1. O material de designação UHB-20C utilizado para a fabricação da válvula, $\leq 1,00$ mm, e o material UHB 15N20 disponível em espessuras maiores, entre 1,00mm e 1,5mm para a medição da tensão residual por raios-X.

Tabela 3.1- Composição química de catálogo dos aços utilizados na fabricação de válvulas.

Tipo do Aço	Composição Química (% nominal em peso)							
	C	Si	Mn	P max.	S máx.	Cr	Ni	Mo
UHB 20C	1,00	0,3	0,45	0,015	0,015	-	-	-
UHB15N20	0,75	0,3	0,4	0,020	0,015	-	2,00	-

Com o primeiro aço, UHB 20C foram realizados ensaios de cunhagem em válvula estampada, além dos ensaios dinâmicos. Com o UHB15N20, ensaios de corte, cunhagem e medição da tensão residual para a comparação com os valores obtidos na simulação numérica.

3.2 – Estampagem

Devido a não possibilidade de análise de amostras com pequenas espessuras por difração de raios X, pela limitação da resposta do equipamento (intensidade), a estampagem do material para a medida da tensão residual no processo foi efetuada para uma espessura de chapa de 1,5mm, material UHB 15N20. O objetivo dessa estampagem foi a verificação do nível de tensão residual no material na mesma condição do processo de fabricação de válvulas. A operação foi efetuada em guilhotina mecânica NEWTON modelo TM-8. Foram ensaiadas mais duas amostras deste mesmo material: a primeira, cortada por eletroerosão e então submetida aos processos de tamboreamento A e B para verificar a efetividade de cada um desses processos na obtenção de tensões residuais, já que supostamente, a condição de corte por eletroerosão não gera tensões. A segunda amostra foi cortada por estampagem, e então, submetida a ambos os processos adicionais de tamboreamento.

3.2.1 – Ensaios de Cunhagem

A cunhagem foi efetuada tanto no material UHB-15N20 em chapa de espessura 1,5mm (chanfro de 0,25mm) cortado por eletroerosão, e numa válvula dinâmica estampada. O propósito da cunhagem da chapa foi a medida por raios-X da tensão residual introduzida para então compará-la aos resultado obtidos no MEF. Já no caso da válvula (Figura 3.1), objetivou-se a introdução de

tensões residuais compressivas que resultassem no aumento de sua durabilidade. Para tal operação foi desenvolvida uma ferramenta especial e utilizada uma prensa excêntrica mecânica [9].

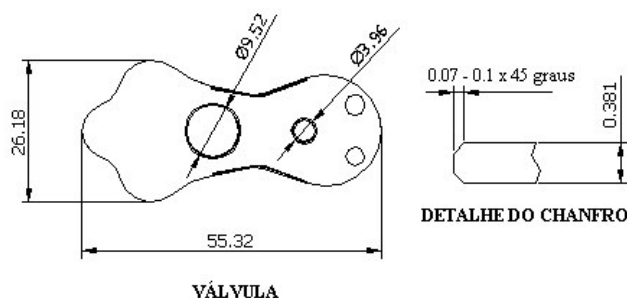


Figura 3.1 – Válvula cortada por estampagem e cunhada.

3.3 – Tamboreamento

A operação de tamboreamento foi efetuada para avaliar sua influência na tensão residual de amostras do material UHB 15N20, cortada por eletroerosão e por estampagem. Essa operação foi efetuada sob diferentes parâmetros de processo, processos denominados A e B. O tempo de processo foi mantido igual para ambos os processos. O processo de tamboreamento não é detalhado no trabalho por tratar-se de tecnologia considerada sigilosa pela empresa. Essa operação também foi efetuada em válvulas nas condições somente estampada e estampada e cunhada. A medição dos chanfros foi efetuada em *Contracer*, Mitutoyo CBH-400.

