

CURVAS DE RESISTÊNCIA CTOD-R DA INTERFACE METAL-CLAD DE TUBOS API 5L X52 CLADEADOS POR SOLDAGEM COM INCONEL 625

CON-2016-0933

Resumo: Este trabalho teve o objetivo de determinar e avaliar as curvas de resistência ao crescimento de trincas (CTOD-R) na interface substrato/revestimento de um tubo de aço API 5L X52 revestido internamente por Inconel 625 mediante processo de soldagem TIG (GTAW) multipasse. Para isso, foi utilizado um segmento de tubo de 168 mm de diâmetro externo e 22,5 mm de espessura que foi recoberto por uma camada de 15 mm de Inconel 625 na parede interna do mesmo. Corpos de prova de tração foram obtidos tanto do substrato quanto do recobrimento, assim como corpos de prova compactos de tração (C(T)) para testes de fratura, com entalhe na interface em orientação RL. Os resultados indicam que a região de interface substrato/recobrimento apresenta tenacidade à fratura elevada, não tendo sido detectada alguma região com baixa tenacidade na amostra avaliada.

Palavras-chave: Aço API 5L X52, Inconel 625, Tenacidade à fratura, CTOD e Soldagem de revestimento

1. INTRODUÇÃO

O petróleo produzido em alguns campos, dentre eles aqueles do pré-sal brasileiro, apresenta um certo conteúdo de substâncias corrosivas, tais como CO₂, H₂S, etc. A produção e processamento de petróleo cru nessas condições requer tubulações e equipamentos resistentes tanto aos esforços mecânicos quanto à corrosão, conforme abordado por Vargas-Arista *et al.* (2011). Segundo afirma Mansour *et al.* (2015), a viabilidade técnica apropriada para atender a estas condições consiste no uso de materiais altamente resistentes à corrosão, que contêm e sua composição elevado teor de Cr ou Ni que são caras e apresentam problemas de soldabilidade, como relatado por El-Reedy *et al.* (2012) e Silva *et al.* (2013). Uma alternativa neste caso é a utilização de tubulações de aço API revestidos internamente com ligas resistentes à corrosão. Nessa configuração o aço API tem a função estrutural, segundo a norma API 5L (2007), enquanto que o revestimento é responsável apenas pela resistência à corrosão. O material mais utilizado no revestimento de tubos com CRAS normalmente são as superligas de Níquel, dentre elas o Inconel 625, como relata Abioye *et al.* (2015) e Xu *et al.* (2013), em estudo neste trabalho. O processo de fabricação do revestimento pode ser realizado por diferentes processos, mas a soldagem de revestimento (*welding overlay*) é o mais utilizado industrialmente em razão dos baixos custo de fabricação.

Entre o metal de base e o revestimento há uma região denominada de interface, que é formada durante soldagem e que pode conter regiões com microestruturas frágeis. Assim, a tenacidade à fratura dessa região é um parâmetro de suma importância para controlar a qualidade da interface substrato/recobrimento e prevenir falhas que possam afetar a integridade estrutural. Com esse objetivo, a tenacidade à fratura na interface foi determinado experimentalmente através da mecânica da fratura elastoplástica utilizando o CTOD de iniciação, obtidos a partir da curva de resistências teórica CTOD- Δa utilizando corpos de prova de tração compacto C(T) com entalhe posicionado na interface. Os corpos de prova a serem utilizados nos ensaios de fratura e de tração foram retirados da amostra tubular de aço API 5L X52 (substrato) internamente revestida por Inconel 625 por soldagem TIG (GTAW) orbital.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Materiais

O material utilizado foi um tubo de aço revestido pelo método de deposição por soldagem TIG orbital. O tubo utilizado como substrato é de aço de baixo carbono API 5L X52, segundo API 5L, com diâmetro externo de 168 mm, 22,5 mm de espessura e comprimento de 150 mm. Esse aço é utilizado nas indústrias ligados ao petróleo. O revestimento interno do tubo foi feito de uma superliga à base de Níquel, Inconel 625, conforme recomenda Donachie *et al.* (2002). As composições químicas nominais do aço API 5LX52, fornecido pela norma API 5L e do Inconel 625, fornecido por Donachie *et al.* (2002), estão apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1. Composição química nominal (wt%) do aço API 5L X52 e do Inconel 625.

