

USO DE FUNÇÕES ANALÍTICAS NO AJUSTE DE PICOS DE DIFRAÇÃO DE RAIO-X PARA MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS¹

Francisco Diego Araruna da Silva²
Francisco Edval Sampaio de Freitas Júnior³
Cleiton Carvalho Silva⁴
Jesualdo Pereira Farias⁵

Resumo

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o uso de funções analíticas no ajuste do perfil do pico de difração e localização correta do pico, visando melhores resultados no cálculo das tensões residuais por difração de raio-X. A metodologia consistiu da soldagem de tubulações com diâmetro de 4", usando o processo TIG manual. As medições de tensões residuais foram realizadas através de um minidifratômetro de raio-X para medição em condições de campo, utilizando um tubo de cromo ($\lambda=2,2911 \text{ \AA}$). Para a construção dos difratogramas, ajustes das curvas e localização dos picos, foi utilizado o software Origin. Já para calcular o valor das tensões residuais foi usado o software Phillips X'pert Stress. O ajuste de curva por funções analíticas para determinar a correta localização do pico de difração de raio-X mostrou-se um método bastante adequado, reduzindo o erro das medidas. Dentre as funções avaliadas as que apresentaram melhores resultados foram a Pearson VII e a Lorentz.

Palavras-chave: Tensões residuais; Difração de raio-X; Funções analíticas.

USE OF ANALYTIC FUNCTIONS IN THE X-RAY DIFFRACTION PEAK ADJUSTMENT FOR RESIDUAL STRESS MEASUREMENT

Abstract

In this work the use of analytic functions for X-ray diffraction peak adjustment in residual stress measurement were evaluated. The analysis was carried out on outer surface of a low carbon steel pipe welded by GTAW process. X-ray minidiffractometer for field analysis was used to welding residual stress measurements. A Cr-K _{α 1} X-ray source ($\lambda=2,2911 \text{ \AA}$) was used. The diffraction profile construction, peak adjustment and peak localization, was carried out through the Origin software. For residual stress calculate was used the software Phillips X'pert Stress. The results indicated that the diffraction profile adjustment by analytic functions for correct X-ray peak localization shown a quite appropriate method. Among the appraised functions the better results were obtained to Pearson VII and Lorentz analytic functions.

Key words: Residual stress; X-ray diffraction; Analytic functions.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Graduando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará.

³ Graduando em Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal do Ceará.

⁴ Engº, M.Sc., Doutorando em Engenharia e Ciência dos Materiais, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

⁵ Dr., Professor Titular, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais – UFC.

1 INTRODUÇÃO

As tensões residuais são características intrínsecas do processo de soldagem, não sendo possível evitá-las. Em geral, a presença de tensões residuais é indesejada por estar associada a diversos problemas metalúrgicos, como trincas a frio,⁽¹⁾ fatura por fadiga,⁽²⁾ corrosão sob tensão,⁽³⁾ dentre outros. Dessa forma, torna-se de extrema importância determinar o valor das tensões residuais em componentes soldados.

Dentre os inúmeros métodos experimentais para determinação das tensões residuais em materiais, a difração de raio-X possui posição de destaque por ser um método não-destrutivo e por ter a possibilidade de aplicação em campo.⁽⁴⁾ A difração de raio-X consiste na incidência de um feixe monocromático sobre a superfície de um material, o qual será espalhado (difratado) e posteriormente detectado por algum dispositivo (Figura 1a). Através da Lei de Bragg (Equação 1), é possível relacionar o ângulo 2θ medido experimentalmente com a distância interplanar d .

$$n\lambda = 2d^{hkl} \cdot \text{sen}\theta^{hkl} \quad \text{Eq. 1}$$

Os materiais na sua imensa maioria são policristalinos, e apresentam em muitos casos orientação cristalográfica aleatória. Assim, um feixe de raio-X incidindo com determinado ângulo θ sobre a superfície de um material policristalino, será difratado somente por alguns grãos com orientação favorável. Para materiais livre de tensões a distância interplanar é padrão (d_0), mas para um material submetido a tensões (aplicadas ou residuais), a distância interplanar sofre variações de acordo com a orientação da família de planos hkl e da tensão aplicada, conforme mostrado da Figura 1b.

