

Análise de Tensão Residual por meio da Difração de Raios-X

Fernanda Moura de Andrade de Brito, Gabriel Gonçalves Ribeiro, Gabriel da Silva de Carvalho, Hugo Serrão Ribeiro Borges, Juciane Maria Alves, Lucas Alexandre Gonçalves Lima, Luiz Paulo Mendonça Brandão, Rebeca Pinheiro dos Reis
Instituto Militar de Engenharia,
Praça General Tibúrcio, 80, 22290-270
Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

RESUMO: Este artigo tem por finalidade analisar a tensão residual em amostras de aço inoxidável austenítico 304L com auxílio do software X'Pert Stress, comparando os valores encontrados com aqueles previstos pela teoria de elasticidade e tensões residuais. O artigo fundamenta seu desenvolvimento na literatura de tensões e deformações, explicitando as equações utilizadas e explicando a teoria abordada. Por fim, mostra-se que os resultados obtidos estão em concordância com a literatura, no que diz respeito ao tipo e magnitude das tensões aplicadas.

PALAVRAS-CHAVE: Tensão residual, difração de raio-X, X'Pert Stress

ABSTRACT: This paper aims to analyze the residual stress in a sample of austenitic stainless steel 304L with the aid of the X'Pert Stress software, comparing the values found with those predicted by the theory of elasticity and residual stresses. The article has its development based on the literature of tensions and deformations, expliciting the equations used and explaining the theory addressed. Lastly, it is presented that the obtained results are in agreement with the literature, concerning the type and magnitude of applied tensions.

KEYWORDS: Residual Stress. X-ray diffraction. X'Pert Stress

software X'Pert Stress, bem como fornecer insumos para o estudo

do comportamento destas tensões em materiais que sofrem transformação austenita-martensita.

1. INTRODUÇÃO

A difração de raios-X é uma técnica muito difundida na área dos materiais, pois permite analisar propriedades microscópicas de diversas amostras em estudo. Um difratômetro de raio-X é um instrumento com diversas funcionalidades e especificidades, porém em todos existem três componentes básicos: a fonte de raio-X, a amostra e o detector de raio-X [1]. Todos esses três componentes se encontram numa mesma circunferência imaginária de tal forma que o ângulo entre o plano da amostra e o raio-X emitido seja θ (ângulo de Bragg) e o ângulo entre o prolongamento do raio-X emitido e o raio-X detectado seja 2θ . Por conta disso, os padrões de raio-X são referidos como $\theta-2\theta$ [1].

O raio-X é uma radiação que se encontra entre os raios- γ e o ultravioleta no espectro de radiação eletromagnética. Quando um feixe de elétrons em certas condições incide sobre um material qualquer, este provoca saltos quânticos no núcleo dos átomos da amostra, emitindo raios-X para equilíbrio energético. As propriedades dessa radiação eletromagnética dependem de alguns fatores, sendo o tipo de material um deles. Desta forma, filtrando algumas frequências de raios-X emitidos por uma amostra, é possível obter uma frequência exata de onda e, conseqüentemente, um comprimento de onda adequado, possibilitando o uso da lei de Bragg para o estudo dos materiais.

Tensões residuais são aquelas que permanecem atuando em um corpo mesmo na ausência de forças externas e/ou de gradientes de temperatura. Vale ressaltar que uma causa importante dessas tensões é a mudança de fase, no caso da amostra estudada, de austenita para martensita. A tensão é gerada uma vez que, com esse processo, haverá diferença volumétrica entre as fases matriz e produto, o que acaba causando distorções na rede para acomodação das mesmas [2].

Dependendo da grandeza de suas atuações, podem ser classificadas como macro, micro ou submicrotensões. O campo de tensão pode atuar de maneira benéfica ou maléfica no desempenho do material, o que depende de sua magnitude, extensão e natureza [3]. Macrotensões residuais são aquelas que se estendem por diversos grãos da amostra, sendo praticamente uniformes para diversos grãos [4]. Microtensões, por sua vez, variam de ponto a ponto na rede cristalina e atuam em áreas do tamanho de um grão [4]. A presença de tensão residual em um material pode ser verificada pelas variações das distâncias interplanares do material através da técnica de difração de raios-X.

As tensões também são definidas como trativas ou compressivas. As tensões trativas podem diminuir o tempo de vida em fadiga, bem como provocar a iniciação precoce de trincas, e sua propagação pode levar à ocorrência de falhas da peça. As tensões compressivas, consideradas benéficas, podem retardar o índice de propagação de trincas por fadiga na microestrutura cristalina [5].

Utilizando um difratômetro de raio-X pode-se relacionar a difração com as tensões residuais de um certo material. Fazendo a análise de uma amostra com este instrumento, obtém-se o padrão de interferência do material analisado, o que permite aferir informações relevantes como ângulo, largura e altura dos picos.

