



NOVO MÉTODO DE TENSOMETRIA POR RAIOS-X

J.R. Teodósio, V.I. Monin, T. Gurova
Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

São apresentados os elementos da teoria de tensometria por raios-X, bem como a metodologia empregada em um equipamento portátil para determinação de tensões internas em estruturas de materiais cristalinos. São apresentadas as principais aplicações do método, e resultados experimentais obtidos em aço contendo Cr e Mo.

1. INTRODUÇÃO - Teoria da tensometria por raios-X

O método de raios-X para medição de tensões mecânicas começa a ser mais utilizado na indústria com o desenvolvimento e produção dos equipamentos portáteis. Um desses equipamentos portáteis é o Raystress. Contudo, os princípios básicos da tensometria por raios-X foram desenvolvidos há mais de 50 anos. Por um lado eles se baseiam na teoria de difração de raios-X para materiais cristalinos. Por outro lado, se baseiam em mecânica dos materiais e, em particular, na teoria da elasticidade do material sólido.

Da teoria de difração de raios-X na rede cristalina, sabe-se que os feixes ao incidirem a rede cristalina nas direções caracterizadas pelo ângulo de difração θ , surgem intensidades máximas dos feixes difratados. O ângulo de difração obedece a lei de Bragg:

$$2d \cdot \sin \theta = \lambda, \quad (1)$$

onde:

θ é o ângulo de difração;

d é a distância interplanar do plano difratante;

λ é o comprimento de onda dos feixes de raios-X.

A figura 1 mostra a interpretação geométrica da lei de Bragg. A variação da distância interplanar Δd conduz à variação do ângulo de difração. A diferenciação da equação (1) pode ser escrita:

$$\frac{\Delta d}{d} = -\cot \theta \cdot \Delta \theta, \quad (2)$$

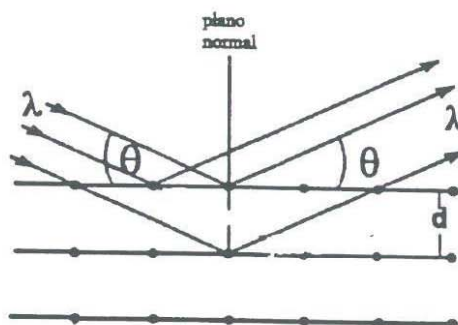


Figura 1. Interpretação geométrica da lei de Bragg [Cullity, 1967].

A equação (2) mostra que, medindo-se experimentalmente a variação do ângulo de difração, pode-se determinar a deformação elástica da rede cristalina. Por outro lado, quanto maior o ângulo de difração θ , maior é a precisão de determinação da deformação.

Os princípios básicos da teoria de elasticidade para interpretação da tensometria por raios-X são:

- deformação: $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l}$;

(3)

- tensão: $\sigma = \frac{\Delta F}{\Delta A}$;

(4)

• a lei de Hooke para estado ^{triaxial}uniaxial é $\varepsilon = \frac{\sigma}{E}$ - ou para estado triaxial é:

$$\varepsilon_1 = \frac{\sigma_1}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_3) \quad (5)$$

$$\varepsilon_3 = \frac{\sigma_3}{E} - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2)$$

onde:

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ são as deformações principais;
 $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ são as tensões principais;
 E é o módulo da elasticidade;
 μ é o coeficiente de Poisson.

Contudo, a mais importante equação da tensometria por raios-X, é a equação para deformação nas direções φ e ψ , $\varepsilon_{\varphi\psi}$, no sistema de coordenadas polares apresentado na figura 2

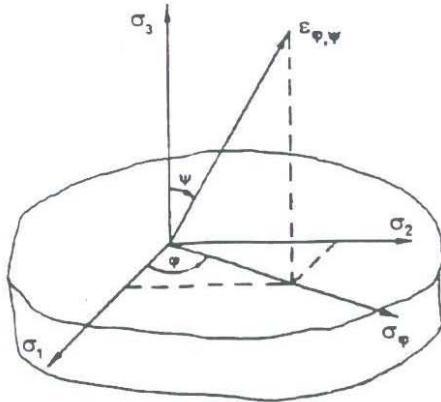


Figura 2. Sistema de coordenadas polares.

Sabe-se que:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = (\sigma_1 \cos^2 \varphi + \sigma_2 \sin^2 \varphi) \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3), \quad (6)$$

onde:

φ é o ângulo azimutal;
 ψ é o ângulo polar.

