



## **Análise experimental de ensaios de iniciação de trinca por flexão alternada com detecção pela perda de estanqueidade**

Tomás Pessoa Londe Camargos<sup>1</sup>

Saulo de Paiva Cabral<sup>2</sup>

Ewerton Augusto de Sousa Nogueira<sup>3</sup>

José Felipe Dias<sup>4</sup>

Denilson José do Carmo<sup>5</sup>

Gabriel de Oliveira Ribeiro<sup>6</sup>

Ana Maria Gontijo Figueiredo<sup>7</sup>

**Resumo:** Investiga-se o método de iniciação de trinca por fadiga em corpo de prova com uma cavidade sob pressão. O teste é interrompido automaticamente quando uma trinca de fadiga provoca a perda de estanqueidade da cavidade. Construiu-se uma máquina de fadiga por flexão alternada adaptada para ensaiar corpos de provas com cavidade pressurizada ou sob vácuo. Foram realizados ensaios de fadiga sob amplitude de deformação constante, em corpos de prova feitos em aço SAE 1045, com cavidade pressurizada por gás inerte e espessura de parede de 1 mm. Para verificar se o método investigado seria capaz de detectar a influência do acabamento superficial na iniciação da trinca por fadiga, foram utilizados corpos de prova usinados e trefilados. Na análise dos resultados experimentais foi utilizada a curva de Coffin-Manson e os modelos de SWT com os parâmetros de curva  $\epsilon$ -N segundo Castro e Meggiolaro. Os resultados dos ensaios apresentaram coerência com as previsões dos modelos e dados utilizados, indicando que o método de detecção de trincas pela perda de estanqueidade é efetivo e tecnicamente viável, sendo capaz de detectar a influência do estado da superfície na resistência à iniciação de trinca por fadiga.

**Palavras-chave:** Fadiga. Máquina de ensaio por flexão alternada. Método de detecção de trincas pela perda da estanqueidade. Deformação constante.

1. Engenheiro Mecânico, Mestrando em Energia e Sustentabilidade, UFMG, tomascamargos@yahoo.com.br.
2. Engenheiro Mecânico, Esp. em Engenharia de Estruturas, PUC MINAS, saulo3636@yahoo.com.br.
3. Engenheiro Mecânico, Mestre, Universidade de Itaúna, ewertonasnogueira@gmail.com.
4. Engenheiro Mecânico, Doutor, Universidade de Itaúna, jfelipe@uit.br.
5. Engenheiro Mecânico, Doutor, Universidade de Itaúna, denilsoncarmo@uit.br.
6. Engenheiro Civil, Doutor, Universidade Federal de Minas Gerais, gabriel@dees.ufmg.br.
7. Engenheira Civil, Doutora, Universidade Federal de Minas Gerais, anamaria@dees.ufmg.br.

### **1. Introdução**

O termo fadiga, no contexto dos materiais de engenharia, segundo a ASTM E 1823 (2009) refere-se: “ao processo gradual de mudança estrutural localizada permanente em um material sujeito a condições que produzem tensões e deformações flutuantes em algum ponto (ou pontos) e que pode culminar em trincas ou em fratura, depois de um número suficiente de



flutuações”. Quando as solicitações são tensões ou deformações, a fadiga é dita fadiga mecânica, ocorrendo fratura sob tensões inferiores tanto à tensão de escoamento quanto à tensão crítica de fratura monotônica do material.

O processo de falha por fadiga, após a fase inicial de interação entre deslocamentos, pode ser dividido em três estágios: (a) Estágio I – nucleação da trinca (iniciação); (b) Estágio II – crescimento estável da trinca (propagação); (c) Estágio III - falha final rápida, que ocorre quando a superfície remanescente da seção transversal não é mais capaz de suportar a carga aplicada (fratura por sobrecarga de tração) ou quando o valor da tensão na região da ponta da trinca atinge o valor da intensidade de tensão crítica do material (tenacidade à fratura). Tanto a existência quanto a extensão desses estágios dependem das condições de aplicação de carga, da geometria da peça, da presença e dimensões de defeitos preexistentes, assim como das propriedades mecânicas do material.

