

ESTUDO EXPERIMENTAL DE AÇOS API 5L X80 SOLDADOS UTILIZADOS EM DUTOS ATRAVÉS DE ENSAIOS DE CTOD¹

Maurício de Carvalho Silva²

Rodrigo Magnabosco³

Claudio Ruggieri⁴

Resumo

O objetivo deste trabalho é caracterizar as propriedades de tenacidade à fratura de um aço API 5L X80 soldado por arco submerso, utilizando corpos-de-prova SE(B) para obtenção de valores de CTOD em duas configurações: entalhes localizados no metal base (MB) e na zona afetada pelo calor (ZAC). As dimensões dos corpos-de-prova utilizados são espessura $B=14\text{mm}$, largura $W=28\text{mm}$, distância entre os apoios dos roletes $S=112\text{mm}$ e uma relação entre o tamanho de trinca (a) e a largura, $a/W=0,5$, segundo a norma BS7448 – parte1. Os entalhes na ZAC têm por objetivo evidenciar o efeito das zonas de fragilização localizadas (LBZ), e para tal os ensaios foram conduzidos em temperaturas a -10°C , -30°C e -50°C . Em particular, os valores de CTOD obtidos nos ensaios experimentais dos corpos-de-prova com entalhe na ZAC nas temperaturas de -30°C e -50°C apresentaram uma diminuição brusca de tenacidade se comparado com os de entalhe no MB. Este resultado pode ser atribuído às possíveis LBZ.

Palavras-chave: Ensaio de CTOD; Juntas soldadas; Zonas de fragilização localizadas (LBZ); API 5L X80.

EXPERIMENTAL STUDY OF API 5L X80 WELDED STEEL THROUGH CTOD DETERMINATION

Abstracts

This work characterizes the fracture toughness of a submerged arc welded API 5L X80 steel, using SE(B) specimens for CTOD determination in two configurations: notches located in the base metal (BM) and in the heat affected zone (HAZ). The specimens dimensions are thickness $B=14\text{mm}$, width $W=28\text{mm}$, span $S=112\text{mm}$ and crack length to width ratio (a/W) of 0.5, according to BS7448 standard. The effects of local brittle zones (LBZ) are evaluated through tests carried out in temperatures of -10°C , -30°C and -50°C . In particular, the CTOD values obtained at specimens with notch localized in the HAZ for temperatures of -30°C and -50°C had presented a great toughness reduction if compared with the ones with notch in the BM. These results can be attributed to local brittle zones formed in the welding process.

Key words: CTOD determination; Welded joints; Local brittle zones (LBZ); API 5L X80.

¹ Contribuição técnica ao 62º Congresso Anual da ABM – Internacional, 23 a 27 de julho de 2007, Vitória – ES, Brasil.

² Doutorando do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, carvalho.silva@poli.usp.br

³ Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrimagn@fei.edu.br

⁴ Prof. Livre Docente do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, claudio.ruggieri@poli.usp.br

1 INTRODUÇÃO

Grande parte dos aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) de classificação API (*American Petroleum Institute*) utilizados na fabricação de tubos são produzidos pelo processo de laminação controlada. Este processo permite a obtenção de chapas grossas de alta resistência aliada a uma boa tenacidade.^[1] O objetivo básico da laminação controlada é deformar os grãos de austenita, dentro de uma faixa de temperatura na qual não ocorra sua recristalização, para obtenção de tamanho de grão de ferrita na ordem de 3 μ m a 6 μ m.^[2] A faixa de temperatura onde a recristalização não ocorre é representada pela faixa de temperaturas entre 950°C e a temperatura A_{r3} (aproximadamente 750°C), sendo que abaixo da A_{r3} haverá formação de ferrita.^[3-5]

O balanço entre alta resistência e boa tenacidade dos aços grau API, resultante do processo de laminação termomecânica com ou sem resfriamento acelerado, pode ser deteriorado pelos ciclos térmicos da solda, aplicada tanto na etapa final de fabricação do tubo (fechamento em “O”) como na soldagem de campo (montagem dos tubos na linha). No caso de soldagem multipasses, tal deterioração da tenacidade é esperada ocorrer na região de grãos grosseiros da zona afetada pelo calor (ZAC), em particular, numa região definida como *ICGC (Intercritically reheated grain-coarsened)*: zona de grãos grosseiros reaquecida intercriticamente (entre A_{C1} e A_{C3}).^[6] Estudos demonstram que valores de CTOD obtidos de microestruturas simuladas termicamente podem apresentar valores inferiores a 0,1 mm. Essa diminuição da tenacidade à fratura da ZAC está associada à formação de zonas frágeis, tais como o constituinte M-A.^[7] Estas regiões de baixos valores de tenacidade são conhecidas como *zonas frágeis localizadas (LBZ)*.^[6-11]

