



COTEQ 360
NOVO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DOS
RESULTADOS DE ALÍVIO DAS TENSÕES RESIDUAIS
Tetyana Gurova¹, Décio L. Vieira², Anatoli Leontiev³

Copyright 2011, ABENDI.

Trabalho apresentado durante a 11ª Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos.

As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade dos autores.

SINOPSE

Novo método proposto para avaliação do procedimento de alívio das tensões residuais se baseia em aplicação simultânea das duas técnicas de medição das tensões, método magnético de magnetostrição inversa e método de difração de raios-X. Através do mapeamento da peça analisada por método magnético são identificados os pontos com valores críticos (máximo e mínimo) das tensões conforme critério de escoamento de Tresca-Guest da peça antes e após o tratamento de alívio das tensões. As medições dos valores absolutos das tensões residuais nestes pontos são feitas através do método de difração de raios-X. Os resultados permitem obter a faixa de variação dos valores da tensão residual na peça antes e depois do tratamento para avaliar a eficiência do processo. Os equipamentos utilizados para aplicação do método são portáteis e não possuem nenhuma restrição para serem utilizados em condições de campo. Exemplos práticos de utilização deste método para avaliação dos resultados de alívio das tensões em peças fundidas e soldadas fabricadas para indústria hidroelétrica nacional são apresentados.

1 Doutora, Engenheira Metalúrgica – GURTEQ – Ensaio Não Destrutivos Ltda

2 Engenheiro de Materiais – ALSTOM Hydro Energia Brasil Ltda

3 Doutor, Professor – IM – UFRJ

1. INTRODUÇÃO

Um dos desafios no campo da metalurgia é produzir componentes, peças e estruturas de metal com valores baixos e/ou distribuição uniforme das tensões residuais. Tensões residuais influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e do funcionamento dos elementos das estruturas e construções. Para a prevenção da segurança e da capacidade de trabalho, o conhecimento da magnitude e das direções da atuação dessas tensões é de grande importância. As tensões residuais podem ter origem em diversas causas, entre elas, deformação plástica heterogênea, tensões de origem térmica, transformações de fase, soldagem, tratamento mecânico superficial, tratamentos termoquímicos, etc.

Não sendo sempre possível controlar e suprimir o surgimento das tensões residuais durante o processo de fabricação, o procedimento de alívio das tensões é aplicado posteriormente para diminuir o nível das tensões e/ou redistribuí-las de maneira mais uniforme. Em princípio, existem duas técnicas de alívio das tensões, tratamento térmico de alívio das tensões (TTAT) e tratamento por vibração. Por sua vez, TTAT pode ser aplicado tanto para peça inteira, quando ela é colocada no forno, como localmente. O TTAT prevê o aquecimento da peça (ou da sua região no caso do tratamento localizado) até uma temperatura definida em função das composições do material empregado e a espessura da peça, por um período de tempo suficiente para que ocorra uma acomodação sob uma nova condição de equilíbrio de tensões. Espera-se que nova distribuição das tensões possui menor intensidade e/ou tenha sua amplitude reduzida. O método de alívio de tensões por vibração prevê a excitação da região a ser aliviada de maneira que esta região vibre de forma controlada com frequência próxima a um harmônico da frequência natural. Entende-se que este processo força a dissipação de energia na forma de energia de deformação, provocando uma acomodação da região sob uma nova condição de equilíbrio, **(1)**.

Avaliação dos resultados do procedimento de alívio das tensões através das técnicas convencionais de medição das tensões em maioria das situações não é apropriada, pois exige medições *in loco* antes e após o procedimento de alívio, na superfície da peça toda, que implica em grande número dos pontos de medições e torna o processo de avaliação bastante dispendioso. Mapeamentos extensivos de um campo e uma média estatística dos resultados seriam necessários antes de os resultados serem considerados óbvios. Por essa razão, medição em um único ponto ou outras medições não são realizadas em peças com tensões aliviadas pelo processo por tratamento TTAT ou vibratório, antes ou após o tratamento, **(2)**, **(3)**. Como a estabilidade dimensional é normalmente o fator determinante para aceitação, as peças que permanecem dimensionalmente estáveis após o tratamento de alívio de tensões são consideradas satisfatórias.

Novo método proposto para avaliação do procedimento de alívio das tensões residuais se baseia em aplicação simultânea das duas técnicas de medição das tensões, método magnético de magnetostrição inversa e método de difração de raios-X. Através do mapeamento da peça analisada por método magnético são identificados, antes e após o tratamento de alívio das tensões, os pontos com valores críticos (máximo e mínimo) das tensões conforme critério de escoamento de Tresca-Guest. As medições dos valores absolutos das tensões residuais nestes pontos são feitos através do método de difração de raios-X. Os resultados permitem obter os intervalos de variação das tensões residuais na peça antes e depois do tratamento para avaliar a eficiência do processo.