A detecção da fase de iniciação de trincas por fadiga permite compreender melhor os mecanismos envolvidos no processo de fratura, o que é importante para melhorar a análise e o projeto de materiais resistentes à fadiga, a fim de reduzir a ocorrência de falhas de componentes mecânicos e estruturais. Pois, 50 a 90% das falhas em serviço de componentes mecânicos ou estruturais são atribuídas à fadiga, causando importantes prejuízos econômicos, ambientais e sociais. Segundo Dowling (1999), estima-se em 3% do PIB o custo gerado por falhas devidas à fadiga dos materiais nos EUA, estimando-se também uma percentagem similar a esta em outras nações industrializadas. Tais custos surgem da ocorrência ou prevenção de falhas por fadiga em pontes, veículos terrestres, equipamentos de usinas de geração de energia, veículos ferroviários, guindastes, estruturas *offshore* para exploração de petróleo, tubulações industriais, aeronaves, indústrias automobilísticas, e uma grande variedade de componentes de máquinas e equipamentos, e ainda equipamentos domésticos de uso diário.

Desta forma, a sensibilidade do método de detecção de trincas desempenha um papel importante. A resolução dos métodos de detecção de trincas pode variar de 0,1 a 500  $\mu\text{m}$ , conforme resumido no QUADRO 1. A sensibilidade depende da técnica específica, geometria do componente, condição da superfície, acessibilidade física, e do fenômeno responsável pela iniciação da trinca. No entanto, a maioria destes métodos requer equipamento sofisticado e dispendioso, e alguns deles não podem ser aplicados em condições de serviço ou em testes de rotina. Além disso, a necessidade de interromper o teste de fadiga para avaliar a existência e dimensão de qualquer trinca que possa ocorrer é um dos problemas significativos apresentados pela maioria dos métodos típicos. Este aspecto implica em ciclos indesejáveis de carga e descarga, que podem afetar o fenômeno de iniciação da trinca.

Este trabalho apresenta os resultados iniciais da avaliação e utilização do sistema de detecção de trincas pela perda de estanqueidade como um possível método para detectar o início de trinca por fadiga.



Método ou técnica	Sensibilidade de detecção de trincas (mm)
Radiografia gama	2% da espessura do componente
Partícula magnética	0,5
<i>Crack Gage</i>	0,25
Emissão acústica	0,1
Correntes parasitas	0,1
Microscópio óptico	0,1 – 0,5
Potencial elétrico	0,1 – 0,5
Propriedade magnética	0,076
Ultrassom	0,050
<i>Eletrodo em gel</i>	0,030
Líquido penetrante	0,025-0,25
Flexibilidade	0,01
Microscópio eletrônico de varredura	0,001
Microscópio eletrônico de transmissão	0,0001
Microscópio de tunelamento com varredura	0,0001

QUADRO 1 – Sensibilidade dos métodos utilizados para detecção de trincas.

Fonte: Adaptado de SHANMUGHAM, LIAW, 1996, p. 518.

## 2. Metodologia

O procedimento experimental ocorreu em três fases, sendo:

a) Fase 1: ensaios preliminares para avaliar o funcionamento da máquina, a sensibilidade do ensaio e comparação de dois tipos de corpo de prova propostos.

b) Fase 2: correções e alterações necessárias para melhorar a sensibilidade do método de detecção da iniciação da trinca e definição do corpo de prova mais adequado ao método proposto.

c) Fase 3: Realização de ensaios para levantar curvas de previsão de iniciação de trincas por fadiga utilizando o método da perda de estanqueidade.