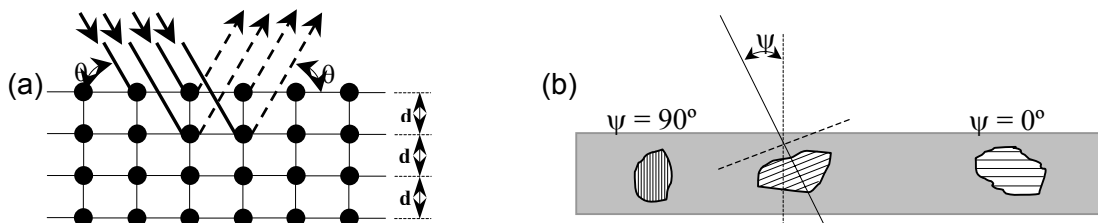


Figura 1. (a) Desenho esquemático do espalhamento das ondas de raio-X segundo a Lei de Bragg. (b) Tensão compressiva em um material policristalino e isotrópico.⁽⁵⁾

Com base na posição do pico de difração 2θ é possível determinar o espaçamento dos planos cristalográficos, através da Lei de Bragg. Com isso é possível encontrar o estado de deformação da estrutura cristalina, calculada a partir da equação 2.

$$\varepsilon = \frac{d - d_0}{d_0} \quad \text{Eq. 2}$$

Os dados obtidos a partir das medidas realizadas com o minidifratômetro (Figura 2) são transformados em uma curva (difratograma) (Figura 3a), que representa a variação da intensidade difratada em função do ângulo 2θ . Atualmente o método mais empregado na determinação das tensões residuais é o “método do $\text{sen}^2\psi$ ”, o qual é aplicado à materiais policristalinos.⁽⁶⁾ Para calcular as tensões através do

método do $\text{sen}^2\psi$ é necessária a correta localização do pico de difração (ângulo 2θ), o qual é usado para determinar a variação da distância interplanar em função da variação do ângulo ψ (Figura 1b). A tensão é então calculada através da equação 3.

$$\sigma = -\frac{E}{1+\nu} \cdot \cot g\theta \cdot \frac{d\theta}{d(\text{sen}^2\psi)} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde: E = módulo de elasticidade;
 ν = coeficiente de Poisson.

Determinar a posição do pico de difração apenas visualmente pode acarretar em erros no valor da tensão residual. Assim, é necessário ajustar o perfil do pico de difração utilizando funções analíticas. O objetivo do presente trabalho é avaliar o uso de algumas funções analíticas no ajuste do pico de difração e localização correta do pico, visando melhores resultados no cálculo de tensões residuais por difração de raio-X.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Foi usado neste trabalho um tubo de aço baixo carbono para serviço em alta temperatura ASTM A106 Gr. B., com diâmetro nominal de 4", e Schedule 40, soldado manualmente pelo processo TIG, com metal de adição AWS ER 70 S3 com diâmetros de 2,5 e 3,25 mm. A composição química (% em massa) do tubo e do metal de adição é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Composição química. Aço ASTM A106 Gr. B e metal de adição AWS ER 70 S3.

Material	C	Mn	Si	P	S
Tubo	0,19	0,96	0,20	0,016	0,006
Metal de adição	0,18	0,45	0,18	0,09	0,04

O equipamento utilizado para medição das tensões residuais na superfície externa do tubo foi um minidifratômetro para medição em condições de campo, desenvolvido pelo Instituto Politécnico da UERJ – Nova Friburgo-RJ, o qual é apresentado na Figura 2a. Utilizou-se um tubo de raio-X com anodo de cromo ($\lambda=2,2911 \text{ \AA}$).⁽⁷⁾ A tensão de operação foi de 20 kV e a corrente de 50 mA. O método de medição utilizado foi o do $\text{sen}^2\psi$, com medidas realizadas para $\psi = 0^\circ, 20^\circ, 35^\circ$, e 50° . O Conjunto tubo de raio-X/detector foi montado sobre o corpo de prova a ser medido, conforme a Figura 2b. Foi utilizado o software Origin para construção dos difratogramas, ajustes das curvas e localização dos picos. O software Phillips X'pert Stress foi usado para calcular as tensões residuais.



Figura 2. (a) Minidifratômetro para medição de tensões residuais em campo.⁽⁸⁾ (b) Geometria descrita pelo conjunto tubo/detector.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Figura 3a apresenta o espectro de difração da amostra A1 realizado no centro do cordão de solda para o ângulo $\psi = 33^\circ$. A escolha deste ângulo deve-se à sua maior irregularidade e assimetria. A correta localização do pico foi feita pelo ajuste da curva (difratograma) utilizando funções analíticas para descrever o perfil de difração. Estas equações são expressas em função de vários parâmetros, os quais descrevem sua forma e localização do pico. As principais funções aplicadas ao ajuste de perfis de difração são Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt.⁽⁴⁾ As funções de Gauss e Lorentz podem ser consideradas casos extremos da função Voigt. A função de Lorentz tem sido considerada satisfatória para modelar o perfil de picos com alargamentos, cuja função Gauss tem se mostrado menos apropriada para o mesmo propósito⁽⁹⁾. A seguir são apresentadas as funções Gauss e Lorentz (Equações 4 e 5).