2. EQUIPAMENTOS E METODOLOGIA DE MEDIÇÃO E MAPEAMENTO DAS TENSÕES

Equipamento portátil RAYSTRESS para medição dos valores absolutos das tensões por difração de raios-X utiliza o método de dupla exposição e radiação $K\alpha$ do Cr, (4). Esta técnica de medição foi amplamente testada e utilizada com sucesso durante vários anos em diferentes aplicações industriais (5–12).



Fig. 1. RAYSTRESS: Equipamento portátil de raios-X para medição de tensões mecânicas

As seguintes partes são incluídas como componentes deste equipamento, **Fig. 1:** 1 – Unidade de controle com fonte de alta tensão, que permite monitoramento e o ajuste do nível de potência de alimentação do tubo de raios-X; 2 – Fonte de alta tensão e tubo de raios-X. Uma das qualidades do equipamento é que o tubo de raios-X é acoplado à fonte de alta tensão. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X é de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tubo de raios-X possui dois anodos de cromo com resfriamento ao ar, e produz dois feixes convergentes de raios-X para realizar a técnica de duas exposições de medição de tensões por raios-X. O ângulo de convergência dos feixes de raios-X é de 50° ; 3 – O suporte magnético permite instalar o equipamento diretamente na peça analisada e ajustar o equipamento na posição de exposição; 4 – O colimador com cassete para filme de raios-X. Duas janelas no cassete permitem captar partes das linhas difratadas no intervalo angular de 2θ de 148° a 164° .

Os princípios da tensometria por raios-X se baseiam, por um lado, na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos, e por outro – em mecânica dos materiais e, em particular, na teoria da elasticidade do corpo sólido. Os valores das tensões são definidos a partir da deformação da estrutura cristalina causada pela ação destas tensões. As deformações são medidas por sua vez, conforme lei de Bragg: $2d \sin \theta = \lambda$, através do deslocamento da linha de difração. Os princípios de técnica de dupla exposição, usada para medição de tensões utilizando o equipamento portátil

descrito acima, baseiam-se em determinação de duas componentes de deformação: $\varepsilon_{\varphi, \psi_1}$ e $\varepsilon_{\varphi, \psi_2}$. Se a deformação é determinada através da fórmula:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\nu}{E} (\sigma_1 + \sigma_2),$$

então a diferença entre duas componentes da deformação é:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1} = \frac{1+\nu}{E} \sigma_{\varphi} (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1), \quad (1)$$

onde E e ν são constantes elásticas do material, ψ e φ são os ângulos polar e azimutal, σ_{φ} - componente medida da tensão, σ_1 e σ_2 são tensões principais. Da equação (1), a componente σ_{φ} é igual a:

$$\sigma_{\varphi} = \frac{E}{1+\nu} \frac{\varepsilon_{\varphi, \psi_2} - \varepsilon_{\varphi, \psi_1}}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1}. \quad (2)$$

Derivando a lei de Bragg:

$$\varepsilon_{\varphi, \psi} = \frac{d_{\varphi, \psi} - d_0}{d_0} = -ctg \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi} - \theta_0), \quad (3)$$

onde $d_{\varphi, \psi}$, d_0 e $\theta_{\varphi, \psi}$, θ_0 são distâncias interplanares e os ângulos de difração para materiais com e sem tensão respectivamente. Usando as fórmulas (2) e (3), temos:

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{E}{1+\nu} \frac{ctg \theta_0 (\theta_{\varphi, \psi_2} - \theta_{\varphi, \psi_1})}{\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1}.$$

Desta maneira, para determinar qualquer componente da tensão é necessário medir os ângulos de difração correspondentes às reflexões dos planos cristalinos com normais caracterizadas por ângulos ψ_1 e ψ_2 .

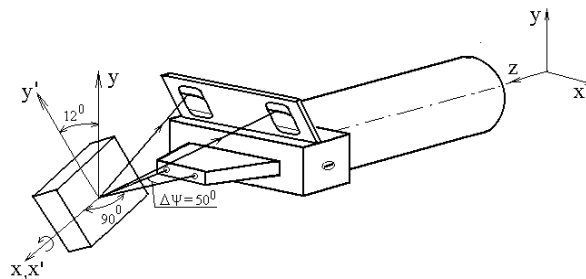


Fig. 2. Esquema de medição de tensões com o equipamento portátil

Os ângulos usados no equipamento são $\psi_1=0^\circ$ e $\psi_2=50^\circ$ e para se medir as tensões é usada geometria de “ ψ - goniômetro”, **Fig. 2**. A precisão da medição do valor absoluto da tensão por equipamento utilizado neste trabalho é de $\pm 10\text{MPa}$.

Para mapeamento do estado das tensões foi utilizado equipamento magnético portátil, que emprega o efeito inverso de magnetostricção, com sensor do tipo MAS (sensor magneto-anisotrópico). O efeito inverso de magnetostricção consiste em variação de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas devido às mudanças na estrutura dos domínios magnéticos. Os primeiros trabalhos sobre a utilização prática deste efeito apareceram nos anos 60, **(13)**. Além disso, podemos mencionar os resultados da escola japonesa dos anos 90, **(14)**, **(15)**. O equipamento utilizado, **Fig. 3**, é composto por: 1 – Sensor de tipo MAS (diâmetro 40 mm), 2 – Unidade de controle, 3 – Computador portátil para visualização dos resultados em tempo real.

