

INCERTEZA DE MEDIÇÃO NO ENSAIO DE FADIGA PARA DIFERENTES RUGOSIDADES SUPERFICIAIS

Lisiane Trevisan, lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Daniel Antonio Kapper Fabricio, daniel.fabricio@ifsc.edu.br²

¹Instituto Federal do Rio Grande do Sul – Câmpus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Farroupilha, RS

²Instituto Federal de Santa Catarina – Câmpus Chapecó, Avenida Nereu Ramos, 3450-D, Chapecó, SC

Resumo:

Os processos industriais podem ser controlados através de distintos ensaios mecânicos, e a confiabilidade dos ensaios mecânicos depende dos valores de incerteza de medição. O ensaio de fadiga é um dos ensaios mecânicos mais importantes na área da mecânica, pois descreve como o material suporta esforços dinâmicos. O comportamento do material depende da rugosidade superficial, pois essa modifica a tensão suportada pelo material submetido a esforços mecânicos dinâmicos. O principal objetivo deste trabalho é a determinação da incerteza expandida do aço inoxidável SAE 316L quando sujeito a ensaios de fadiga, tanto para o número de ciclos como para a tensão corrigida, devido à influência do acabamento superficial. Os valores de incerteza de medição foram obtidos para três diferentes níveis de tensão em três diferentes acabamentos superficiais. Através do método de Monte Carlo foi possível determinar a incerteza expandida tanto para o número de ciclos quanto para a tensão corrigida. A incerteza expandida do número de ciclos foi calculada com base na dispersão dos resultados do número de ciclos suportado para cada grupo de corpo de prova. Os valores de incerteza calculados para a tensão corrigida se mostraram aceitáveis dentro dos critérios definidos pela norma ASTM E466.

Palavras-chave: Ensaio de Fadiga, Incerteza de Medição, Método de Monte Carlo

1. INTRODUÇÃO

Fadiga é uma forma de falha que ocorre em componentes sujeitos a esforços cíclicos diante de carregamento variável, tais como em construções, pontes, aeronaves, peças automotivas e componentes industriais. Resumidamente, a fadiga é um modo de falha em que um componente se rompe a um nível de tensão abaixo daquele definido em um ensaio estático (ASTM, 1987; SHACKELRFORD, 2008). O comportamento de um metal diante de esforços em fadiga também depende de fatores metalúrgicos como tamanho de grão, elementos de liga e tratamento térmico, e também a condições de operação, incluindo o histórico de carregamento, tensão imposta, temperatura, etc. (YE, 2010).

Diversos fatores justificam o cálculo de incerteza de medição na área de ensaios e calibração. Através do valor de incerteza é possível verificar a confiabilidade dos resultados obtidos, permitindo a aprovação desses resultados dentro dos limites de tolerância especificados pelo cliente. Essa pesquisa se justifica pelo objetivo de determinar a incerteza expandida para o ensaio de fadiga. Como é um ensaio destrutivo, é possível entender o comportamento do material diante de esforços dinâmicos.

No ensaio de fadiga, é possível determinar a incerteza de medição para diferentes parâmetros: limite de fadiga, número de ciclos suportados pelo material, fator concentrador de tensões e tamanho da trinca (SCHWENKE; KANDIL, 2000). No entanto, o valor da incerteza de medição deve estar associado ao processamento mecânico submetido ao material e em conjunto com o acabamento superficial (KEISLER, 1996).

A falha em fadiga inicia de irregularidades superficiais, e sua propagação é perpendicular ao eixo da tensão. O início da trinca de fadiga pode ocorrer devido à alta tensão superficial, corrosão, desgaste, assim como por altas temperaturas às quais o material é submetido. A otimização do acabamento superficial melhora significativamente resistência total de qualquer material submetido a carregamentos dinâmicos (LOPES, 2006).