3.4 - Análise de Elementos Finitos (MEF)

A análise de elementos finitos foi efetuada utilizando-se o software Superform versão 2002. A simulação levou em consideração os parâmetros, $E = 210\,000$ MPa e $\nu = 0,30$ para comportamento elástico e $\nu = 1/2$ para comportamento plástico. O coeficiente de atrito considerado foi o de Coulomb de 0,3, para materiais sobre trefilação com pouca lubrificação. A equação de encruamento utilizada para ambos os materiais foi a de Holloman ($\sigma = K \cdot \epsilon^n$). Os coeficientes e expoentes da equação para cada material foram determinados no ensaio de tração, sendo para o material UHB20C $\rightarrow K=2300$ MPa e $n=0,0487$, e para o material UHB15N $\rightarrow K=1900$ MPa e $n=0,0487$.

Para a condição de corte e de deformação por cunhagem da chapa de UHB-15N20 com 1,5mm de espessura foi utilizada uma malha de elementos quadráticos axi-simétricos com trinta e oito nós na direção da espessura da chapa. Já para o corte e deformação por cunhagem da válvula dinâmica foram mantidos dez nós na direção da espessura da chapa.

Como se trata de um processo de estampagem simétrico, somente um lado do material foi simulado de forma bidimensional, além da não utilização do remalhamento devido a pouca diferença na intensidade das tensões resultantes. O critério de escoamento utilizado na simulação foi o de von Mises para materiais isotrópicos. A tensão equivalente de von Mises, após o relaxamento do carregamento do punção nos processos foi considerada como a intensidade de tensão no material a ser comparada com os valores encontrados por difração de raios-X. A deformação da operação de estampagem inserida no modelo de processo de cunhagem foi de 0,26 [9].

3.5 - Difração de Raios-X

A amostra foi analisada ao longo de 90° (Figura 3.2) de sua espessura para a amostra cunhada e em 180° para a chapa cortada por eletroerosão e por estampagem. As amostras analisadas por difração de raios-X foram as produzidas nas condições estampada, cortada por eletroerosão, cortada por eletroerosão e após tamboreada e cortada por estampagem e então cunhada. Utilizou-se para a medida um difratômetro Philips 1710 utilizando-se radiação de $\text{Cu}_{K\alpha}$, (1,5405 Å) e um monocromador de grafite para feixe difratado.

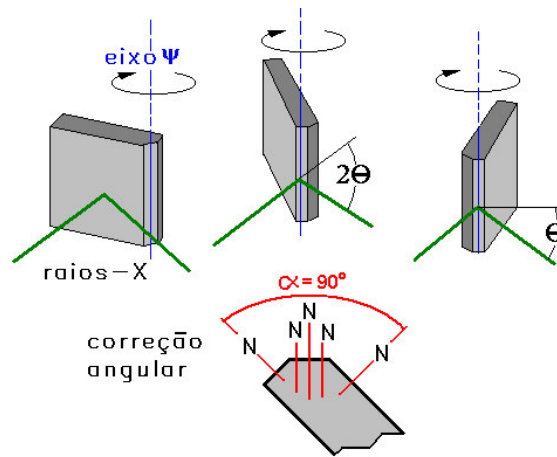


Figura 3.2 – Posicionamento da amostra na análise por difração de raios X.

Como é sabido, os planos (310) são os mais indicados na medida de tensões residuais de aços pelo alto ângulo de Bragg. Para esse caso em particular, devido a grande dispersão dos resultados verificada na medição desses planos (baixa intensidade) utilizou-se o plano (110). O resultado desta medição verificada através da variação do ângulo 2θ ($44,456^\circ$) determinou a variação interplanar, deformação física.

3.6 - Fadiga

O ensaio de fadiga foi efetuado em válvulas dinâmicas no intuito de validar as válvulas nas condições, estampadas, cunhada e cunhada e tamboreada. O carregamento aplicado é do tipo flexão alternada reversa, (Figura 3.3).