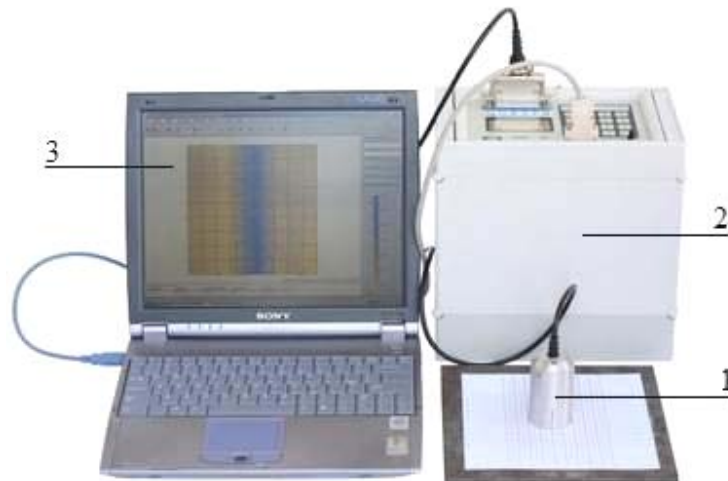


Fig. 3. Equipamento magnético para avaliação do estado das tensões mecânicas

O sensor MAS utilizado tem duas bobinas na forma de U , posicionadas entre si nas direções ortogonais. Uma delas é a da indução (magnetização), outra é da detecção, **Fig. 4**. A bobina de indução produz uma onda eletromagnética que, passando pela material, gera uma onda refletida, captada pela bobina de detecção. Seja uma onda senoidal com intensidade do campo magnético H_0 e frequência ω transmitida na direção do eixo z ortogonal a superfície do metal. Para semi-espaço ferromagnético com permeabilidade magnética μ temos a intensidade do campo magnético H na profundidade z :

$$H = H_0 * \exp(ikz),$$

onde $k = \frac{i+1}{\delta}$ e $\delta = C\sqrt{2\pi\mu\omega}$. Consideramos que o ângulo α entre direção do H e uma das direções de tensão mecânica principal é de 45° . O fluxo magnético registrado pela bobina de

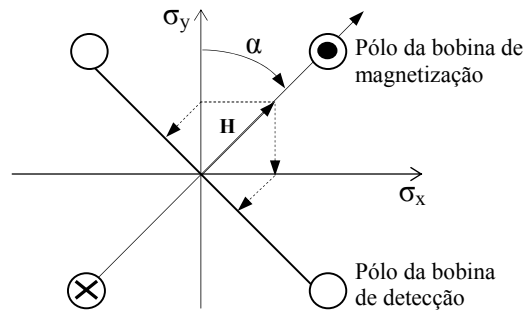


Fig. 4. Esquema do funcionamento do sensor magneto-anisotrópico

detecção é proporcional à projeção do vetor da indução magnética B na direção entre os pólos da bobina. A força eletromotriz induzida em bobina de detecção fica:

$$dU = M(B_x - B_y) \exp(ikz) dz,$$

onde M é um coeficiente que caracteriza as propriedades do metal analisado. Integrando com relação à espessura h da camada, encontramos o sinal captado pela bobina de detecção:

$$U = \frac{MH}{2} \int_0^h (\mu_x(z) - \mu_y(z)) \exp(2ikz) dz.$$

Com variação da tensão mecânica σ variam também as permeabilidades magnéticas na direção longitudinal μ_x e transversal μ_y . Esta variação é proporcional a σ , ou seja: $\mu_x - \mu_y = \beta * \sigma$, onde β é constante do material. Assim, para voltagem captada pelo sensor temos:

$$U = A \int_0^h \sigma(z) * \exp(2ikz) dz,$$

onde A – é uma constante específica do sensor. Desta maneira o sensor registra valor σ_{reg} da desmodulação em amplitude da onda com frequência ω :

$$\sigma_{reg} = \frac{\int_0^h \sigma(z) \exp(2ikz) dz}{\int_0^h \exp(2ikz) dz},$$

utilizado posteriormente para encontrar a diferença entre os valores (relativos) das tensões principais, cujo módulo é igual ao valor dobro da tensão cisalhante máxima, utilizada diretamente no critério do escoamento de Tresca-Guest.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Para análise foi disponibilizada uma peça de caldeiraria pesada. Devido ao seu tamanho e peso considerado, a análise foi realizada no local da fabricação. Material da peça é o aço carbono com limite de escoamento de 270MPa. O TTAT foi realizado no forno conforme normas de fabricante.