Como os aços brasileiros de grau API são produzidos sem o resfriamento acelerado, torna-se necessário adicionar quantidades significativas de elementos de liga com o objetivo de incrementar as propriedades mecânicas e de tenacidade do material-base (via mecanismos de refino de grão e precipitação). Entretanto, esse recurso apresenta potenciais efeitos deletérios sobre a tenacidade da ZAC de juntas soldadas multipasses. Dentro deste contexto, a correta determinação das propriedades de tenacidade do aço API 5L X80 (objeto deste estudo), e a propensão de formação de zonas de fragilização localizadas, assume papel altamente relevante, uma vez que, este material é fabricado no Brasil (e utilizado em linhas dutoviárias e *risers*), exclusivamente, por meio de adição de elementos de liga (portanto, sem a utilização de processo de resfriamento acelerado, após a laminação controlada).

Sendo assim, o objetivo deste trabalho é caracterizar as propriedades de tenacidade à fratura de um aço API 5L X80 soldado por arco submerso, utilizando corpos-de-prova SE(B) para obtenção de valores de CTOD em duas configurações: entalhes localizados no metal base (MB) e na zona afetada pelo calor (ZAC). Em particular, pretende-se evidenciar o efeito das zonas de fragilização localizadas na tenacidade da junta soldada do aço API 5L X80 nacional.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Para obtenção dos corpos-de-prova utilizados neste trabalho, foi necessário preparar uma chapa de aço API 5L X80 (limite de escoamento igual a 80ksi ou ~550MPa), sendo que a mesma foi soldada por arco submerso de forma longitudinal. Foram obtidos corpos-de-prova para ensaios de impacto *Charpy*, tração e CTOD. Vale ressaltar em relação ao sentido de extração dos corpos-de-prova que LT significa

que o corpo-de-prova foi extraído na direção longitudinal (L), ou seja, na direção de laminação da chapa; e a trinca (quando for o caso) se propagará na direção transversal (T). A direção TL significa corpo-de-prova no sentido transversal e trinca propagando no sentido longitudinal.

Para a preparação da chapa, foi requisitado um chanfro numa configuração “especial”: uma junta 1/2V, ou seja, com um dos lados retos. O objetivo era posicionar o entalhe (no caso dos corpos-de-prova de impacto *Charpy* e CTOD) “unicamente” na zona afetada pelo calor (ZAC), pois se trata de uma região mais propensa às zonas de fragilização.

Os corpos-de-prova para ensaio de tração (tanto cilíndrico, como retangular) foram obtidos apenas na condição de metal base (MB). Já para os de ensaio de impacto *Charpy* e de CTOD, foram obtidos nas condições de MB e ZAC. Entretanto, àqueles com entalhe na ZAC foram obtidos apenas na direção TL. E os demais, tanto na TL como na LT.

Apesar da junta projetada ter sido 1/2V para garantir que um dos lados do chanfro fosse reto e, assim, posicionar os entalhes nos corpos-de-prova de impacto *Charpy* e de CTOD exatamente na ZAC, isto não aconteceu efetivamente devido a um erro operacional. A macrografia para ilustração da junta obtida pode ser vista na Figura 1. Sendo assim, os entalhes foram posicionados aproximadamente em 50% da ZAC e 50% do metal de solda. Pode-se antecipar deste fato que em função das diferenças de materiais, a propagação da pré-trinca de fadiga seria dificultada. Por exemplo, a pré-trinca poderia crescer de maneira desigual, em função da dissimilaridade dos materiais.



Figura 1: Macrografia da junta obtida.