$$y = y_0 + Ae^{-\frac{(x-x_c)^2}{2w^2}} \quad \text{Eq. 4}$$

$$y = y_0 + \frac{2A}{\pi} \frac{w}{4(x-x_c)^2 + w^2} \quad \text{Eq. 5}$$

A função pseudo-Voigt tem sido amplamente usada para modelar o perfil de picos de difração, principalmente no caso de análise de microestruturas e refinamento de estruturas através do método Rietveld, visto que o alargamento do pico causado pelo instrumento e as características físicas dos materiais (tamanho de grão, microdeformação e falhas de empilhamento) fazem com que o pico, em geral, tenha a forma de Voigt.⁽¹⁰⁻¹³⁾ A função pseudo-Voigt é interessante por se tratar de uma aproximação simples da função Voigt, sendo rápida de calcular. Esta função trata-se na verdade de uma convolução das funções Gauss e Lorentz, cujo parâmetro η determina a proporção de cada função, atuando assim na forma do perfil.

$$pV(r) = \eta G(r) + (1 - \eta)L(r) \quad \text{Eq. 6}$$

Em uma primeira análise, as curvas de difração foram ajustadas através das funções de Gauss e Lorentz (Figura 3b). Observou-se que o ajuste não foi adequado ao se utilizar o perfil inteiro, pois em alguns casos o perfil apresentava grandes irregularidades no ruído de fundo (*background*) o qual alterava a posição do pico. Além disso, foi observado que o pico apresenta uma pequena assimetria.

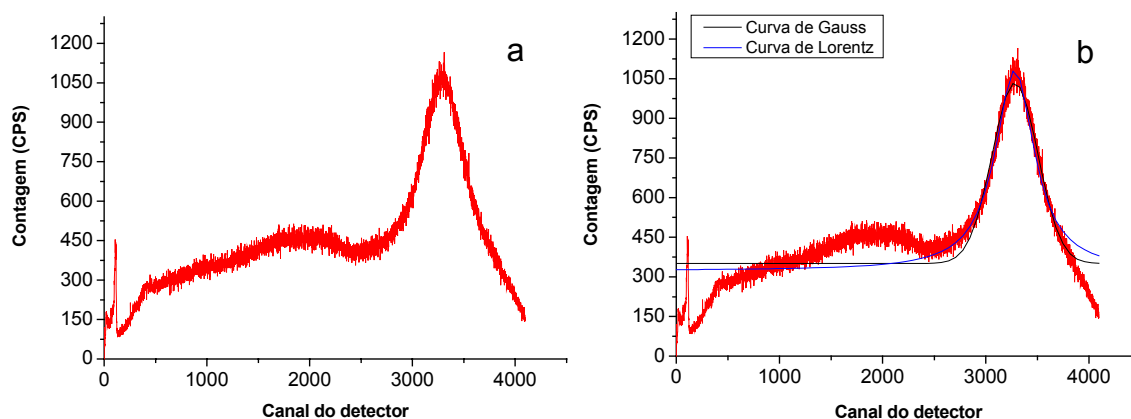


Figura 3. Espectro de difração da amostra A1, realizada no metal de solda com $\psi = 33^\circ$. (a) sem ajuste. (b) ajustado por Gauss e Lorentz.

Em geral, as funções de Gauss, Lorentz e Voigt (pseudo-Voigt) são aplicadas com sucesso para perfis de pico simétricos, porém não são indicadas para o ajuste de picos com assimetria. Para superar as deficiências das funções de Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt, a alternativa foi utilizar uma função que proporcionasse um melhor ajuste no caso de assimetria do pico. A função escolhida neste caso foi a Pearson VII (Equação 7), a qual tem sido freqüentemente empregada em difração de raio-X, difração de nêutrons e espectroscopia Mössbauer.⁽¹⁴⁻¹⁶⁾

$$y = A \frac{2\sqrt{\mu} \cdot e(\Gamma(2^{1/\mu} - 1))}{\pi \cdot e(\Gamma(\mu - 0,5))} \left[1 + 4 \frac{2^{1/\mu} - 1}{w^2} (x - x_c)^2 \right]^{-\mu} \quad \text{Eq. 7}$$

Posteriormente foram realizadas as análises dos picos usando desta vez as funções Gauss, Lorentz, pseudo-Voigt e Pearson VII. Para evitar um possível efeito do *background* sobre o perfil ajustado pelas funções, procedeu-se o ajuste apenas na região do pico, descartando as regiões antes e após o pico, como pode ser observado na Figura 4 e Figura 5.