O projeto e detalhes da construção da máquina de ensaios utilizada foram apresentados por Borges (2011). A máquina realiza ensaios de fadiga por flexão alternada, e a detecção da trinca é feita pela perda de estanqueidade. O método utilizado consiste em pressurizar gás argônio através de um furo no corpo de prova. O gás fica estancado até que ocorra a iniciação da trinca e sua propagação pela espessura controlada do furo, provocando a perda da estanqueidade. A pressão do gás é lida por um transdutor diferencial de pressão. O ensaio pode ser interrompido pela queda de pressão devido à iniciação da trinca; pela ruptura total do corpo de prova, detectada por sensor de fibra óptica ou quando atingido o número de ciclos programado. A FIGURA 1 apresenta a máquina de ensaios utilizada nos testes.

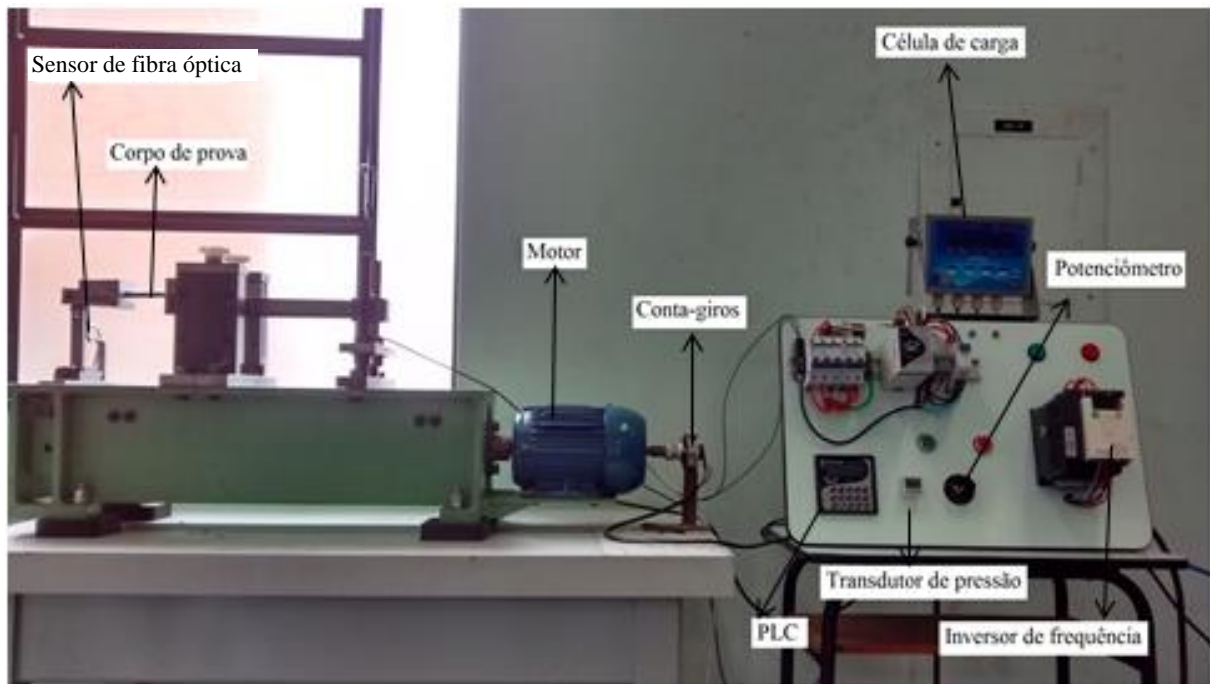


FIGURA 1 – Máquina de ensaio de fadiga por flexão alternada utilizada nos testes.

Foram utilizadas três barras de aço SAE 1045 e foram testadas 45 amostras. A FIGURA 2 mostra a geometria desenvolvida para os corpos de prova (CP) e as duas posições dos furos pressurizados com argônio. A espessura nominal da parede, onde a trinca iniciou, foi de 1 mm. Esta é a menor dimensão detectável por ensaios tradicionais de inspeção não destrutiva (CASTRO; MEGGIOLARO, 2009). A TABELA 1 mostra as propriedades mecânicas das barras. Os ensaios de fadiga foram realizados com  $R = 0,1$  após o ajuste do equipamento.