Os efeitos das características superficiais usinadas relacionadas ao limite de fadiga podem ser determinados através de diversas simulações computacionais. O tamanho, espaçamento, forma e distribuição de marcas existentes na superfície influenciam diretamente no crescimento da trinca (NUREG/CR-6878, 2005). O limite de fadiga pode ser determinado pelo número de ciclos no qual a primeira trinca atinge um tamanho crítico. Resultados demonstram que o limite de fadiga é modificado fortemente quando o valor da rugosidade excede 0,1 μm (ANDREWS, 2000).

Para a demonstração da influência entre as fontes de incerteza consideradas é necessário que o modelo matemático utilizado demonstre simplificações e suas particularidades. Podem ser utilizados modelos simples baseados em simplificações usadas em muitos casos específicos, e podem ser utilizados também modelos extremamente complexos utilizando modelos de fenômenos físicos. O método de Monte Carlo auxilia na resolução de modelos matemáticos complexos a um nível de confiança determinado inicialmente (WEATHERS, 2009).

Assim, o principal objetivo deste artigo é a determinação da incerteza expandida para o número de ciclos e tensão corrigida no ensaio de fadiga pelo método de Monte Carlo, e a comparação dos valores de incerteza com os valores aceitáveis segundo a norma ASTM E466:2007 (ASTM, 2007) para diferentes acabamentos superficiais.

2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

O Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM) é um documento que estabelece os critérios para o cálculo da incerteza de medição do termo correspondente, considerando a influência de diferentes parâmetros que compõem a incerteza. Para essa estimativa, é necessário descrever o efeito de cada variável de entrada em relação ao mensurando utilizando coeficientes de sensibilidade (derivadas parciais do modelo de medição em relação a cada fonte de incerteza) (PAPADOPOULOS, 2001; ISO/GUM, 2003).

Nos casos em que a descrição da função matemática para cada fonte de incerteza é difícil, é recomendável determinar a incerteza de medição através de outros métodos, tais como a simulação de Monte Carlo. O Suplemento 1 do GUM apresenta os passos para a determinação da incerteza de medição por esse método (JCGM, 2008).

É importante ressaltar que a base para o desenvolvimento do método de Monte Carlo é a organização da distribuição de probabilidade de cada variável e depende de um bom algoritmo para a geração de números pseudo-aleatórios. Além disso, o método de Monte Carlo é recomendado quando as variáveis de entrada para o cálculo de incerteza possuem valores arbitrariamente altos, para modelos de medição com um elevado grau de não linearidade e distribuições dos dados de entrada com assimetrias complexas, assim como para distribuições não-Gaussianas associadas a um componente dominante (JCGM, 2008).

Assim, o resultado da medição é relatado com base em uma distribuição de probabilidade para um dado nível de confiança (tipicamente igual a 95%). Com base na função matemática, o número de iterações é um fator importante na obtenção dos resultados, de modo que quanto maior o número de simulações, melhor a análise dos resultados (COX, 2001). É possível estimar o número de iterações para produzir resultados confiáveis baseado no nível de confiança desejado, sendo recomendável um número entre 10^5 e 10^6 na maioria dos casos (SHAHANAGHI, 2010).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O material metálico utilizado nesse trabalho se trata de um aço inoxidável SAE 316L, devido a suas qualidades, tais como estabilidade dimensional e excelente resistência à corrosão. O aço SAE 316L possui um baixo conteúdo de carbono (máximo 0,03%) quando comparado ao SAE 316 (máximo 0,08%) (CALLISTER, 2007). As dimensões dos corpos de prova são apresentadas na Figura 1, com tolerâncias especificadas pela norma NBR ISO 2768-1 (ABNT, 2001).

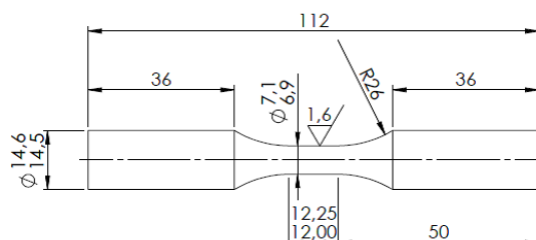


Figura 1. Dimensões dos corpos de prova, em milímetros. Trevisan *et.al.* (2015).

