COTEQ - 120

NOVA TÉCNICA DE MAPEAMENTO DAS TENSÕES MECÂNICAS

Tatiana Gurova[1], Anatoli Leontiev[2]

Copyright 2009, ABENDE, ABRACO e IBP
Trabalho apresentado durante a 10ª. COTEQ – Conferência Sobre Tecnologia de Equipamentos
As informações e opiniões contidas neste trabalho são de exclusiva responsabilidade do(s) autor(es).

Sinopse

Métodos experimentais de medição das tensões mecânicas são métodos indiretos, ou seja, o valor absoluto da tensão é calculado através da analise de deslocamentos mecânicos ou variação das características físicas do objeto. Entre os métodos atualmente utilizados em aplicações industriais se destacam o método de difração de raios-X e o método de furo cego, sendo o primeiro não destrutivo e o segundo é semi-destrutivo. Como os métodos são aplicados localmente, um dos principais problemas para avaliação correta do estado das tensões numa área analisada é a escolha dos pontos das medições, visando a necessidade de encontrar os pontos críticos de concentração das tensões. Em várias situações como, por exemplo, medições em dutos, peças fundidas de grandes dimensões e outras estruturas de grande porte, localização destes pontos é desconhecida a priori.

Neste trabalho é apresentada uma nova técnica de avaliação do estado das tensões mecânicas em materiais ferromagnéticos que permite superar este tipo de problema. A técnica se baseia em aplicação de dois métodos. O primeiro emprega o efeito inverso de magnetostrição e permite realizar em tempo real o mapeamento do estado das tensões e localizar os pontos críticos de concentração das tensões segundo critério de escoamento de Tresca-Guest. As medições realizadas nestes pontos através do método de difração de raios-X permitem obter valor absoluto das tensões.

Esta técnica otimiza o processo de medição, minimizando o volume de trabalho para medições por raios-X e simplifica tomada da decisão no momento de avaliação do objeto de controle. O conjunto dos equipamentos é portátil e permite realizar medições em qualquer condição de campo, sem restrições para geometria da superfície analisada, em tempo real, visualizando imediatamente os resultados de análise. As aplicações industriais mostram a eficiência da técnica proposta.

1. Tensões residuais

A tensão residual pode ser definida como qualquer tensão que existe no volume de um material sem aplicação de carga externa [1, 2]. O estado das tensões residuais representa o fator importante que

1 Doutora, Engenheira Metalúrgica – GURTEQ – Ensaios Não Destrutivos Ltda
2 Doutor, Professor – IM-UFRJ

determina a capacidade de carga e vida útil da construção. Esta informação, obtida durante a fabricação, permite corrigir possíveis imperfeições na execução do projeto, facilitando o posterior controle da integridade e contribuindo para o planejamento da manutenção. Tensões residuais influenciam substancialmente nas características de resistência mecânica e do funcionamento dos elementos de uma estrutura. Como resultado das operações tecnológicas, para produção de estruturas e, posteriormente, na sua montagem e funcionamento, freqüentemente ocorrem tensões residuais que contribuem para o surgimento de trincas. Para a prevenção da segurança e da capacidade de trabalho dos diversos elementos das estruturas, o conhecimento da magnitude e das direções da atuação dessas tensões residuais é de grande importância. Surgindo após vários processos tecnológicos como soldagem, tratamento mecânico superficial e/ou tratamentos termoquímico as tensões residuais podem ser causadas por deformação plástica heterogênea, ação térmica e/ou transformações de fase.

2. Técnica de medição

A técnica proposta emprega dois métodos, magnético e de difração de raios-X. Necessidade da aplicação simultânea dos dois se justifica pela seguinte argumentação. Conhecimento do estado das tensões na superfície do material (tensões superficiais) é de grande importância pratica, pois a ruptura do material, inclusive o surgimento das trincas de fatiga, na maioria das situações começa a partir da sua superfície. Método de medição das tensões superficiais por difração de raios-X atualmente é uma das mais seguras e confiáveis técnicas de controle não destrutivo para materiais cristalinos. Este método é direto, ou seja, não exige nenhum procedimento de correlação entre os resultados das medições e resultados das calibrações para cada tipo do material.

Método de difração de raios-X permite medir valor absoluto da tensão superficial num determinado ponto numa determinada direção. Em certas situações a escolha do ponto e da direção de medição é determinada *a priori* pela geometria do objeto analisado, sistema de forças externas atuantes, tratamento da superfície do objeto ou as condições específicas do seu trabalho. Estes, por exemplo, são casos da medição das tensões em cordoalhas pré-tencionadas [3], peças dentadas [4], peças submetidas ao tratamento por *shot peening* [5], solda entre peças livres [6-8]. Nas situações quando a direção da tensão predominante não pode ser indicada previamente, as medições das tensões superficiais em três direções permitem obter os valores principais das tensões e aplicar para peça analisada um dos critérios de escoamento (Tresca-Guest, von Mises, etc.). Um dos problemas na determinação do estado das tensões de solda de reparo é que nem a posição dos pontos onde são esperados os valores críticos das tensões, nem as direções destas tensões, são conhecidas previamente.

O método magnético, que faz parte da técnica apresentada, permite localizar a posição dos pontos das tensões críticos. O método mapeia a diferença dos valores das tensões principais, cujo modulo é proporcional à tensão cisalhante máxima, a grandeza utilizada diretamente no critério de escoamento de Tresca-Guest [9]. Uma das principais características deste método é que o valor medido é um valor médio numa camada sub-superficial de 3mm (ou de 6mm). Ou seja, este método pode ser aplicado para avaliar a distribuição das tensões na superfície na hipótese que elas não possuem um grande gradiente com relação à profundidade. A concordância entre os resultados do mapeamento por método magnético e valores absolutos medidos por difração de raios-X, apresentada neste trabalho, confirma esta hipótese para caso das tensões de solda de reparo, validando desta maneira a técnica proposta.