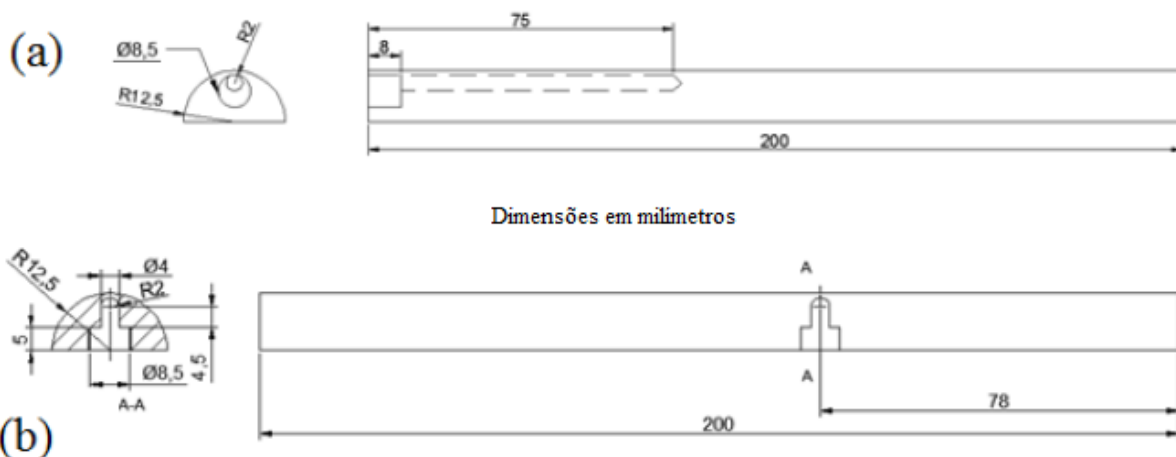


FIGURA 2 – Geometrias dos corpos de prova mostrando a cavidade pressurizada. (a) Tipo 1; (b) Tipo 2.



TABELA 1 – Propriedades mecânicas das barras de aço SAE 1045 utilizadas na fabricação dos corpos de prova.

Barra	Tipo de CP	$\sigma_u$ (MPa)	$\sigma_e$ (MPa)	Dureza (HB)	E (GPa)
1 (trefilada)	1	864,3	802,5	241	206,5
2 (trefilada)	1 e 2	724,0	634,0	229	200,2
3 (usinada)	2	786,0	718,0	229	205,0

Para comparação dos resultados experimentais com estimativas de resistência à fadiga dos corpos de prova, foi utilizado o modelo de Smith-Watson-Topper (SWT) que quantifica o efeito da tensão máxima (SURESH, 2001; CASTRO; MEGGIOLARO, 2009):

$$\frac{\Delta\varepsilon}{2} = \frac{\sigma_c^2}{E\sigma_{m\acute{a}x}} (2N)^{2b} + \frac{\sigma_c\varepsilon_c}{\sigma_{m\acute{a}x}} (2N)^{b+c} \quad (1)$$

Onde  $\Delta\varepsilon$ ,  $N$ ,  $E$  e  $\sigma_{m\acute{a}x}$  representam respectivamente a deformação, número de ciclos, módulo de elasticidade e tensão máxima. Através das medianas de Castro e Meggiolaro (2009) foram estimados os coeficientes e expoentes das partes elásticas e plásticas de Coffin-Manson ( $\varepsilon_c$ ,  $b$  e  $c$ ). Os valores são apresentados na TABELA 2. O coeficiente  $\sigma_c$  pode ser estimado pela Equação (2), como proposto por Castro e Meggiolaro (2009):

$$\sigma_c = 1,5\sigma_u \quad (2)$$

Onde  $\sigma_u$  representa o limite de resistência do material, no caso o aço SAE 1045.

