

Validação de um Equipamento para Avaliação da Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio

Guilherme Antonelli Martiniano*, Marcus Vinicius Rezende Júnior, Sinésio Domingues Franco, Rosenda Valdés Arencibia.

Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste, gamartiniano@gmail.com

Palavras-chave

Fragilização por Hidrogênio, rising step loading, tensão mecânica, Monte Carlo

1. INTRODUÇÃO

A fragilização por hidrogênio, segundo Barnoush et al. (2010), é um fenômeno severo que afeta quase todos os metais e ligas, dependendo do meio em que estão inseridos. Devido ao hidrogênio apresentar diâmetro atômico muito pequeno e fácil mobilidade no estado sólido, ele penetra facilmente no material, introduzindo defeitos e desordem microestrutural, levando, consequentemente, à fragilização dos materiais. Atualmente, os métodos existentes capazes de avaliar a susceptibilidade à fragilização por hidrogênio (SFH) dos aços são caros e demorados, como o ensaio de tração com baixa taxa de deformação (BTD) ou o ensaio com carga constante, ou, dependendo das condições de ensaio, limitados, como a ensaio de nanoindentação instrumentada.

O carregamento progressivo (*Rising Step Loading* - RSL) é um método desenvolvido em meados dos anos 90 por Raymond (1995) como uma alternativa aos testes convencionais de baixa taxa de deformação (BTD) para avaliar a fragilização por hidrogênio de uma maneira mais rápida e econômica através de um carregamento progressivo em ambiente controlado. Consiste de um teste de carregamento progressivo de flexão a quatro pontos, regido pela norma ASTM F1624 (2010), usando uma amostra entalhada imersa em uma solução eletrolítica que fornece hidrogênio para permear a amostra. Este método pode avaliar a SFH em um período de até 60 horas, fornecendo resultados equiparáveis àqueles obtidos pelos métodos tradicionais de análise da SFH. Uma ilustração deste equipamento pode ser vista na Fig. 1.

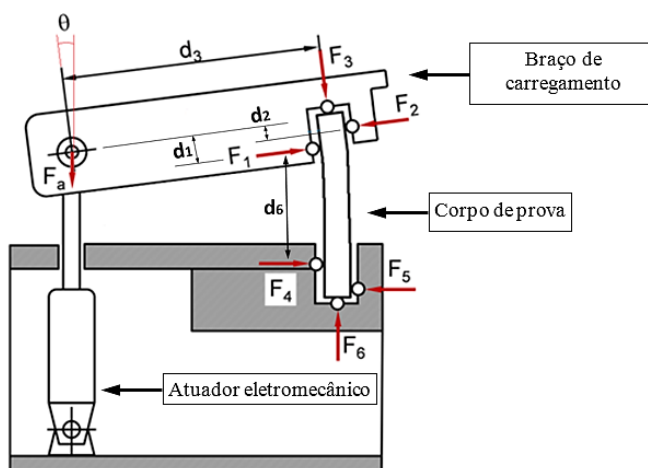


Figura 1: Croqui de um equipamento de flexão à quatro pontos

Um equipamento que realiza ensaios do tipo RSL foi desenvolvido por Martiniano (2016). Para avaliar o equipamento resulta necessário realizar um experimento que permita determinar o erro entre o valor de tensão mecânica fornecido pelo equipamento e um valor de referência. Este trabalho descreve o procedimento proposto para validar o equipamento construído, utilizando extensometria. Este permite obter um valor de tensão mecânica de referência para comparar com o valor fornecido durante o ensaio.

O extensômetro, também conhecido como *strain gage*, é um medidor de deformação que tem seu funcionamento baseado na variação de sua resistência elétrica, esta variação é causada pela deformação da amostra. Hoffmann (1989) afirma que a medição de deformação com *strain gages* assume que toda a deformação no experimentada pelo material

investigado é transferida sem perda para o sensor. Com o valor da deformação e com as propriedades mecânicas do material é possível se obter a tensão mecânica que está sendo aplicada.

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste trabalho, uma amostra de Aço AISI 4140 temperado e revenido, de seção quadrada com dimensões 30x30x200 mm³ sem entalhe foi utilizada no teste de verificação da tensão (validação). Para medir a tensão mecânica aplicada utilizou-se o extensômetro elétrico unidirecional da marca HBM modelo 1-LY41-3/120 com resistência elétrica nominal de 120 Ω e *grid* de medição de 3 mm. Foram utilizados quatro extensômetros colados na amostra numa configuração de ponte completa, como mostra a Fig.2.