Resultados de avaliação do estado das tensões de solda de reparo são apresentados neste trabalho para uma amostra, assim como para um caso real de turbina hidráulica. Aplicação da solda de reparo é um procedimento utilizado durante reparos dos defeitos de fundição e das áreas de erosão por cavitação dos rotores das turbinas hidráulicas. Avaliação do estado das tensões de soldagem neste caso permite concluir sobre a qualidade do reparo realizado, a necessidade e o tipo de tratamento de alivio das tensões na peça em questão e, posteriormente, avaliar o resultado do tratamento aplicado.

3. Equipamentos e metodologia

Para mapeamento do estado das tensões foi utilizado equipamento magnético portátil, que emprega o efeito inverso de magnetostrição, com sensor do tipo MAS (sensor magneto-anisotrópico). O efeito inverso de magnetostrição consiste em variação de magnetização do material ferromagnético sujeito às tensões mecânicas devido às mudanças na estrutura dos domínios magnéticos. Os primeiros trabalhos sobre utilização prática deste efeito apareceram nos anos 60, [10]. Além disso, podemos mencionar os resultados da escola japonesa dos anos 90, [11]. O equipamento utilizado, Fig. 1, 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.

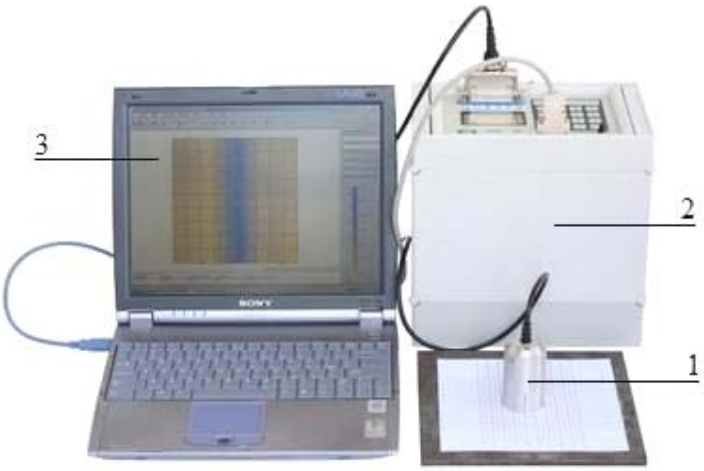


Fig. 1: Equipamento magnético para avaliação do estado das tensões mecânicas

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. 2. 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_o e freqüência 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*:

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

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 45º. O fluxo magnético registrado pela bobina de

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

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

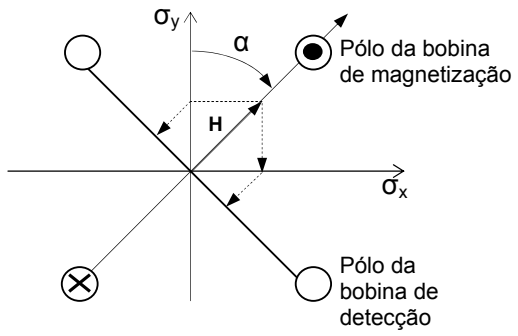


Fig. 2: Esquema do funcionamento do sensor magneto-anisotrópico

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:

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

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 especifica do sensor. Desta maneira o sensor registra valor σ_{reg} da desmodulação em amplitude da onda com freqüência 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 das tensões principais, cujo módulo é igual ao valor dobro da tensão cisalhante máxima, utilizada diretamente no critério do escoamento de Tresca-Guest.

Os valores absolutos das tensões residuais foram medidas com equipamento portátil de raios-X que utiliza o método de dupla exposição e radiação Kα do Cr, [12].

As seguintes partes são incluídas como componentes deste equipamento, Fig. 3: (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

Fig. 3: Equipamento portátil de raios-X para medição de tensões mecânicas

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, [13, 14]. Os valores das tensões são definidos a partir da deformação da estrutura cristalina causada pela ação destas tensões. As deformações são medidas em 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 formula:

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

então a diferença entre duas componentes da deformação é:

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

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:

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

Derivando a lei de Bragg:

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

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

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

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.

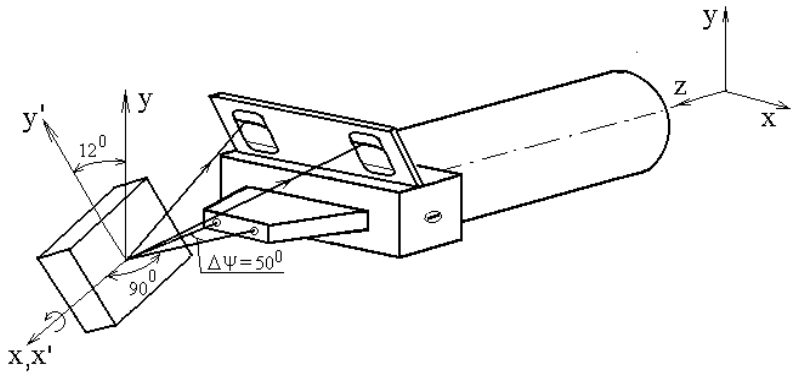


Fig. 4: Esquema de medição de tensões com o equipamento portátil

Os ângulos usados no equipamento são $\psi_1=0^o$ e $\psi_2=50^o$ e para se medir as tensões é usada geometria de "ψ - goniômetro", Fig. 4. A precisão da medição do valor absoluto da tensão por equipamento utilizado neste trabalho é de ±10MPa.