2.1 Ensaio de CTOD

As dimensões dos corpos-de-prova (tanto para MB como para entalhe na ZAC) submetidos à flexão em três pontos SE(B), apresentam espessura $B=14\text{mm}$, largura $W=28\text{mm}$, distância entre os apoios dos roletes $S=112\text{mm}$ e uma relação entre o tamanho de trinca (a) e a largura, $a/W=0,5$, conforme a norma BS7448-parte1. Vale ressaltar que inicialmente se projetou corpos-de-prova com espessura $B=19\text{mm}$ (mesma espessura da chapa). Entretanto, a junta final não permitiu a extração de corpos-de-prova com espessura similar à espessura da chapa soldada. A partir desta configuração, foram obtidos 5 corpos-de-prova de MB (B01 até B05) e 5 com entalhe na ZAC (A01 até A05). Este ensaio foi conduzido nas temperaturas de -10°C , -30°C e -50°C , numa máquina universal de ensaios (MTS) servo-controlada e capacidade máxima de 250kN de acordo com a norma BS7448 – parte1.^[12]

A carga máxima de fadiga utilizada foi de 6kN e a carga mínima foi mantida em 0,6kN para manter a razão entre cargas mínima e máxima (R) igual a 0,1, sugerida pela norma ASTM E1820.^[13]

O cálculo do valor de CTOD (δ) total é dividido em duas partes: uma parcela elástica (dependente do fator de intensificação de tensão) e outra plástica (dependente da parcela plástica do deslocamento), sendo que ambas dependem das características geométricas do corpo-de-prova, conforme eq.(1) extraída da norma BS7448 – parte1.^[12]

$$\delta = \left[\left(\frac{P \cdot S}{B \cdot W^{1,5}} \cdot f(a_0/W) \right)^2 \cdot \frac{(1-\nu^2)}{2 \cdot \sigma_{ys} \cdot E} \right] + \left[\frac{0,4 \cdot (W - a_0) \cdot Vp}{0,4 \cdot W + 0,6 \cdot a_0 + z} \right] \quad (1)$$

Onde:

P: Carga obtida do diagrama Carga vs. CMOD

S: distância entre os roletes de apoio

B: Espessura do corpo-de-prova

W: Largura do corpo-de-prova

a_0 : Tamanho inicial da trinca

$f(a_0/W)$: Fator de correção que depende da geometria do corpo-de-prova

ν : Coeficiente de Poisson

σ_{ys} : Limite de escoamento corrigido para a temperatura na qual o ensaio de CTOD

E: Módulo de elasticidade

Vp: Parcela plástica do deslocamento

z: Espessura das “facas” de fixação do *clip gage*

2.2 Ensaio de Impacto Charpy

Para a determinação dos valores de energia de impacto absorvida em função da temperatura do material, um conjunto de 63 corpos-de-prova entalhados para ensaio de impacto *Charpy* foi extraído da chapa de material API 5L X80. As amostras foram usinadas com dimensões nominais de 10x10x55mm e ensaiados seguindo as recomendações da norma ASTM E23,^[14] num martelo de impacto com capacidade para 300J. O ensaio foi conduzido nas temperaturas de -196°C (só MB), -118°C , -100°C , -50°C , -30°C (só ZAC), -10°C , 0°C e 20°C .

Para atingir as temperaturas de ensaio, os corpos-de-prova foram imersos em álcool etílico, gelo seco e nitrogênio líquido, estabilizados em $\pm 2^\circ\text{C}$ em torno da temperatura desejada, e nestas mantidos por aproximadamente 10 minutos. Após este período o corpo-de-prova era posicionado na máquina de ensaios e o martelo liberado em menos de 5 segundos. Foram testados 3 corpos-de-prova em cada direção e temperatura.

2.3 Ensaio de Tração

Para o ensaio de tração, foram usinados 8 corpos-de-prova retangulares (4 na direção longitudinal e 4 na direção transversal) e 8 cilíndricos (4 na direção longitudinal e 4 na direção transversal). Os corpos-de-prova cilíndricos de dimensões reduzidas possuem diâmetros de 6mm conforme a norma ASTM E8M-04.^[15] Os requisitos dimensionais recomendados para os corpos-de-prova retangulares segundo a norma API 5l^[16] são que para corpos-de-prova extraídos de chapa a

largura seja igual a 38mm, a espessura igual a da chapa e extensômetro de 50mm. Entretanto, por limitação da máquina de tração (capacidade máxima de 250kN) a largura foi reduzida para 12,5mm; assim, a seção transversal ficou igual a 12,5x19mm. Ambos os corpos-de-prova foram ensaiados (na temperatura ambiente) na condição de metal base.

