



MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS UNIAXIAIS USANDO UM INDENTADOR INSTRUMENTADO ASSOCIADO A UM INTERFERÔMETRO RADIAL

*Frederico A. R. C. Reis*¹, *Armando Albertazzi*², *Matias R. Viotti*³

¹ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, fred_mec@yahoo.com.br

² Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, albertazzi@labmetro.ufsc.br

³ Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, Brasil, matiasviotti@gmail.com

Resumo: Este trabalho envolve o aperfeiçoamento de uma técnica de medição de tensões residuais uniaxiais combinando a holografia eletrônica, e a indentação para dois diferentes materiais. Os resultados mostram que o aparato de medição utilizado, consideravelmente tem melhor repetitividade e menor incerteza do utilizado em trabalhos prévios para o aço 1020.

Palavras chave: tensões residuais, indentação, análise experimental de tensões, *ESPI*, interferometria.

1. A MEDIÇÃO DE TENSÕES RESIDUAIS

Somente pelo conhecimento do histórico do material da peça desde o processo de fabricação da matéria prima até o processo de fabricação e montagem do produto final em serviço é possível calcular o estado de tensões residuais presente no componente mecânico final. Pela dificuldade em recompor o histórico do material, a forma mais utilizada e adequada para a determinação do nível de tensões residuais existentes num material é o uso de métodos experimentais, os quais realizam a medição direta sobre o material [1].

Vários métodos de medição de tensões residuais têm sido desenvolvidos e utilizados por várias décadas. Boa parte destes determinam indiretamente as tensões residuais através dos efeitos que o alívio das tensões residuais provocam sobre o material, normalmente feita por meio de extensômetros (“*strain gages*”) [2],[3].

Em comparação com algumas técnicas experimentais normalmente usadas, a interferometria radial combinada com a indentação instrumentada na determinação de tensões residuais tem como vantagens: (a) redução expressiva do tempo de medição; (b) ausência de cavacos que poderiam gerar problemas de contaminação na região de medição, (c) redução de riscos de introdução de trincas na superfície do material.

Neste artigo é realizada a validação em laboratório de uma técnica de medição de tensões residuais uniaxiais. É usada uma combinação de um indentador instrumentado e um sistema óptico que mede a componente radial do campo de deslocamentos ao redor da marca de indentação por meio de um interferômetro que usa holografia eletrônica. Dois materiais são usados na avaliação experimental: aço AISI 1020 e alumínio 6063-T5.

2. A INDENTAÇÃO ASSOCIADA À HOLOGRAFIA ELETRÔNICA

A indentação provoca deformações plásticas localizadas na superfície do material. O campo de deformações resultante da indentação com ponta esférica será simétrico na ausência de tensões mecânicas e se modifica em função do estado de tensões atuante no material antes da indentação ser aplicada. A indentação instrumentada permite medir simultaneamente a força aplicada e a profundidade de penetração em função do tempo, permitindo a avaliação da resposta do material [1].

A holografia eletrônica é uma técnica que utiliza a luz de um laser para formar franjas de interferência e, com o uso de técnicas de processamento de imagens, o campo de deslocamentos na superfície do material é quantificado em toda a região iluminada [4].

SUTERIO -2005 [1] demonstrou a viabilidade da medição de tensões residuais utilizando um indentador por impacto associado a um interferômetro radial. Mostrou ser possível atingir uma faixa de medição entre 20 e 80 % da tensão de escoamento do material. A análise das incertezas revelou que, para as condições ensaiadas, foi possível enquadrar o valor medido dentro de uma faixa de incerteza de medição de tensões residuais da ordem de $\pm 30\%$ da tensão medida.

2.1. Aparato experimental

O sistema de medição de tensões residuais conta com um módulo de indentação instrumentado e automatizado, responsável por fazer indentações no material; e um módulo de medição óptico, encarregado de fazer a medição da componente radial do campo de deslocamentos em torno da indentação.

A ponta indentadora esférica tem 2,5 mm de diâmetro e aplica uma carga de 900N sobre o material ensaiado. O módulo óptico é equipado com uma grade difrativa (DOE) responsável por gerar iluminação circular na área de medição [5].

O dispositivo de medição de referência dispõe de um simulador por tração pura uniaxial que utiliza corpos de prova na forma de barras chatas longas (3000x50,8x4,76 [mm]) instrumentadas com 10 extensômetros de resistência elétrica.

2.2. Modelo matemático

Partindo-se do princípio que o campo de deslocamentos resultante da subtração entre a indentação de um material com tensões residuais pré-existentes menos a de um material sem tensões residuais iniciais tem comportamento que guarda certa semelhança com o da equação que rege o deslocamento radial para o método de medição do Furo Passante, novas funções A e B podem ser determinadas. Estas dependem do raio, das propriedades do material, da forma geométrica da ferramenta de indentação, da carga, da profundidade (elástica e plástica) e do diâmetro da marca da indentação [1].