Material	C	Mn	Si	Cr	Ni	Mo	S	Cu	Ti	Nb	Al	Fe
API X52	0,24	1,4	0,45	0,3	0,3	0,15	0,009	0,5	-	-	0,032	-
Inconel 625	0,01	0,06	0,07	21,7	60,55	8,90	<0,001	-	0,28	3,47	0,19	4,53

O revestimento foi aplicado por soldagem mediante processo TIG orbital em passes múltiplos e eletrodo de arame AWS ER-NiCrMo-3 de 2 mm de diâmetro, até atingir uma espessura de aproximadamente 15 mm. Para isso foram necessários 8 passes de soldagem, o primeiro com aproximadamente 1 mm de espessura e os 7 restantes com aproximadamente 2 mm. Em produtos comerciais o revestimento interno apresenta usualmente uma espessura aproximada de 4 mm.

2.2. Corpo de Prova

Da amostra tubular revestida internamente foram removidos via eletroerosão a fio seis barras de seção circular tanto do substrato quanto do recobrimento, para fabricar seis corpos de prova de tração nas dimensões mostrada na Fig. 1, conforme a norma ASTM E8/E8M (2009). Adicionalmente, duas barras retangulares contendo aproximadamente 50% de substrato e 50% de recobrimento foram também retiradas para a fabricação de corpos de prova compactos de tração C(T) para testes de fratura segundo ASTM E1820-01 (2001). A Fig. 1 mostra o layout de corte das barras a serem utilizadas para fabricar os corpos de prova de tração e de fratura C(T), na mesma está presente tanto os valores dimensionais da amostra tubular quanto das barras e dos corpos de prova normalizados a serem fabricados. As barras retangulares proporcionou que fossem fabricados oito corpos de prova C(T) com espessura $B=12,5$ mm e largura $W=25$ mm, como mostra a Fig. 2. Nos corpos de prova C(T) o entalhe foi posicionado na região mais próxima da interface substrato/revestimento e fabricado por eletroerosão à fio.

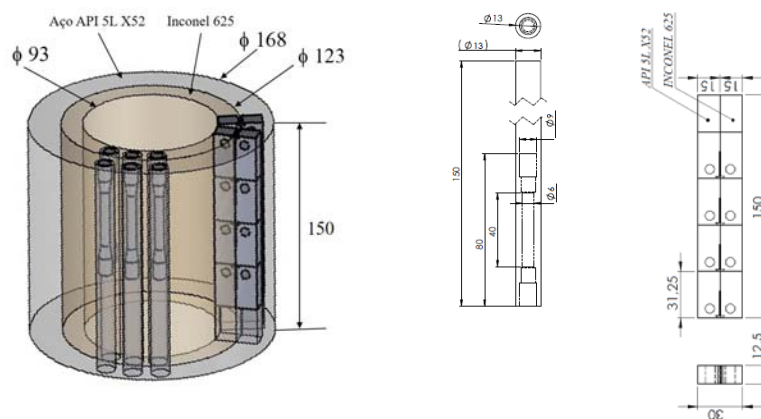


Figura1. Layout de usinagem da amostra tubular e dimensões normalizadas dos corpos de prova.

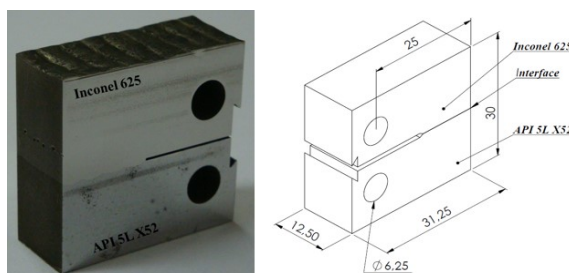


Figura 2. Corpo de prova de tensão compacto C(T) [4]

2.3. Corpo de Prova de Tração

As propriedades mecânicas de tração do substrato e do revestimento foram avaliadas em temperatura ambiente (25°C) utilizando três corpos de prova de cada material. Os testes de tração foram realizados de acordo com a norma ASTM E8/E8M (2009), utilizando-se uma taxa de deformação de $5 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$. Os testes foram realizados em uma máquina EMIC DL 23-300, com capacidade de carga de 300 kN e um extensômetro axial EMIC EE09.