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Ensaio de Impacto Charpy

A Figura 2 mostra os resultados obtidos para este ensaio. Com estes dados, pode-se calcular a temperatura de transição frágil-dúctil através da energia média, obtendo os seguintes valores: -100°C (LT), -80°C (TL) e -30°C (ZAC). Uma outra maneira de se considerar os resultados do ensaio de impacto *Charpy* é segundo os requisitos da norma API 5L^[16] para fabricação do aço X80. Na temperatura de 0°C , a amostra longitudinal apresenta uma energia de impacto média a igual a 271J, a amostra transversal igual a 221J e a amostra da ZAC igual a 154J.

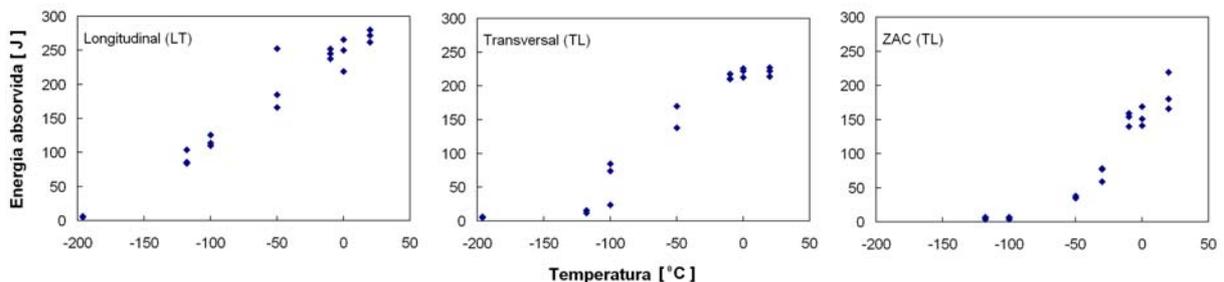


Figura 2: Resultado dos ensaios de impacto Charpy para as amostras longitudinal (LT), transversal (TL) e ZAC.

3.2 Ensaios de Tração

Os resultados do ensaio de tração são apresentados na Tabela 1. Além dos limites de escoamento (σ_{LE}) e resistência (σ_{LR}), estão presentes nas tabelas os valores obtidos de alongamento total em 50mm (A_T^{50mm}) para os corpos-de-prova de chapa, alongamento total em 25mm (A_T^{25mm}) para os corpos-de-prova cilíndricos, módulo de elasticidade (E), o expoente de encruamento (N) e a relação entre os limites de escoamento e resistência $\sigma_{LE} / \sigma_{LR}$.

Tabela 1: Valores médios das propriedades mecânicas obtidas no ensaio de tração.

Corpos-de-prova Retangulares						
Sentido	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	A_T^{50mm} [%]	E [GPa]	N	$\sigma_{LE} / \sigma_{LR}$
Longitudinal	502	654	33	207	6,16	0,768
Transversal	508	666	31,5	190	6,92	0,733
Corpos-de-prova Cilíndricos						
Sentido	σ_{LE} [MPa]	σ_{LR} [MPa]	A_T^{25mm} [%]	E [GPa]	N	$\sigma_{LE} / \sigma_{LR}$
Longitudinal	479	652	29	205	6,4	0,734
Transversal	506	669	24	220	6,78	0,757

3.3 Ensaio de CTOD

Antes da apresentação dos resultados de CTOD, vale ressaltar que uma prática utilizada para conferir se a frente de trinca propagou de maneira uniforme ou não, é fazendo-se o rasgamento dos corpos-de-prova logo após o seu ensaio. A medição da pré-trinca se deu pela utilização de um projetor de perfil. Os corpos-de-prova com entalhes na ZAC, ver Figura 3(a), apresentou uma frente de trinca muito irregular (situação já esperada por não ter sido assegurado um lado com chanfro reto, conforme pode apresentado na Figura 1). Já os corpos-de-prova de MB, ver Figura 3(b), apresentaram pré-trinca de fadiga dentro dos padrões exigidos pelas normas de ensaios de mecânica da fratura (bem uniformes).



Figura 3: (a) Corpos-de-prova com entalhes na ZAC; (b) Corpos-de-prova MB, após ensaio de CTOD e rasgamento para medição da pré-trinca.

