

# ANÁLISE COMPARATIVA DAS TÉCNICAS DE TOFD, QUEDA DE POTENCIAL E COMPLIANCE NO MONITORAMENTO DE CRESCIMENTO DE TRINCA EM UMA SOLDA EM UM AÇO INOXIDÁVEL SUPERDUPLEX UNS S32750<sup>1</sup>

Marcelo de Freitas Lopes<sup>2</sup>  
Felipe Wu Tzong Yeh<sup>3</sup>  
Jefferson Haag<sup>2</sup>  
Eliakin Abreu<sup>4</sup>  
Thomas Gabriel Rosauero Clarke<sup>5</sup>

## Resumo

Aplicação de aços inoxidáveis superduplex em ambientes marinhos vêm crescendo devido a sua combinação de elevada resistência a corrosão e resistência mecânica. Neste trabalho, um corpo-de-prova do tipo “*single edge bending*” SE(B), foi usinado a partir de soldas de dutos de aço inox superduplex soldados pelo processo TIG e um ensaio de crescimento de trinca por fadiga foi realizado a partir da raiz da solda. O crescimento da trinca foi monitorado pela técnica ultrassônica “*time of flight diffraction*” TOFD, Queda de Potencial Elétrico (QP) e “*compliance*”. O perfil de profundidade da trinca ao longo do ensaio foi levantado comparando os três métodos analisando as vantagens e limitações.

**Palavras-chave:** TOFD; Queda de potencial; Compliance; Crescimento de trinca.

## COMPARISON OF TECHNIQUES TOFD, POTENTIAL DROP OF THE COMPLIANCE MONITORING GROWTH TRINCA IN A STAINLESS STEEL WELD IN A SUPERDUPLEX UNS S327501

## Abstract

Application of super duplex stainless steels in maritime environment have been increasing due to their high corrosion and mechanical resistance combination. In this work, a single edge bending (SE(B)) specimen was cut from pipe welds of super duplex stainless steel welded with TIG process and a fatigue crack growth was performed from the root of the weld. The crack growth during the fatigue test was measured and compared with ultrasonic time of flight diffraction (TOFD), potential drop (QP) and compliance techniques. Depth of the crack profile was obtained with the 3 methods along with advantages and limitations of each one.

**Key words:** TOFD; Potential drop; Compliance; Crack growth.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

<sup>2</sup> Engenheiro Metalúrgico, Mestrando, Ciências dos Materiais, PPG3M, Laboratório Lamef, UFRGS, RS, Brasil.

<sup>3</sup> Engenheiro Metalúrgico, Doutorando, Ciências dos Materiais, PPG3M, Laboratório Lamef, UFRGS, RS, Brasil.

<sup>4</sup> Acadêmico, Engenharia Metalúrgica, Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.

<sup>5</sup> Engenheiro de Materiais, Dr. Professor. Laboratório de Metalurgia Física, UFRGS, RS, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

Aços inoxidáveis superduplex são ligas que apresentam uma microestrutura austeno-ferrítica com fração média de cada fase de aproximadamente 50%. Esta microestrutura é responsável pelas excelentes propriedades mecânicas, unindo alto limite de escoamento e alta tenacidade. Apresenta também, elevada resistência a corrosão em ambientes agressivos que contenham, por exemplo, o íon cloreto e os gases CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S. Entretanto, pode ser susceptível ao fenômeno de trincamento sob tensão induzido pelo hidrogênio, devido a combinação de proteção catódica e solitação mecânica. Ainda, por apresentar um estado termodinâmico metaestável, os aços super duplex podem sofrer precipitação de fases frágeis quando expostos a ciclos térmicos de temperaturas elevadas.<sup>(1)</sup>

Este material é utilizado em grande proporção pela indústria do petróleo e gás, principalmente, em dutos e válvulas em ambientes marinhos,<sup>(2,3)</sup> onde é inerente o tensionamento em fadiga que somados a proteção catódica e/ou a processos de soldagem podem originar a nucleação e propagação de trincas. Assim, é importante avaliar o comportamento de defeitos como trincas tanto na junta soldada quanto no material base. A abordagem da mecânica da fratura é a mais indicada para os cálculos de integridade estrutural desses componentes, já que esta correlacionam a tensão aplicada e a geometria do defeito às propriedades do material.<sup>(4)</sup> Valores quantitativos de tenacidade na região do metal de solda possibilitam projetos que combinam segurança e viabilidade econômica para esse tipo de duto.