2.4. Entalhe dos Corpos de Prova de Fratura e Pré-trincamento por Fadiga

O entalhe dos seis corpos de prova de tensão compacto C(T) foi realizado por eletro-erosão à fio, sendo a ponta do entalhe posicionado na interface. Após de entalhados os corpos-de-prova foram pré-trincados por fadiga seguindo as recomendações das normas BS 7448-91 (1991) e ASTM 1820-01 (2001). Essa operação foi realizada em uma máquina servo-hidráulica Instron 1332, equipada com uma célula de carga Instron 2527-100 com capacidade máxima de ± 50 kN. A carga máxima de pré-trincamento foi de 6.85 kN. O comprimento mínimo da pré-trinca (nas superfícies do corpo de prova) foi de aproximadamente 1,5 mm.

2.5. Curvas de Resistência CTOD-R

O método das descargas parciais foi utilizado para determinar o comprimento de trinca ao longo dos testes. A partir de descargas parciais realizadas regularmente ao longo do teste é possível correlacionar as inclinações dessas descargas nos registros P-CMOD com o comprimento instantâneo da trinca. A norma ASTM E1820-01 (2001) disponibiliza equações para determinar o comprimento de trinca para a geometria C(T) instrumentada em linha de carga. No caso em questão, esse tipo de instrumentação não foi possível pelas dimensões reduzidas dos corpos de prova. Assim sendo, os valores de CMOD foram, no nosso caso, medidos na face externa dos corpos de prova. Equações que relacionam o CMOD medido na face externa de corpos de prova C(T) com o comprimento da trinca são fornecidas pela norma ASTM E399-06 (2006). Assim, o comprimento da trinca em cada descarga foi calculado de acordo com as seguintes equações:

$$\frac{a_i}{W} = \left[1 - 4.500U + 13.157U^2 - 172.551U^3 + 879.944U^4 - 1514.671U^5 \right] \quad (1)$$

$$U = \frac{1}{1 + \sqrt{E'BC_i}} \quad (2)$$

$$E' = \frac{E}{(1 - \nu^2)} \quad (3)$$

Na Eq. (2) o valor C_i é a razão $\Delta\text{CMOD}/\Delta P$ (*compliance*) de cada ciclo de descarga parcial. Os valores de CTOD em cada descarga foram calculados a partir do registro P-CMOD de acordo com a equação proposta pela norma ASTM E1820-01 (2001), já que a mesma é baseada no modelo da dobradiça plástica (*plastic hinge*), o que foi considerado mais apropriado para o cálculo do CTOD na interface. Assim sendo, o CTOD foi calculado a partir das seguintes expressões:

$$\delta_{(i)} = \frac{K_{(i)}^2 (1 - \nu^2)}{2\sigma_{YS}E} + \frac{\left[r_{p(i)} (W - a_{(i)}) + \Delta a \right] \nu_{p(i)}}{\left[r_{p(i)} (W - a_{(i)}) + a_{(i)} + z \right]} \quad (4)$$

$$r_{p(i)} = 0,4 \left(1 + \alpha_{(i)} \right) \quad (5)$$

$$\alpha(i) = 2 \left[\left(\frac{a_{(i)}}{b_{(i)}} \right)^2 + \frac{a_{(i)}}{b_{(i)}} + \frac{1}{2} \right]^{0,5} - 2 \left(\frac{a_{(i)}}{b_{(i)}} + \frac{1}{2} \right) \quad (6)$$

Sendo $\alpha_{(i)}$ o comprimento da trinca e $b_{(i)}$ o comprimento do ligamento remanescente em cada descarga.