O experimento foi conduzido para nove diferentes condições (níveis de tensão e rugosidade), segundo a Figura 2, com quatro corpos de prova para cada condição, totalizando 36 amostras. Então, foi obtido o valor médio do número de ciclos suportado pelo material e o desvio padrão para cada condição.

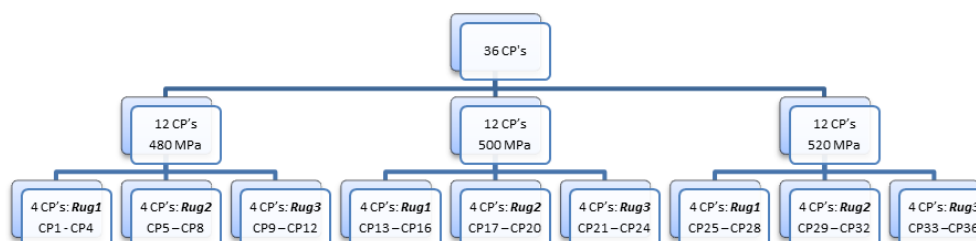


Figura 2. Distribuição dos corpos de prova no estágio experimental, observando-se diferentes valores de tensão e rugosidade.

Os ensaios de fadiga foram executados em uma máquina servo-hidráulica universal com capacidade de carregamento de 100 kN. Os parâmetros utilizados nos ensaios foram os seguintes: frequência de 20 Hz, razão de carga de 0,1, *run-out* de 1 milhão de ciclos e como critério de falha a ruptura total do corpo de prova.

Antes do início do ensaio de fadiga, foram executadas verificações do desalinhamento do sistema de fixação dos corpos de prova, assim como a verificação de calibração relacionada à medição da carga estática pela máquina de ensaios (TREVISAN, 2015).

As medições de rugosidade foram realizadas utilizando-se um perfilômetro na região de interesse. Foram realizadas cinco medidas de cada amostra com espaçamento de 0,25 mm entre elas. Para minimizar o erro durante a medição, foi utilizado um sistema de fixação para os corpos de prova. Os três níveis de rugosidade estudados foram separados conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação dos corpos de prova a partir do nível de rugosidade.

Rugosidade Superficial	Acabamento Superficial
Ru1	Desbaste com lixa d'água # 800 e polimento com pasta de diamante 6 µm
Ru2	Desbaste com lixa d'água # 500, isento de polimento
Ru3	Desbaste com lixa d'água # 320, isento de polimento

O ensaio de dureza foi realizado em uma máquina de dureza Brinell (HB). A medida do diâmetro dos corpos de prova foi realizada com um micrômetro de capacidade de medição de 0 a 25 mm e resolução de 0,001 mm.

Para calcular a incerteza de medição do número de ciclos, apenas a dispersão dos resultados obtidos no ensaio de fadiga foi considerada, a partir do valor médio e do desvio padrão para cada nível de rugosidade. Assim, a incerteza de medida foi expressa relacionando o número de ciclos para cada intervalo de rugosidade.

4. RESULTADOS

A 'tensão corrigida' é o termo utilizado para indicar a influência da rugosidade superficial (fator de correção: $C_{\sigma,R}$) do material metálico, considerando a tensão a que o material foi submetido. Para isso, o material foi avaliado para cada tensão e cada rugosidade aos quais foi submetido.

Um dos métodos mais simples para esse fator de correção ($C_{\sigma,R}$) é o descrito no FKM-Guideline (FKM, 2003) segundo a Equação 1, sendo $S_{t,u}$ a resistência mecânica real do componente e, $S_{t,u,min}$ a resistência mínima à tração suportada,

$$C_{\sigma,R} = 1 - a_r \log(R_z) \cdot \log\left(\frac{2 S_{t,u}}{S_{t,u,min}}\right) \quad (1)$$

A influência da rugosidade superficial é calculada para cada nível de rugosidade. Assim, a tensão corrigida (σ_{corr}) é determinada pela multiplicação do fator de correção ($C_{\sigma,R}$) pela tensão de ensaio (σ_{test}), e é uma função do diâmetro do corpo de prova, segundo a Equação 2 (FKM, 2003).

