

ESTUDO DE UMA NOVA GEOMETRIA DE CORPO DE PROVA NA AVALIAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA DE UM TUBO DE AÇO GRAU API 5L X70

I. Atilio, M. P. do Nascimento

Departamento de Materiais e Tecnologia, UNESP – Campus de Guaratinguetá.

Av. Ariberto Pereira da Cunha, 333. Portal das Colinas, CEP: 12516-410.

Guaratinguetá – SP, Brasil. Email: isabelaatilio@hotmail.com

RESUMO

O aumento da demanda por petróleo e seus derivados tem instigado o desenvolvimento de materiais para dutos com elevadas tenacidade e resistência mecânica, como os aços ARBL classes API. O objetivo deste trabalho foi avaliar a tenacidade de um tubo de aço API X70, utilizado na indústria de petróleo e gás, a partir de dados obtidos com ensaios CTOD de espécimes de flexão por três pontos – tipo SE(B) “gull wind”. A metodologia proposta envolveu ensaios de CTOD a temperatura ambiente, realizados conforme as normas ASTM E1820-11 e BS 7448(1991), e consistiu na utilização de espécimes retirados diretamente da parede do tubo, com posterior planificação. Os resultados obtidos com os ensaios de CTOD foram coerentes com os resultados de CTOD de amostras retiradas de chapas e da parede de tubos, sem posterior planificação, encontrados na literatura. Os resultados de CTOD obtidos por ambas as normas convergiram para um valor comum.

Palavras-chave: Tenacidade, aço API 5L X70, ensaios de CTOD, *gull wind*.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por matérias-primas e energia tornou necessária a construção de uma infraestrutura cada vez maior, incluindo complexas redes de dutos com grande diâmetro para o transporte de petróleo e seus derivados ⁽¹⁾, o que impulsionou o desenvolvimento de novos materiais.

Os aços pertencentes à classe API são aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) e têm se tornado uma tendência mundial no setor de petróleo e gás, em função de seus elevados valores de propriedades mecânicas, baixa temperatura de transição dúctil-frágil e baixo carbono equivalente, sendo este último o que confere melhor soldabilidade ao material. Esses aços permitem a aplicação de maior pressão na linha e a utilização de tubos com diâmetros maiores e paredes com espessuras reduzidas, com conseqüente redução do peso do gasoduto e menor custo de fabricação, montagem e transporte do produto, além de um aumento de produtividade e da segurança operacional ^(2,3).

A boa combinação de tenacidade à fratura e resistência mecânica dos aços ARBL é proporcionada pelo reduzido teor de carbono e pela microadição de elementos de liga, dentre eles nióbio, titânio e vanádio ^(2,3). Quando submetidos ao processo de laminação controlada, estes aços sofrem uma elevação simultânea destas propriedades, conseqüente do refino da microestrutura que ocorre com o processo ^(4,3).

Os estudos relacionados à tenacidade destes aços têm sido de grande importância para o setor de petróleo e gás ⁽⁵⁾. Os parâmetros da mecânica da fratura como, o fator intensidade de tensão K , a integral J e o deslocamento de abertura da ponta da trinca (CTOD ou δ) são usados para caracterização da tenacidade à fratura, e apesar da pequena espessura dos tubos, os parâmetros J e CTOD não possuem restrição em relação às dimensões do corpo de prova e abrangem as condições da fratura elástica e plástica ^(5, 6, 7).

Quando se trata de ensaios de tenacidade à fratura em soldas, o projeto e a fabricação dos corpos de prova são mais difíceis de serem obtidos, já que a forma irregular e as superfícies curvadas associadas a certas juntas soldadas dificultam a localização do entalhe ⁽⁸⁾. Se a curvatura ou a distorção de uma soldagem é excessiva, o modelo do corpo de prova pode ser esticado por flexão em ambos os lados do entalhe para produzir uma configuração do tipo "asa de gaivota" (*gull wind*), conforme ilustrado na Figura 1. A dobra deve ser feita de forma que os três pontos de carga em um espécime do tipo SE(B) estejam alinhados.

Como o ensaio do tipo CTOD não faz restrições à espessura do corpo de prova a ser ensaiado, esta pode ser igual à espessura do material de interesse. Porém, os valores de CTOD calculados para o mesmo material podem ser influenciados pelas dimensões ou tipo de amostra. Uma vez que se procura

reproduzir no ensaio as condições de serviço, é requerido que o ensaio seja realizado em corpos de prova com espessura igual àquela da estrutura considerada.