4. Resultados experimentais

Os testes foram realizados numa amostra preparada de uma chapa 200 x 200 x 6mm de aço ASTM 131 grau A com limite de escoamento 235MPa. A chapa foi submetida previamente ao tratamento térmico para alivio das tensões preexistentes. As medições das tensões por método de difração de raios-X da chapa depois do tratamento térmico mostraram a existência das tensões, distribuídas de maneira uniforme, com valor da tensão cisalhante máxima entre 40 e 60MPa.

Para simular uma solda de reparo, no meio da chapa foi aberto um furo vazado de 60 x 10mm, que foi soldado manualmente por arco elétrico com eletrodo revestido. O mapeamento do estado das tensões por método magnético após da soldagem foi realizado numa área de 150 x 150mm com passo uniforme da malha de 10 mm através da medição realizada em cada ponto da malha, Fig. 5.

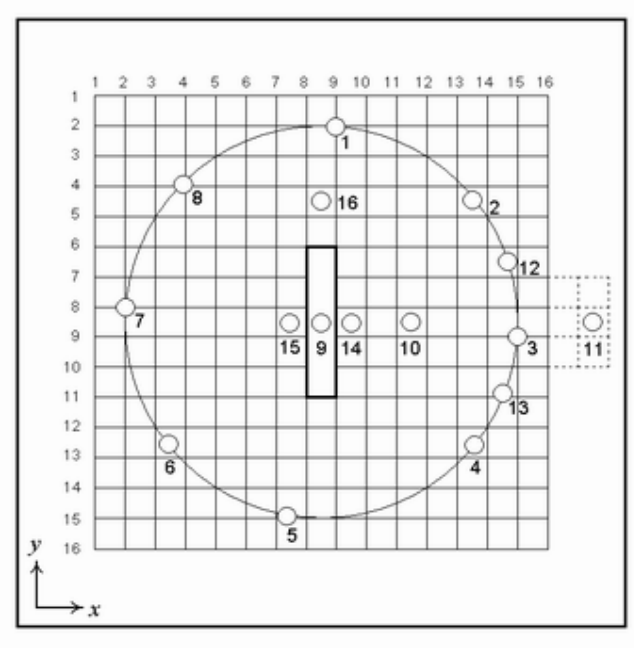


Fig. 5: Amostra com solda de reparo. Malha utilizada no método magnético com passo uniforme de 10 mm e posição dos pontos (1...16) escolhidos para análise através do método de raios-X

Em cada ponto o equipamento registra o valor médio numa camada de 3mm de profundidade (camada fina) e numa camada de 6mm (camada grossa). O resultado de mapeamento para camada fina está apresentado na Figura 6. Vale lembrar que valor medido por método magnético – a diferença entre os valores das tensões principais – é um valor relativo. O mapeamento realizado no verso da amostra tanto para camada fina como para camada grossa apresentou as imagens similares à da frente e entre si. Assim, podemos assumir que o gradiente da tensão não é alto e não interfere

na imagem obtida por método magnético. Na Fig. 6 observa-se a existência dos dois tipos de pontos críticos (ver a posição dos pontos na Fig. 5): Os pontos 1 e 5, com valores mínimos e os pontos 3 e 7 com valores máximos. Linhas de nível correspondem aos pontos com mesmo valor. Todos os pontos críticos ficam numa distancia aproximada de 65mm do centro da solda, posicionados de maneira simétrica e formam uma cruz (pontos 1 – 5, pontos 3 – 7).

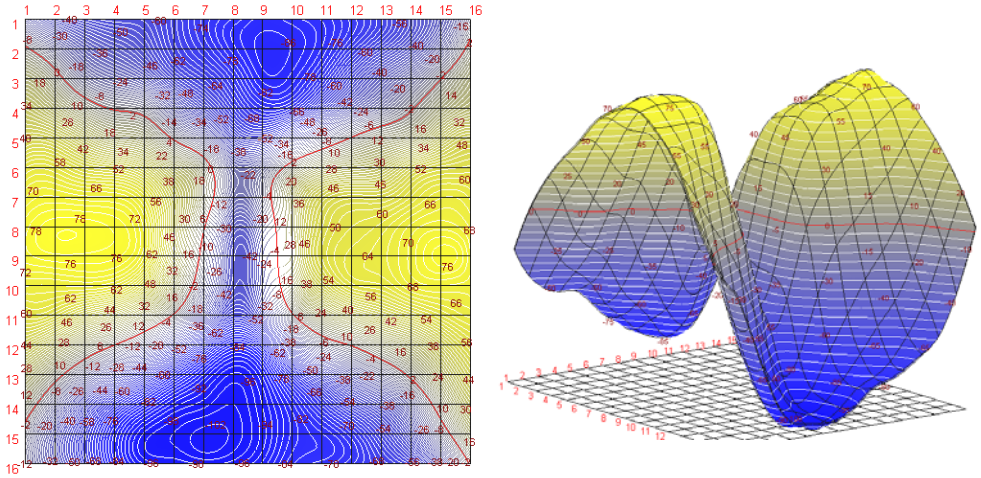


Figura 6: Visualização em 2-D e 3-D dos resultados de mapeamento do estado das tensões por método magnético