$$\sigma_{corr} = C_{\sigma,R} \cdot \sigma_{test} \quad (2)$$

Com base nos resultados experimentais obtidos, o número de ciclos suportados no ensaio de fadiga e a respectiva tensão de ensaio foram utilizados para desenvolver uma rotina numérica baseada no método de Monte Carlo. A simulação foi executada no software *Matlab*, versão 7.7.0. A rotina desenvolvida utilizou a função *random* para a geração de números aleatórios. Essa função requer a determinação da distribuição de probabilidade para a qual serão gerados os números aleatórios, assim como a média e o desvio padrão de cada variável.

Baseando-se na função matemática, o número de iterações é um fator importante na obtenção dos resultados, de tal forma que, quanto maior o número de simulações, maior a análise dos resultados (COX, 2001). No entanto, quanto maior o número de iterações, maior o trabalho computacional, sendo que um número excessivamente grande de iterações pode tornar o uso do *software* muito lento ou até inviável. Além disso, o número de iterações depende da tolerância aceitável para a dispersão dos resultados. Isso evidencia a importância de se conhecer a distribuição de probabilidade e a respectiva convergência numérica para cada fonte de incerteza.

Para a estimativa da incerteza de medição pelo método de Monte Carlo, é necessário expressar os valores limite inferior (L_i) e superior (L_s) para cada variável, de acordo com a média (μ) e desvio padrão (σ) (COUTO, 2008), conforme as Equações 4 e 5.

$$-1,96 = \frac{L_i - \mu}{\sigma} \quad (4)$$

$$1,96 = \frac{L_s - \mu}{\sigma} \quad (5)$$

Assim, a incerteza de medição expandida para um nível de confiança de 95% e $K = 2$, pode ser descrita Segundo a Equação 6 (COUTO, 2008).

$$U(p = 95\%; K = 2) = \frac{L_s - L_i}{2} \quad (6)$$

Os valores de incerteza de medição obtidos para o número de ciclos e os valores de tensão corrigida são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2. Incerteza expandida para o número de ciclos, expressa em log(N) e tensão corrigida (MPa).

Tensão de Ensaio (MPa)	Rugosidade	log(N)		Tensão corrigida (MPa)	
		Média	U	Média	U
480	Ru1	5,94	0,20	489,66	6,55
	Ru2	5,05	0,19	481,20	2,97
	Ru3	5,07	0,18	472,51	4,20
500	Ru1	5,29	0,10	502,33	9,99
	Ru2	5,31	0,24	493,68	5,08
	Ru3	5,20	0,20	489,38	8,00
520	Ru1	5,51	0,01	525,53	2,88
	Ru2	5,35	0,12	511,37	9,49
	Ru3	5,22	0,09	505,49	5,09

Conforme demonstrado na Tabela 2, não é possível verificar uma relação matemática entre os valores do número de ciclos suportados pelo material e o valor da rugosidade ou tensão de ensaio. Como os valores de tensão de ensaio foram similares, com intervalos de 20 MPa, pode-se observar que a dispersão entre os resultados obtidos para o número de ciclos deve ser maior que os valores de incerteza de medição.

Os valores de tensão corrigida média apresentaram valores inversamente proporcionais ao valor de rugosidade, sendo que valor de rugosidade Ru3 é maior que Ru2 e Ru1. Também para a incerteza expandida da tensão corrigida não foi possível verificar uma relação matemática entre a incerteza expandida e a tensão corrigida. A dispersão dos valores de incerteza expandida para as amostras ensaiadas sob as mesmas condições para o mesmo grupo de rugosidade é devido à variabilidade entre os valores experimentais de rugosidade (Rz) para os diferentes corpos de prova ensaiados sob as mesmas condições. É importante ressaltar que a preparação da superfície dos corpos de prova foi realizada manualmente, incluindo as etapas de lixamento e polimento (quando houve), e esse fator causou grande dispersão nos valores de rugosidade.