TABELA 2 – Parâmetros da curva  $\varepsilon$ -N segundo as medianas de Castro e Meggiolaro (2009).

Material	$\sigma_c$	$\varepsilon_c$	$b$	$c$
Barra 1	1296,45	0,45	-0,09	-0,59
Barra 2	1086,00	0,45	-0,09	-0,59
Barra 3	1179,00	0,45	-0,09	-0,59

### 3. Resultados

As FIGURAS 3, 4 e 5 apresentam os resultados dos ensaios de iniciação de trinca em corpos de prova extraídos das barras 1,2 e 3 comparados com o modelo SWT de previsão de vida à fadiga, calculada pela Equação (1), utilizando parâmetros das medianas proposta por Castro e Meggiolaro (2009), para o aço SAE 1045.

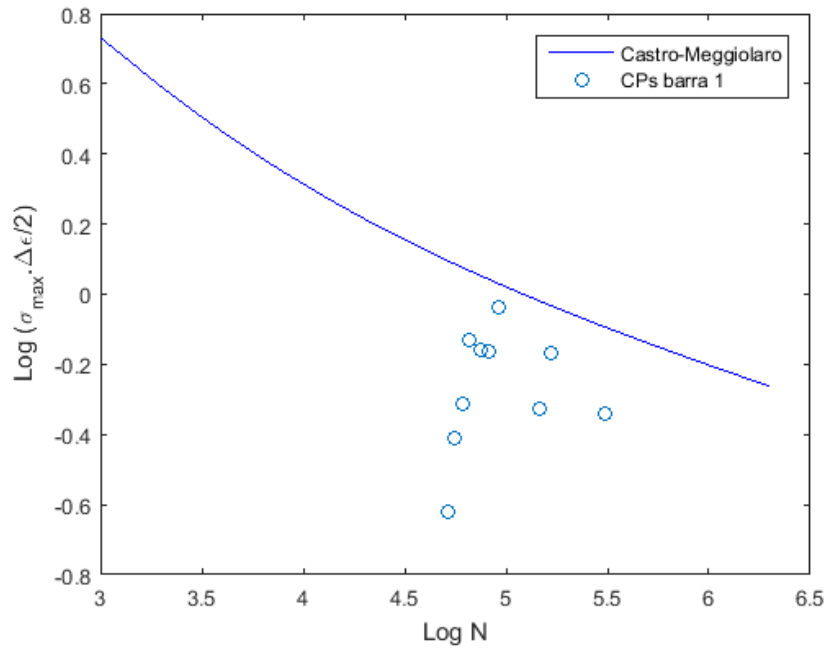


FIGURA 3 – Comparação dos resultados experimentais da barra 1 com o modelo SWT e os parâmetros estimados pelas medianas de Castro e Meggiolaro (2009).