A Figura 4 apresenta o ajuste das curvas do metal de solda da amostra A1 para $\psi = 33^\circ$. De uma forma geral, as curvas de ajuste de Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt apresentam pouca diferença, com valores de posição do pico bastante próximos. Já a função Pearson VII apresenta uma maior diferença quando comparada às demais. Contudo, esta variação em termos de ângulo 2θ é na ordem de $0,018^\circ$. Os valores de R^2 mostrados na Figura 4 indicam o quão próximo o ajuste da curva está da condição real, assim, quanto mais próximo de 1 melhor é o resultado. Verifica-se então que as curvas pseudo-Voigt ($R^2 = 0,98099$) e de Gauss ($R^2 = 0,98062$) obtiveram melhores resultados de ajuste de curva, seguido por Lorentz ($R^2 = 0,97971$) e Pearson VII ($R^2 = 0,97617$).

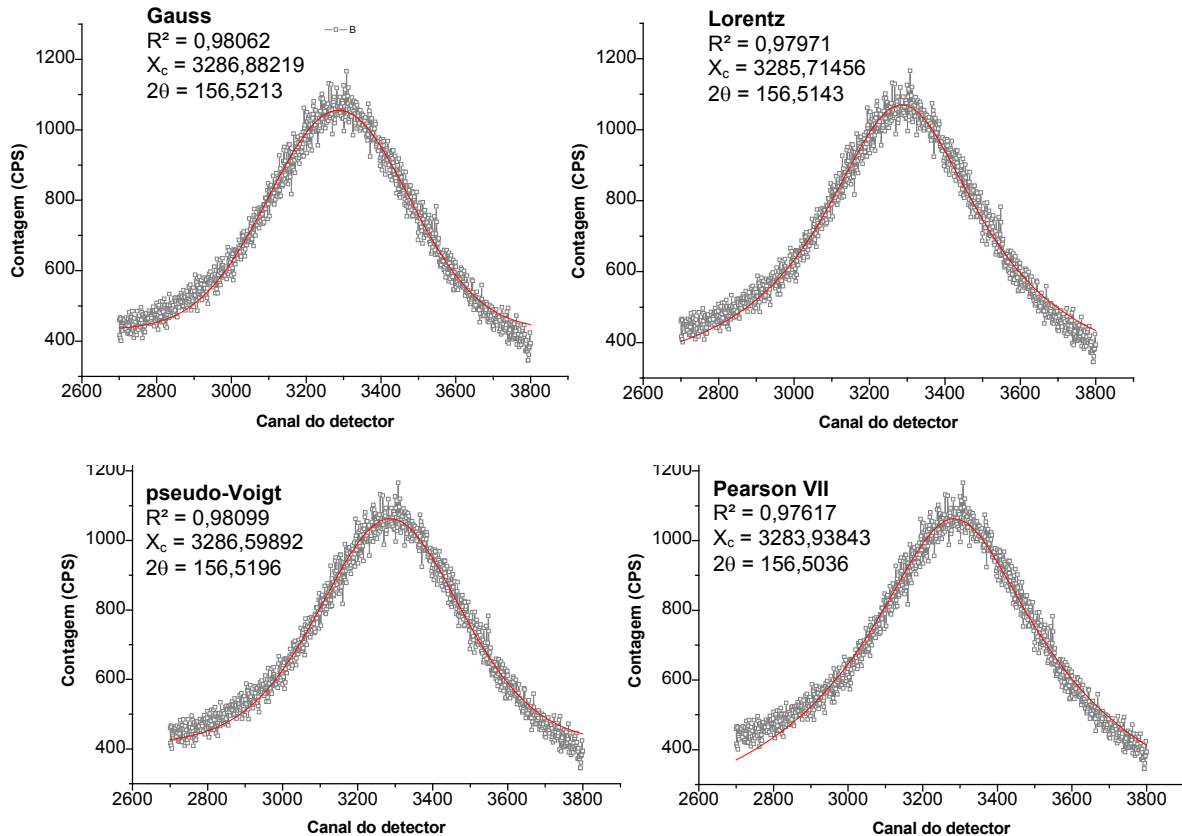


Figura 4. Ajuste do perfil dos picos de difração para o ângulo $\psi = 33^\circ$ usando as funções: (a) Gauss; (b) Lorentz; (c) pseudo-Voigt; (d) Pearson VII.