Os corpos-de-prova de MB apresentaram-se bastante tenazes nas temperaturas de ensaio utilizadas: -30°C e -50°C . Ou seja, foram obtidas curvas de *Carga vs. CMOD* crescentes. Um exemplo pode ser visto na Figura 4 para uma temperatura de -50°C . Utilizando estas curvas (para obtenção de P e V_p) e as características geométricas dos corpos-de-prova, tal como tamanhos iniciais de trinca entre 14,6mm e 14,9mm, foi possível obter um CTOD de carga máxima (δ_m) para todos os corpos-de-prova de MB, independente da temperatura.

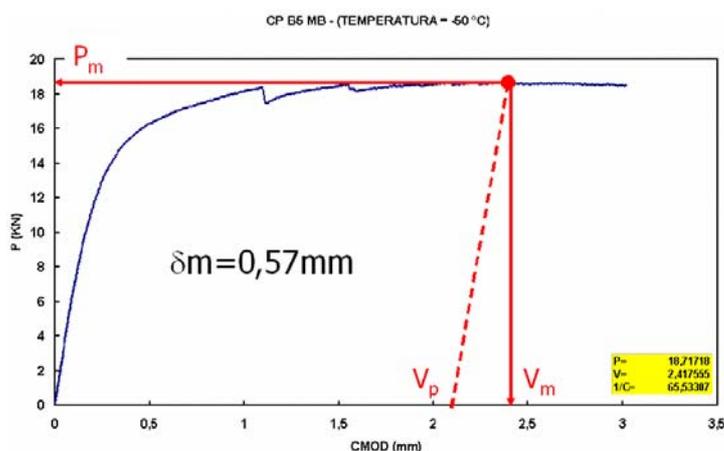


Figura 4: Curva de Carga vs. CMOD para o corpo-de-prova MB – B5 ensaiado na temperatura de -50°C e CTOD igual a $\delta_m=0,57\text{mm}$.

Como os corpos-de-prova de ZAC apresentaram uma frente de pré-trinca muito irregular, foi necessário fazer algumas considerações para que fosse possível uma comparação (mesmo que apenas qualitativa) entre os resultados obtidos para metal base e ZAC. Adotou-se para os corpos-de-prova com entalhe na ZAC um tamanho inicial de trinca “médio” igual a 14mm. Os corpos-de-prova de ZAC ensaiados nas temperaturas de -10°C apresentaram-se bastante tenazes, gerando um CTOD de carga máxima. Para as temperaturas de -30°C e -50°C notou-se uma queda repentina da carga, gerando valores de CTOD críticos (δu). A curva de *Carga vs. CMOD* para uma temperatura de -50°C está apresentada na Figura 5. Já a Figura 6 mostra os valores de CTOD obtidos para os corpos-de-prova de metal base (valores entre 0,46mm e 0,57mm) e com entalhe na ZAC (valores entre 0,05mm e 0,65mm).

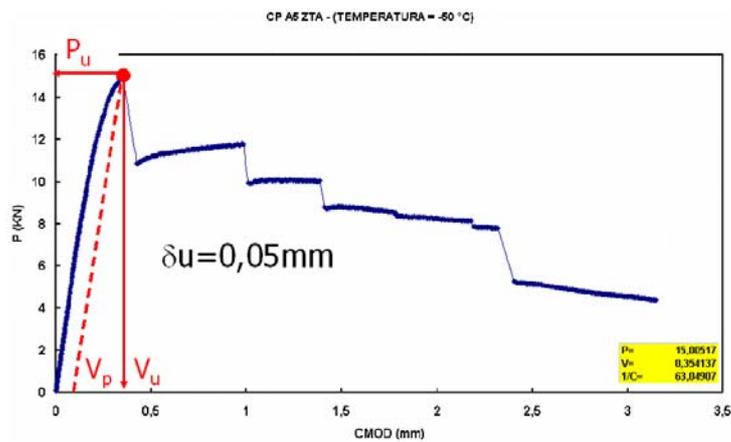


Figura 5: Curva de Carga vs. CMOD para o corpo-de-prova ZAC– A5 ensaiado na temperatura de -50°C e CTOD igual a $\delta u=0,05\text{mm}$.