Para avaliação do TTAT foi escolhida uma área 180 x 180mm composta somente por material base. Como a espessura da peça ultrapassava a 30mm, e a superfície não foi submetida a nenhum tipo de tratamento específico, nós trabalhamos dentro da hipótese que não houve grande variação das tensões com profundidade até 3mm. Nesta situação os resultados do mapeamento magnético, que registra valor médio relativo das tensões até a profundidade de 3mm, podem ser confrontados com sua distribuição na superfície da peça, onde as medições dos valores absolutos foram realizados através do método de direção de raios-X.

Mapeamento foi realizado com passo uniforme de malha de 20mm, somando no total 100 pontos de medição para área avaliada. Os resultados do mapeamento foram apresentados na forma de distribuição de concentração do valor relativo da tensão cisalhante máxima. O valor da concentração da tensão α_i no ponto de medição i , é definido como:

$$\alpha_i = \frac{\tau_i}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N \tau_j},$$

onde τ_i (τ_j) é valor da diferença entre os valores relativos da das tensões principais medido no ponto i (ponto j), N é o número dos pontos de medição.

Mapeamento na **Fig. 5** visualiza a distribuição da concentração do valor relativo da tensão cisalhante máxima τ_{max} , antes do TTAT. Os pontos P1 com valor máxima e P2 com valor mínimo da área são identificados como pontos críticos segundo o critério do escoamento de Tresca-Guest.

Nos pontos identificados como pontos críticos foram realizadas medições do valor absoluto das tensões residuais através do método de difração de raios-X nas três direções: duas ortogonais (direções 0° e 90°) e uma na direção diagonal em relação às duas primeiras (direção 45°).

Com base nos resultados de medição do valor absoluto da tensão nas três direções em cada ponto, foram calculados os valores absolutos da tensão cisalhante máxima. Sejam σ_0 e σ_{90} os valores medidos das tensões em duas direções ortogonais (direções 0° e 90°) e σ_{45} o valor medido da tensão na direção diagonal entre duas primeiras, ou seja, na direção de 45° . Então, o valor da tensão cisalhante máxima é calculado através da formula:

$$\tau_{max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 - \sigma_{90}}{2}\right)^2 + \tau_{0,90}^2}$$

onde $\tau_{0,90} = \sigma_{45} - 0.5(\sigma_0 + \sigma_{90})$. Resultados de medição dos valores absolutos nos pontos identificados como críticos e valores da tensão cisalhante máxima são apresentados na **Tabela 1**.