A componente da tensão perpendicular à superfície é igual a zero, e as componentes σ_1 e σ_2 se posicionam na superfície. Então, a equação (6) pode ser escrita como:

$$\varepsilon_{\varphi\psi} = \frac{1+\mu}{E} \cdot \sigma_{\varphi} \cdot \sin^2 \psi - \frac{\mu}{E}(\sigma_1 + \sigma_2), \quad (7)$$

onde σ_{φ} é a componente da tensão na direção que faz o ângulo φ com a tensão principal σ_1 .

Com base nas equações (6) e (7), são elaboradas várias metodologias de medição de tensões.

2. METODOLOGIA DO EQUIPAMENTO RAYSTRESS

Da equação (2) pode-se escrever que:

$$\varepsilon(\varphi, \psi) = \frac{d_{\varphi\psi} - d_0}{d_c} = \cot g \theta_0 (\theta_{\varphi\psi} - \theta_0); \quad (8)$$

onde d_0 e θ_0 são os valores para o estado sem tensão.

Determinando a diferença entre as deformações em duas direções diferentes, segundo o ângulo ψ , teremos:

$$\varepsilon(\psi_2, \varphi) - \varepsilon(\psi_1, \varphi) = \cot g \theta_0 (\theta_{\psi_2} - \theta_{\psi_1}), \quad (9)$$

Por outro lado, o primeiro membro da equação (7) permite escrever:

$$\varepsilon(\psi_2, \varphi) - \varepsilon(\psi_1, \varphi) = \frac{1+\mu}{E} \sigma_{\varphi} (\sin^2 \psi_2 - \sin^2 \psi_1), \quad (10)$$

Da equação (10) obtemos a equação usada no equipamento RAYSTRESS:

$$\sigma_{\varphi} = \left(\frac{1+\mu}{E} \right)^{-1} \cot g \theta_0 \cdot \frac{\theta_{\psi_2} - \theta_{\psi_1}}{\sin^2 \psi_1 - \sin^2 \psi_2}, \quad (11)$$

A equação (11) permite medir a componente σ_{φ} , mesmo que as direções principais não sejam conhecidas. O ângulo θ_0 pode ser substituído por θ_{φ} . Esta substituição induz um erro na tensão medida menor que 1%.

O lugar geométrico dos feixes difratados pelos planos da mesma família, é um cone. A interseção deste cone com o filme é uma linha cônica (figura 3).

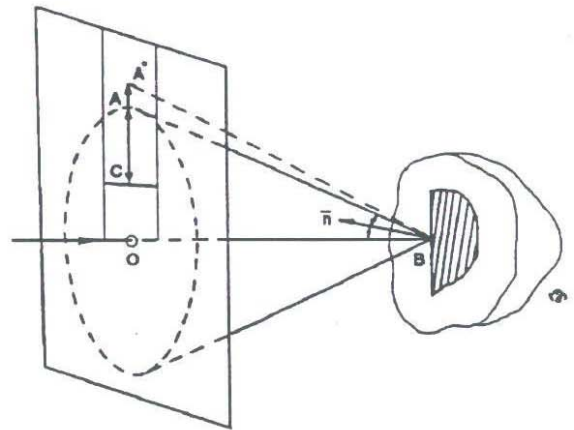


Figura 3. Esquema da difração de raios-X.

Para cada ponto desta linha cônica, o plano difratante é tal que, sua normal $\vec{n}$ é a bissetriz do ângulo entre o feixe incidente e o difratado. Com isso, o ângulo

$$\angle O\vec{B}A = \pi - 2\theta \text{ ou } \theta = \frac{\pi - \angle O\vec{B}A}{2}.$$

Para determinação experimental do ângulo da difração θ é necessário medir o raio da linha cônica. Para determinar a variação do ângulo $\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1$, pode-se utilizar a "referência," e em vez de medir o raio, medir as distâncias A^*C e AC . Então,

$$\Delta\theta = \left(\frac{\pi - \angle O\vec{B}A^*}{2} \right) - \left(\frac{\pi - \angle O\vec{B}A}{2} \right) = \frac{\angle O\vec{B}A - \angle O\vec{B}A^*}{2}, \text{ ou}$$

$$\Delta\theta = K(AC - A^*C) = K(L_2 - L_1), \quad (12)$$

onde K é denominado de fator de escala. O fator de escala e a posição das referências, determinam-se através de uma única calibração, utilizando materiais com tensão igual a zero

(geralmente são utilizados pós de metais puros). A "referência" é obtida através de um fio fino de tungstênio, colocado na base do colimador.