A Figura 5 apresenta o ajuste das curvas do metal de solda da amostra A1 para $\psi = 50^\circ$. Verifica-se novamente que as curvas de ajuste de Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt apresentam pouca diferença, inclusive com valores iguais para Gauss e Lorentz. Já a função Pearson VII apresentou novamente uma maior diferença, a qual em termos de ângulo 2θ foi na ordem de $0,015^\circ$. Novamente verifica-se que as funções que melhor ajustaram as curvas foram a pseudo-Voigt ($R^2 = 0,94447$) e Gauss ($R^2 = 0,94441$). A função Lorentz apresentou uma pequena diferença em relação as duas, com R^2 de $0,94336$, e com a Pearson VII obtivemos o menor valor de R^2 ($R^2 = 0,93302$). Embora tenha sido verificada estas variações no grau de ajuste das curvas, as diferenças entre o maior ajuste e o menor foi de apenas $0,00482$ para $\psi = 33^\circ$ e de $0,01145$ para $\psi = 50^\circ$.

Para avaliar qual ajuste de curva apresenta o melhor resultado em termos de determinação da distância interplanar d , foram construídos os gráficos de “distância d ” versus $\text{sen}^2\psi$ para o ponto de medida no metal de solda da amostra A1, cujos resultados são apresentados na Figura 6. Além da comparação entre os valores obtidos com o ajuste dos picos, foi realizado também o cálculo para valores dos picos determinados visualmente sem ajuste.

A Figura 6a apresenta o resultado da “distância d ” versus $\text{sen}^2\psi$ para os valores de 2θ obtidos sem qualquer ajuste do pico, cuja determinação foi realizada visualmente. Observa-se que a inclinação da reta foi negativa, indicando que a distância interplanar diminui com o aumento do ângulo ψ , o que corresponde a um estado de tensões compressivo. Houve uma grande dispersão dos resultados, inclusive com o ponto referente à medida para $\psi = 22^\circ$ sendo

descartado para um melhor ajuste da reta. Embora tenha sido procedido o descarte deste ponto, o valor da tensão foi baixo (-95,9MPa) e o erro da medida foi considerado elevado ($\pm 70,2$ MPa).

