



**XXVI CREAM**

Congresso Nacional de Estudantes  
de Engenharia Mecânica

**ILHÉUS/ITABUNA - BAHIA**



XXVI Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica,  
CREEM 2019

19 a 23 de agosto de 2019, Ilhéus, BA, Brasil

## **ANÁLISE DE PROPAGAÇÃO DE TRINCAS POR FADIGA ATRAVÉS DE ENSAIO CTOD EM AÇO LIGA ASTM A516 GR 55 EMPREGADO NA INDÚSTRIA PETROLÍFERA**

João Carlos de Jesus Santos, jcarlosengmec@gmail.com<sup>1</sup>

Sandro Griza, griza@ufs.br<sup>2</sup>

Diego Andrade Pereira, diegoandrade\_senai@yahoo.com<sup>3</sup>

Antônio Pereira Santos, aps.engenheiro@gmail.com<sup>4</sup>

Paulo Franklin Tavares Santos, p.franklintavares@gmail.com<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, S/N, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000, Superintendência de Infraestrutura,

<sup>2</sup>Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, S/N, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000, Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais,

<sup>3</sup>Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, S/N, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000, Departamento de Engenharia Agrícola,

<sup>4</sup>Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, S/N, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000, Superintendência de Infraestrutura,

<sup>5</sup>Universidade Federal de Sergipe, Av. Marechal Rondon, S/N, São Cristóvão/SE, CEP 49100-000, Departamento de Engenharia Mecânica

**Resumo.** *O presente trabalho busca analisar a tenacidade à fratura e resistência a propagação de trincas por fadiga no aço e ASTM A516 Gr 55 utilizado na indústria petrolífera, seja em elementos estruturais, seja para a fabricação de vasos de pressão e acessórios de tubulação. A norma BS 7448 -1 orienta a execução de ensaios com o intuito de avaliar propriedades mecânicas que são exigidas para um bom comportamento frente a essas situações. De acordo com os resultados obtidos, pode se concluir que o material estudado apresenta elevada resistência à propagação de trincas a partir de um defeito pré-existente, e com a empregabilidade correta a utilização para a construção de estruturas e dispositivos mecânicos submetidos aos esforços de fadiga em operação.*

**Palavras chave:** *Mecânica da Fratura. BS 7448 -1. Indústria Petrolífera. Propagação de trincas. Ensaio Mecânico.*

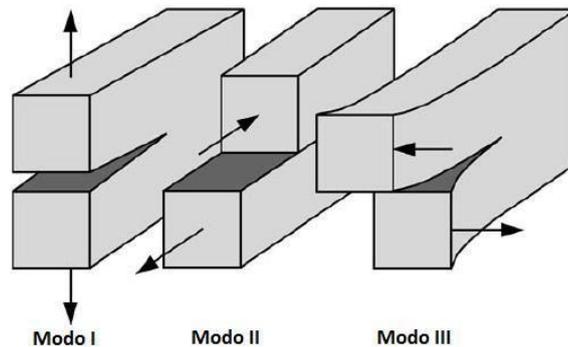
### **1. INTRODUÇÃO**

O objetivo da mecânica da fratura é determinar se um defeito tipo trinca irá ou não levar o componente à fratura catastrófica para tensões normais de serviço, permitindo ainda, determinar o grau de segurança efetivo de um componente trincado. O grande mérito desse tipo de análise é possibilitar ao projetista obter valores quantitativos de tenacidade do material, permitindo a elaboração de projetos que aliem segurança e viabilidade econômica, por Strohaecker (2007).

A mecânica da fratura permite analisar a resistência que cada material tem à propagação de uma trinca até uma condição instável, ou seja, é uma estimativa que consegue quantificar o comportamento da fissura. Essa se divide em: Mecânica da Fratura Linear-Elastica (MFLE) e Mecânica da Fratura Elasto-Plástica (MFEP).

De acordo com Soares (2011), três variáveis devem ser consideradas em relação à possibilidade de fratura de algum componente estrutural, quais sejam: a tenacidade à fratura ( $K_{Ic}$ ) ou a tenacidade à fratura em deformação plana ( $K_{Ic}$ ), a tensão imposta ( $\sigma$ ) e o tamanho do defeito ( $a$ ). Existem três maneiras fundamentais, ou modos, segundo os quais a carga pode operar sob uma trinca, e cada um irá causar um deslocamento diferente da superfície da trinca. Esses modos são demonstrados na Fig. 1. O modo I consiste em carregamento em tração, deslocamento das superfícies da trinca perpendicular a si mesmas; o modo II é de cisalhamento puro, deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas e perpendicularmente à frente de propagação e no modo III acontece cisalhamento fora do plano, deslocamento das superfícies da trinca paralelamente a si mesmas. O modo I de carregamento é o mais encontrado em situações práticas, enquanto que os modos II e III são mais raros.