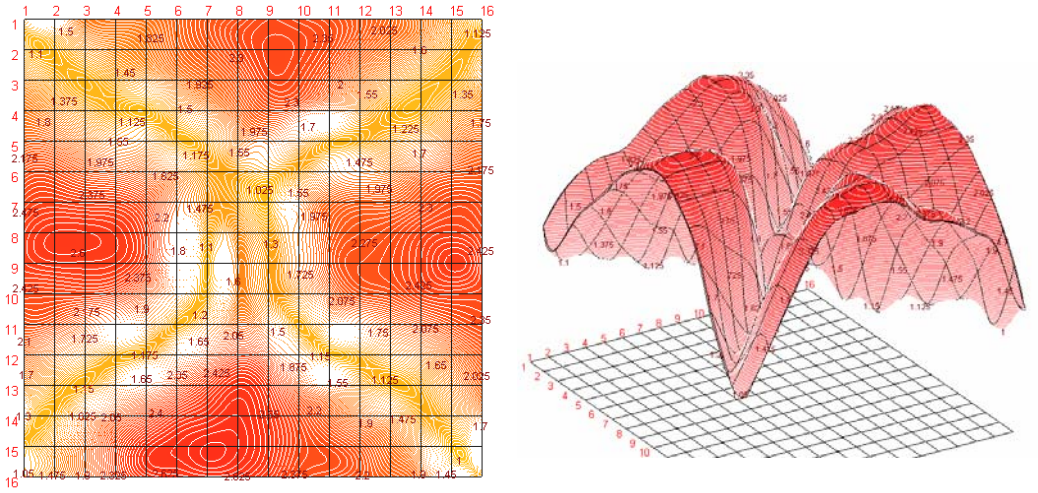


Figura 7: Visualização em 2-D e 3-D da distribuição do fator de concentração da tensão máxima cisalhante

Como o modulo da diferença entre valores das tensões principais é proporcional a tensão cisalhante máxima, a partir do mapeamento realizado é possível obter a distribuição do fator de concentração da tensão cisalhante máxima. O fator de concentração nos pontos críticos (1, 3, 5 e 7) apresenta valores entre 2.3 e 2.6, Fig. 7.

A primeira serie das medições de valor absoluto das tensões por difração de raios-X foram realizadas nos pontos 1...8. Pontos 1, 3, 5 e 7 foram escolhidos como pontos críticos. Os pontos 2, 4, 6 e 8 pertencem à mesma circunferência, e segundo relutados do mapeamento magnético, a diferença dos valores de tensão principal neles tem o mesmo valor, pois todos os pontos pertencem a mesma linha de nível com valor (relativo) 0, de cor vermelha na Fig. 6.

Em todos os pontos foram realizadas três medições das tensões: na direção radial com relação ao centro da solda (σ_R), na direção transversal (σ_T) e na direção de 45° entre as duas primeiras (σ_{45}). Os valores da tensão cisalhante $\tau_{RT} = \sigma_{45} - 0.5(\sigma_R - \sigma_T)$ foram próximos ao zero considerando erro da medição (±10MPa). Este resultado prova o fato do que as direções radial e transversal podem ser consideradas como direções das tensões principais. O erro na definição da direção principal pode ser avaliado utilizando a formula que define o ângulo entre os eixos em que foram realizadas as medições e os eixos formados por direções das tensões principais, [15]:

$$\alpha = 0.5 arctg\left(\frac{2\tau_{RT}}{\sigma_R - \sigma_T}\right).$$

Para valores das tensões medidos e precisão das medições, o erro na definição das direções das tensões principais pode ser avaliado como ±3°.

Os resultados das medições para pontos 1...8 obtidos por método de difração de raios-X e método magnético são apresentados na Tabela 1. A diferença entre os valores das tensões principais foi calculada com relação ao sistema das coordenadas *XOY* como $(\sigma_x - \sigma_y)$: para 1 e 5 consideramos diferença como $(\sigma_T - \sigma_R)$ e para 3 e 7 consideramos $(\sigma_R - \sigma_T)$. Nos pontos 2, 4, 6 e 8 o sinal da diferença fica indefinido e comparamos somente os valores absolutos (marcados neste caso com*) que devem ficar próximos entre si.

Outra série das medições por raios-X tinha como finalidade analisar os pontos das áreas onde segundo método magnético a diferença entre os valores principais das tensões mantinha o sinal (positivo ou negativo). As medições foram realizadas nos pontos 10...16 na direção radial com relação ao centro da solda (σ_R), na direção transversal (σ_T) e na direção de 45° entre as duas primeiras (σ_{45}). Como no caso anterior, foi confirmando, que as direções radial e transversal estão próximas das direções das tensões principais com margem do erro de ±3°. A diferença dos valores principais foi calculada como descrito acima, supondo que nos pontos 12 e 13, o valor (anotado com *) pode ser considerado com sinal "+" pois a posição dos eixos das tensões principais é próxima aos eixos do sistema *XOY*. Os resultados são apresentados na Tabela 2. Para ter a imagem completa da distribuição das tensões, os valores absolutos de tensões foram medidos no centro da solda (ponto 9) na direção longitudinal (σ_y) e transversal (σ_x), sendo: σ_y=350MPa, σ_x=380MPa.