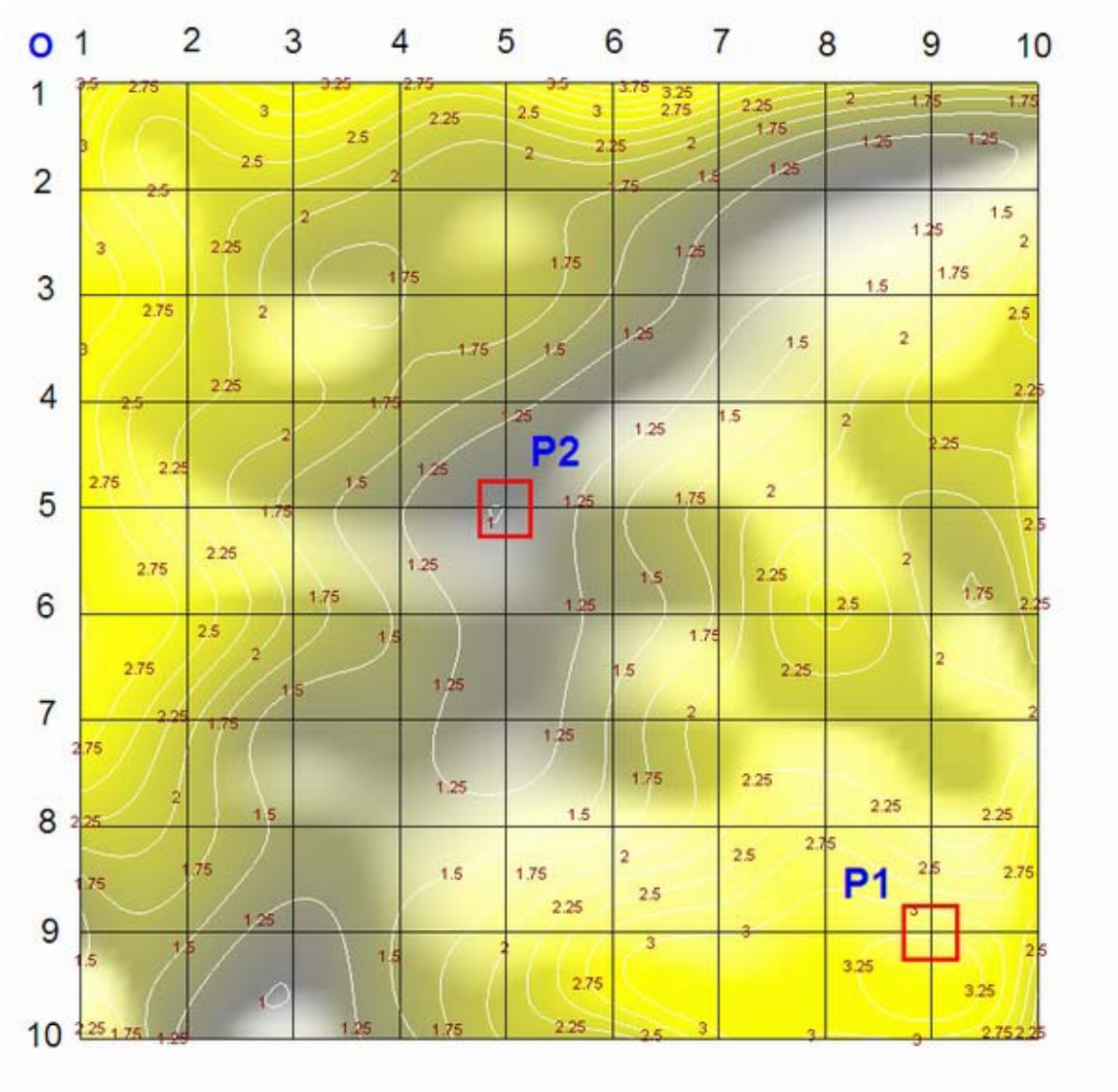


Fig. 5. Mapeamento antes do TTAT. Pontos críticos do campo das tensões cisalhantes máximas, **P1** e **P2**. Ponto de referência **O**. Passo da malha 20mm x 20mm. Tamanho da área mapeada 180mm x 180mm

Fig. 6 apresenta mapeamento da mesma área após o TTAT. Pode ser visto que a distribuição do campo de concentração do valor relativo da tensão cisalhante máxima mudou significativamente, assim como posição dos pontos críticos, **P3** e **P4**. Os resultados de medição dos valores absolutos das tensões nos pontos críticos e os valores calculados da tensão cisalhante máxima são apresentados na **Tabela 2**.