Figura 1. Os três modos de carregamento aplicados para uma trinca. (Adaptado de Anderson, 2005)



Segundo Mandai (2010), para cada modo de carregamento existe um fator de intensidade de tensão associado, de tal forma que os fatores de intensidade de tensão  $K_I$ ,  $K_{II}$  e  $K_{III}$  estão associados aos modos I, II e III. É comum também, que a propagação de trincas ocorra por combinação de alguns dos modos de carregamento, principalmente dos modos I e II.

### 1.1. Mecânica da Fratura Linear-Elástica (MFLE)

De acordo com Oliveira (2014) este conceito de mecânica da fratura é aplicado somente em materiais que obedecem à lei de “Hooke”. Existem correções em pequena escala considerando a plasticidade do material, mas esta filosofia aplica-se somente em materiais de comportamento frágil, com baixa ductilidade, componentes de grande espessura ou operados em baixa temperatura. A eq. (1) determina o valor da intensidade de tensões para uma trinca passante de perímetro ( $2a$ ), tensão remota ( $\sigma$ ) e fator geométrico ( $Y$ ) em uma chapa infinita. Para a determinação do  $K_{IC}$  faz-se necessário estar em um estado plano de deformações características da mecânica da fratura linear elástica.

$$K_I = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

### 1.2. Mecânica da fratura elasto- plástica (MFEP)

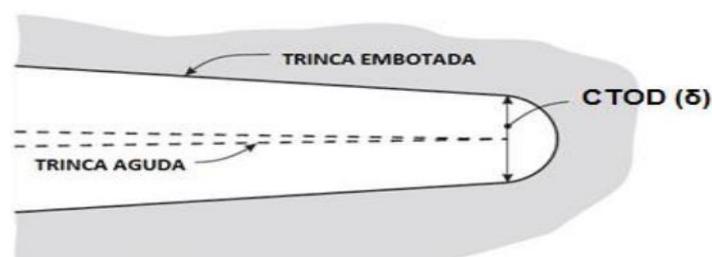
A mecânica da fratura linear elástica deve ser válida somente em materiais onde a deformação plástica é resumida nas proximidades da trinca. Isto estimulou a criação de um estudo que englobasse a maioria dos materiais que se comportassem de forma não linear (deformação plástica). O comportamento da trinca neste regime é instigado devido a maioria das estruturas de aço serem de média e baixa resistência, por Oliveira (2014).

Existem dois parâmetros estabelecidos para se medir a tenacidade dos materiais na MFEP, que são: o CTOD e a Integral J. O CTOD - “Crack Tip Opening Displacement” - representa a abertura da trinca anterior à sua propagação instável. Observou-se em experimentos, que em alguns aços muito tenazes não era possível obter um estado plano de deformação suficiente para obtenção do  $K_{IC}$ . Verificou-se então que as faces da trinca se afastam antes da fratura (característica plástica), por Oliveira (2014).

### 1.3. Ensaio de CTOD

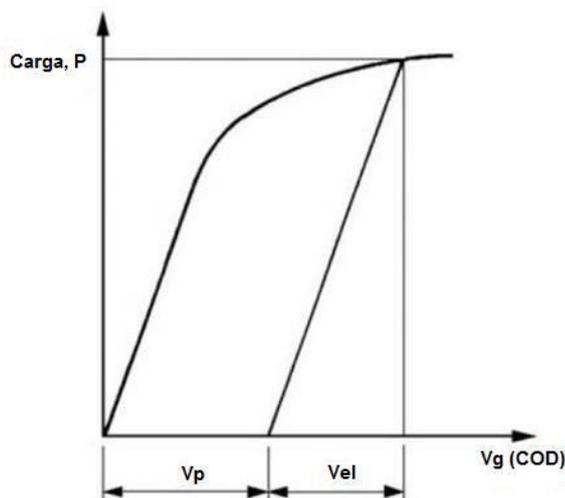
Segundo Martins (2012), o critério de CTOD assume que o início da fratura se dá quando a abertura da ponta da trinca atinge um determinado valor. A Fig. 2 demonstra a representação da abertura da ponta da trinca. Testes subsequentes confirmaram essa ideia, ficando esse parâmetro amplamente conhecido para a avaliação do processo de fratura de materiais elasto-plásticos.