A partir das equações (11) e (12), é possível obter a equação final:

$$\sigma_{\theta} = \frac{E}{1 + \mu} \cot g \theta \cdot K(L_2 - L_1) \quad (13)$$

Para determinar as direções e valores das tensões principais σ_1 e σ_2 , mede-se as componentes das tensões nas direções x , y e 45° :

$$\gamma = \frac{1}{2} \arctg \frac{2\sigma_{45} - \sigma_x - \sigma_y}{\sigma_x - \sigma_y};$$

$$\sigma_{1,2} = \frac{1}{2} \left[(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (2\sigma_{45} - \sigma_x - \sigma_y)^2} \right] \quad (14)$$

A figura 5 apresenta o esquema da medição através deste método, utilizado no equipamento RAYSTRESS (Ivanov, Monin, Teodósio (1994)).

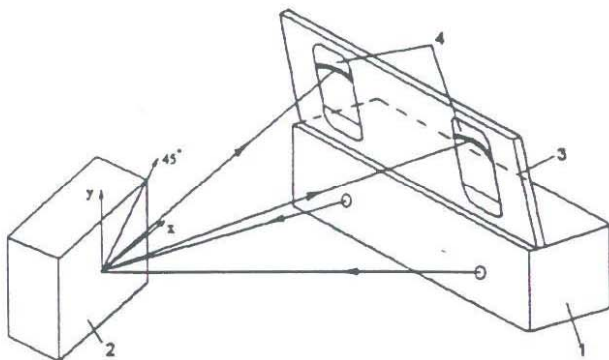


Figura 5. Esquema de medição das tensões residuais no equipamento RAYSTRESS.

- 1 - colimador para formar dois raios incidentes sob os ângulos $\psi = 50^\circ$ e $\psi = 0^\circ$;
- 2 - amostra analisada;
- 3 - cassete;
- 4 - janelas com as linhas de referência e linhas de difração.

A figura 6 apresenta o conjunto RAYSTRESS que é composto de:

- Bloco diretor (1);
- Fonte de alta tensão e tubo de raios-X (2);
- Colimador com cassete(3);
- Suporte magnético (4);

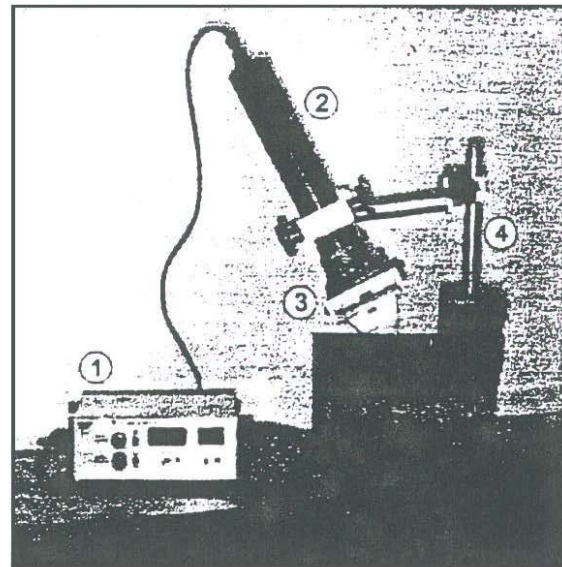


Figura 6. Conjunto RAYSTRESS.

O bloco diretor permite monitoramento e ajuste do nível de potência de alimentação do tubo de raios-X. O tubo utiliza dois anodos de cromo ($\lambda_{CrK\alpha} = 2,29092 \text{ \AA}$) produzindo feixes de radiação monocromática. A profundidade de penetração efetiva da radiação no Fe é aproximadamente de $11 \mu\text{m}$. Os dois feixes incidentes são difratados pelos planos cristalográficos $\{211\}$ do ferro. A tensão e a corrente de trabalho da fonte de raios-X é de 25 kV e 1,5 mA, respectivamente. O tempo de exposição, no caso de medição de tensões residuais em aços, é de aproximadamente 6 minutos.

3. APLICAÇÕES.

3.1. Principais medições de tensões residuais.

A seguir são citadas as principais aplicações em estruturas e equipamentos industriais, utilizando o RAYSTRESS.