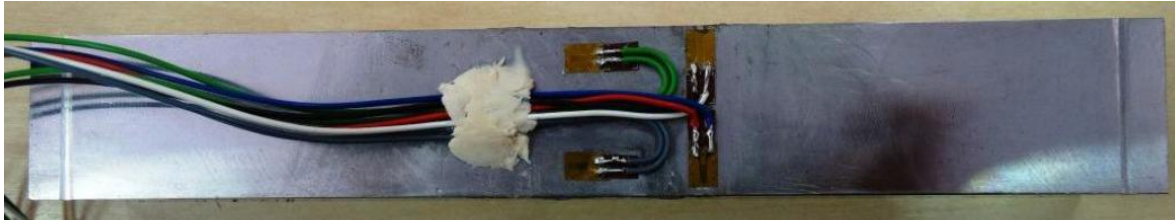


Figura 2: Amostra utilizada nos ensaios de verificação de tensão do RSL com os extensômetros colados em ponte completa

A tensão mecânica na amostra fornecida pelo equipamento é obtida utilizando-se a Eq. 1.

$$\sigma = F_a \left[\frac{3}{bh^2} (2d_1 \sin \theta + 2d_3 \cos \theta + d_6 \sin \theta) - \frac{\cos \theta}{bh} \right] \quad (1)$$

Na Eq. 1, F_a é a força aplicada pelo atuador; d_1 e d_2 são as distâncias verticais das forças F_1 e F_2 em relação ao eixo de giro do braço de flexão; d_3 é a distância horizontal do eixo de giro do braço de flexão em relação ao eixo central do corpo de prova; d_6 é a distância vertical entre os centros dos roletes do braço de carregamento e do suporte inferior que apoiam a face oposta ao entalhe da amostra; b e h representam a largura e a profundidade da seção transversal do corpo de prova; e θ é o ângulo de giro do braço atuador.

O teste de validação foi conduzido mediante aplicação de carga na amostra de forma incremental, da mesma forma que no ensaio RSL. A força aplicada na amostra variou de 0,5 kN a 10,0 kN, com 20 patamares de carga constante, sendo cada patamar incrementado com 5 % da força máxima e mantido por 30 segundos. O teste foi conduzido mediante carregamento e descarregamento da amostra.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos nos ensaios de validação são mostrados nas Fig. 3.

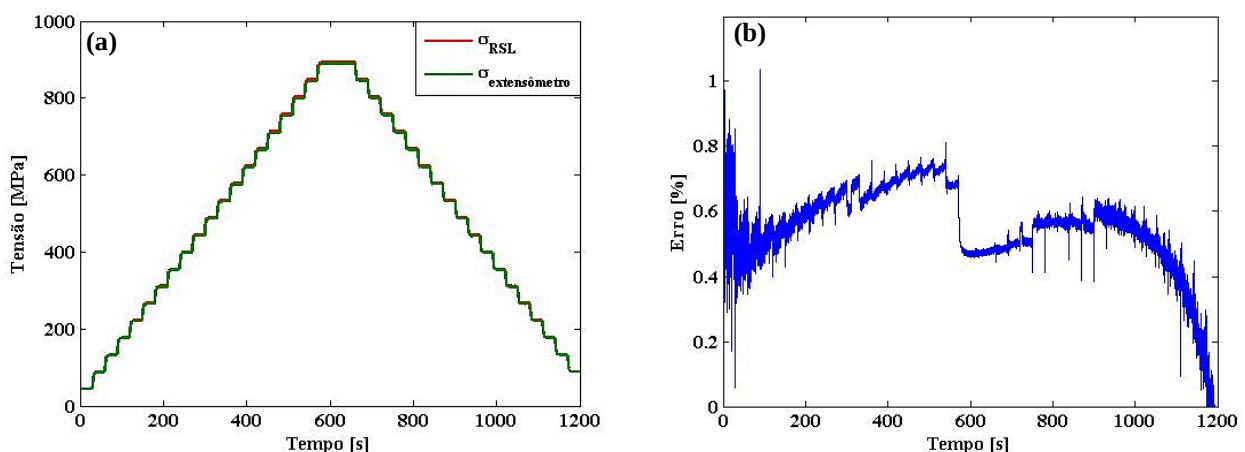


Figura 3: Resultados do teste de validação (a) tensão na amostra calculada analiticamente (vermelho) e medida pelos *strain gauges* (verde) e (b) erro entre as tensões calculada e experimental