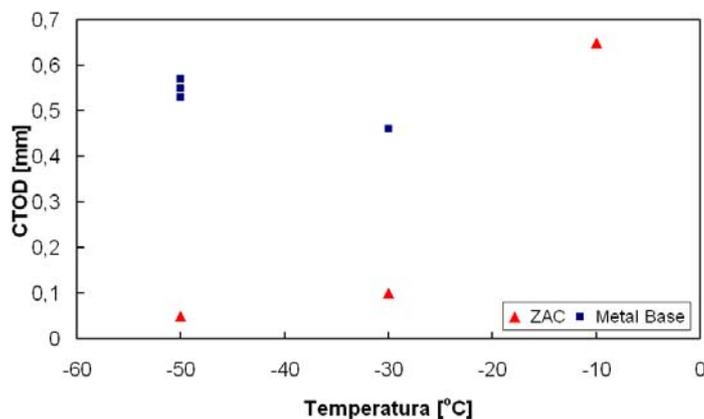


Figura 6: Resultados do ensaio de CTOD para os corpos-de-prova de metal base (B1 até B5) e com entalhe na ZAC (A1 até A5)

4 DISCUSSÃO

Os resultados do ensaio de tração para o aço API 5L X80 apresentaram-se satisfatórios. Além disso, os resultados das propriedades mecânicas tanto para os corpos-de-prova cilíndricos como para os retangulares são bem similares mesmo com características geométricas tão diferentes. Em relação ao corpo-de-prova retangular, como o mesmo não seguiu totalmente os requisitos da API 5L^[16] (em função da redução da seção transversal), o limite de escoamento obtido

provavelmente tem um valor reduzido. Contudo, este valor deveria ser corrigido para que tal afirmação seja validada. Como o objetivo central deste trabalho é o ensaio de CTOD, esta correção não será feita, mas fica o alerta para os leitores. Segundo relato do fabricante de tubos (no caso a Confab) é comum obter valores de limite de escoamento inferiores a 550MPa para corpos-de-prova extraído de chapa. Mas, isto não é considerado preocupante, pois ao deformar a chapa durante o processo de fabricação do tubo, este alcança o limite de escoamento requisitado pela norma, devido ao encruamento do material.

Os resultados de ensaio de impacto *Charpy* demonstraram que o aço API 5L X80 utilizado é de alta tenacidade. Entretanto, os resultados dos corpos-de-prova com entalhe na ZAC apresentam uma temperatura de transição frágil-dúctil mais alta do que aquela apresentada para o MB. Por exemplo, o MB na direção longitudinal apresenta uma temperatura de transição igual a -100°C , enquanto que o da ZAC apresenta -30°C . Isto é um indício claro de que a tenacidade foi deteriorada por conta do processo de soldagem.

Os resultados obtidos para o ensaio de CTOD confirmaram a deterioração da tenacidade à fratura indicada pelo ensaio de impacto Charpy. Por exemplo, ao se ensaiar os corpos-de-prova de MB nas temperaturas de -30°C e -50°C , os valores de CTOD foram obtidos para carga máxima (valores entre 0,46mm e 0,57mm). Entretanto, ao estender este estudo para os corpos-de-prova com entalhe na ZAC, obteve-se dois resultados. Até a temperatura de -10°C foi obtido um CTOD para carga máxima igual a 0,65mm. Para as temperaturas de -30° foi obtido um valor de 0,1mm e para -50°C um valor de 0,05mm, conforme Figura 6.

Por melhor que seja o processo de soldagem, acredita-se que há uma maior probabilidade de estruturas soldadas apresentarem defeitos, se comparadas com as não-soldadas. Portanto, em função dos resultados apresentados na Figura 6, em particular, comparando-se os corpos-de-prova A5 ($\delta u=0,05\text{mm}$) e B5 ($\delta m=0,57\text{mm}$) percebe-se que há um forte indício de que após a soldagem este material é susceptível à formação de fases frágeis (por exemplo, formação do constituinte MA). Entretanto, será necessário fazer uma análise metalúrgica detalhada e a realização de novos ensaios de CTOD com chanfros retos para o posicionamento da pré-trinca por fadiga nos corpos-de-prova extraídos das juntas soldadas para um melhor entendimento deste evento.