Este trabalho destina-se a analisar a tensão residual do material aço inoxidável austenítico 304L para verificar a confiabilidade do

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O estudo da tensão residual no material e a realização das medições foram feitos a partir do difratômetro X'Pert PRO X-Ray (XRD) da PANalytical, utilizando tubo de Cobalto como fonte de raios-X, o qual estava ligado a uma voltagem de 40 kV e corrente de 45 mA. Foram analisadas três amostras de aço inoxidável 304L autêntico, nas seguintes condições: amostra como-recebida, com deformação a 10% em tração e, por fim, com deformação a 25% em tração. A medida obtida foi enviada para o software comercial X'Pert Stress, versão 2007, o qual foi o responsável pela análise da tensão residual presente no material.

Antes do acionamento do difratômetro, realizou-se a disposição da amostra na posição mais adequada no porta-amostra. O procedimento de DRX foi realizado a partir do equipamento mencionado anteriormente, segundo a geometria Psi, com a utilização de foco ponto para colimar o feixe de raios-X, o qual é mais adequado para análises de tensões residuais [6].

As varreduras foram realizadas para 3 ângulos Φ de rotação da amostra, totalizando 27 medições (devido à variação de Ψ entre 9 ângulos possíveis), método conhecido como múltipla exposição [6]. Os ângulos descritos podem ser identificados na Figura 1.

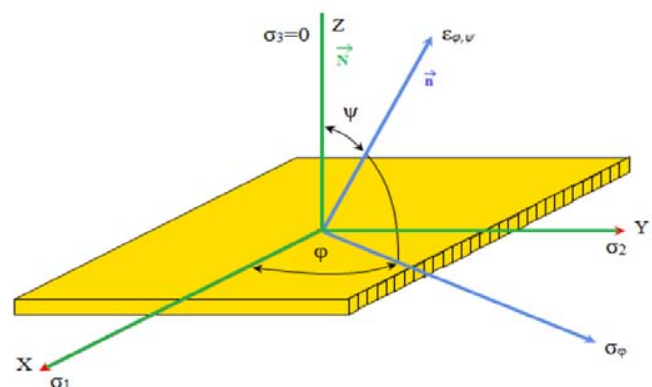


Fig. 1 - Esquema da medição de tensão residual por DRX (ALVES, J.M., 2014).

O ângulo de difração 2θ , mantido fixo ao longo dessas 27 varreduras, foi selecionado de forma que o pico de difração fosse aquele de maior 2θ possível, para minimizar os erros nas medições [2]. A partir do cálculo das distâncias entre planos de átomos da amostra, o software obtém a tensão residual presente no material [6].

3. RESULTADOS

A determinação da tensão residual foi realizada a partir do processo descrito na seção 2. A Equação (1) fornece o comportamento da deformação relativa planar para um dado ângulo ψ [6].

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

Ao passo que diferentes valores de deformação relativa são obtidos ao se variar o ângulo ψ , dados ângulos θ e Φ fixos, tal equação gera uma reta representada no gráfico de $\varepsilon_{\phi\psi}$ por $\sin^2 \psi$ conforme apresentado na Figura 2.

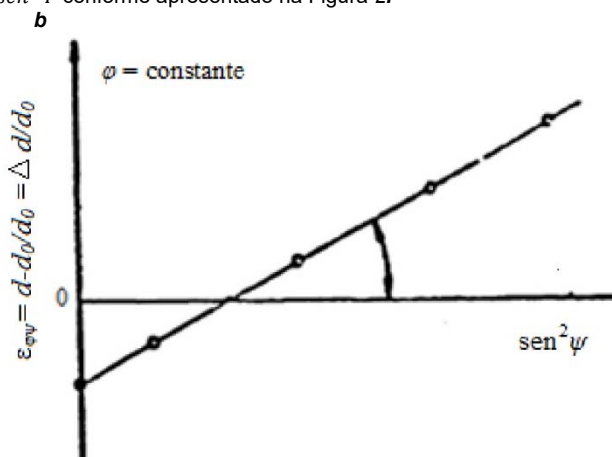


Fig. 2 - Análise gráfica da equação (3.1) (GUIMARÃES, L.R., 1990).

Analisando o gráfico obtido, é possível calcular a tensão atuante na direção Φ , σ_{ϕ} , a partir do coeficiente angular da reta em questão, tal que:

$$\sigma_{\phi} = m \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \quad (2)$$

A relação da tensão direcional com as tensões principais é dada por [6]:

$$\sigma_{\phi} = \sigma_1 \cos^2 \Phi + \sigma_2 \sin^2 \Phi \quad (3)$$

Por fim, o último termo da Equação (1), necessário ao cálculo das tensões principais, pode ser obtido a partir da deformação relativa calculada para o ângulo de $\psi=0^\circ$. A partir dos passos descritos acima, obtém-se o seguinte sistema de equações:

$$\sigma_1 + \sigma_2 = \frac{-\nu}{E} \left(\frac{d\psi-d_0}{d_0} \right) \quad (4)$$

$$\sigma_1 \cos^2 \Phi + \sigma_2 \sin^2 \Phi = m \left(\frac{E}{1+\nu} \right) \quad (5)$$

A resolução desse sistema explicita os valores de tensões residuais atuantes no material.