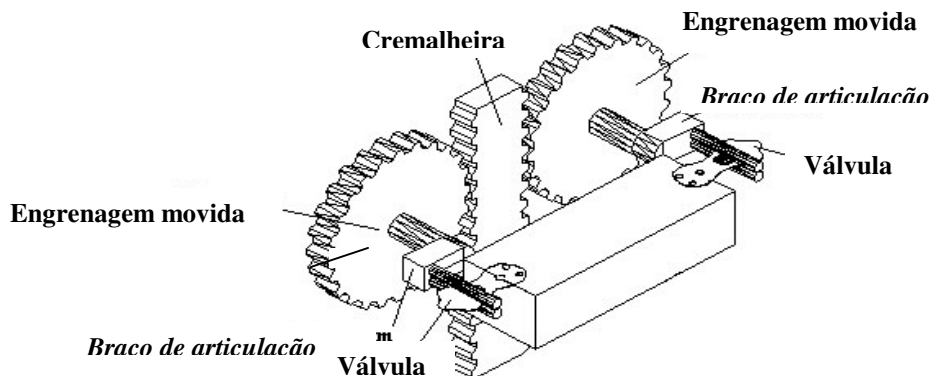


Figura 3.3 – Esquema de funcionamento da máquina.

4- APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 – Tensões verificadas na Simulação do Material Cunhado (UHB-15N20)

Assume-se que a tensão residual é a própria tensão remanescente no material, e que pode ser representada pela tensão equivalente, o que é justificada por tratar-se de uma condição de estado, onde se considera a interação entre todas as tensões às quais o material é submetido, seja pela representação das tensões principais ou pelas tensões aplicadas em determinados planos. O valor máximo de 1356 MPa normal ao chanfro foi verificado no MEF, próximo ao canto superior do chanfro e a 45° de uma das faces, e 1162 MPa no ponto médio do chanfro conforme mostra a Figura 4.1.

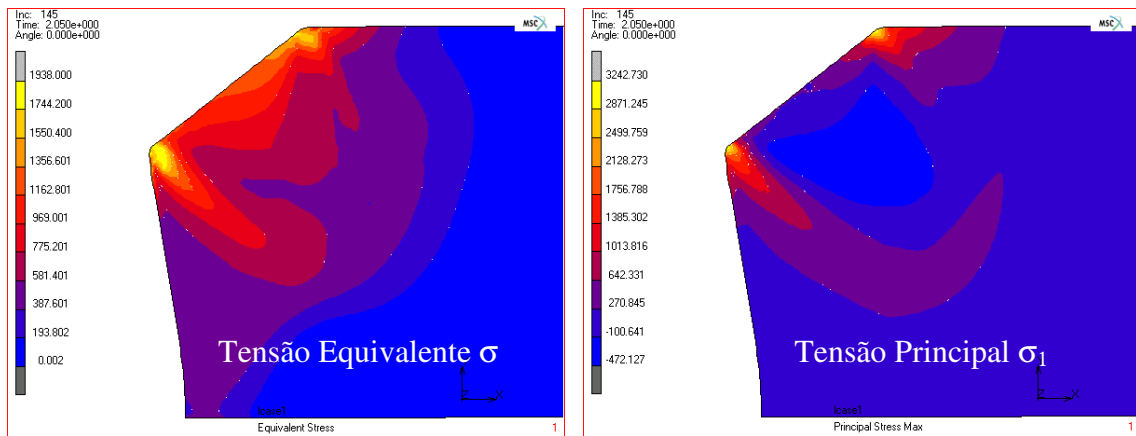


Figura 4.1 – Tensão equivalente do material mais espesso e deformado por cunhagem

Verifica-se que, apesar de haver um alto nível de tensão residual nos chanfros suas extremidades são as regiões que apresentam maior estado de tensão trativo, pela análise da tensão equivalente (1700MPa) e da principal σ_1 (+2800MPa) nessa região.

4.2 – Tensões verificadas na Simulação por MEF da Válvula (UHB-20C)

A válvula cunhada apresenta uma condição de estado compressivo de tensões quase que na sua totalidade, Figura 4.2. A região trativa é verificada na superfície superior do chanfro, com σ_1 da ordem de +1100 MPa sendo uma região bem restrita, como verificado anteriormente na simulação da cunhagem do material de maior espessura. O valor máximo da tensão equivalente foi 1479 MPa.