Figura 2. Representação da abertura na ponta da trinca. (Adaptado de Anderson, 2005)



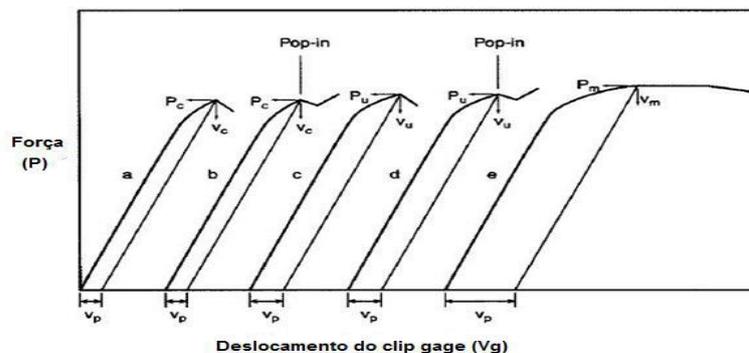
Com o intuito de se aplicar esse modelo para as condições elasto-plásticas, o valor total de CTOD é separado em uma componente elástica e uma plástica. A componente plástica é determinada a partir da parcela plástica do valor do COD (Crack Opening Displacement), e a componente elástica é calculada pelo fator de intensidade de tensões  $K$ . O “ $V_p$ ” é o componente plástico e o “ $V_{el}$ ” é o componente elástico do COD, obtido a partir do gráfico “Carga X COD”, considerando como “ $P$ ” a carga máxima e “ $V_g$ ” o deslocamento do clip gage, de acordo com a Fig. 3, conforme Martins (2012).

Figura 3. Obtenção do  $V_p$  e  $V_{el}$  a partir do gráfico “Carga X COD”. (Adaptado de Standard, 1991)



A Fig. 4 mostra os possíveis gráficos de carga versus abertura da trinca que vão ser adquiridos no ensaio. O CTOD crítico ( $\delta_c$ ) acontece quando se registra pouca deformação plástica, é o caso dos modelos a e b. O CTOD ( $\delta_u$ ) apresenta uma propagação de trinca estável, é o caso dos modelos c e d. O último modelo CTOD ( $\delta_m$ ) se trata de uma propagação lenta de trinca estável de acordo com Standard (1991).

Figura 4. Modelos de gráficos de CTOD. (Adaptado de Standard, 1991)



## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

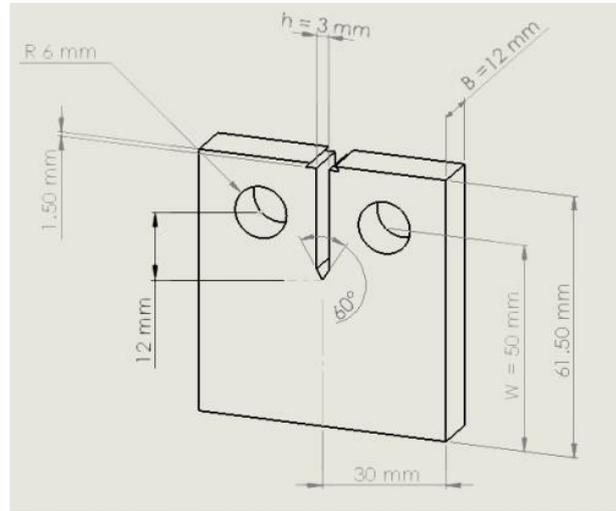
Para o ensaio de CTOD foi utilizada a região do cordão de solda circunferencial de um aço ASTM A516 Gr 55, empregado como vaso de pressão em uma indústria petrolífera a partir de três corpos de prova. De acordo com o trabalho de Rocha (2013), o resultado da análise química a partir do metal base do aço ASTM A516 Gr 55 mostrou que as chapas foram fabricadas de aço estrutural de baixo carbono ao manganês. Os valores percentuais dos elementos químicos encontrados na amostra utilizada estão apresentados na Tab. 1.

Tabela 1. Resultado da análise química da região do cordão de solda (% em peso)

Elemento	C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Al
Valor (%)	0,100	0,370	0,260	0,310	0,016	0,070	0,010	0,030

A norma britânica BS 7448 -1 orienta como devem ser executadas as etapas do ensaio de CTOD, bem como especifica as geometrias dos corpos de prova a serem utilizados. O corpo de prova utilizado no ensaio foi do tipo C(T) (Compact specimen) como está demonstrado em Standard (1991). A Fig. 5 apresenta as dimensões do corpo de prova.