A análise das fontes de incerteza consideradas neste trabalho não elimina a influência de outros parâmetros na determinação da incerteza de medição, tais como parâmetros metalúrgicos, geometria do corpo de prova, entre outros. É evidente que os valores de incerteza de medição obtidos são devidos à variação na rugosidade (Rz), dureza e diâmetro de cada corpo de prova, sendo que outros fatores não foram considerados.

5. CONCLUSÕES

O método de Monte Carlo geralmente não é usado na indústria devido a problemas na especificação da distribuição de probabilidade para cada variável e correlações entre elas. Além disso, existem outras limitações, tais como, o trabalho computacional na resolução do problema, o tempo necessário para a execução da simulação e a falta de mão de obra qualificada. A acurácia dos resultados depende da qualidade da geração de números aleatórios, que depende do software utilizado na simulação.

Adicionalmente, a aplicação do método descrito pelo GUM assume $k = 1,96$ para um nível de confiança de 95%, e uma distribuição normal expandida simetricamente em relação ao valor médio. Utilizando o método de Monte Carlo, a expansão da incerteza não é necessariamente simétrica, cobrindo, assim, de forma mais realística, o comportamento estatístico da medição.

Ressalta-se que os resultados obtidos do cálculo de incerteza para a incerteza expandida da tensão corrigida estiveram dentro do erro máximo aceitável pela norma ASTM E466: 2007 (ASTM, 2007), que é de no máximo 2% da carga medida.

Como o principal objetivo deste artigo foi a determinação dos valores de incerteza de medição expandida através do método de Monte Carlo, sugere-se a comparação desses valores com aqueles obtidos pelo GUM, através do cálculo de coeficientes de sensibilidade.

6. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao LAMEF pelo apoio no desenvolvimento desta pesquisa, em especial ao Prof. Dr. Afonso Reguly.

7. REFERÊNCIAS

- American society for metals international, 1987, “Metals Handbook, Fatigue and Fracture”, vol. 19, 9ed.
- American society for testing and materials, 2007, “ASTM E466: Standard Practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials”, Pennsylvania.
- American society for testing and materials, 2007, “ASTM E466: Standard Practice for conducting force controlled constant amplitude axial fatigue test of metallic materials”, Pennsylvania.
- Andrews, Scott. Sehitoglu, H., 2000, “A computer model for fatigue crack growth from rough surface”. International Journal of Fatigue. Vol. 22. p. 619-630.
- ABNT, 2001, “NBR ISO 2768-1 – Tolerâncias gerais - Parte 1: Tolerâncias para dimensões lineares e angulares sem indicação de tolerância individual”. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Callister, W., 2007, “Materials Science and Engineering”, New York: John Wiley & Sons Inc, . 7 ed.
- Trevisan, Lisiane., 2016, “Avaliação da incerteza de medição em curvas de fadiga S-N através do método de monte carlo”. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2010.
- Couto, Paulo Roberto Guimarães., 2008, “The measurement uncertainty estimation by the methods of ISO GUM 95 and Monte Carlo simulation”. INMETRO. Technical note. September.
- Cox, M. G., Dainton, M. P., HARRIS, P.M., 2001, “Uncertainty and Statistical Modelling”. Software Support for Metrology. Best Practice Guide N°6. National Physical Laboratory, United Kingdom. March 2001.
- FKM-Guideline, 2003, “Analytical strength assessment of components in mechanical engineering”. 5ed.
- ISO / GUM, 2003, “Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement”. INMETRO. Rio de Janeiro, 3.ed. 120 p.
- JCGM, 2008, “Evaluation of measurement data - Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" - Propagation of distributions using a Monte Carlo method”. Joint Committee for Guides in Metrology.
- Kandil, F.A, 2000, “Manual of Codes of Practice for the Determination of Uncertainties in Mechanical Tests on Metallic Materials: Section 1 - Introduction to the evaluation of uncertainty”. National Physical Laboratory Queens Road. United Kingdom.
- Keisler, j. M. Chopra, o. K. Shack, w. J., 2006, “Statistical models for estimating fatigue strain-life behavior of pressure boundary materials on light water reactor environments”. Nuclear Engineering and Design. 167. p.129-154.
- Lopes, Karina Stefania Souza., 2006, “Influencia dos parâmetros de usinagem na resistência à fadiga de aços AISI 4140”. Dissertação de mestrado. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Belo Horizonte.
- NUREG/CR-6878 ANL-03/35., 2005, “Effect of Material Heat treatment on fatigue Crack initiation in Austenitic Stainless Steels in LWR Environments”. Argonne National Laboratory. USA Nuclear.
- Papadopoulos, Christos E. Yeung, Hoi., 2001, “Uncertainty estimation and Monte Carlo simulation method”. Flow Measurement and Instrumentation. Vol. 12. p.291-298.
- Schwenke, H.*et.al.*, 2010, “Assessment of uncertainties in dimensional metrology by Monte Carlo Simulation: Proposal of a Modular and Visual Software”. Annual of the CIRP. Vol.49.
- Shackelford, James F., 2008, “Ciência dos Materiais”. Pearson. 576 p.
- Shahanaghi, Kamran. Nakhjiri, Pooneh., 2010, “A new optimized uncertainty evaluation applied to the Monte-Carlo simulation in platinum resistance thermometer calibration”. Measurement. Vol. 43. p. 901-911.
- Trevisan, Lisiane. Fabricio, Daniel Antonio Kapper. Reguly, Afonso., 2015, “Study of the Misalignment of Test Specimens Submitted to Fatigue Test Through Different Fastening Systems”. International Journal of Research in Mechanical Engineering & Technology - IJRMET Vol. 5, Issue 2.
- Weathers, J.B. Luck, R. Weathers, J. W., 2009, “An exercise in model validation: Comparing univariate statistics and Monte Carlo-based multivariate statistics”. Reliability Engineering and System Safety. Vol. 94. p. 1695-1702.
- Ye, Dui., *et.al.*, 2010, “Effects of low-cycle fatigue on static mechanical properties, microstructures and fracture behavior of 304 stainless steel”. Materials Science and Engineering A. vol. 527. p. 4092-4102.