As curvas de resistência teóricas CTOD-R foram ajustadas a partir dos pares de pontos CTOD- Δa qualificados segundo as recomendações da norma ASTM E1820-01 (2001), segundo a Eq. (7):

$$\delta_q = C_1 \left(\frac{\Delta a}{k} \right)^{C_2} \quad (7)$$

onde C_1 e C_2 são obtidos por regressão linear pelo método dos mínimos quadrados.

Os valores δ_q (valores candidatos ao CTOD de iniciação δ_i) foram obtidos a partir da interseção de uma linha auxiliar paralela à *blunting line* calculada com as propriedades mecânicas do revestimento e correspondente a crescimento estável de trinca de 0.2 mm.

2.6. Determinação do posicionamento da pré-trinca em relação ao crescimento estável de trinca

Para identificar o posicionamento da pré-trinca e a propagação de trinca durante o crescimento estável, após os corpos de prova terem sido fraturados para expor suas superfícies de fratura foi realizado um corte transversal no plano médio dos corpos de prova, perpendicular ao plano da trinca, como mostra a Fig. 3. O plano de observação foi preparado mediante lixamento e polimento e observado em microscópio metalográfico Olympus BX60M.

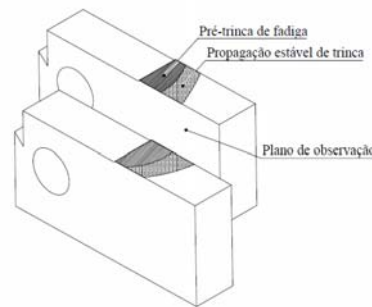


Figura 3. Plano médio do corpo de prova de tração compacto C(T) para análise de propagação de trinca

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1. Ensaio de Tração

A Fig. 4 apresenta os registros experimentais dos testes de tração do aço API 5L X52 (substrato) e do Inconel 625 como depositado (revestimento). A Tab. 2 apresenta as propriedades mecânicas em tração avaliadas a partir desses testes.

De acordo com os valores apresentados na Tab. 2, o aço do tubo testado não atinge os requisitos mínimos da norma API 5L (2007) no que diz à tensão limite de escoamento, ficando abaixo em 4,82 % do valor definido pela norma (359 MPa). O motivo dessa não conformidade pode ser a diminuição no limite do escoamento do aço do tubo como resultado do processo de revestimento, já que o mesmo foi realizado em 8 passes de solda com aporte térmico elevado e os CPs foram retirados de uma região próxima à interface. Os valores referentes ao Inconel 625 como depositado são similares aos reportados por Yeni *et al.* (2006) (481 MPa e 858 MPa para escoamento e ruptura, respectivamente), que estudaram esse material depositado por soldagem.

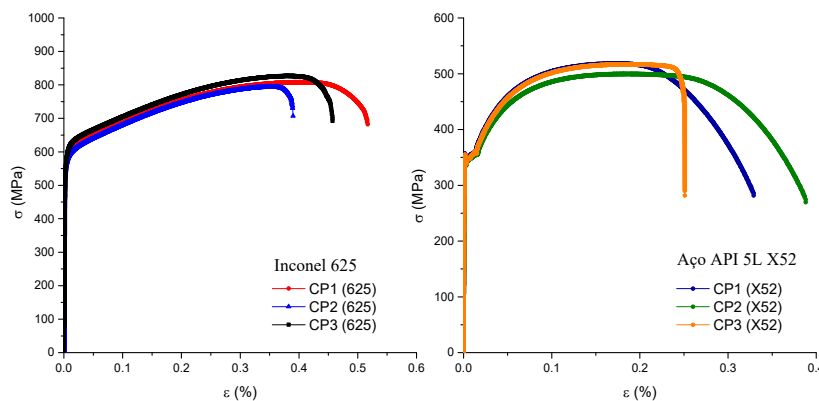


Figura 4. Curvas tensão-deformação do substrato (API 5L X52) e do revestimento (Inconel 625).