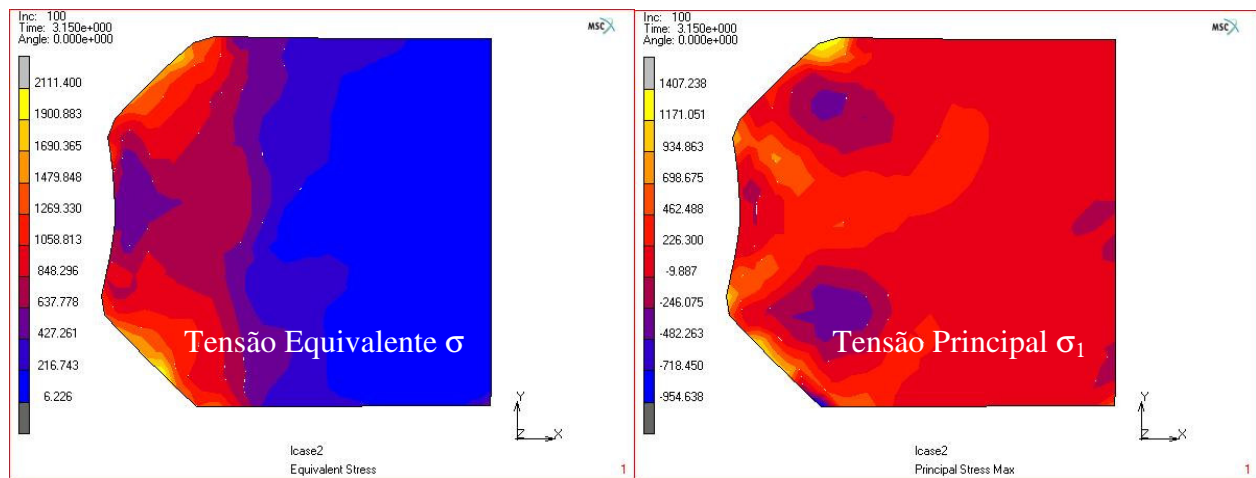


Figura 4.2 – Tensão equivalente do material mais espesso e deformado por cunhagem

4.3 – Tensões residuais determinadas por difratometria (UHB-15N20)

As determinações das tensões residuais passaram pelo equacionamento descrito no item 2.2 desse trabalho. A Figura 4.3 apresenta os resultados de tensão residual obtidos por MEF e difratometria. Verifica-se uma diferença na evolução dos valores da tensão residual medida por difração de raios X, e os obtidos na simulação por MEF da amostra estampada.

Para a amostra cunhada, verifica-se um estado de tensões compressivo, determinado pelo decréscimo da distância interplanar (110). O valor máximo encontrado é de 1500 MPa, compatível com o nível de resistência mecânica do material e com o nível de deformação mecânica aplicada. Não se observa o estado de tensão trativo verificado na simulação por MEF (Figura 4.4).