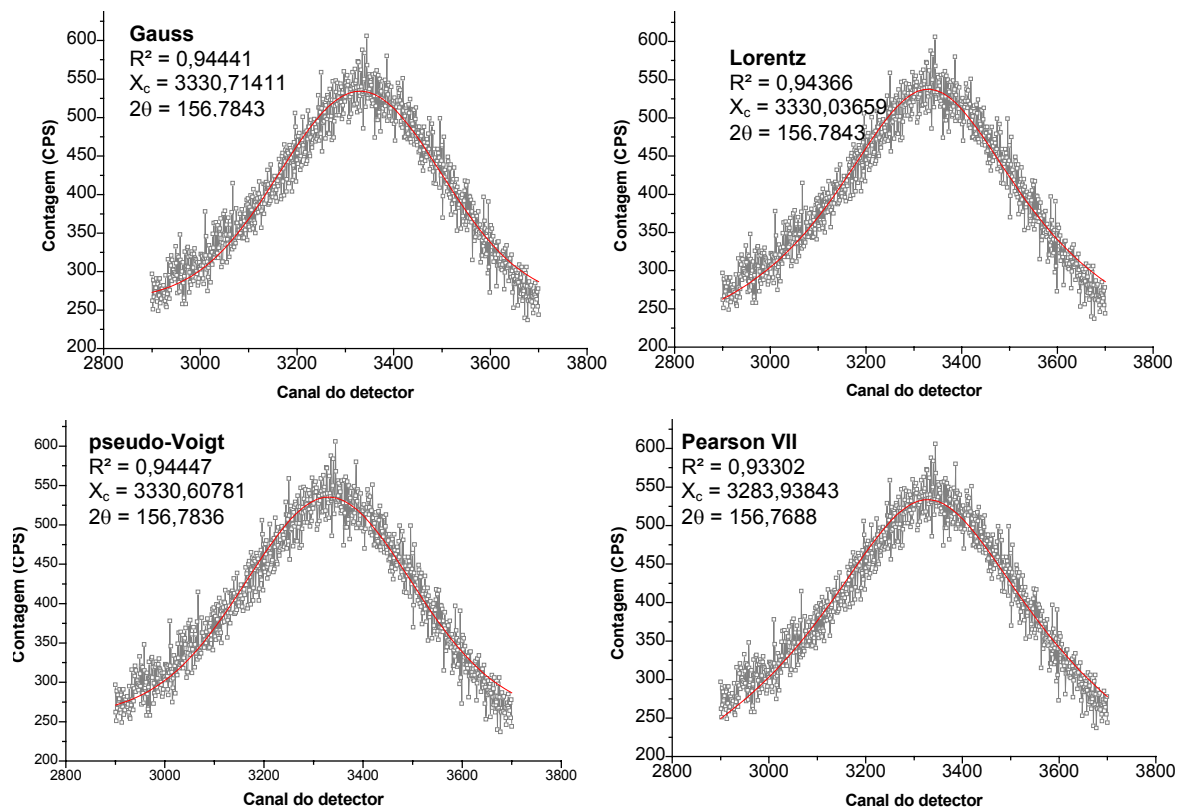


Figura 5. Ajuste do perfil dos picos de difração para o ângulo $\psi = 50^\circ$ usando as funções: (a) Gauss; (b) Lorentz; (c) pseudo-Voigt; (d) Pearson VII.

Para o ajuste com a função Gaussiana observa-se que a distribuição dos pontos ao longo da reta foi bem mais regular (Figura 6b), quando comparada ao resultado para a análise dos picos sem ajuste. A inclinação da reta foi novamente negativa, indicando um estado de tensões residuais compressivas. O valor da tensão foi de -253,7 MPa e o erro foi menor ($\pm 43,0$ MPa), estando dentro dos valores normalmente observados para medidas de tensometria por raio-X (± 50 MPa) nas regiões da zona fundida (ZF) e zona afetada pelo calor (ZAC), as quais apresentam diversos aspectos metalúrgicos que afetam o valor da medida, como variação do tamanho de grão, presença de múltiplas fases e elevado grau de microdeformação.

Para o ajuste pela função Lorentz (Figura 6c) observa-se novamente que a tensão residual no ponto em questão é compressiva. O valor da tensão residual foi de -255,7 MPa, bem semelhante ao obtido pelo ajuste com a função de Gauss (-253,7 MPa). O valor do erro para o ajuste com a função Lorentziana foi de $\pm 40,2$ MPa.

Analisando o ajuste dos picos pela função pseudo-Voigt (Figura 6d), verifica-se a presença de tensões residuais compressivas. O valor da tensão foi de -254,4 MPa, estando entre os valores obtidos para a função Gauss (-253,7 MPa) e Lorentz (-255,7 MPa). Esta observação é justificada pelo fato da função pseudo-Voigt ser uma convolução destas duas funções. O erro foi de $\pm 41,9$ MPa, estando entre os valores obtidos para Gauss ($\pm 43,0$ MPa) e Lorentz ($\pm 40,2$ MPa).

Os resultados referentes ao ajuste dos picos com a função Pearson VII revelaram um comportamento um pouco diferente dos demais ajustes (Figura 6e). A tensão residual foi compressiva (-244,0 MPa), menor que os demais ajustes analisados, e o erro foi substancialmente menor ($\pm 29,7$ MPa).

A diferença entre os valores obtidos para o ajuste com a função Pearson VII e as demais utilizadas pode ser atribuído ao melhor comportamento desta função para picos assimétricos, visto que as funções Gauss, Lorentz e pseudo-Voigt são empregadas principalmente para picos simétricos. Além disso, a utilização da função Pearson VII para localização do pico de difração é mais eficaz quando comparado aos métodos parabólicos de regressão quadrática para picos de largura intermediária.⁽¹⁷⁾