O presente trabalho visa monitorar o crescimento de uma trinca em fadiga em um corpo de prova tipo SE(B) de uma junta soldada de aço inox superduplex UNS S32750. Além disso, objetiva-se averiguar a resolução e exatidão das técnicas TOFD e Queda de Potencial e a aplicabilidade dessas duas técnicas no controle do crescimento de trinca em ensaios de fadiga. As técnicas utilizadas neste trabalho são descritas a seguir.

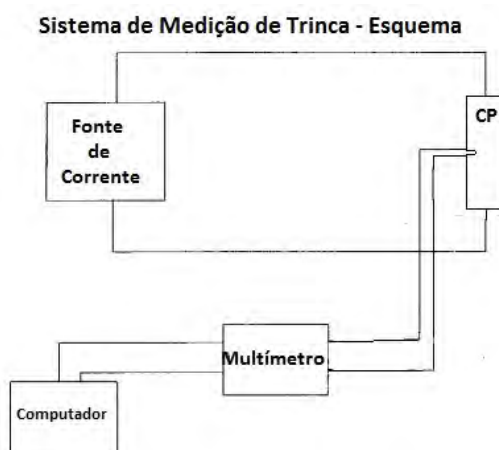
### 1.1 *Time of Flight Diffraction (TOFD)*

Técnica de ultrassom que se baseia na utilização de um par de transdutores ultrassônicos, sendo um dos transdutores o emissor de ondas ultrassônicas e o outro o receptor dessas ondas. As ondas são incididas no material em ângulo, com auxílio de uma sapata de acrílico. A técnica funciona pelo fato de que a ponta de uma possível trinca no interior do material produz difração das ondas mecânicas que percorrem o material. Com a captação dessa difração é possível medir a profundidade da trinca com o valor de tempo de voo das ondas. As leituras dos sinais de ultrassom foram feitas com auxílio do software “usscope”, que também possibilita fazer a gravação dos sinais durante o crescimento de uma trinca. A principal limitação da técnica é que na medida de trincas que se aproximam da superfície, onde se encontram os transdutores, o sinal da onda lateral (que percorre a superfície do material) e o sinal do defeito se confundem. Entretanto, este aspecto pode ser minimizado alterando-se a configuração do ensaio ou utilizando técnicas de processamento de sinais.<sup>(5)</sup>

### 1.2. *Queda de Potencial Elétrico (QP)*

Consiste em aplicar uma corrente elétrica controlada ao longo do corpo de prova. Esta corrente pode ser contínua ou alternada. O valor da tensão elétrica aplicada

nos terminais do corpo de prova responde a lei de Ohm, ou seja, depende da corrente que circula através do corpo e a resistência do próprio corpo de prova. A resistência do corpo de prova é inversamente proporcional à área do mesmo, ou seja, quanto menor for a seção do corpo, maior será a resistência oferecida ao passo da corrente. Na região onde estiver presente uma trinca, o corpo de prova apresentará uma redução da seção. Esta redução de seção aumenta a resistência. Se o valor de corrente é constante, então o potencial medido nessa região aumenta conforme diminui a seção, ou seja, à medida que a trinca crescer, o potencial elétrico medido aumenta devido à redução da seção.<sup>(6)</sup> A Figura 1 mostra a configuração do sistema de medição por QP.



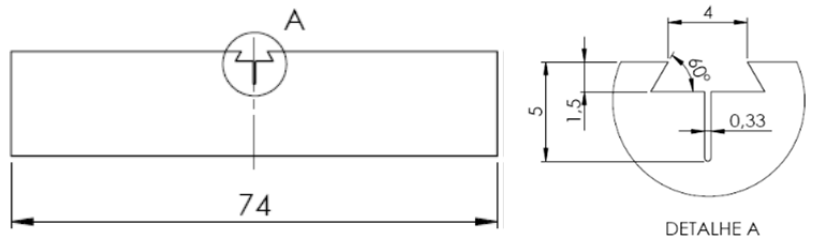
**Figura 1.** Diagrama esquemático do sistema de medição de trinca por QP.