Tabela 2. Propriedades mecânicas em tração do substrato e do revestimento

Material	σ_y (MPa)	σ_{UTS} (MPa)	E (GPa)
Aço API 5L X52 (substrato)	$341,68 \pm 3,39$	$511,69 \pm 10,36$	206,1
Inconel 625 (revestimento)	$558,05 \pm 3,18$	$801,01 \pm 6,99$	205,1

3.2. Resultados de Tenacidade à Fratura

Dos oito corpos de prova testados dois resultados foram descartados por problemas durante o pré-trincamento. A Fig. 5 apresenta seis registros P-CMOD típicos do comportamento do material durante os seis testes de fratura válidos. Nesses registros podem ser vistas as descargas e recargas realizadas ao longo dos testes segundo a metodologia das descargas parciais. Como pode ser visto na Fig. 5, o material apresenta um comportamento elastoplástico e os registros não apresentam nenhum tipo de instabilidade.

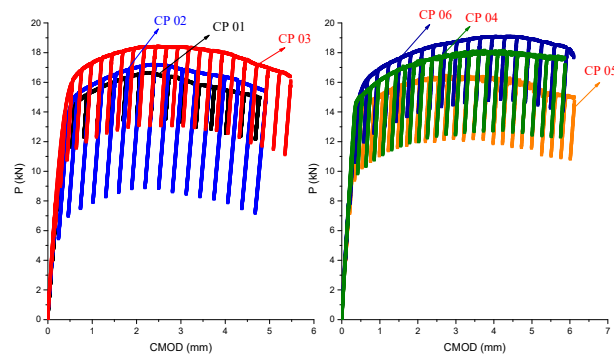
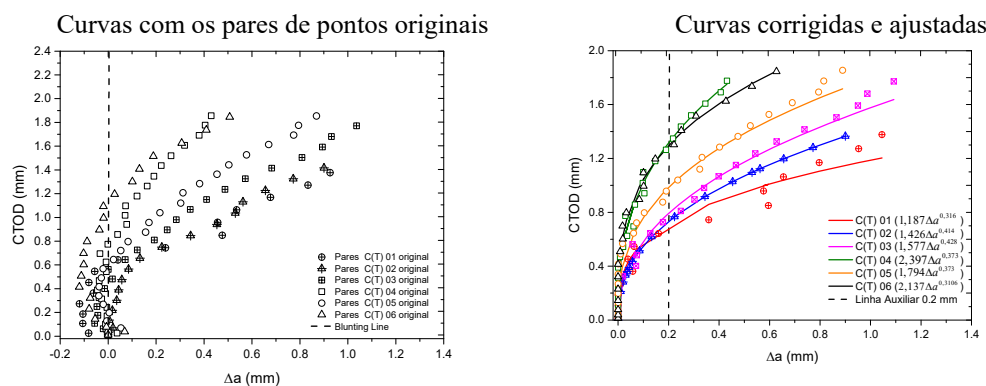


Figura 5. Curvas carga-CMOD dos seis corpos de prova C(T) testados.

3.3. Curva de Resistência CTOD-R

A Fig. 6 apresenta todos os pares de ponto CTOD- Δa para todos os corpos de prova testados e como pode ser visto na mesma, para alguns casos o método das descargas parciais indica valores de crescimento de trinca negativo, em especial para valores baixos de CTOD. Esse tipo de resultados foram observados em alguns importantes trabalhos, tais como: Bertolino *et al.* (2002), Underwood *et al.* (1994), Seok *et al.* (2000), Kalyanam *et al.* (2009), Sasikala *et al.* (2011) e Voss *et al.* (1985). Este tipo de problema está diretamente relacionado com a instrumentação utilizada no ensaio de fratura, segundo relata Seok *et al.* (2000) e não tendo nenhum sentido físico e nem relação com as propriedades mecânicas do material avaliado. Com respeito a tal problema observado foram propostas algumas metodologias para corrigir esse comportamento, dentre os mais importantes foram propostos por Underwood *et al.* (1994), Seok *et al.* (2000) e Rosenthal *et al.* (1990). Assim, foi decidido aplicar uma correção dos pontos CTOD- Δa experimentais em especial aos que apresentaram valores de crescimento aparente de trinca. Existem diversas metodologias para a correção dos pares CTOD- Δa , sendo todas dependentes de avaliações criteriosas e da experiência do analista. Neste trabalho o critério adotado para a correção dos pontos com crescimento de trinca negativo foi deslocar os mesmos para a direita, posicionando o ponto com Δa originalmente mais negativo sobre a linha de embotamento (*blunting line*). Os pontos CTOD- Δa com valores de CTOD menores àquele mais extremo foram reposicionados sobre a linha de embotamento. Os pontos CTOD- Δa com valores de CTOD maiores àquele caso extremo foram deslocados à direita em um valor constante, correspondente à diferença entre o ponto mais extremo e a linha de embotamento.