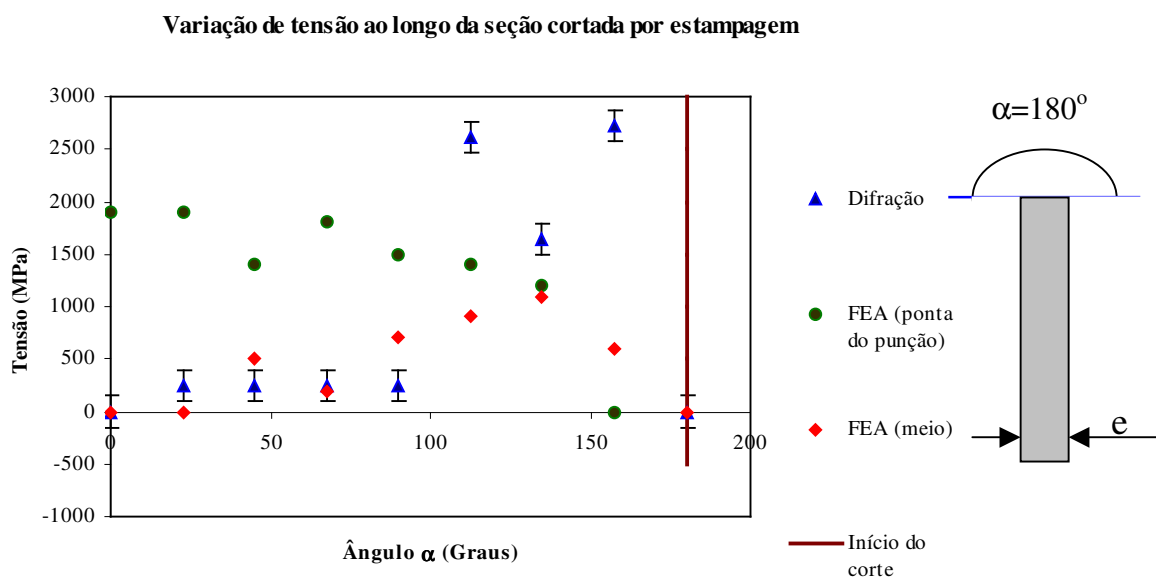


Figura 4.3-Varição da tensão residual calculada para a difratometria e simulada por MEF para o material UHB-15N20 somente estampado

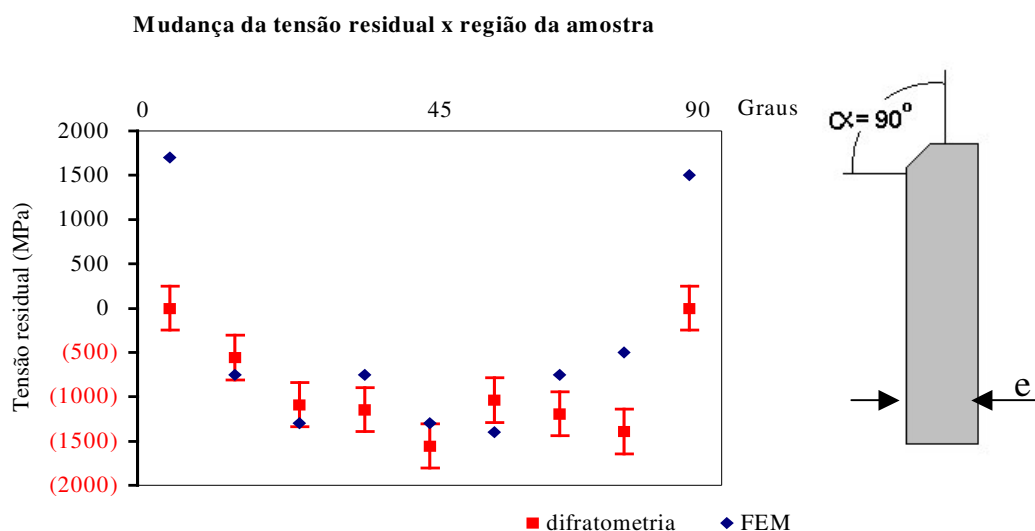


Figura 4.4 – Tensão residual medida e determinada por simulação (tensão equivalente de von Mises) para a cunhagem do material UHB-15N20.

Em amostras obtidas por eletroerosão (Figura 4.5) com o processo de tamboreamento A, além de apresentarem um menor estado de tensão trativo, também apresentam uma menor dispersão nos resultados, os quais são importantes para elevar a durabilidade do componente.

Na análise das figuras 4.5 e 4.6 verifica-se que, pelas medidas da tensão residual por difratometria a maior efetividade na minimização ou eliminação dos estados de tensão trativos inerentes ao material somente estampado é verificada na adoção do processo A. Assim, a combinação dos processos de estampagem e tamboreamento pode trazer benefícios aos componentes dinâmicos por reduzir os estados de tensão trativos e mesmo para alguns casos introduzir estados de tensão compressivos.