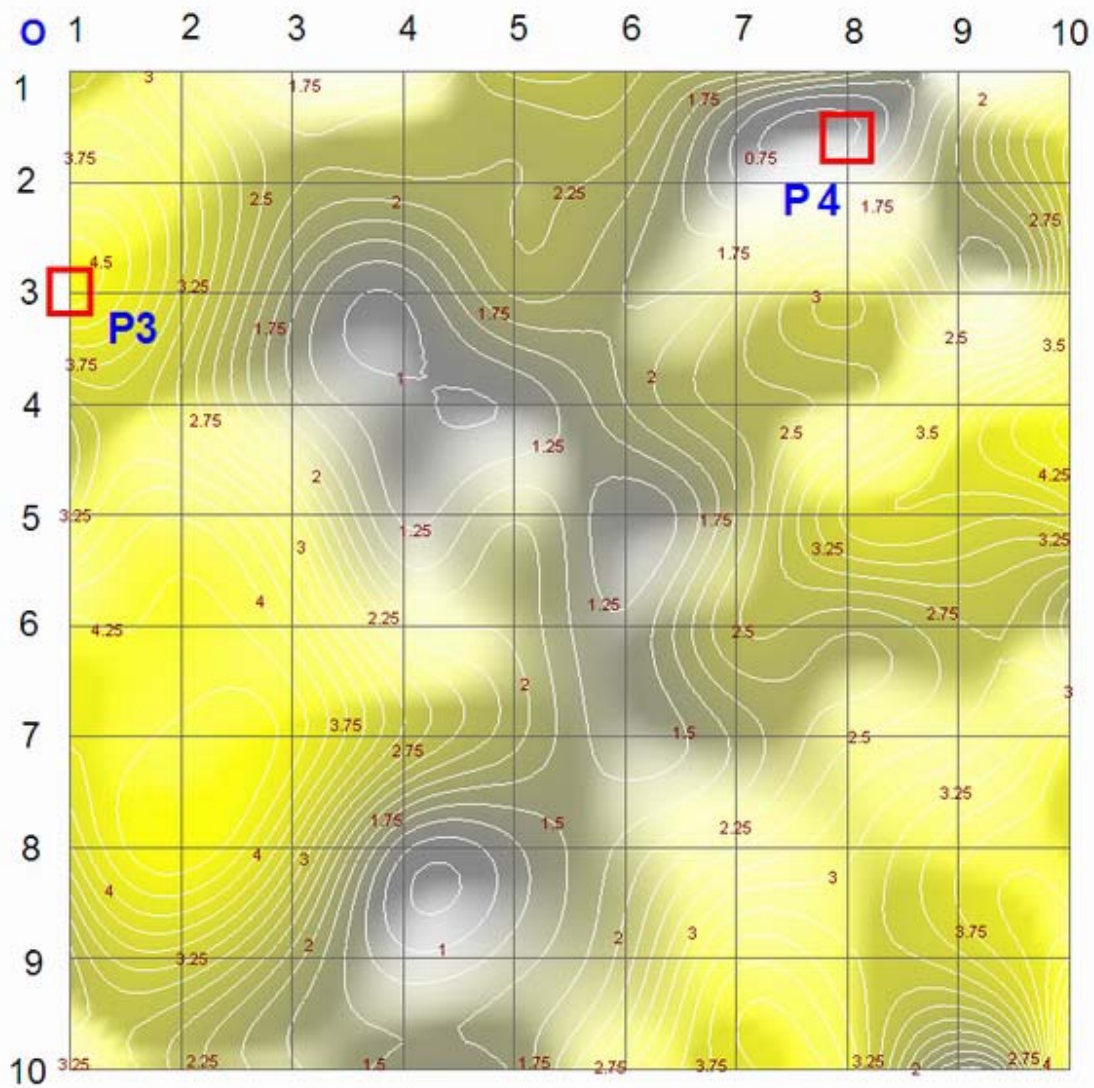


Fig. 6. Mapeamento após TTAT. Pontos críticos do campo das tensões cisalhantes máximas, **P3** e **P4**. Ponto de referência O. Passo da malha 20mm x 20mm. Tamanho da área mapeada 180mm x 80mm

Fig. 7 e **Fig. 8** mostram a posição na superfície da peça dos pontos identificados como pontos críticos antes e após o TTAT e direções de medição utilizadas no método de difração de raios-X.

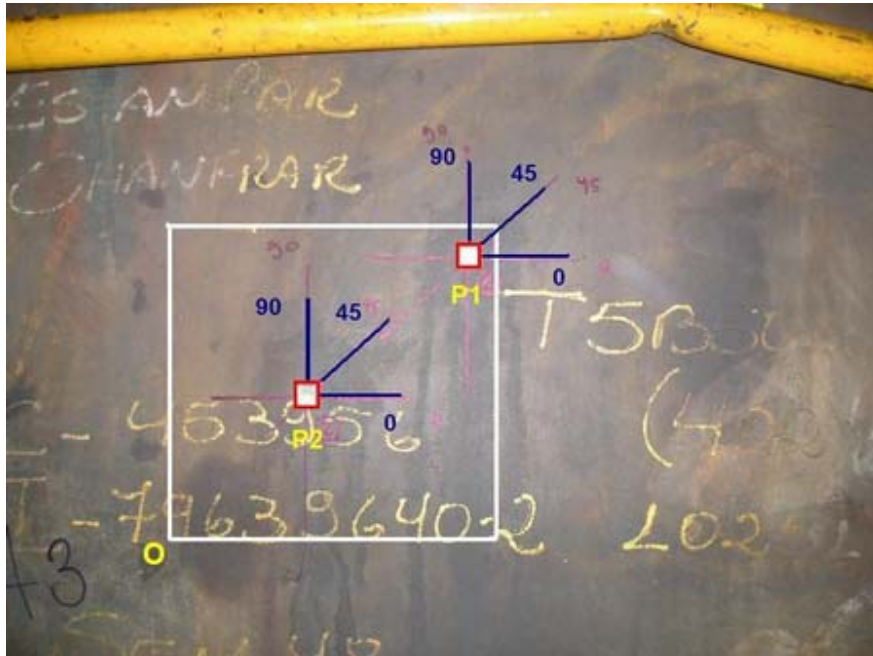


Fig. 7. Antes do TTAT. Pontos de medição **P1** e **P2**. Direções de medição 0° , 45° e 90° . Ponto de referência **O**.

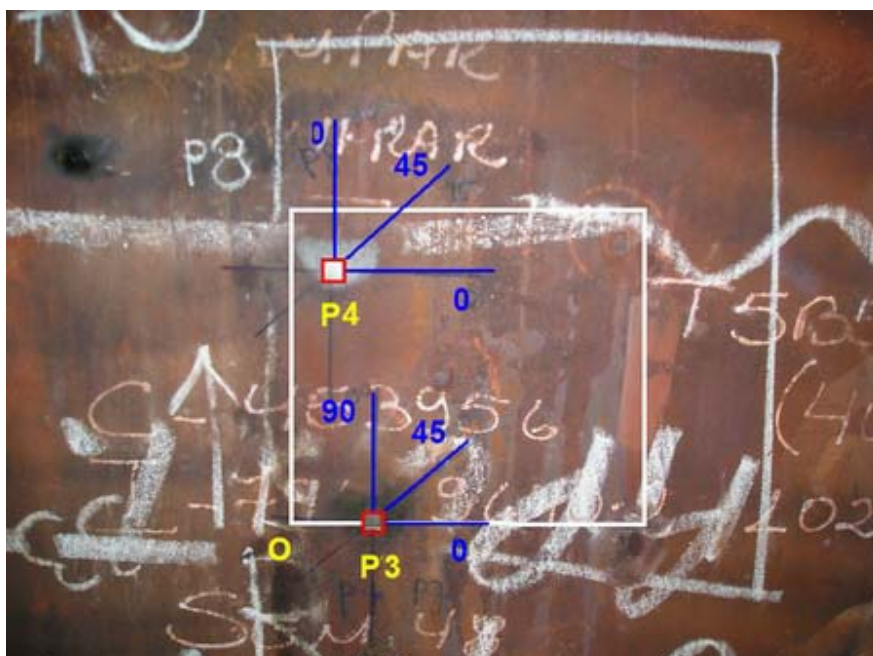


Fig. 8. Após o TTAT. Pontos de medição **P3** e **P4**. Direções de medição 0° , 45° e 90° . Ponto de referência **O**.