Na Tabela 1 são apresentados os resultados de tensão residual obtidos pelo software X'Pert Stress para as três amostras de aço inoxidável austenítico 304L em estudo:

Tab 1 - Tensão residual, atuante na amostra analisada, obtida pelo software X'Pert Stress.

Aço inoxidável 304L Austenítico	Tensão Residual σ_{11} (MPa)	Tensão Residual σ_{22} (MPa)	Erro relativo (MPa)
I - Como-recebido	- 199,2	- 184,7	$\pm 13,7$
II - Com deformação de 10% em tração	- 215,9	- 229,8	$\pm 19,7$
III - Com deformação de 25% em tração	- 123,2	- 177,2	$\pm 16,0$

4. DISCUSSÕES

Os resultados apresentados na Tabela 1 exemplificam a atuação do software na determinação das tensões residuais atuantes no aço inoxidável 304L.

Para a faixa de valores de deformação sob tração utilizada experimentalmente, a austenita encontra-se situada no regime elástico [7]. Por conseguinte, a redução da magnitude da tensão compressiva nela atuante seria, a princípio, proporcional à tração a ela aplicada, de acordo com a Lei de Hooke, presente na teoria da Elasticidade [2].

A Tabela 1 apresenta, entretanto, um comportamento alheio a tal princípio: a evolução da tensão residual conforme o material é progressivamente deformado constituiria uma violação à tal Lei, uma vez que o aumento da tração aplicada à amostra resultou em um aumento do esforço compressivo residual na mesma, ao contrário do esperado.

No entanto, deve-se considerar que, quando exposto a uma tração externa, o aço austenítico é submetido à deformação plástica, fato que o transforma na fase martensítica. Tal mudança de fase resulta no aumento de tensões residuais compressivas ali presentes [2].

Desse modo, ainda que a Lei de Hooke prediga a linearidade da deformação de um material de acordo com a tração sobre ele aplicada, a transformação de fase austenita-martensita se contrapõe à diminuição da tensão compressiva que seria esperada segundo tal princípio. A deformação plástica, responsável por incrementar a tensão residual compressiva atuante no aço, concorre com a tendência à diminuição da tensão compressiva pela qual a tração externa é responsável.

Ao levar-se em conta os fatos citados, revela-se a coerência dos resultados da Tabela 1, de modo que, a deformação introduzida pela transformação de fase citada implica no aumento da tensão residual compressiva entre as amostras I e II da tabela citada. Por outro lado, o aumento da tração externa posteriormente é capaz de superar os efeitos de tal deformação, resultando na diminuição da tensão compressiva entre as amostras II e III.

5. CONCLUSÃO

A partir da análise dos resultados, constata-se que o software utilizado, X'Pert Stress, possui desempenho adequado para a análise do tipo de tensão residual e a consequente identificação de propriedades dos materiais em estudo. No entanto, o modelo ainda apresenta inconsistências quando se considera apenas a teoria da elasticidade.

Tais inconsistências são originadas por comportamentos não previstos no escopo de tal teoria, mas que podem ser justificados pela transformação de fase austenita-martensita sofrida pelo tipo do aço estudado, a qual ocorre devido à deformação plástica que o material é submetido.

Tal situação indica a necessidade de uma avaliação do programa utilizado, ou comparação de tais resultados com os de outros programas de mesmo gênero, de modo a avaliar se as inconsistências advêm do próprio software ou baseiam-se em um comportamento real do material nas condições descritas.

REFERÊNCIAS

- [1] SURYANARAYANA, C.; NORTON, M.G.; X-Ray Diffraction - A Practical Approach. Pullman. Plenum Publishing Corporation, 1998.
- [2] ALVES, J.M., Análise da Transformação Martensítica e Tensão Residual em um aço inoxidável 304L. 2014. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais) - Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro. 2014.
- [3] MARTINS, C.O.D.; STROHAECKER, T.R.; ROCHA, A.S.; HIRSCH, T.K.; Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100, Revista Matéria, v.9, n.1, p.20-28, 2004.
- [4] CULLITY, B.D.; Elements of X-Ray Diffraction. 2ª ed. Nôtre Dame: Addison-Wesley Publishing Company, 1978.
- [5] PITELLA, R.M.; Determinação de Tensões Residuais em Aço C45 PBK em Condições Limites de Usinagem. 2003. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- [6] GUIMARÃES, L.R.; Estudo de Parâmetros Experimentais Envolvidos na Determinação de Macrotensões Residuais, em Tubos de Aço Inoxidável, pelo Método da Difração de Raios-X. 1990. 81 f. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares Autarquia Associada à Universidade de São Paulo, São Paulo, 1990.
- [7] LICHTENFELD, J.A.; VAN TYNE, C.J.V.; MATAYA, M.C. Effect of Strain Rate on Stress-Strain Behavior of Alloy 309 and 304L Austenitic Stainless Steel. Metallurgical and Materials Transactions, v. A37, p. 147-161.