Variação da tensão residual proveniente dos processos de corte por eletro-erosão + tamboreamento

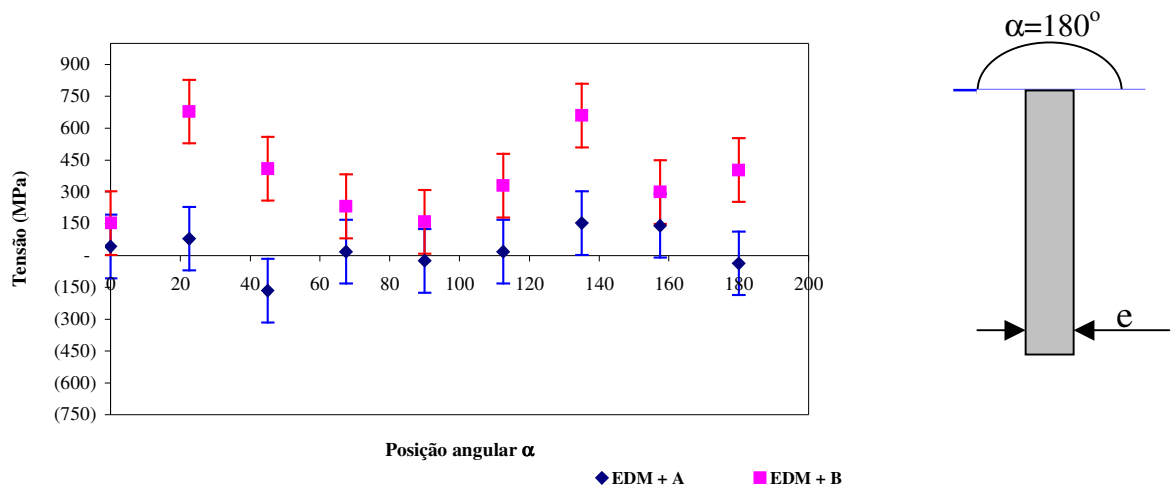


Figura 4.5 – Tensão residual obtida por difratometria ao longo da seção das amostras sob dois processos de tamboreamento.

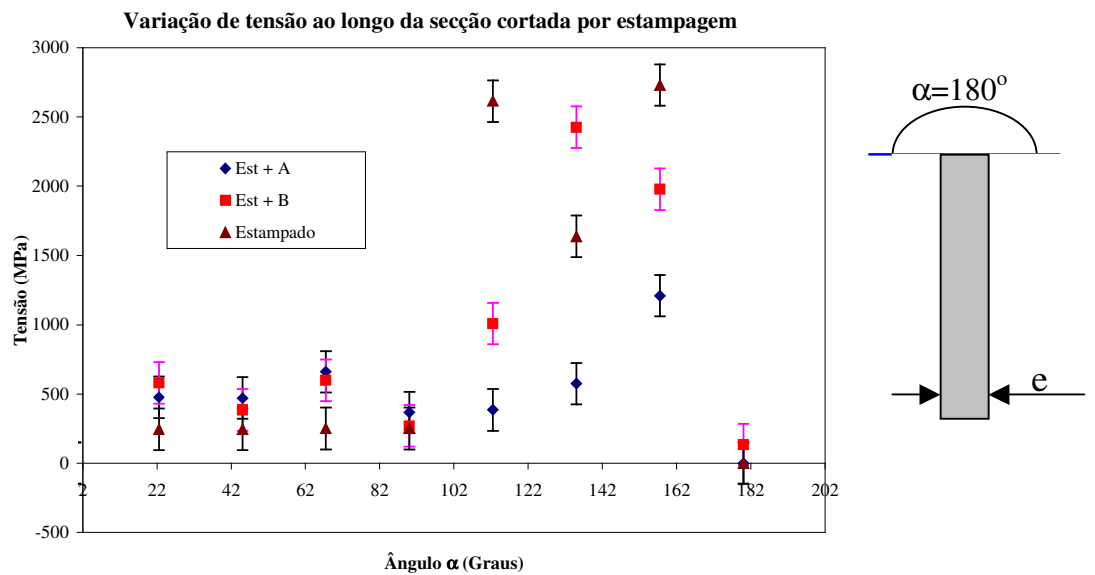


Figura 4.6 - Variação da tensão residual ao longo da seção do material sob interações entre processos