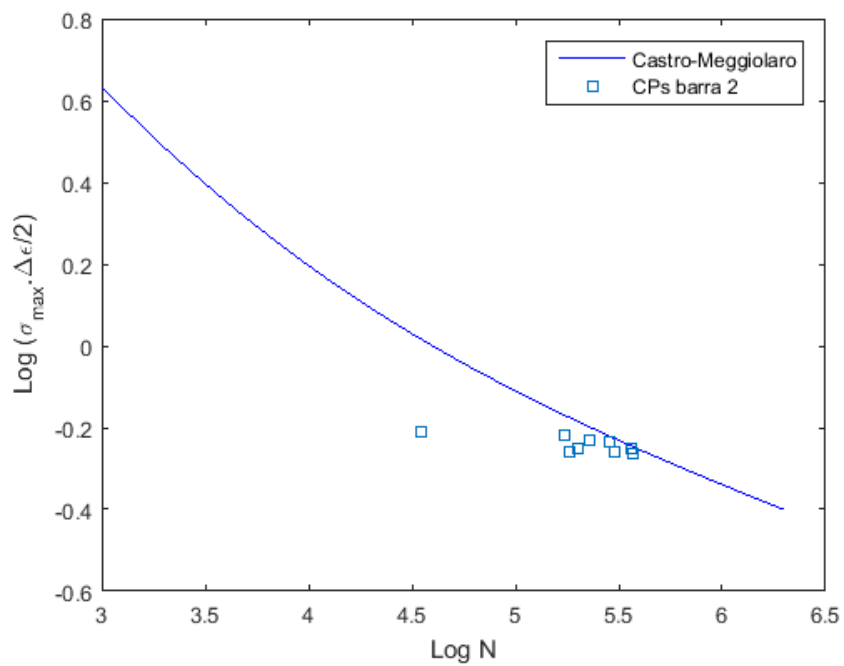


FIGURA 4 – Comparação dos resultados experimentais da barra 2 com o modelo SWT e os parâmetros estimados pelas medianas de Castro e Meggiolaro (2009).

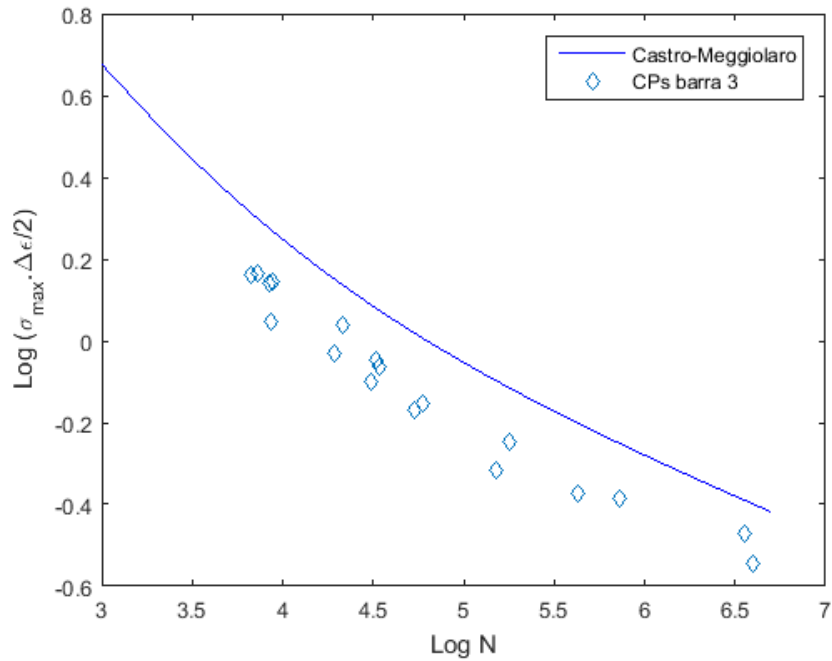


FIGURA 5 – Comparação dos resultados experimentais da barra 3 com o modelo SWT e os parâmetros estimados pelas medianas de Castro e Meggiolaro (2009).

A superfície de fratura de ambos os tipos de corpos de prova é apresentada nas FIGURAS 6 e 7, evidenciando as regiões de trincas por fadiga, corte de serra e fratura brusca provocada intencionalmente.