Figura 5. Corpo de Prova C(T) dimensionado para ensaio de CTOD



A pré-trinca deve ter o comprimento mínimo de 1,3 mm ou 2,5% de W, sendo definido como tamanho mínimo o maior valor entre essas duas dimensões como orienta Standard (1991).

## 2.1 Ensaio Mecânicos

No ensaio de CTOD, foi executada uma fase inicial para obtenção da pré-trinca por carregamento sob fadiga. Em seguida ocorreu a propagação estável da trinca por esforço monotônico, até ser atingido o comprimento final da trinca. Posteriormente, o corpo de prova foi submetido a um novo carregamento cíclico (propagação instável da trinca) para análise da região de fratura conforme Standard (1991).

Os ensaios foram realizados com frequência de 15 Hz para todas as amostras. É executada uma fase inicial para obtenção da pré-trinca por carregamento sob fadiga. Em seguida acontece a propagação estável da trinca por esforço monotônico, até ser atingido o comprimento final da trinca. Posteriormente, o corpo de prova é submetido a um novo carregamento cíclico (propagação instável da trinca) para análise da região de fratura. A norma BS 7448-1 recomenda o uso da Eq. (2) para a obtenção do valor da força ( $F_f$ ) que deve ser empregada para que a pré-trinca de fadiga se inicie. A pré-trinca de fadiga foi estimulada até o tamanho de 3,0 mm de acordo com procedimento demonstrado em Standard (1991).

$$F_f = \frac{0,2B(Wa)^2(\sigma_{Ysp} + \sigma_{Tsp})}{(2W+a)} \quad (2)$$

Considerando:

B = Espessura do corpo de prova (mm);  
W = Comprimento do corpo de prova (mm);  
a = Distância da pré-trinca de fadiga + entalhe (mm);  
 $\sigma_{Ysp}$  = Tensão de escoamento (MPa);  
 $\sigma_{Tsp}$  = Limite de resistência à tração.

A força máxima utilizada para início da pré-trinca através dos ensaios foi de 6,53 kN. Após a abertura da pré-trinca, o carregamento monotônico fornece os valores de " $F_{máx}$ " e " $V_p$ " utilizados para o cálculo de CTOD que são extraídos do gráfico "Carregamento x COD". A Eq. (3) é utilizada para o cálculo do valor do CTOD ( $\delta$ ), por Standard (1991):

$$\delta = \left[ \frac{F_{máx}}{BW^{0,5}} f\left(\frac{a_0}{W}\right) \right]^2 \frac{(1-\nu^2)}{2\sigma_{Ysp}E} + \frac{0,46(W-a_0)V_p}{0,46W+0,54a_0+z} \quad (3)$$

Considerando:

$\delta$  = Deslocamento de abertura da ponta da trinca (mm);  
 $F_{m\acute{a}x}$  = Força máxima aplicada (kN);  
 $\nu$  = Coeficiente de Poisson;  
 $E$  = Módulo de elasticidade.

$a_o$  = Pré-trinca (mm);  
 $V_p$  = Componente plástico (mm);  
 $z$  = Distância do suporte do clip gage até o corpo de prova (mm).

A função  $f^*(\frac{a_o}{W})$  pode ser consultada na tabela 3 da norma Standard (1991) através de uma correspondência para a relação  $(\frac{a_o}{W})$ , ou pode calculada através da equação 5 dessa mesma norma. A equação utilizada para encontrar o valor da função nesse trabalho é apresentada como Eq. (4):

$$f^*\left(\frac{a_o}{W}\right) = \frac{(2 + \frac{a_o}{W})(0,886 + 4,64\frac{a_o}{W} - 13,32\frac{a_o^2}{W^2} + 14,72\frac{a_o^3}{W^3} - 5,6\frac{a_o^4}{W^4})}{(1 - \frac{a_o}{W})^{1,5}} \quad (4)$$