A componente radial do campo de deslocamento (u_r), em termos de coordenadas polares, pode ser escrita da seguinte forma[1]:

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\theta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\theta}{E(\theta-1)} \frac{1}{r^{\theta-1}}$$

$$u_r(r, \theta) = \left(\frac{1+\theta}{2E}\right) \frac{K_1}{r} + \left(\frac{2}{E}\right) \frac{K_2}{r} \cos(2\theta - 2\beta) + K_4 \frac{\theta}{E(\theta-1)} \frac{1}{r^{\theta-1}} \quad (1)$$

onde:

r: raio da coordenada polar

θ : ângulo da coordenada polar

β : coeficiente de Poisson.

E: módulo de elasticidade ou módulo de Young.

β : ângulo da direção principal de tensão

K_1, K_2 e K_4 são funções desconhecidas, dadas por:

$$K_1 = H[(\sigma_1 + \sigma_2), \psi_1]$$

$$K_2 = F[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_2] \quad (2)$$
~~$$K_1 = H[(\sigma_1 + \sigma_2), \psi_1]$$

$$K_2 = F[(\sigma_1 - \sigma_2), \psi_2] \quad (2)$$~~

Os termos ψ_1 e ψ_2 nas funções da equação 2 são coeficientes de ajuste de curvas experimentalmente determinados. As constantes K_1, K_2 e K_4 da equação 1 são encontradas a partir de uma regressão linear, e depois, relacionado-as a equação 2, pode-se determinar facilmente o valor das tensões principais σ_1 e σ_2 e suas direções [1].

2.3. Metodologia e resultados alcançados

Os ensaios experimentais são feitos utilizando o simulador uniaxial por tração pura já descrito (seção 2.1) com médias de carregamentos que chegam até 80% do limite de escoamento do material do corpo de prova.

A tabela 1 apresenta uma comparação dos resultados alcançados por SUTERIO - 2005 [1] (anterior) e os encontrados no trabalho em curso (atual) para o aço AISI 1020 livre de tensões residuais:

Tabela 1. Comparação de resultados na avaliação de tensões residuais para o aço AISI 1020

Versão	Incerteza em relação à tensão medida	Valor da incerteza
Anterior	18,90%	33,5 MPa

Atual	12,50%	22,1 MPa
Queda da incerteza	6,4%	

Como mostrado na tabela 1, o atual método apresenta um valor de incerteza de medição de 22,1 MPa, o equivalente a uma queda de 6,4% em comparação com o método original. Em termos práticos, o erro apresentado são similares às incertezas de outros métodos de medição. Por exemplo, o método do Furo apresenta incertezas na ordem de ± 20 MPa em ensaios típicos.

Finalmente, testes para o aço indicam que o atual sistema de medição tem repetitividade de 4% na produção de marcas de indentação, parâmetro fundamental no processo de avaliação do valor das tensões do material. Além disso, uma segunda análise via processamento de imagens de fase do deslocamento em torno da indentação mostrou que o atual sistema é mais de duas vezes mais repetitivo do que o usado no trabalho inicial de desenvolvimento desta técnica (SUTERIO-2005[1]).

3. CONCLUSÃO

É proposto o aperfeiçoamento de uma técnica de medição de tensões residuais uniaxiais via indentação instrumentada em conjunto com a holografia eletrônica em dois tipos de materiais. Este método se mostra simples, rápido e com exatidão na determinação da direção e do valor das tensões principais.

Os resultados da avaliação de tensões uniaxiais para o aço AISI 1020 apresentam uma incerteza de 12,5% em relação à tensão medida, um valor consideravelmente mais baixo do alcançado pelo método original utilizado por SUTERIO [1].

Atualmente estão também sendo realizados ensaios para o alumínio 6063-T5, com previsão de término para Maio/2011. Uma análise preliminar mostrou resultados muito otimistas para este material.

AGRADECIMENTOS

A toda equipe LABMETRO, pelo seu apoio, incentivo e dedicação no sentido de me ajudar a alcançar os objetivos desejados, em especial: Luiz Domingos e Danilo Bonomo.

REFERÊNCIAS

- [1] SUTERIO, R.; ALBERTAZZI JR., A. G.; "Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica" - Tese de Doutorado, UFSC - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- [2] DALLY, J. W.; RILEY, W. F. - "Experimental Stress Analysis" - McGraw-Hill, USA, 3rd edition, 1991.
- [3] LAERMANN, K. H. - "New Perspectives for Laser Metrology - Vision and Instruction" - Fringe'97, p. 15-23, 1997.
- [4] GASVIK, K. J. - "Optical Metrology" - John Wiley & Sons Ltd., England, 2nd edition, 1995.

Formatado: À direita

- [5] KAPP, W. A.; ALBERTAZZI JR., A. G.;
“Desenvolvimento de uma roseta óptica difrativa para
medição de nanodeslocamentos, deformações, tensões e
tensões residuais”- Tese de Doutorado, UFSC -
Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.