Tabela 1: Resultados das medições dos valores absolutos das tensões antes do TTAT

Pontos	Direções	Valores das tensões medidos (σ , MPa)	Tensão cisalhante máxima calculada (τ_{max} , MPa)
P1	0°	+250	108
	45°	+100	
	90°	+70	
P2	0°	+140	20
	45°	+160	
	90°	+140	

Tabela 2: Resultados das medições dos valores absolutos das tensões após o TTAT

Pontos	Direções	Valores das tensões medidos (σ , MPa)	Tensão cisalhante máxima calculada (τ_{max} , MPa)
P3	0°	+50	26
	4°	+30	
	90°	+60	
P4	0°	+80	10
	45°	+70	
	90°	+60	

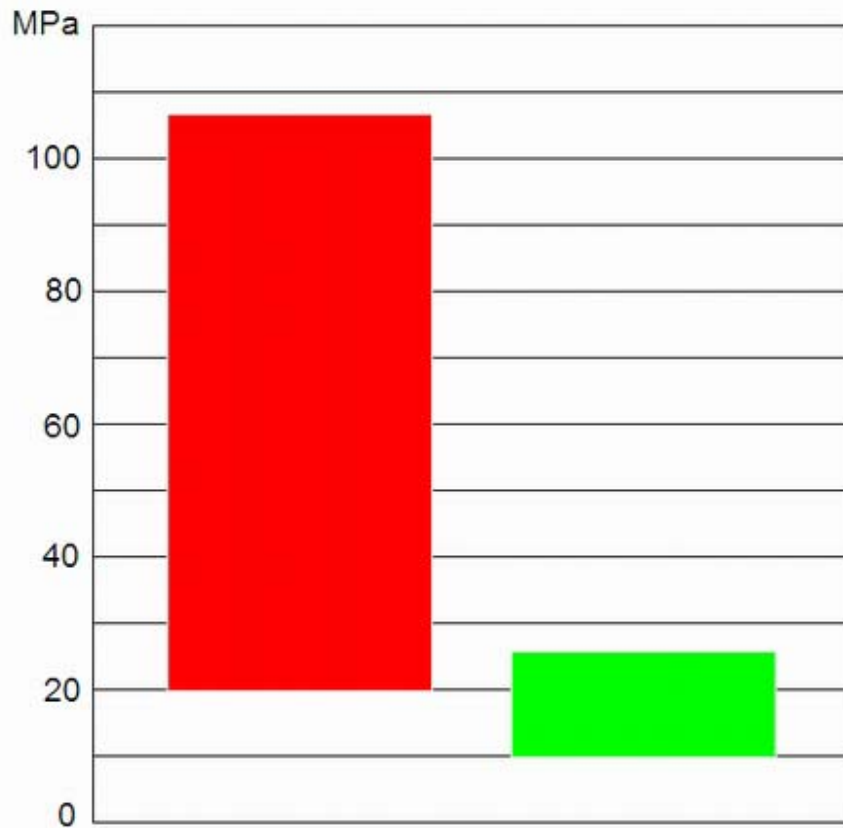


Fig. 9. Faixas da variação dos valores absolutos da tensão cisalhante máxima na área analisada. Cor vermelha: antes do TTAT. Cor verde: após o TTAT.

Na **Fig. 9** são apresentados resultados de comparação da variação dos valores absolutos da tensão cisalhante máxima na área analisada antes e após o TTAT.

3. DISCUSSÃO

Os resultados mostram que, para avaliar a eficiência do tratamento de alívio das tensões, seria equívoco realizar comparação dos valores das tensões somente em um ponto antes do tratamento e em um ponto após o tratamento escolhendo estes pontos de maneira aleatória. Mapeamentos das tensões apresentados nas **Fig. 5** e **Fig. 6** mostram que localização dos pontos com valores críticos (máximo e mínimo) varia para mesma área antes e após o tratamento. Assim, caso o ponto P1 seja escolhido para avaliar o estado das tensões antes do TTAT e o ponto P3 para avaliar o estado após o TTAT, o resultado de comparação mostrasse que a tensões tiveram um aumento. As medições realizadas no mesmo ponto antes e após o tratamento também poderiam levar as conclusões erradas.