Tabela 1. Resultados das medições para pontos 1...9

N	Ponto da medição	Direção da medição	Valor absoluto medido por raios-X em MPa	$(\sigma_x - \sigma_y)$ em MPa	Valor relativo medido por método magnético
1	1	σ_R	-120	-240	-86
		σ_T	+120		
2	2	σ_R	+140	40*	0
		σ_T	+100		
3	3	σ_R	+200	+190	+76
		σ_T	+10		
4	4	σ_R	-50	70*	0
		σ_T	-120		
5	5	σ_R	-150	-290	-102
		σ_T	+140		
6	6	σ_R	+150	60*	0
		σ_T	+90		
7	7	σ_R	+120	+210	+78
		σ_T	-90		
8	8	σ_R	-90	40*	0
		σ_T	-130		

Tabela 2. Resultado das medições para pontos 10...16

N	Ponto da medição	Direção da medição	Valore absoluto medido por raios-X em MPa	$(\sigma_x - \sigma_y)$ em MPa	Valor relativo medido por método magnético
1	10	σ_R	+160	+100	+50
		σ_T	+60		
2	11	σ_R	+50	+110	Obs.
		σ_T	-60		
3	12	σ_R	+90	+90*	+50
		σ_T	0		
4	13	σ_R	+100	+100*	+64
		σ_T	0		
5	14	σ_R	+190	-40	0
		σ_T	+230		
6	15	σ_R	+180	-20	-10
		σ_T	+200		
7	16	σ_R	0	-100	-50
		σ_T	+100		

Observação 1: Sinal “+” significa tensão de tração, “-” tensão de compressão.

Observação 2: Ponto 11 está fora da área mapeada, porém pela continuidade do campo das tensões podemos afirmar que o correspondente valor relativo é positivo.

Com base nesta análise podemos fazer seguintes conclusões sobre estado das tensões de soldagem na amostra analisada:

- O campo das tensões possui quatro pontos críticos de concentração das tensões conforme critério de escoamento de Tresca-Guest, onde a tensão cisalhante máxima tem valores extremos.
- Estes pontos críticos, onde a diferença entre os valores das tensões principais é máxima (mínima), são simétricos com relação ao centro da solda.
- A direção entre os pontos onde a diferença entre os valores das tensões principais é máxima (mínima) é uma das direções das tensões principais.
- Os valores relativos medidos por método magnético e valores absolutos medidos por raios-X apresentam boa concordância entre si tanto nas regiões dos pontos críticos, quanto nos outros pontos do metal de base.
- Nas regiões onde segundo mapeamento magnético as linhas de nível são bastante concentradas (como no caso da linha de nível com valore relativo zero), a comparação dos resultados relativos com absolutos exige a identificação exata da posição do ponto de comparação.

5. Aplicações industriais - I

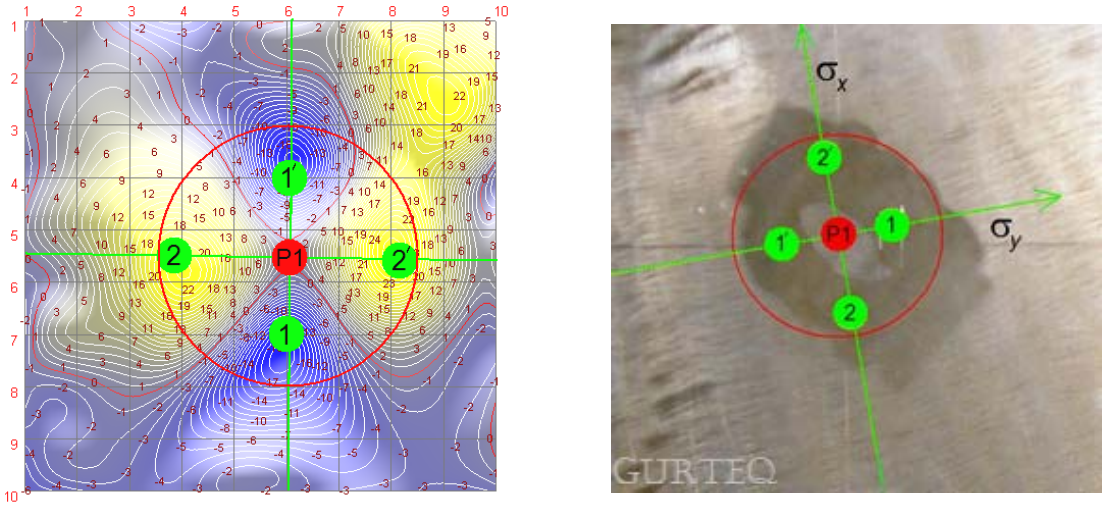
A técnica proposta foi aplicada para análise de tensões nas áreas dos reparos de solda de uma peça fundida de uma turbina hidroelétrica, ver Fig. 8, com metal de base ASTM A 743CA6NM (inox martensítico). Foram analisados dois dos quatro pontos de reparo, P1 e P4, efetuados com dois processos de soldagem diferente. Localização dos pontos de reparo na peça pode ser vista na Fig. 8. Para ambos os pontos de reparo foram feito o mapeamento através do método magnético numa área de 90 x 90mm, centrada no meio da solda, com passo da malha uniforme de 10mm, Fig. 9-a.

Fig. 8: Localização dos pontos de reparo de solda na peça

(a) (b)