Figura 6 – Curvas CTOD- Δa dos seis corpos de prova C(T) testados.

A partir dos pontos dos registros gráficos das curvas corrigidas e ajustadas mostrado na Fig. 6 e da Eq. (7) foi possível determinar, através do ajuste de mínimos quadrados, os valores dos coeficientes C_1 e C_2 da Eq. (7) e sim, definir a equação para cada corpo de prova C(T) testado, que por sua vez, possibilitou construir a curva teórica de resistência CTOD- Δa (CTOD-R) para cada corpo de prova C(T), como mostrado na Fig. 6. A partir da interseção das curvas teóricas de resistência CTOD- Δa com a linha auxiliar em 0,2 mm foi possível determinar os valores de CTOD de iniciação (δ_i), apresentado na Tab. 3.

Os comprimentos de trinca medidos a partir das superfícies de fratura (a_0) e os estimados indiretamente pelo método da flexibilidade (a_{0q}) para os seis corpos de prova testados, estão apresentados na Tab. 3. E um dos critérios de aceitabilidade do comprimento de trinca pelo método da flexibilidade (*compliance*) é que satisfaça a Eq. (8) da norma ASTM 1820-01 (2001) e assim foi feito e considerado aceitável.

$$\frac{|a_0 - a_{0q}|}{W} \leq 0,010 \quad (8)$$

Tabela 3. Resultados dos comprimentos de trinca (a_0) e de CTOD de iniciação (δ_i).

CPs	C(T) 01	C(T) 02	C(T) 03	C(T) 04	C(T) 05	C(T) 06
a_0 (mm)	13,85	14,01	13,25	13,39	13,74	13,54
a_{0q} (mm)	13,95	13,60	13,38	13,93	13,35	13,48
Resultado da Eq. (8)	0,004	0,016	0,001	0,022	0,016	0,014
δ_i (mm)	0,65	0,72	0,78	1,30	0,98	1,30

3.4. Superfície de Fratura e Crescimento de Trinca

A Fig. 7 mostra a trajetória realizada pela trinca nos seis corpo de prova C(T), e como pode ser observado os corpos de provas C(T) 04, 05 e 06 mostram que a propagação estável de trinca se deu preferencialmente na interface, enquanto que nos corpos de prova C(T) 01 e 02 se deu no revestimento e no corpo de prova C(T) 03 o crescimento tenha iniciado no revestimento e finalizou na interface.

As observações realizadas têm relação direta com o valor de CTOD de iniciação obtido e com as curvas corrigidas e ajustadas mostrada na Fig. 8. As curvas CTOD-R mais elevadas estão diretamente relacionadas com os corpos de provas C(T) 04, 05 e 06. Enquanto que as curvas CTOD-R mais baixas como corpos de prova C(T) 01, 02 e 03.