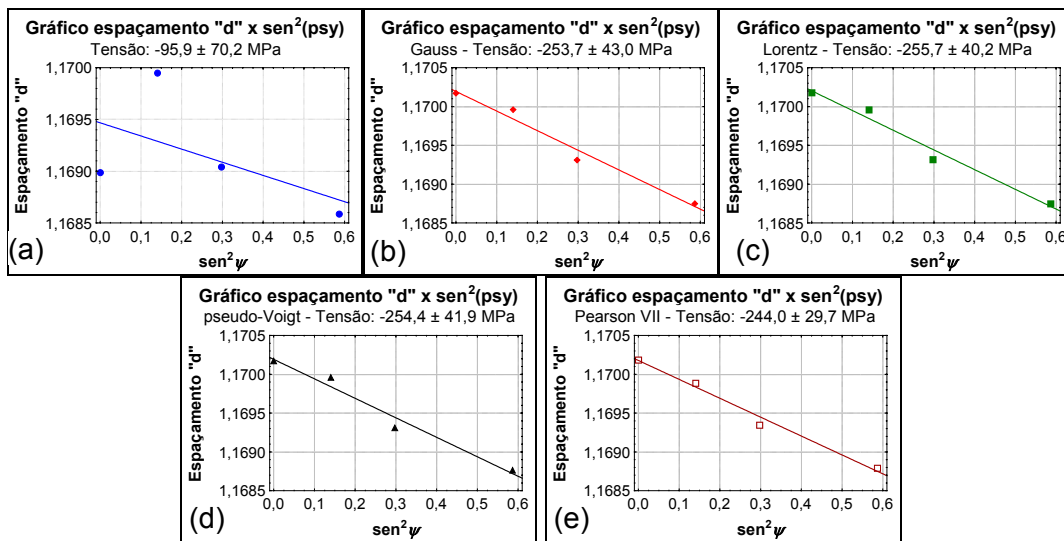


Figura 6. Gráfico “distância d ” versus $\text{sen}^2 \psi$. (a) sem correção; (b) Gauss; (c) Lorentz; (d) pseudo-Voigt; (e) Pearson VII.

Uma questão bastante interessante observada na análise dos picos foi que as funções de Gauss e pseudo-Voigt apresentaram os melhores resultados de ajuste de curva, conforme destacado anteriormente. Entretanto, os menores erros no cálculo das tensões residuais foram conseguidos para as correções por Lorentz e Pearson VII, justamente as funções que apresentaram ajustes de curva inferiores aos obtidos pelas funções Gauss e pseudo-Voigt.

Acredita-se que as funções de Gauss e pseudo-Voigt consigam ajustar a curva de uma forma mais regular visto que elas decaem suavemente, porém não consigam ajustar a posição do pico de forma satisfatória. Já as funções Lorentz e Pearson VII, não ajustam a curva tão bem quanto as outras duas, mas conseguem determinar melhor a posição do pico.

Os demais pontos da amostra A1 foram analisados, e os perfis de tensões residuais axiais ao longo da junta soldada foram determinados para as quatro funções analisadas e para a análise sem correção (Figura 7). Observa o comportamento bastante irregular da curva cujos valores de 2θ foram obtidos sem qualquer correção.

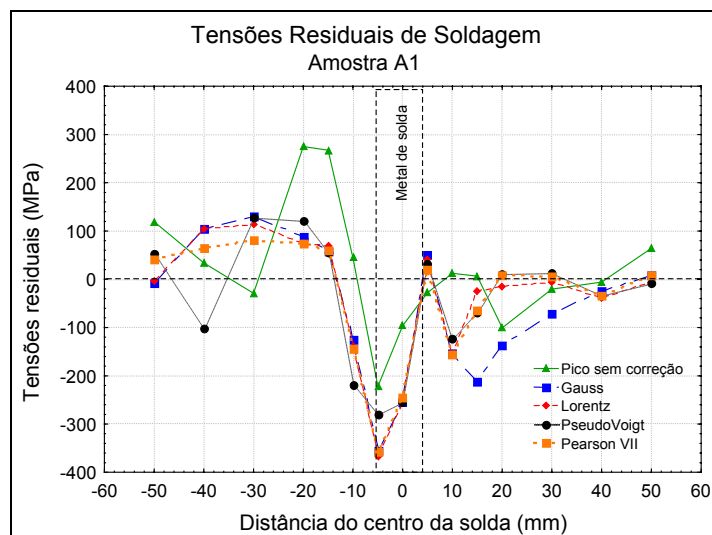


Figura 7. Comportamento das tensões residuais axiais ao longo da junta para os diversos métodos de análise da posição do pico.

O comportamento das tensões ajustadas pelas funções de Gauss e Lorentz foram bastante semelhantes, contudo, o mesmo não foi observado para as tensões obtidas pelo ajuste com a função pseudo-Voigt. Analisando o comportamento das tensões ajustadas por Pearson VII, verificou-se um comportamento muito semelhante ao observado por Gauss e Lorentz para as regiões do metal de solda e ZAC. Entretanto, para as regiões mais afastadas do cordão de solda este comportamento foi um pouco diferente. Analisando o lado direito da junta, observa-se um comportamento muito semelhante ao das tensões cujo ajuste foi realizado pelas funções Lorentz e pseudo-Voigt, enquanto que para o lado esquerdo o comportamento foi mais parecido com os resultados obtidos com as funções Gauss e Lorentz. Outras análises foram realizadas para outros três corpos de prova e em praticamente todos os pontos analisados os melhores resultados (menores erros) foram obtidos para os valores de 2θ determinados através do ajuste da curva utilizando as funções Pearson VII e Lorentz.