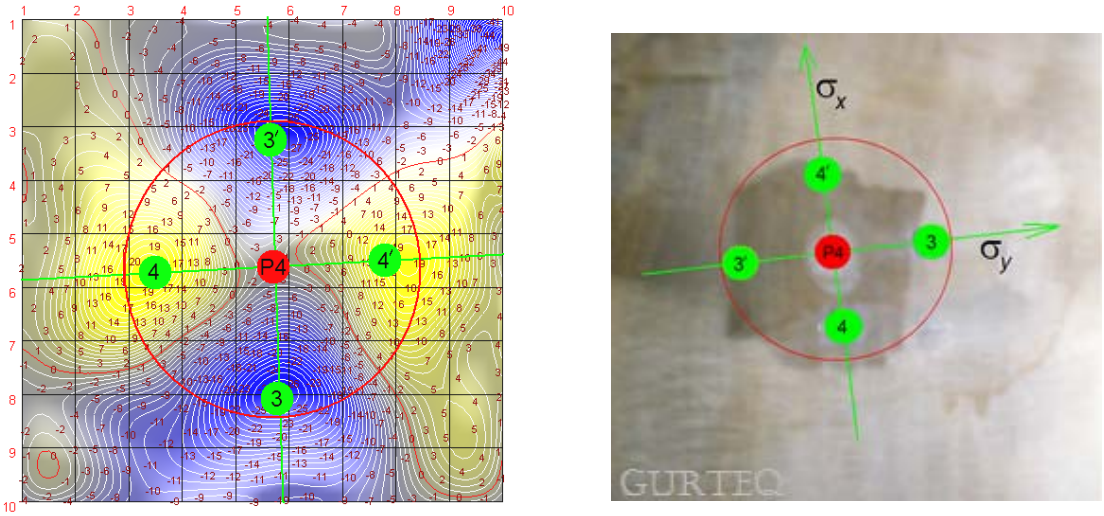
Fig. 9: Processo de mapeamento das tensões nas áreas dos pontos de reparo através do equipamento magnético (a) e medição de tensões por equipamento portátil de raios-X (b)

Os mapeamentos obtidos (Fig. 10 e 11) apresentam distribuição da diferença dos valores das tensões principais similares à da amostra analisada na seção anterior: Cada área tem dois pontos de máximos e dois pontos de mínimos localizados de maneira simétrica com relação ao centro da solda. A diferença entre as duas áreas analisadas aparece na distancia entre os pontos críticos, ou seja, na extensão da área afetada pelo processo de soldagem, bem como nos próprios valores e na direção dos eixos das tensões principais. Área P1: distância entre pontos de mínimo ≈30mm, entre pontos de máximo ≈40mm, nos pontos 1 e 1' temos valor relativo -18 e -16, nos pontos 2 e 2' temos valor relativo +23 e +24, respectivamente. Área P4: distância entre pontos de mínimo ≈45 mm, entre pontos de máximo ≈40 mm, nos pontos 3 e 3' temos valor relativo -26 e -27, respectivamente, nos pontos 4 e 4' temos valor relativo +20. Como as áreas analisadas representam parte da mesma peça, os valores obtidos para pontos de reparo P1 e P4, mesmo sendo relativos, podem ser comparados entre si.



(a) (b)

Fig. 10: (a) - Visualização 2-D do mapeamento das tensões próximo a ponto de solda P1. (b) – posição real do ponto de solda P1 e dos pontos das tensões críticos encontrados



(a) (b)

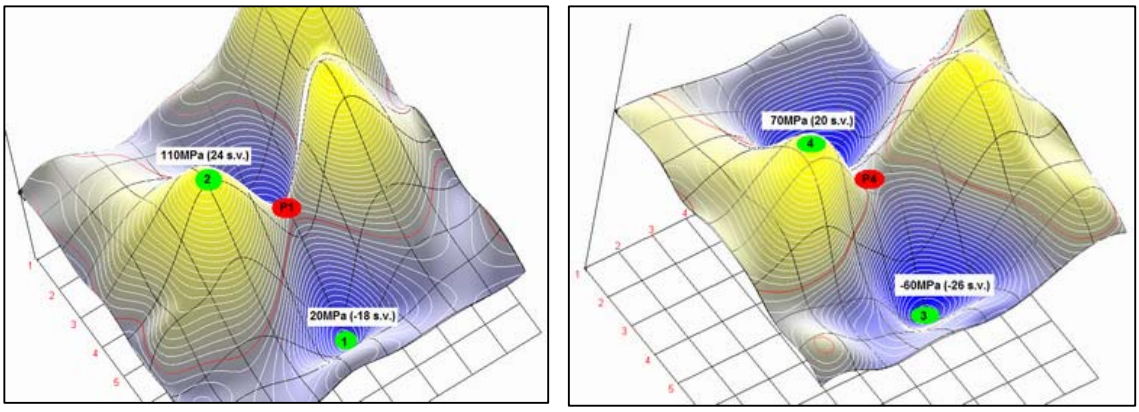
Fig. 11: (a) - Visualização 2-D do mapeamento das tensões próximo a ponto de solda P4.
(b) – posição real do ponto de solda P4 e dos pontos das tensões críticos encontrados

Baseando-se nas conclusões da seção anterior, as medições das tensões por raios-X (Fig. 9-b) foram realizadas nas direções σ_x e σ_y somente numa parte dos pontos críticos, especificamente nos pontos 1, 2, 3 e 4, Fig. 10-b e 11-b. Os resultados da medição nas posições 1, 2, 3 e 4 para pontos P1 e P4 são apresentados são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3: Resultados das medições para áreas dos pontos de solda P1 e P4

N	Área do ponto da solda	Ponto da medição	Direção da medição	Valore absoluto medido por raios-X em MPa	$(\sigma_x - \sigma_y)$ em MPa	Valor relativo medido por método magnético
1	P1	1	σ_x	+140	+20	-18
2			σ_y	+160		
3		2	σ_x	+180	+110	+24
4			σ_y	+290		
5	P4	3	σ_x	+170	-60	-26
6			σ_y	+110		
7		4	σ_x	+100	+70	+20
8			σ_y	+170		

A visualização em 3-D do estado das tensões das duas áreas de solda está mostrada na Fig. 12.



(a) (b)

Fig. 12: Resultados de mapeamentos das áreas P1 (a) e P4 (b) em 3-D, com valores absolutos (raios-X) e relativos (método magnético)

Importante salientar, devido à utilização do método proposto, a avaliação do estado das tensões e comparação das duas áreas com solda de reparo foram feitas com número mínimo das medições por raios-X, tendo como resultado a visualização completa do campo das tensões e localização dos pontos das tensões críticos em tempo real.