5 CONCLUSÕES

Este estudo versou basicamente sobre propriedades de tenacidade à fratura de um aço API 5L X80 através da obtenção de valores de CTOD para duas configurações: a) entalhes localizados no metal base (MB); b) entalhes localizados na zona afetada pelo calor (ZAC) para o material soldado por arco submerso. Embora os ensaios de CTOD não tenham sido totalmente conclusivos (devido a problemas para obtenção de chanfros retos para posicionamento da pré-trinca por fadiga nos corpos-de-prova extraídos das junta soldada), os resultados obtidos neste trabalho sugerem propriedades de tenacidade relativamente elevadas para o metal base, mesmo em temperaturas de -50°C . Em contraste, os valores de CTOD obtidos para entalhes posicionados na ZAC revelam que a temperatura possui um efeito significativo sobre a tenacidade desta região. Estes resultados sugerem indícios de severa degradação da tenacidade na região de grãos grosseiros da ZAC, provavelmente associada à formação de zonas de fragilização localizadas. Investigações experimentais (metalográficas e fractográficas) estão atualmente em andamento para esclarecer a origem destes baixos valores de CTOD e a constituição microestrutural na região dos sítios de clivagem associados à fratura frágil destes corpos-de-prova.

Agradecimentos

Os autores agradecem à empresa *Tenaris Confab* pela cessão do material e ao Centro Universitário da FEI pela disponibilização do laboratório. Em particular, o bolsista Maurício de Carvalho Silva agradece ao CNPQ pela bolsa concedida.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, C.N.P.; SILVA, P.S.C.P. Influência das separações sobre o deslocamento da abertura na ponta da trinca (COD), de um aço microligado produzido por laminação controlada. 42º congresso anual da ABM, out. 1987 – Salvador, Ba.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *High-strength structural and high-strength low-alloy steels*. 10.ed. Metals handbook: Properties and selection: Irons, steels and high-performance alloys, 1990. v.1, p.389-423.
- 3 SHIGA, C.; KAMADA, A.; HATOMURA, T.; HIROSE, K.; KUDOH, J.; SEKINE, T. *Development of large diameter high strength line pipes for low temperature services*. Kawasaki Steel Technical Report, n.4, Dec. 1981.
- 4 SILVA, C.N.P. – *Efeitos das separações na tenacidade de um aço microligado produzido por laminação controlada*. 1986. Dissertação apresentada à escola Politécnica da USP para obtenção do título de mestre em engenharia. São Paulo.
- 5 SILVA, M. S. *Determinação da tenacidade à fratura de aços para dutos API X60 utilizando a metodologia de integral J com determinação do tamanho da trinca por queda de potencial*. 2002. Dissertação apresentada à UFRJ para obtenção do título de mestre em engenharia. Rio de Janeiro.
- 6 TOYODA, M. – Fracture Toughness Evaluation of Steel Welds, Osaka University Report, 1989.
- 7 HÅKANSSON, K. – Weld Metal Properties for Extra High Strength Steels. Doctoral Thesis. Division of Welding, Department of Production Engineering. The Royal Institute of Technology (KTH), Report 2002, August.
- 8 MOLTUBAKK, T. – Strength mismatch effects on the cleavage fracture toughness of the heat affected zone of steel welds. Trondheim, Norway. 1998. 110p. PhD Thesis, Department of Machine Design and Materials Technology Norwegian University of Science and Technology.
- 9 VISHNU, P. R. – Solid-State Transformation in Weldments. Welding, Brazing and Soldering. American Society for Metals, ASM Handbook, Metals Park, Ohio, v. 6, pp. 70-87, 1984.
- 10 ZHANG, J. X., Shi, Y. W. – The Effect of Welding Mechanical Heterogeneity on Fracture Toughness Feature of Base Metal. International Journal of Pressure Vessel and Piping, v. 72, pp. 199-202, 1997.
- 11 DENNYS, R. M. – The implications of local brittle zones (LBZ).
- 12 BS7448, British Standard Institution. Fracture Mechanics Toughness Tests, 1991.
- 13 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for measurements of fracture toughness*. ASTM E1820. New York, 1996.
- 14 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for notched bar impact testing of metallic materials*. ASTM E23. New York, 1997.
- 15 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. *Standard test methods for tension testing of metallic materials [metric]*. ASTM E8M. New York, 1997.
- 16 AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Specification for line pipe steel*. API 5L. New York, 2001.