4 CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais apresentados neste trabalho foi possível concluir que:

A medição de tensões residuais por difração de raio-X usando o minidifratômetro para aplicações em campo, mostrou-se bastante eficaz na determinação do perfil de tensões em tubulações de aço carbono soldadas em junta de topo.

O ajuste de curva por funções analíticas para determinar a correta localização do pico de difração de raio-X mostrou-se um método bastante adequado, reduzindo o erro das medidas.

Dentre as funções avaliadas as que apresentaram melhores resultados foram a Pearson VII e a Lorentz.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao IPRJ-UERJ (Nova Friburgo) pelo suporte laboratorial. A PETROBRAS/LUBNOR/MI pelo apoio ao trabalho. Aos órgãos de fomento FINEP, CNPq e ANP/PRH-31 pelo suporte financeiro.

REFERENCIAS

- 1 BAILEY, N., COE, F. R., GOOCH, T. G., HART, R. H. M., JENKINS, N. & PARGETER, R. J., 1993, *Welding Steels Without Hydrogen Cracking*, Abington Publishing for TWI, Cambridge.
- 2 NGUYEN, T. N., WAHAB, M. A., The effect of weld geometry and residual stress on the fatigue of welded joints under combined loading. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 77, pp 201-208, 1998.
- 3 LINNERT, G. E., 1994, *Welding Metallurgy*, Vol. 1, American Welding Society, Miami, Florida, USA.
- 4 NOYAN I. C. & COHEN, J. B., 1987, *Residual Stress. Measurement by Diffraction and Interpretation*. New York: Springer.
- 5 EINGENMANN, B. & MACHERAUCH, E., 1996, Röntgenographische Untersuchung von Spannungszuständen in Werkstoffen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, v. 27 pp. 426-437.
- 6 WEBSTER, P. J., ANANTHAVIRAVAKUMAR, N., HUGHES, D. J., MILLS, G., PRESTON, R. V., SHERCLIFF, H. R., WITHERS, P. J., 2002, Measurement and Modeling of Residual Stress in a TIG Weld. *Applied Physics A*. v. 74, pp. 1421-1423.
- 7 LU, J., 1996, *Handbook of Measurement of Residual Stress*. Society of Experimental Mechanics.
- 8 ASSIS, J. T., MONIN, V., PEREIRA, F. R., FILIPPOV, S., 2003. Difrátômetro de raio-X portátil para análise de tensões em condições de campo. III Pan American Conference for Nondestructive Testing. Rio de Janeiro, Brazil.
- 9 HOUSKA, C. R., KUZEL, R., 1994, *Defects and Microstructure Analysis by Diffraction*. Chapter 9, Oxford Science Publications, 141-163.
- 10 YOUNG, R. A., SAKTHIVEL, A., 1988. Bimodal Distributions of Profile-broadening Effects in Rietveld Refinement. *Journal Applied Crystallography*. v. 21, p. 416-425.
- 11 PAIVA-SANTOS, C. O., 2003, *Caracterização de Materiais pelo Método de Rietveld com Dados de Difração por Policristais*. Apostila. Instituto de Química – UNESP. Bauru.
- 12 ARAÚJO, J. C., ASSIS, J. T., MONIN, V. I., BERTOLINO, L. C., 2005, Determinação dos Parâmetros Microestruturais de Amostras de Caulinitas Usando o Método de Refinamento do Perfil de Difração de Raios-X. *Revista da Escola de Minas de Ouro Preto*. n. 58, v. 4, p. 299-307.
- 13 ESTEVEZ-RAMS, E., PENTON, A., MARTINEZ-GARCIA, J., FUESS, H., 2005, The use of Analytical Peak Profile Functions to Fit Diffraction Data of Planar Faulted Layers Crystals. *Crystal Research Technology*. n. 1/2, 166-176.
- 14 TORAYA, H., YOSHIMURA, M., SOMIYA, S., 1983. A Computer Program for the Deconvolution of X-ray Diffraction Profiles with the Composite of Pearson VII Function. *Journal Applied Crystallography*. v. 16, p. 653-657.
- 15 OVEN, R., ASHWORTH, D. G., BOWYER, M. D. J., 1992, Formulas for the Distribution of Ions Under an Ideal Mask. *Journal of Physics D: Applied Physics*. v. 25, p. 1235-1237.
- 16 WULFHEKEL, W., CADOGAN, J. M., 1994. Mössbauer Line-sharpening – Application to Magnetically Split Spectra. *Hyperfine Interact.* v. 92, p. 1195-1202.
- 17 PREVÉY, P. S., 1986. The use of Pearson VII distribution function in X-ray diffraction residual stress measurement. *Advances in X-ray Analysis*. v. 29, pp. 103-111.