Como tensão no ponto é um valor tensorial (tensor de segunda ordem no caso de análise das tensões na superfície) a avaliação do estado das tensões não pode ser feita através da comparação em separada entre si dos componentes deste tensor, como costumam fazer alguns autores, comparando valores das tensões em determinadas direções de medição (longitudinal, transversal, etc.). Realmente, a comparação dos componentes em separada implicaria em que o estado das tensões em qual se encontra o ponto P2 é muito mais crítico do que o P3. Porém segundo critério de escoamento de Tresca-Guest, o estado das tensões nestes dois pontos é quase similar e fica longe do estado crítico. A maneira correta é utilizar para tal comparação ou tensão de Von Mises (1) ou tensão cisalhante máxima, como foi feito neste trabalho, pois ambos relacionam o estado das tensões com critérios de escoamento do material.

4. CONCLUSÕES

A técnica proposta neste trabalho permite uma avaliação realística da eficiência do tratamento de alívio das tensões apresentando um quadro completo da redistribuição das tensões. Na área escolhida para avaliação, o intervalo de variação dos valores da tensão cisalhante máxima diminuiu em até 5.5 vezes, ou seja, a distribuição das tensões ficou mais uniforme. Os valores absolutos das tensões também diminuíram significativamente, em até 4 vezes. A técnica proposta foi aplicada *in situ*, com resultados de análise obtidos em tempo real, tem baixo custo e não apresentou nenhuma restrição quanto à integração na seqüência operacional de fabricação e tratamento da peça.

5. AGRADECIMENTOS

Apoio financeiro:
CNPq – projetos 305338/2009-9 (A. Leontiev)

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Filippin CG, Lira AT. “Análise estrutural de rotores de turbinas hidráulicas para estudo da incidência de trincas e desempenho à vida de fadiga”, 1º CITENEL - Congresso de Inovação Tecnológica em Energia Elétrica, Brasília, 6 e 7 de novembro de 2001, Web-site: <http://www.aneel.gov.br/biblioteca/Citene12001/trabalhos/24.pdf> (acessado em 11.02.2011)
- (2) Mirzaee-Sisana A, Fookesa JA, Trumana CE, Smitha DJ, Brownb TB, Daudab TA “Residual stress measurement in a repair welded header in the as-welded condition and after advanced post weld treatment”, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 84, 265–73, 2007
- (3) Choa JR, Lee BY, Moonb YH, Van Tyne CJ “Investigation of residual stress and post weld heat treatment of multi-pass welds by finite element method and experiments”, Journal of Materials Processing Technology, 155–156, 1690–95, 2004
- (4) Monin V, Teodosio JR, Gurova T. “A portable X-ray apparatus for both stress measurements and phase analysis under field conditions”, Adv X-ray Anal, 43, 66-71, 2000
- (5) Gurova T, Teodosio JR, Rebello JM, Monin V. “Study of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension in a 5.0Cr and 0.5Mo steel”, Scr Mater, 36, 1031-35, 1997

- (6) Gurova T, Teodosio JR, Rebello JM, Monin V. "Model for the variation of the residual stress state during plastic deformation under uniaxial tension", *J Strain Anal Eng Des*, 33, 367-72, 1998
- (7) Monin V, Teodosio JR, Gurova T, Assis J. "X-ray study of the inhomogeneity of surface residual stresses after shot-peening treatment", *Adv X-ray Anal*, 43, 48-53, 2000
- (8) Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "Study and service control of stress state of high-strength steel cables used in prestressed concrete structures", *Adv X-ray Anal*, 44, 195-200, 2001
- (9) Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "Analysis of residual stress state in speed gears for automotive vehicles", *Adv X-ray Anal*, 44, 187-94, 2001
- (10) Assis JT, Monin V, Teodosio JR, Gurova T. "X-ray analysis of residual stress distribution in weld region", *Adv X-ray Anal*, 45, 225-31, 2002
- (11) Gurova, T., Leontiev, A. 'Novas técnicas de mapeamento das tensões mecânicas', COTEQ 2009 - 10-a Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos, Salvador - BA, maio de 2009.
- (12) Vieira, D.L., Silva, B.M, Monin, V., Gurova, T., Leontiev, A. "Nova técnica de avaliação do estado das tensões de soldagem", CONAEND&IEV2008 – Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos e Inspeção & Conferencia Internacional sobre Evaluación de Integridad y Extensión de Vida de Equipos Industriales, São Paulo, junho de 2008.
- (13) "Handbook of Control of the Quality by Electroacoustic, Radiometric and Magnetic Methods", I-39-63, Leningrad: Leningradstroy, 1962 (em Russo)
- (14) Abuki, S. "Effects of surface conditions on residual stress measurement by magnetic probe", In: *Proceedings of the Third International Conference on Residual Stresses*, ICRS 3, Tokushima, Japan on 23-26 July 1991, Editor: K. Tanaka, 1081-86, 1992
- (15) Handbook of Measurement of Residual Stresses. Edited by Dr. Jian Lu, Published by The Fairmont Press Inc. Libum GA 30247