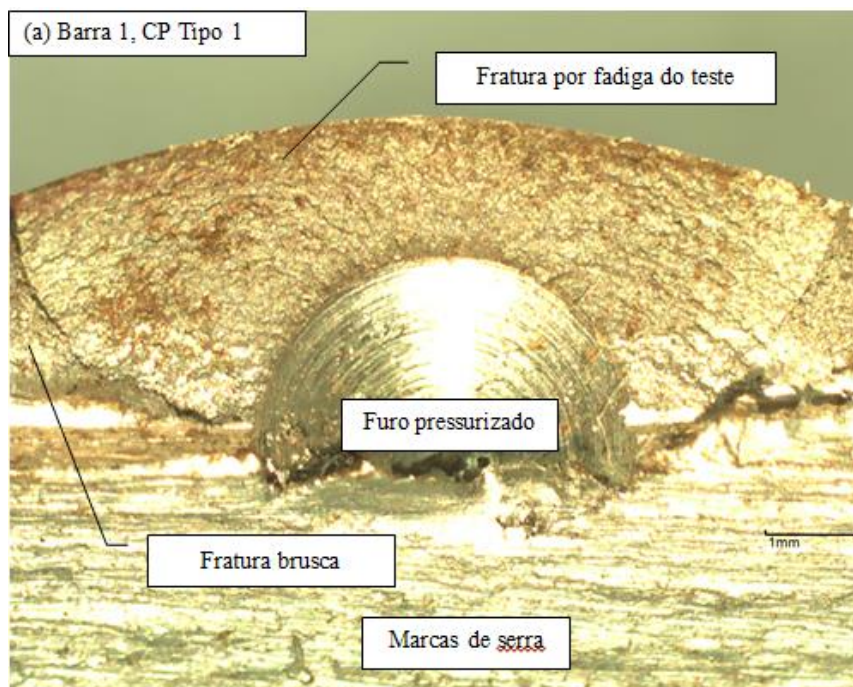


FIGURA 6 – Superfície de fratura do corpo de prova tipo 1.