6. Aplicações industriais - II

A técnica proposta foi aplicada para avaliar a distribuição das tensões residuais numa área da peça fundida do rotor de uma turbina hidroelétrica. Área analisada tem dimensões 100mm x 100mm, Fig. 13.

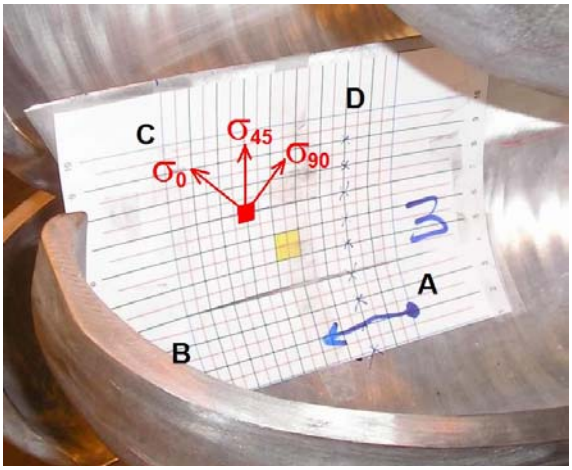


Fig. 13: Posição e orientação da malha para mapeamento através do método magnético. Ponto da medição por método de raios-X e direções das medições

O mapeamento obtido através do método magnético, Fig. 14, apresenta distribuições do fator de concentração das tensões e da diferença dos valores das tensões principais. Malha aplicada é uniforme com passo de 10mm.

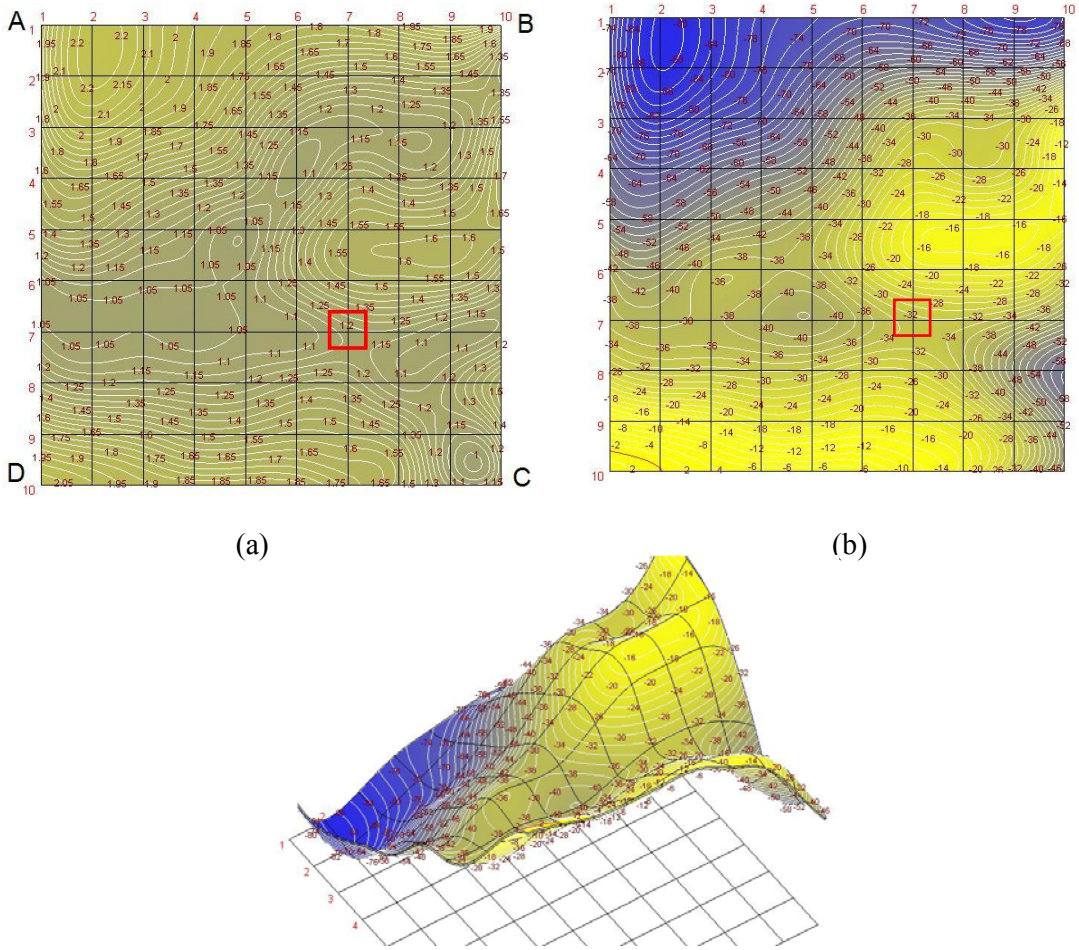


Fig. 14: Mapa da distribuição do fator de concentração das tensões (a) e da diferença dos valores das tensões principais e do ponto da medição das tensões por raios-X (quadrado vermelho) com relação à malha aplicada. Passo da malha uniforme de 10mm; (c) - mapas em 3-D da diferença dos valores das tensões principais

Medição dos valores absolutos realizada num ponto da área analisada permite calibrar os mapas. Sendo N o número das medições realizadas por método magnético e σ_i o módulo dos valores relativos da diferença entre as tensões principais medidos por método magnético, para fator de concentração das tensões no ponto da medição i, temos:

$$k_i = \frac{\sigma_i}{\sigma_{med}} = \frac{2\tau_i}{\sigma_{med}},$$

onde $\sigma_{med} = \frac{1}{N}\sum_{i=1...N}\sigma_i$ e τ_i é o valor relativo da tensão cisalhante máxima.