Observa-se na Fig. 3a que a tensão calculada analiticamente pelo *software* do equipamento e a medida pelos extensômetros são similares. O erro entre as tensões, mostrado na Fig. 3b, apresenta um valor médio de aproximadamente 0,6 %, com um pico isolado em 1,0 % que foi atribuído a algum ruído ou a uma fonte externa. A incerteza expandida associada à tensão mecânica estimada pelo *software* do RSL foi calculada considerando as incertezas-padrão associadas às variáveis presentes na Eq. 1 e foram combinadas utilizando o método de Monte Carlo,

descrito pela JCGM (2008). O resultado da avaliação da incerteza de medição pode ser visto na Fig. 4 como sendo a barra de erros para uma probabilidade de abrangência de 95,45 %.

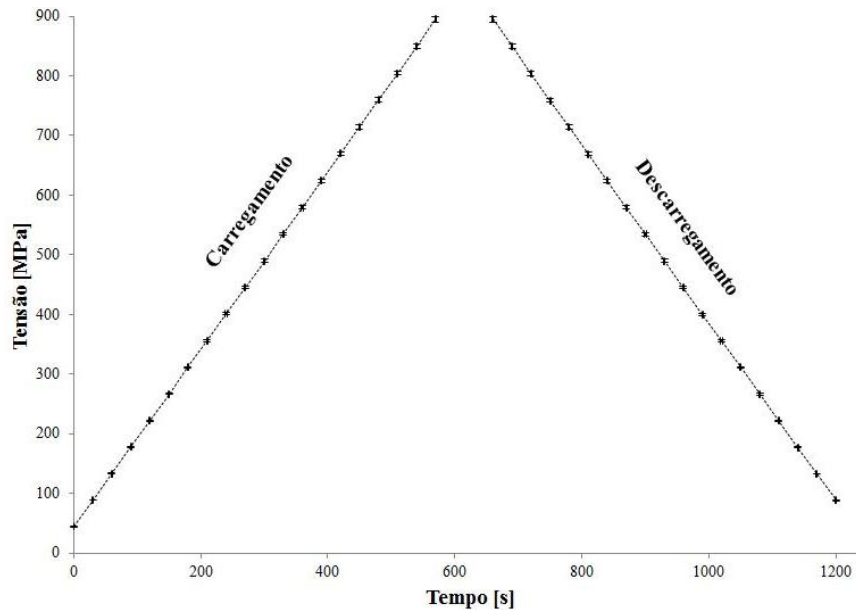


Figura 4: Tensão média medida durante o ensaio de verificação de tensão com as incertezas expandidas no formato de barras de erro

A incerteza expandida (U) associada ao valor de tensão mecânica calculada pelo método de Monte Carlo foi de 0,5 % do valor médio indicado pelo equipamento, Fig. 4.

4. CONCLUSÕES

- O erro máximo entre as tensões mecânica calculada pelo equipamento e a medida pelos extensômetros foi de 0,8 % no início do ensaio e o erro médio foi de 0,6 % da tensão mecânica de referência medida pelos extensômetros;
- A incerteza expandida associada à tensão mecânica na amostra calculada pelo equipamento foi de 0,5 % da tensão mecânica de referência medida pelos extensômetros;
- O modelo matemático adotado para o cálculo das tensões mecânicas da amostra é coerente e representa com segurança as tensões a que a amostra está submetida, tendo em vista a incerteza e erro apresentados pelo equipamento.

5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pelo CAPES-PROEX, CNPq, FAPEMIG e PETROBRAS.

6. REFERÊNCIAS

- ASTM F1624, “Standard Test Method for Measurement of Hydrogen Embrittlement Threshold in Steel by the Incremental Step Loading Technique”, 2010.
- Barnoush, A. Vehoff, H. “Recent developments in the study of hydrogen embrittlement: Hydrogen effect on dislocation nucleation”. *Acta Materialia*, vol. 58, 2010, pp. 5274–5285.
- Hoffmann, K. “An Introduction to Measurements using Strain Gages”. Darmstadt: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989, 291p.
- JCGM. “Evaluation of Measurement Data — Supplement 1 to the “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement” — Propagation of Distributions Using a Monte Carlo Method”. *JCGM 101*, 2008b.
- Martiniano, G.A. “Desenvolvimento de um Equipamento para Avaliação da Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio”. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2016.
- Raymond, L. “United States Patent US5505095 - Rising Step Load Apparatus”, 1995.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.