8. DIREITOS AUTORAIS

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

Os trabalhos escritos em português ou espanhol devem incluir (após direitos autorais) título, os nomes dos autores e afiliações, o resumo e as palavras chave, traduzidos para o inglês e a declaração a seguir, devidamente adaptada para o número de autores.

MEASUREMENT UNCERTAINTY IN FATIGUE TEST FOR DIFFERENT SURFACE ROUGHNESS

Lisiane Trevisan, lisiane.trevisan@farroupilha.ifrs.edu.br¹

Daniel Antonio Kapper Fabricio, daniel.fabricio@ifsc.edu.br²

¹Federal Institute of Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, São Vicente Avenue, 785, Farroupilha, RS

²Federal Institute of Santa Catarina – Campus Chapecó, Nereu Ramos Avenue, 3450-D, Chapecó, SC

Industrial processes may be controlled by a series of mechanical tests, and testing reliability depends on the measurement uncertainty values. Fatigue testing is one of the most important tests in the mechanical field, because it describes material behavior when subjected to dynamic efforts. Material behavior depends on surface roughness, because it modifies supported tension when material is subjected to dynamic forces. The main goal of this article is to determine the expanded uncertainty of the SAE 316L stainless steel when submitted to the fatigue test for both the number of cycles and the 'adjusted stress' due to the influence of surface finish. The measurement uncertainty were obtained for three different levels of stress (480 MPa, 500 MPa and 520 MPa) in three different surface finishes (Ru1, Ru2 and Ru3). Each level of roughness is represented by a different surface finish experimentally determined by a profilometer and mathematically represented by varying Rz. Using the Monte Carlo method it was possible to determine the expanded uncertainty of the 'adjusted stress'. The extended uncertainty of the number of cycles was calculated based on the dispersion of the results the number of cycles supported by each specimen. The measurement uncertainty of results for the 'adjusted stress' show with acceptable values within the given criterion by ASTM E466.

Keywords: Fatigue Test, Measurement Uncertainty, Monte Carlo Method