Como o fator de concentração das tensões k é um valor absoluto, o valor absoluto da σ_{med} é encontrado através do valor de τ_{max} no ponto da medição por raios-X e o respectivo valor de k neste ponto:

$$\sigma_{med} = \frac{2\tau_{\max}}{k}.$$

Desta maneira, a partir do mapa da distribuição do fator de concentração das tensões e o valor absoluto da tensão cisalhante máxima medida por raios-X num ponto, os valores absolutos de tensão cisalhante $\tau_{i,\max}$ nos pontos $i = 1,..,N$ da área analisada são encontrados por formula:

$$\tau_{i,\max} = \frac{k_i \sigma_{med}}{2} = \frac{k_i}{k}\tau_{\max}.$$

Ponto escolhido para medições por raios-X está marcado por quadrado vermelho na Fig. 14. Valor absoluto da tensão cisalhante máxima medido por raios-X: τ_{max} = 20MPa, ver Tabela 4. Valor do fator de concentração das tensões no mesmo ponto segundo resultado do método magnético k = 1.2.

Tabela 4: Resultados da medição dos valores absolutos das tensões por raios-X

N	Tensão medida	Valor absoluto da tensão medida (MPa)	Valor absoluto da tensão cisalhante máxima τ_{max} (MPa)
1	σ_0	+40	20
2	σ_{45}	0	
3	τ	0	

A partir do mapa da distribuição do fator de concentração das tensões, Fig. 14 (a) para variação dos valores absolutos do fator de concentração das tensões na área analisada temos:

$$1.0 \leq k \leq 2.2.$$

Ou seja, os valores da tensão cisalhante máxima na área analisada ficam dentro do intervalo:

$$16\text{MPa} \leq \tau_{max} \leq 37\text{MPa}.$$

Conclusões

O método proposto mostra-se eficiente para medição das tensões em materiais ferromagnéticos. Localização dos pontos das tensões críticas por método magnético e a possibilidade de realizar o mapeamento magnético sem contato explícito com superfície do metal permite otimizar processo de medição, minimizando o volume de trabalho para medições por raios-X, simplifica tomada da decisão no momento de avaliação do objeto de controle aplicando diretamente o critério de escoamento de Tresca-Guest. O conjunto dos equipamentos é portátil e permite realizar medições em qualquer condição de campo, sem restrições para geometria da superfície analisada, em tempo real, visualizando imediatamente os resultados de análise.

Referências bibliográficas

[1] Macherauch, E., Wohlfahrt, H., Different sources of residual stress as a result of welding. In: *Proceedings of the International Conference on Residual Stress in Welded Construction and their Effects*, pp. 267-282, London, 15-17 Nov. 1977.

[2] Macherauch, E.,Kloos, K.H., Origin, measurement and evaluation of residual stresses. In: *Proceedings of the International Conference on Residual Stress*, pp. 3-26, Germany, 1986.

[3] Monin, V., Teodosio, J., Gurova, T. Study and service control of stress state of high-strength steel cables used in prestressed concrete structures. *Advances in X-Ray Analysis*, Newtown Sq., Pennsylvania, USA, v. 44, pp. 195-200, 2001.

[4] Monin, V., Teodosio, J., Gurova, T. Analysis of residual stress state in speed gears for automotive vehicles. *Advances in X-Ray analysis*, Newtown Sq., Pennsylvania, USA, v. 44, pp. 187-194, 2001.

[5] Monin, V., Teodosio, J. R., Gurova, T., Assis, J. X-Ray study of the inhomogeneity of surface residual stresses after shot-peening treatment. *Advances in X-Ray Analysis*, Newtown Sq., Pennsylvania, USA, v. 43, pp. 48-53, 2000.

[6] Monin, V., Gurova, T., Assis, J. T. Nondestructive control of residual stress state of welding regions by X-ray diffraction method. *Ndt Net*, Germany, v. 5, n. 4, 2000.

[7] Monin, V., Gurova, T., Assis, J. T. Análise bidimencional das tensões residuais em chapas metálicas após soldagem". In: *XIX Congresso Nacional de Ensaios Não Destrutivos*, v. 1, pp. 164-170, São Paulo, 2000.

[8] Assis, J., Monin, V., Teodosio, J., Gurova, T. X-Ray analysis of residual stress distribution in weld region. *Advances in X-Ray Analysis*, Newtown Sq., Pennsylvania, USA, v. 45, pp. 225-231, 2002.

[9] Kachanov, L.M. *Fundamentos da Teoria de Plasticidade*, Nauka, Moscou, 1969, 402 p. *(em russo)*

[10] *Manual de Controle de Qualidade Através dos Métodos Eletroacústicos, Radiométricos e Magnéticos*. И-39-63, Leningrad: Leningradstroy, 1962, 86 p. *(em russo)*

[11] 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, pp. 1081-1086, 1992.

[12] Teodosio, J. R., Monin, V., Gurova, T. Novo método de tensometria por raios-X. In: *COTEQ-97-Conferência sobre Tecnologia de Equipamentos*, v. 1, pp. 255-258, Rio de Janeiro, 1997.

[13] Cullity, B.D. *Elements of X-ray diffraction, Addison-Wesley Publishing Company*, Inc. 1967, 514 p.

[14] Noyan, I.C., Cohen J. B. *Residual Stress: Measurement by Diffraction and Interpretation*, Springer-Verlag, 1987, 276 p.

[15] Timoshenko, S. *Teoria de Elasticidade,* ONTI, Moscou, 1937, 451 p. *(em russo)*