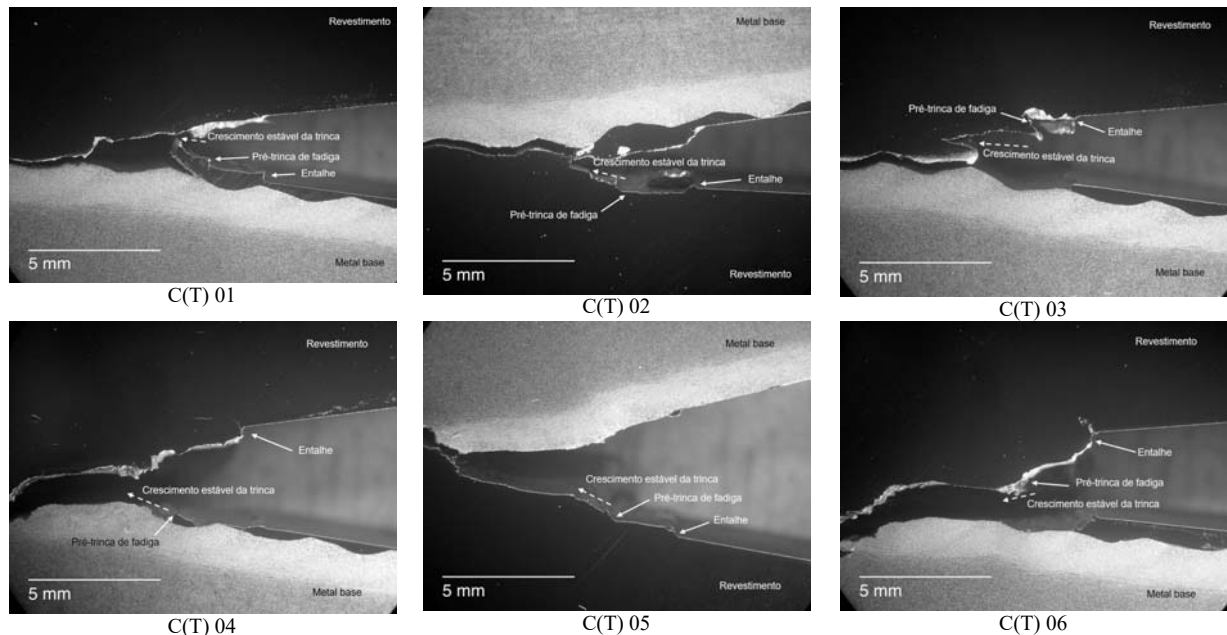


Figura 7 - Trajetória da propagação da trinca no plano médio dos seis corpos de prova C(T) testados.

4. CONCLUSÃO

Os valores de CTOD de iniciação obtidos através das curvas CTOD-R indicam que a região da interface apresenta excelente resistência à fratura e alta tenacidade em temperatura ambiente, sem que regiões de baixa tenacidade pudessem ser detectadas.

As superfícies de fratura revelaram que as pré-trincas e as trajetórias das trincas durante o crescimento estável ocorreram na interface e no revestimento de Inconel 625, porém as trincas que se propagaram estavelmente no revestimento finalizaram o crescimento na interface. Assim, foi possível considerar que as curvas CTOD-R mais baixas estão associadas com crescimento de trinca preferencialmente no revestimento e as mais elevadas com crescimento na interface metal de base/revestimento.

5. AGRADECIENTOS

Os autores agradecem a PRIMO processamentos de tubos S/A, na pessoa do Engenheiro Antônio Marcelo de Meireles, que gentilmente forneceu a amostra tubular revestida e ao CEPEL/Eletróbrás, na pessoa Bruno Reis Cardoso, que disponibilizou os seus laboratórios para alguns testes.