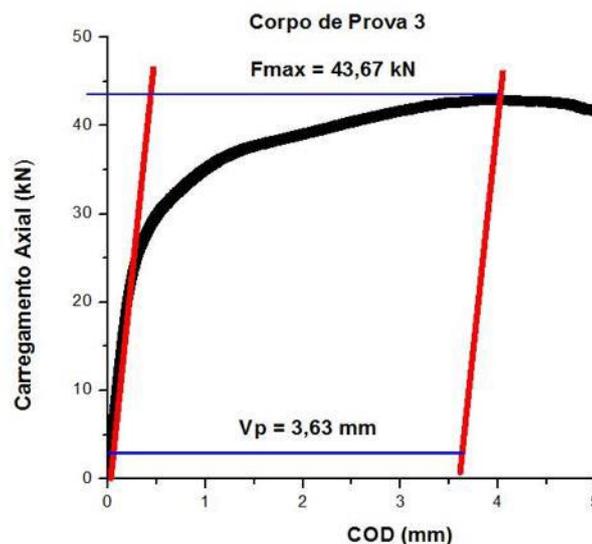
Para a validação do ensaio, se recomenda a realização de nove medições igualmente espaçadas na região da pré-trinca de fadiga até a ponta do entalhe ( $a_o$ ), e o cálculo da média dessas medições, mensuradas a partir da foto da região de fratura, sendo que a diferença entre o valor máximo e o mínimo dessas medidas não pode ultrapassar 10% do tamanho inicial da trinca de fadiga ( $a_o$ ), e a relação  $(\frac{a_o}{W})$  deve estar entre 0,45 e 0,55 conforme Standard (1991). Para a execução das medições foi realizada análise microscópica das regiões das fraturas dos materiais estudados através de microscópio eletrônico de varredura

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De acordo com os modelos da Fig. 4 desse trabalho, a força máxima encontrada através do ensaio foi do tipo “ $F_m$ ”, como pode ser observado na Fig. 6. Os corpos de prova foram fraturados em condição elasto-plástica, a determinação do valor de  $K_{IC}$  só seria possível através da abordagem da curva R como pôde ser constatado em Standard (1991).

Os gráficos dos ensaios resultaram nos valores de CTOD ( $\delta$ m) e estão dispostos em “Carregamento x COD”. Foi utilizado o método gráfico para medir o “ $V_p$ ”, a partir do registro do teste. Todas as amostras ensaiadas foram obtidas a partir da região longitudinal de solda circunferencial, e os resultados obtidos foram similares.

Figura 5. Gráfico Carregamento X COD – Corpo de prova 3



O procedimento de medição da extensão da trinca, recomendado na norma BS 7448 - 1 para a validação do ensaio está demonstrado na Fig. 7. A Tab. 2 apresenta o resultado dessas medições. O tamanho da extensão da trinca ficou entre 0,45 e 0,55 do valor de  $W$  e a diferença entre a maior e a menor das nove medições ( $\Delta L$ ) não ultrapassou 10% do valor da extensão média da trinca, atendendo aos parâmetros de validação do ensaio, o que fortalece a confiabilidade dos resultados. O cálculo da função  $f^*(\frac{a_o}{W})$  a partir da Eq. 4 desse trabalho resultou em um valor aproximado ao do método da

correlação com o valor da relação  $\frac{a_0}{W}$ , para encontrar o resultado da função, método que é recomendado na tabela 3 de Standard (1991), o que eleva a confiabilidade do resultado. A Tab. 3 apresenta os valores de CTOD de carga máxima ( $\delta_m$ ) que foram calculados através da Eq. (3).

Figura 6. Medição da extensão da trinca por fadiga – Corpo de prova 3

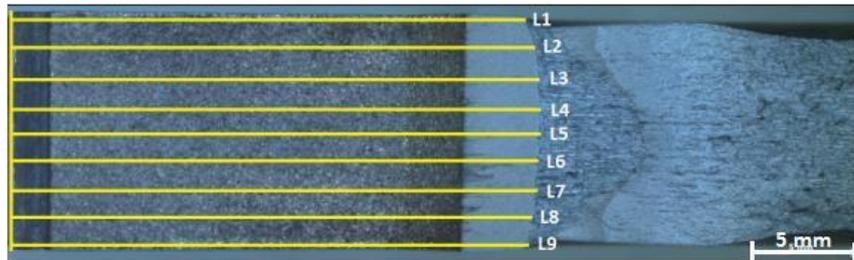


Tabela 2. Resultado das medições do comprimento da trinca por fadiga – Corpo de prova 3

	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	
<b>Comprimento (mm)</b>	24,49	24,90	25,20	25,25	25,31	25,25	25,05	24,79	24,64	
<b>Média (mm)</b>										24,98
<b><math>\Delta L</math> (mm)</b>										0,82

Tabela 3. Valores de CTOD de carga máxima ( $\delta_m$ ) para o aço ASTM A516 Gr 55