### 1.3 Compliance

A técnica de *Compliance* baseia-se em medir a variação da força pela variação do deslocamento de abertura na boca do entalhe (CMOD), sendo esta relação definida com a rigidez do material. Através de um equacionamento matemático, determinado para cada configuração de geometria (corpos de prova do tipo C(T) e SE(B), por exemplo), é possível obter o tamanho da trinca instantaneamente, desde que se conheçam as dimensões do corpo de prova (largura, espessura, etc.). Sendo esta uma técnica amplamente consolidada, a compliance já está presente em diversas normas internacionais, como a ASTM E647<sup>(7)</sup> e a ISO 12108.<sup>(8)</sup>

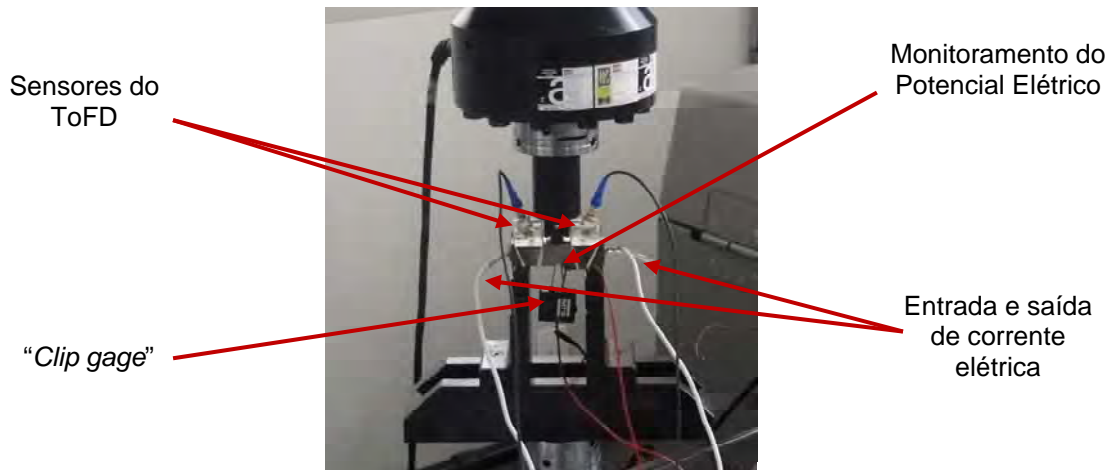
## 2 MATERIAIS E METODOS

Um corpo de prova do tipo SE(B) com dimensões de 18,2mm de espessura e 74 mm de largura, conforme mostra a Figura 2, foi usinado de um duto soldado de aço inox superduplex de forma a nuclear e propagar uma trinca de fadiga a partir da raiz da solda. O ensaio de propagação de trinca por fadiga (da/dN) foi realizado em flexão três pontos, utilizando uma frequência inicial de 20Hz em uma máquina servo-hidráulica da marca MTS modelo 810. O procedimento experimental foi realizado de acordo com a norma ASTM E647-11,<sup>(7)</sup> sendo a amplitude do fator intensidade de tensões ( $\Delta K$ ) utilizado no início do ensaio de 12 MPa.m<sup>1/2</sup> e a razão de carregamento mantida constante durante o ensaio (R=0,1).



**Figura 2.** Desenho do corpo de prova ensaiado (a) e detalhe do entalhe para nucleação da trinca de fadiga (b).

Para eliminar quaisquer efeitos de geometria ou encruamento a amostra foi pré-trincada a partir do entalhe por 0,85mm. Após, instrumentada visando acompanhar o crescimento da trinca com as técnicas de *Compliance*, TOFD e QP. Os transdutores do TOFD (emissor e receptor) foram acoplados na superfície oposta a propagação da trinca, a fim de captar o sinal ultrassônico difratado pela ponta da trinca. A distância dos transdutores foi definida a fim de centralizar a energia sônica a 2/3 de profundidade com relação a espessura. Para o ensaio de queda de potencial foi usada uma corrente contínua de 12 ampéres através da seção do corpo de prova, sendo a aquisição de um valor a cada dez segundos. A variação do potencial em função do crescimento da trinca foi obtido através de um multímetro conectado nas bordas do entalhe usinado. A Figura 3 mostra a configuração do ensaio.