Os resultados mostram-se bem condizentes com a teoria desenvolvida até então, ou seja, a condição cunhada prioriza esse estado de tensão compressivo. Essa condição conferiu um aumento considerável da durabilidade do componente como mostrado na Figura 4.7 quando comparada à condição de somente estampada. O tamboreamento adicional foi aplicado à condição cunhada com o objetivo da eliminação ou minimização do estado de tensão trativa presente no material, verificada pela simulação. Seu caráter benéfico pode ser averiguado pelo aumento da durabilidade da válvula com a combinação dos processos de cunhagem e tamboreamento.

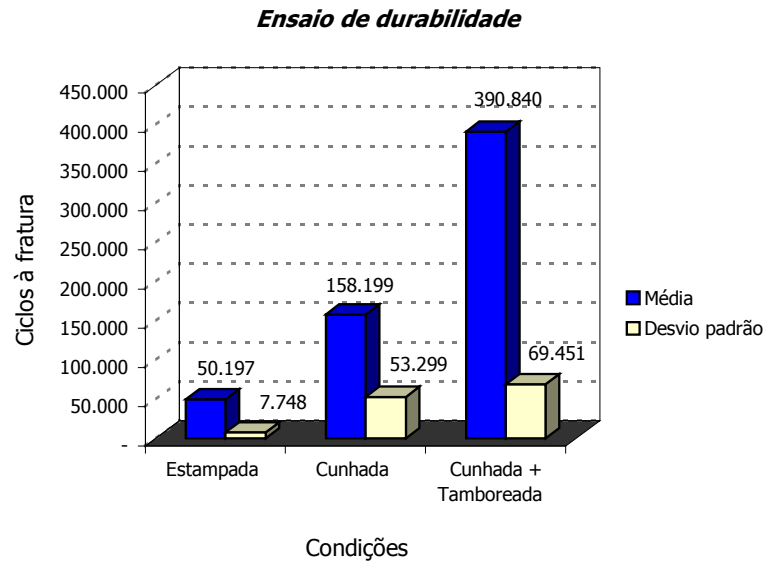


Figura 4.7 – Resultados verificados nos ensaios da válvula nas diversas condições.

5 - CONCLUSÕES

- A intensidade da tensão residual no material UHB-15N20 de espessura 1,50mm observada na simulação por MEF do corte por estampagem é próxima aos valores medidos de tensão por difratometria de raios-X.
- O processo de cunhagem traz benefício ao componente em relação ao aumento de sua resistência à fadiga, mesmo que, segundo o MEF, algumas regiões bem restritas apresentem tensões residuais trativas.
- A tensão efetiva e as principais mostraram-se confiáveis na determinação de tensões residuais de materiais que passaram por algum tipo de deformação plástica durante seu processo de fabricação.
- O método proposto apresenta uma grande facilidade de manipulação por não envolver grandes custos laboratoriais.
- Os resultados encontrados por difratometria de raios-X e por elementos finitos mostraram-se bem próximos, evidenciando a efetividade dos métodos, tanto para a operação de corte por estampagem como para a cunhagem.
- A melhor resistência à fadiga é atribuída à condição de interação entre processos de cunhagem e tamboreamento A pela combinação entre as tensões residuais compressivas e o alívio das tensões trativas pontuais.