6. REFERÊNCIAS

- Vargas-Arista, B., Romero, S., Angeles-Chavez, C., Albitzer, A., Hallen, J. M., 2011, "Deterioration of the corrosion resistance of welded joints in API5L X52 steel isothermally aged", *Int. J. Electrochem. Sci.*, 6, 367-378.
- Mansour, D., Demri, B., Belkaid, S., 2015, "Corrosion behaviour of API 5L X52 carbon steel coated by oxygen plasma discharge". *Univers. J. Mater. Sci.* 3, 35-43.
- El-Reedy, M.A., 2012, "Offshore structures: Design, Construction and Maintenance", Gulf Professional Publishing, USA.
- Silva, C.C., Miranda, H.C, Motta, M. F, Farias, J. P., Afonso C. R. M., Ramirez, A. J, 2013, "New insight on the solidification path of an alloy 625 weld overlay", *JIMRT*, 2, 228-237.
- American Petroleum Institute, 2007, "Specification for line pipe", ANSI/API specification 5L. 44. ed. Chicago.
- Abioye T. E, McCartney, D. G., Clare, A. T., 2015, "Laser cladding of Inconel 625 wire for corrosion protection". *JIMPT*, 217, 232-240.
- Xu LY, Li M, Jing H. Y. and Han Y. D., 2013, "Electrochemical Behaviour of Corrosion Resistance of X65/Inconel 625 Welded Joints", *Int. J. Electrochem. Sci.* 8, 2069 – 2079.
- Donachie M.J., Donachie S.J., 2002, "Superalloys: A Technical Guide", 2nd Ed. ASM International.
- ASTM E8/E8M, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials", ASTM, West Conshohocken, USA.
- ASTM E1820, 2001, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness", New York.
- BS 7448-1, 1991, "Standard for Fracture Mechanics Toughness Tests – Method for Determination of KIC, Critical CTOD and Critical J Values of Metallic Materials", British Standards Institution, London.
- ASTM E399, 2006, "Standard Test Method for Measurement of Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness KIC of Metallic Materials", New York.
- Yeni, C., Kocak, M., 2006, "Fracture toughness analysis of laser-beam-welded superalloys Inconel 718 and 625", *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.*, 29(7), 546–557.
- Bertolino, G., Meyer, G., Ipiña, J. P., 2002, "Mechanical Properties Degradation at Room Temperature in ZRY-4 by Hydrogen Brittleness", *Materials Research*, v. 5, Nº 2, pp. 125-129.
- Underwood J.H., Troiano E.J., Abbott R.T., 1994, "Fracture Mechanics", v. 24, ASTM STP 1207, Philadelphia, pp. 410-421.
- Seok, Chang-Sung, 2000 "Correction methods of an apparent negative crack growth phenomenon", *International Journal of Fracture*, v. 102, pp. 259–269.
- Kalyanam, S., Dodds Jr., R. H., Beaudoin, A. J., Barlat, F., 2009, "Delamination cracking in advanced aluminum–lithium alloys–Experimental and computational studies", *Engineering Fracture Mechanics*, v.76, pp. 2174–2191.
- Sasikala, G., Ray, S. K., 2011, "Influence of ageing on the quasistatic fracture toughness of an SS 316(N) weld at ambient and elevated temperatures", *Journal of Nuclear Materials*, Vol. 408, pp. 45–53.
- Voss, B., Mayville, R.A., 1985, "The use of the partial unloading compliance method for the determination of J-R curve and JIC", *ASTM STP 856*, 117–130.
- Rosenthal, Y. A., Tobler, R.L., Purtscher, P.T., 1990, "JIC Data Analysis Methods with a Negative Crack Growth Correction Procedure", *ASTM International*, Vol. 18, Iss.4, July.

7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

CTOD-R curves of the metal-clad interface of API X52 pipes cladded with an Inconel 625 alloy by welding overlay

CON-2016-0933

Abstract. *This study aimed to determine and evaluate the resistance curves (CTOD-R) of the substrate/cladding interface of an API 5L X52 steel pipe internally coated with Inconel 625 applied by TIG (GTAW) welding were experimentally evaluated. For this, we used a 168 mm length of tube outside diameter and 22.5 mm thick which was covered by a 15 mm layer of Inconel 625 on the inner wall thereof. Tensile specimens were obtained from both the substrate as the coating, as well as compact tensile specimens (C(T)) to fracture tests, notched RL orientation interface. The results indicate that the region of substrado interface / coating has high fracture toughness and has not been detected any region with low toughness of the sample investigated.*

Keywords: *API 5L X52 Steel, Inconel 625, CTOD and Welding overlay*