**Figura 3.** Configuração do ensaio.

A equação usada para aquisição do tamanho de trinca em função da variação do potencial foi:

$$a = \frac{2W}{\pi} \cos^{-1} \sqrt{\frac{1 - B_1^2}{B_2 - B_1^2 B_3}}$$

Onde:

- $W$  - altura do corpo de prova;
- $\pi$  - constante;
- $f$  - distância da aquisição do potencial ao plano da trinca;
- $d$  - distância da aplicação da corrente elétrica ao plano da trinca;
- $v_{cal}$  = potencial inicial aquisitado;
- $a_{cal}$  = tamanho inicial da trinca;

$$B_1 = \frac{e^{v/2k} - 1}{e^{v/2k} + 1}$$

$$B_2 = \sec h^2 \frac{\pi f}{2W}$$

$$B_3 = \sec h^2 \frac{\pi d}{2W} W$$

$$k = \frac{v_{cal}}{2 \ln[\text{mod}(\frac{\alpha + \beta}{\alpha - \beta})]}$$

$$\alpha = \sqrt{\text{mod}[\sec h^2 \frac{\pi f}{2W} \cos^2 \frac{\pi a_{cal}}{2W} - 1]}$$

$$\beta = \sqrt{\text{mod}[\sec h^2 \frac{\pi d}{2W} \cos^2 \frac{\pi a_{cal}}{2W} - 1]}$$

Durante o ensaio também foi determinado o comportamento de propagação da trinca no metal de solda, através da análise do seu crescimento em função do número de ciclos de fadiga (curva a versus N), onde é possível obter os coeficientes da Lei de Paris.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As três técnicas de medição apresentaram medidas de tamanho da trinca semelhantes, conforme pode ser observado na Figura 4. Foi possível acompanhar o crescimento da trinca a partir da pré-trinca por aproximadamente 6,7mm (metade do corpo de prova). Essa limitação se deu devido ao efeito de fundo de escala do TOFD, onde o sinal da onda lateral se confundiu com o sinal difratado pela trinca.

Durante todo o ensaio a diferença entre a técnica de TOFD e o *compliance* não foi superior a 0,53mm e a diferença entre a técnica de QP e o *compliance* não foi superior a 0,59mm. Logo, as duas técnicas (TOFD e QP) apresentaram dispersões em relação à técnica de base comparativa, *compliance*. Sendo que essa diferença pode ser significativa dependendo da aplicação em que se deseja monitorar o crescimento de trinca. Notou-se que com o aumento da trinca os valores medidos pelas técnicas de QP e *Compliance* tendem a convergir. Por outro lado, é importante salientar que mais estudos são necessários para se obter uma maior amostragem e assim quantificar as bandas de incerteza de medição.

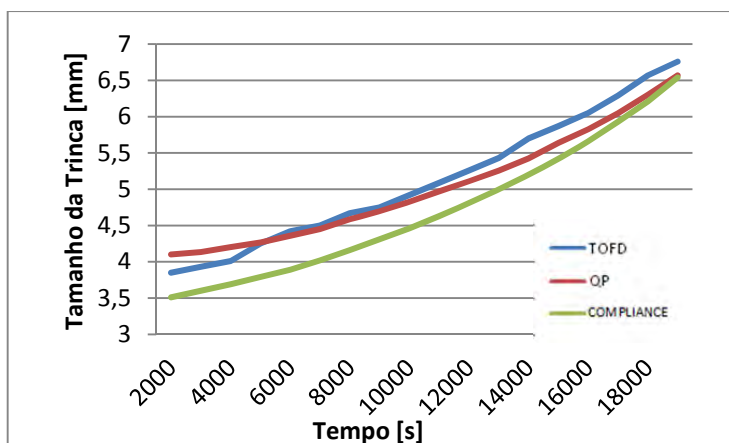


Figura 4. Comparativo entre as técnicas de monitoramento da trinca.

