

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.

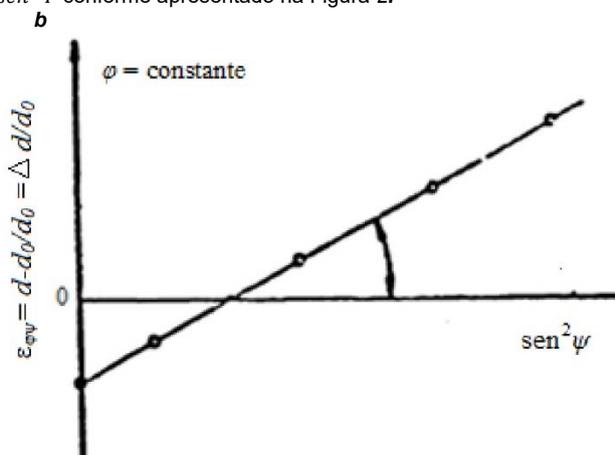


Fig. 2 - Análise gráfica da equação (3.1) (GUIMARÃES, L.R., 1990).

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.