- trocadores de calor, torre de refino e reservatórios da refinaria RLAM/Petrobrás: tensões em reparos de solda;
- reservatório de GLP da refinaria REGAP/Petrobrás: tensões em reparos de solda;
- tambor de coqueria da refinaria REGAP/Petrobrás: tensões internas atuantes;
- torres e vasos de pressão da refinaria Alberto Pasqualini/Petrobrás: tensões em cordões de solda;
- tubulações da refinaria REDUC/Petrobrás: tensões residuais em cordões de solda circunferenciais, incluindo metal de solda e ZTA;
- oleodutos na BR 376, da DTSUL/Petrobrás: tensões em cordões de solda;
- trilhos da RFFSA e EFC: tensões em cordões de solda, incluindo ZTA;
- rodas de trens da RFFSA: tensões no friso e pista;
- linhas de transmissão de 138 kV da ENERSUL: tensões em vigas das torres;
- metrô de São Paulo: tensões em cordões de solda de trilhos;
- perfil de tensões residuais introduzidas por têmpera e shot-peening, em engrenagens: General Motors do Brasil;
- peça de liga de alumínio, utilizada em trem de pouso: EMBRAER.

3.2. Variação de tensões residuais com deformação plástica.

Além das medições acima citadas, foram realizados trabalhos em nível acadêmico. Alguns resultados destes trabalhos são apresentados a seguir.

Foi determinada a variação de tensões residuais introduzidas por shot-peening, durante deformação plástica por tração uniaxial. Foram utilizados corpos de prova do aço ASTM A 387 Gr.5., com cordão de solda. Em todos os casos, foram determinadas as tensões longitudinais e transversais ao eixo de tração. As figuras 7 e 8 mostram os resultados obtidos.

A figura 7 mostra que, no metal de base, as tensões longitudinais se invertem de compressivas para trativas, no início do processo de deformação plástica. Atingem o valor trativo máximo para 2% de deformação. Com 4% de deformação plástica, estas tensões longitudinais se anulam, permanecendo assim até a fratura do corpo de prova. As tensões transversais (figura 7) se anulam com 1% de deformação plástica, permanecendo assim até a fratura do corpo de prova.

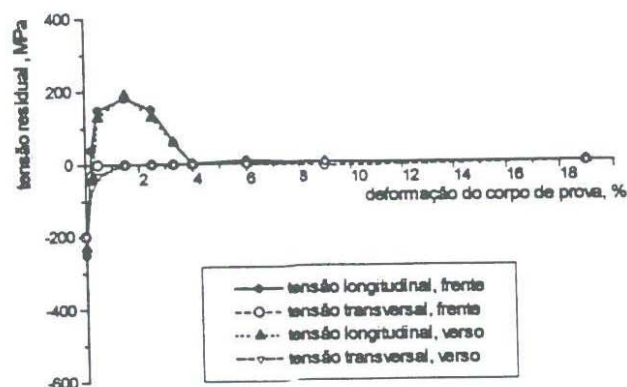


Figura 7. Variação de tensões residuais no metal de base do corpo de prova com cordão de solda. Aço ASTM A 387 Gr.5.

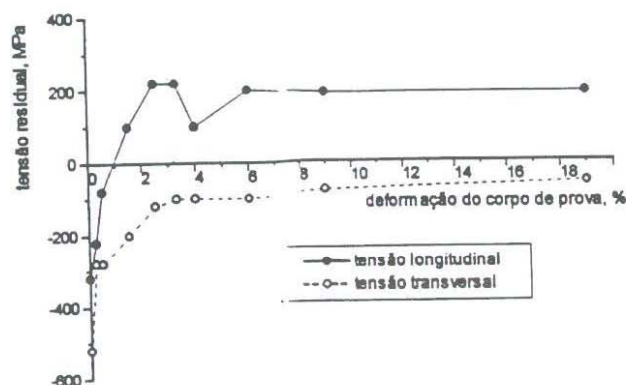


Figura 8. Variação de tensões residuais na ZTA do corpo de prova com cordão de solda. Aço ASTM A 387 Gr.5.

A figura 8 mostra que, na zona termicamente afetada, as tensões longitudinais se invertem de compressivas para trativas, no início do processo de deformação plástica. Atingem o valor trativo máximo para 2% de deformação. Em seguida oscilam, e com 4% de deformação plástica, estas tensões longitudinais trativas permanecem com valor constante até a fratura do corpo de prova. As tensões

transversais (figura 8) diminuem de valor, e permanecem constantes até a fratura do corpo de prova.

4. REFERÊNCIAS

- Cullity B.D. "Elements of X-ray diffraction". Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1967.
- Ivanov S.A.; Monin V.I.; Teodósio J.R.- Recent Advances in Experimental Mechanics. Proceedings of the 10th International Conference on Experimental Mechanics- pp. 757 - 761, Lisboa, 1994.

SUMMARY

It is presented the elements of x-ray tensometry theory, as well as the methodology employed in a portable equipment for residual stress analysis in crystalline materials. The principal applications of the method, and the experimental results obtained in steel containing Cr and Mo are shown.