A partir dos dados de tamanho de trinca foi realizada a regressão linear para obtenção da taxa de propagação e trincas ( $da/dN$ ) e a amplitude do fator intensidade de tensões ( $\Delta K$ ). A Figura 5 mostra a curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$  da junta soldada. A propagação de trinca é uma propriedade muito importante nos códigos de projeto para calcular a vida remanescente de estrutura em que defeitos do tipo trinca estão presentes. Apesar da baixa amostragem obtida no ensaio, os valores dos coeficientes da lei de Paris, apresentados na Tabela 1, estão de acordo com os valores encontrados na literatura para ligas similares a estudada neste trabalho.<sup>(9)</sup>

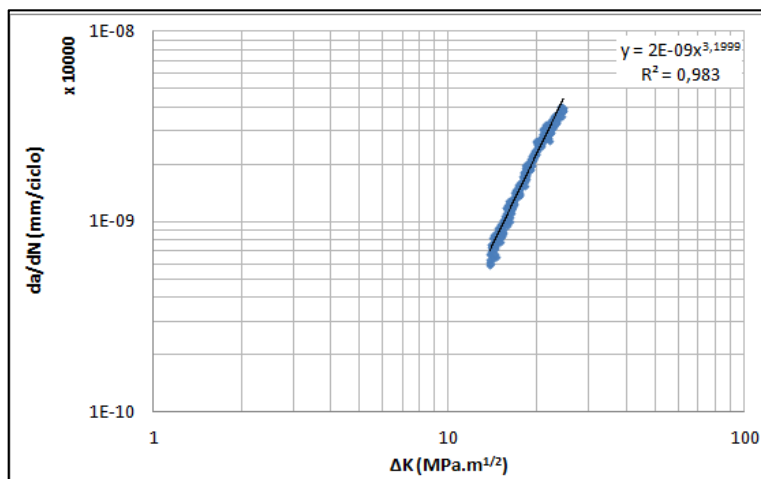


Figura 5. Curva  $da/dN$  versus  $\Delta K$ .

Tabela 1. Coeficientes da Lei de Paris

C	n	R-quadrado
1,57E-09	3,20	0,983

## 4 CONCLUSÕES

O crescimento da trinca foi registrado de forma satisfatória durante o ensaio pela técnica TOFD. Para a configuração adotada foi possível acompanhar o crescimento da trinca até aproximadamente metade da espessura do corpo de prova.

A equação proposta para a aquisição dos dados da Queda de Potencial mostrou-se satisfatória. O tamanho da trinca obtido com ela tendeu a convergir com os dados do “*compliance*” à medida que aumentava a trinca.

As técnicas de Queda de Potencial e TOFD se mostraram aptas a serem aplicadas no acompanhamento do crescimento de trincas em corpos de prova do tipo SE(B), sendo a diferença medida do “*compliance*” inferior a 0,53mm e 0,59mm para a técnica TOFD e para a técnica de QP, respectivamente.

As propriedades levantadas com os dados de mecânica de fratura estão coerentes com os encontrados na literatura.

## REFERÊNCIAS

- 1 ASM. Specialty handbook “stainless steels”. Ohio: American Society for Metals; 1994.
- 2 S.S.M. Tavares, J.M. Pardal, L.D. Lima, I.N. Bastos, A.M. Nascimento, J.A. de Souza, Characterization of microstructure, chemical composition, corrosion resistance and toughness of a multipass weld joint of superduplex stainless steel UNS S32750, Materials Characterization 58 (2007) 610-616.

- 3 V. Di Cocco, E. Franzese, F. Iacoviello, S. Natali. 22 Cr 5 Ni duplex and 25 Cr 7 Ni superduplex stainless steel: Hydrogen influence on fatigue crack propagation resistance. *Engineering Fracture Mechanics* 705–714. 2008.
- 4 ANDERSON, T. *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Thrid Edition. New York: CRC Press,2005.
- 5 R. R. Souza, Dimensionamento de defeitos em blocos de aço carbono através da técnica TOFD, Dissertação de Mestrado, UFRGS, Porto Alegre (2009).
- 6 Cooke R J and Robinson J L, 'Some further considerations of the potential drop method for measuring crack length.', Department of Physical Metallurgy and Science of Materials, Research Report, University of Birmingham (1973).
- 7 ASTM E-647,2008: Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates; American Society for Testing of Materials (ASTM) International, USA.
- 8 ISO 12108:2012, "Metallic materials – Fatigue testing – Fatigue crack growth method"; International Organization for Standardization.
- 9 Holtam,C,2010: 'Structural Integrity Assessment of C-Mn Pipeline Steels Exposed to Sour Enviroments',Loughborough University.