	<b>CTOD (<math>\delta_m</math>)</b>
<b>Corpo de prova 1</b>	1,289 mm
<b>Corpo de prova 2</b>	1,385 mm
<b>Corpo de prova 3</b>	1,268 mm
<b>Média</b>	1,314 mm
<b>Desvio Padrão</b>	0,0026 mm

Para o ensaio de CTOD, é possível que corpos de prova de região soldada apresentem valores superiores de  $V_p$  em relação a materiais da região de metal base, ou seja, apresentem maior tenacidade. Isso devido aos mecanismos de soldagem que provocam alívio de tensões e recristalizações, como observado em Barbosa (2011) e Oliveira (2014). Maiores valores de CTOD encontrados em materiais soldados podem ser acompanhados de patamares plásticos (carregamentos) menos significativos, se comparados aos patamares plásticos bem mais significativos do metal base, que decorre da forte restrição à evolução das deformações plásticas no metal de solda, segundo Almeida (2014). Os valores de CTOD encontrados são similares ao valor de CTOD encontrado para o aço X65Q API 5L ( $\delta_m = 1,25$  mm), classificado como material de boa resistência à propagação de trincas, de acordo com métodos de resistência à tenacidade à fratura empregados, análise de Souza (2011). O mesmo aço estudado nesse trabalho apresentou valores satisfatórios quando submetidos aos ensaios de  $da/dN \times \Delta K$ , que apresentou uma alta resistência à um fator intensidade de tensões que resultasse no início de uma propagação de trinca a partir de um defeito pré-existente, segundo Rocha (2013).

#### 4. CONCLUSÃO

O ensaio de CTOD para o aço ASTM A516 Gr 55 soldado não consegue prever valores de  $K_{IC}$  devido à sua ductilidade. Não foi observado nenhum valor significativo de pop-in nas amostras, o que extingue a necessidade de seu cálculo. Os valores satisfatórios de CTOD ( $\delta_m$ ) para a região de solda devem estar relacionados às alterações microestruturais benéficas ao aumento da tenacidade à fratura que são provocadas pelo processo de soldagem. O material estudado apresenta boas características de resistência à propagação de trincas por fadiga a partir de um defeito pré-existente, recomendado para aplicações industriais que necessitam desse perfil.

#### 5. REFERÊNCIAS

ALMEIDA, J. G. de. Análise da Influência do Hidrogênio na Tenacidade Quase Estática de Juntas Soldadas de Aços ARBL. Tese (Doutorado) — Universidade Federal da Paraíba, Julho 2014. ANDERSON, P. T. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. Third edition. [S.l.]: Taylor & Francis Group, LLC, 2005.

BARBOSA, V. S. Investigação Experimental da Tenacidade em Tubos de Aço API 5LX70 Soldados Pelo Método HF/ERW. Dissertação (Monografia) — UNESP – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Dezembro 2011.

MANDAI, J. T. Determinação de Parâmetros para Crescimento de Trincas em Ligas Metálicas: Modelagem e Experimentação. Dissertação (Mestrado) — Universidade De Brasília, Junho 2010.

MARTINS, I. P. Curvas J-R e CTOD-R de Aços Estruturais Segundo Normas ASTM e BSI. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Setembro 2012.

OLIVEIRA, O.M. D. Tenacidade à Fratura em Elementos Soldados no Mastro de Sondas de Perfuração. Dissertação (Monografia) – Universidade Federal de Sergipe, Janeiro 2014.

ROCHA, M. T. de A. Análise da integridade estrutural através do ensaio da/dN x  $\Delta K$  do aço ASTM 516 Gr 55 aplicado como vaso de pressão petroquímico. Dissertação (Monografia) — Universidade Federal de Sergipe, Abril 2013.

SOARES, P. A. Determinação da Tenacidade à Fratura do Aço APIX65 Utilizado em Tubos na Indústria de Petróleo e Gás. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Espírito Santo, 2011.

SOUZA, F. H. L. Avaliação da Tenacidade à Fratura pela Técnica de CTOD para o Tubo de Aço X65Q API 5L Hidrogenado em Ambiente com H<sub>2</sub>S. Dissertação (Mestrado) — Pontífica Universidade Católica de Minas Gerais – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Julho 2011.

STANDARD, B. BS 7448 - Fracture Mechanics toughness tests. [S.l.], 1991.

STROHAECKER, P. R. Mecânica da Fratura, 2007.

## **6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES**

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.