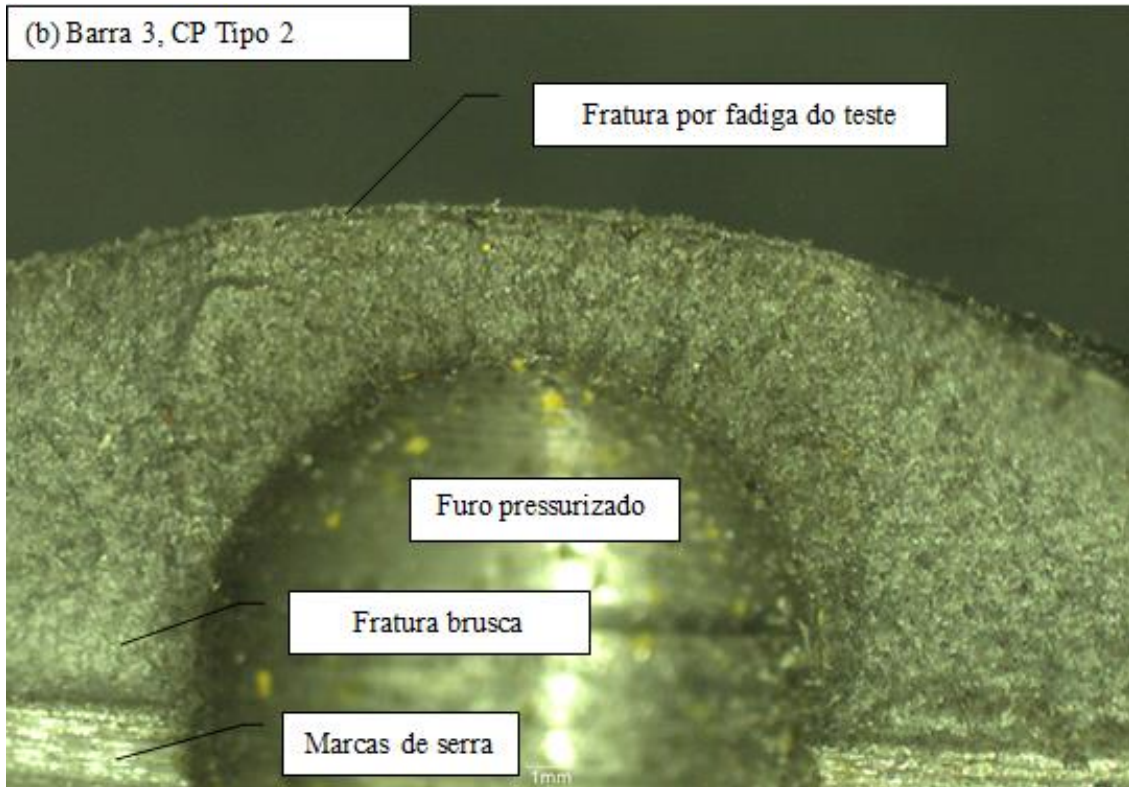


FIGURA 7 – Superfície de fratura do corpo de prova tipo 2.

#### 4. Discussão

As FIGURAS 3, 4 e 5 evidenciaram que o número de ciclos para iniciar e propagar trincas até 1 mm ficaram abaixo do número de ciclos necessários para a ruptura por fadiga previsto pelo modelo SWT com os parâmetros das medianas de Castro e Meggiolaro. Assim, tem-se a indicação que o método de detecção de trinca por fadiga por perda de estanqueidade foi efetivo em determinar o estágio da iniciação de trinca.

Os resultados da barra 1, FIGURA 3, mostraram maior dispersão porque a máquina de ensaio de fadiga estava sendo ajustada e o coeficiente R não era homogêneo. Os resultados das barras 2 e 3, FIGURAS 4 e 5, apresentaram menor dispersão e coerência com o modelo SWT.

As amostras com superfície usinada, barra 3, apresentaram menor número de ciclos do que aquelas com superfície trefilada, barras 1 e 2, com cargas equivalentes. Isto é consistente se considerarem os efeitos benéficos do processo de trefilação na resistência à iniciação da trinca.

#### 5. Conclusões

Considerando que todos os corpos de prova ensaiados apresentaram número de ciclos abaixo da curva de previsão de vida à fadiga para o aço SAE 1045, pode-se concluir que os resultados foram consistentes com os modelos e dados utilizados, indicando que o método de detecção de trinca pela perda de estanqueidade é eficaz e tecnicamente viável.





**SICIT**  
Semana de Iniciação  
Científica e Tecnológica

25 a 29 de setembro de 2017  
Engenharias e Computação

 Universidade de Itaúna

Os corpos de prova com superfície usinada apresentaram menor número de ciclos para iniciar a trinca quando comparados com ensaios de carregamentos equivalentes dos corpos de prova com superfície trefilada. Isto indica que o método apresentou sensibilidade suficiente para detectar a influência do acabamento superficial na resistência à iniciação da trinca por fadiga.

Os resultados dos ensaios realizados possibilitaram inferir que a sensibilidade do teste está relacionada com a espessura da parede da cavidade pressurizada, o tipo de transdutor de pressão e o valor de pressão diferencial especificada.

### **Agradecimentos**

A equipe agradece à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) por fomentar pesquisa e pelo apoio financeiro (Projeto APQ 510-12) e à Universidade de Itaúna pelo apoio ao projeto de pesquisa.

### **Referências**

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *ASTM E 1823 Standard Terminology Relating to Fatigue and Fracture Testing*. West Conshohocken, 2009.

BORGES, V. F. *Máquina para ensaio de iniciação de trinca por flexão alternada: detecção pela perda de estanqueidade*. Itaúna: Universidade de Itaúna, , 2011.

CASTRO, J. T. P.; MEGGIOLARO, M. A. *Fadiga - técnicas e práticas de dimensionamento estrutural sob cargas reais de serviço: volume I – iniciação de trincas*. [S.l.]: [s.n.], 2009.

DOWLING, N. E; *Mechanical Behavior of Materials*, 2nd ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1999.

SHANMUGHAN, S.; LIAW, P. K. *Detection and Monitoring of Fatigue Cracks*. In: ASM Handbook – Fatigue and fracture, v. 19, p. 517-552, 1996.

SURESH, S. *Fatigue of materials*. 2nd ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2001.