AGRADECIMENTOS

Os agradecimentos são dirigidos a UNICAMP pelo suporte técnico e uso de suas instalações, ao CNPq e a Associated Spring pelo patrocínio do trabalho, especialmente ao seu diretor, Eng. Fernando Henriques.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BREITLING, J., et al. - Process control in blanking. *Journal of Materials Processing Technology*. v.71, 187-192, 1997.
- [2] KO, D., KIM, B., CHOI, J., - Finite element simulation of the shear process using the element-kill method. *Journal of Materials Processing Technology*. V.72, 129-140, 1997.
- [3] SCHEY, J.A., - Introduction to manufacturing processes, 2nd ed. McGraw-Hill – New York. 1982.
- [4] CULLITY, B. D. – Elements of X-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Company. 1978, Massachusetts – USA.
- [5] SCARMINIO, J., - Propriedades mecânicas em filmes de Nb/Pd, Tese (doutorado), 1989. Instituto de Física Gleib-Wataglin, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.

- [6] LUKIN, K., GLENN, R.A., -Bragg's law and diffraction: how waves reveal the atomic structure of crystals., www.journey.sunsysb.edu/ProjectJava/Bragg/home.html, consultado em setembro de 2004.
- [7] GENZEL, C., et al. – Neutron and X-ray residual stress analysis of steel parts produced by cold forward extrusion and tube drawing. *Material Science and Engineering*, A205, 79—90, 1996.
- [8] LU, J., RETRAINT, D.,- A review of recent development and applications in the field of X-ray diffraction for residual stress studies., *Journal of Strain Analysis*, v.33, n.2, 127-136, 1998.
- [9] MARTINS, JAIRO A.- Análise de tensões residuais em válvulas estampadas por meio da difração de raios-X e do método de elementos finitos, Tese (doutorado), 2004. Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.

ANALYSIS OF THE RESIDUAL STRESS IN STAMPED VALVES BY X-RAY DIFFRACTION AND FINITE ELEMENT SIMULATION

Jairo Aparecido Martins

Associated Spring do Brasil Ltda.

C.P. 1288 - 13054-701 – Campinas – SP – Brazil

mjairo@asbg.com.br

Lisandro Pavie Cardoso

State University of Campinas

Institute of Physics Gleb Wataghin

Department of Applied Physics

C.P. 6165 - 13083-858 – Campinas – SP – Brazil

cardoso@ifi.unicamp.br

José Alfredo Fraymann

State University of Campinas

Institute of Physics Gleb Wataghin

Department of Applied Physics

C.P. 6165 - 13083-858 – Campinas – SP – Brazil

jalfredo@ifi.unicamp.br

Sérgio Tonini Button

State University of Campinas

School of Mechanical Engineering

Department of Materials Engineering

C.P. 6122 - 13083-970 – Campinas – SP - Brazil

sergio1@fem.unicamp.br

Abstract. *Most of mechanical metallic parts when dynamically loaded require very smooth shapes otherwise the failure prevails. This work was carried out to analyze the residual stress introduced in a plastic deformed chamfered region of high strength steel, by measuring the interplanar distance d (Å) changes in the outer deformed surface layer, applying an alternative proposed X-ray diffraction measurement technique. The samples had their edge corner chamfered by plastic deformation but in a very narrow chamfer size what make the conventional $\sin^2\psi$ difficult to be used due to the spread of the diffracted beam providing so far reliable results. The technique validation was assumed to be its comparison with finite element simulation FEM made with the software MSC/SUPERFORM version 2002. The outputs from the diffraction tests and from the simulation were very close, being the finite element model and the proposed X-ray diffraction two interesting techniques applicable in the residual stress state determination. An advantage verified during the software simulation (FEM) was the determination of the tensile stress in localized areas that would facilitate the fatigue crack nucleation. The validation of the simulation results was done*

with a cyclic loading test by selecting a dynamic valve that was tested under three manufacturing conditions, the first with a blanked valve, the second test with valves deformed plastically aiming the compressive residual stress state but concerning the tensile areas discovered on the FEM analyses, and a third test in which the valve had an additional abrasive tumbling process in order to wear those tensile regions. As predicted with the simulation results, the best endurance performance was verified for the valve deformed with the slightly additional tumbling process which certainly eliminated the tensile stressed areas.