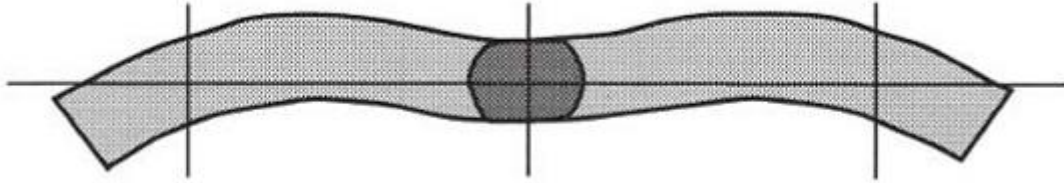


Figura 1 - Configuração asa-de-gaiivota para espécimes soldados com excesso de curvatura ⁽⁹⁾.

Este trabalho consistiu em aplicar a configuração do tipo “asa de gaiivota” em corpos de prova SE(B) sem solda e comparar os valores obtidos de CTOD com os de amostras retiradas de chapa e da parede do tubo, sem posterior deformação.

MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado nesta pesquisa foi o aço microligado API 5L X70, fabricado por laminação termomecânica controlada, sem resfriamento acelerado, conformado em tubo na espessura nominal de 11 mm e soldado pelo processo de resistência elétrica de alta frequência (HF/ERW). As amostras do material foram fornecidas pela empresa APOLO TUBULARS S.A, cuja composição química é indicada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química (% massa) do material utilizado.

| C | Mn | Si | P | S | Ti | V | Nb | Nb+Ti+V |
|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|---------|
| 0,10 | 1,36 | 0,25 | 0,01 | 0,004 | 0,004 | 0,004 | 0,05 | 0,06 |

Para a caracterização microestrutural do aço API X70, foram extraídas 2 amostras de metal base, uma na direção longitudinal e a outra na direção transversal em relação à direção de laminação da chapa, as quais foram analisadas através de um microscópio óptico da marca NIKON, modelo EPIHOT 200. Para a preparação das amostras, foi feito lixamento empregando-se lixas de granulometria decrescente de 100 a 2000 *mesh*, e polimento com suspensão de sílica coloidal, OP-U, de 0,03 μ m. Para revelação da microestrutura, foi realizado ataque químico com Nital 3%, variando-se o tempo de 40 a 60 segundos aproximadamente.

Para realização do ensaio de tração, empregaram-se 44 corpos de prova extraídos diretamente da parede do tubo na direção longitudinal (paralela à direção de laminação), com o formato de “meia cana”, representando toda a espessura da parede do tubo, conforme recomendado pela norma API 5L 44ª edição, 2008. A figura 2 apresenta o modelo do corpo de prova utilizado nos ensaios.

Os ensaios de tração foram executados em conformidade com a norma ASTM E8M, a temperatura ambiente, por meio de uma máquina servo-hidráulica do modelo KRATOS 1980, com capacidade de até 1000 toneladas, pertencente ao laboratório da empresa APOLO TUBULARS.



Figura 2 – Corpo de prova de tração retirado diretamente da parede do tubo.

Os corpos de prova de tenacidade à fratura de flexão por três pontos, tipo SE(B), para ensaio CTOD, foram retirados diretamente da parede do tubo, com posterior planificação. Desta forma, a espessura de cada amostra representou a espessura real do tubo.

A figura 3 apresenta o procedimento realizado na empresa colaboradora desta pesquisa, para a localização, retirada e confecção dos corpos de prova. O procedimento consistiu no corte de amostras de tubo no formato de arco circunferencial, seguido pelo processo de planificação das amostras a partir de uma prensa mecânica.

No processo de planificação, cuidados foram tomados para não induzir grandes deformações na região central do corpo de prova, onde posteriormente foram confeccionados os entalhes e a pré-trinca de fadiga.

Os entalhes foram feitos por eletroerosão, com orientação do plano da trinca C-L, ou seja, a direção de aplicação da tensão correspondeu à direção circunferencial, enquanto a direção de propagação da trinca ocorreu na direção longitudinal do tubo.

Após a confecção dos entalhes, os corpos de prova foram pré-trincados por fadiga, com razão de carga $R=0,1$; frequência de 15 Hz e a temperatura ambiente

(aproximadamente 25°C), em uma máquina universal servo-hidráulica de 100 kN de capacidade, modelo INSTRON 8801, seguindo as normas ASTM E1820 e BS7448.

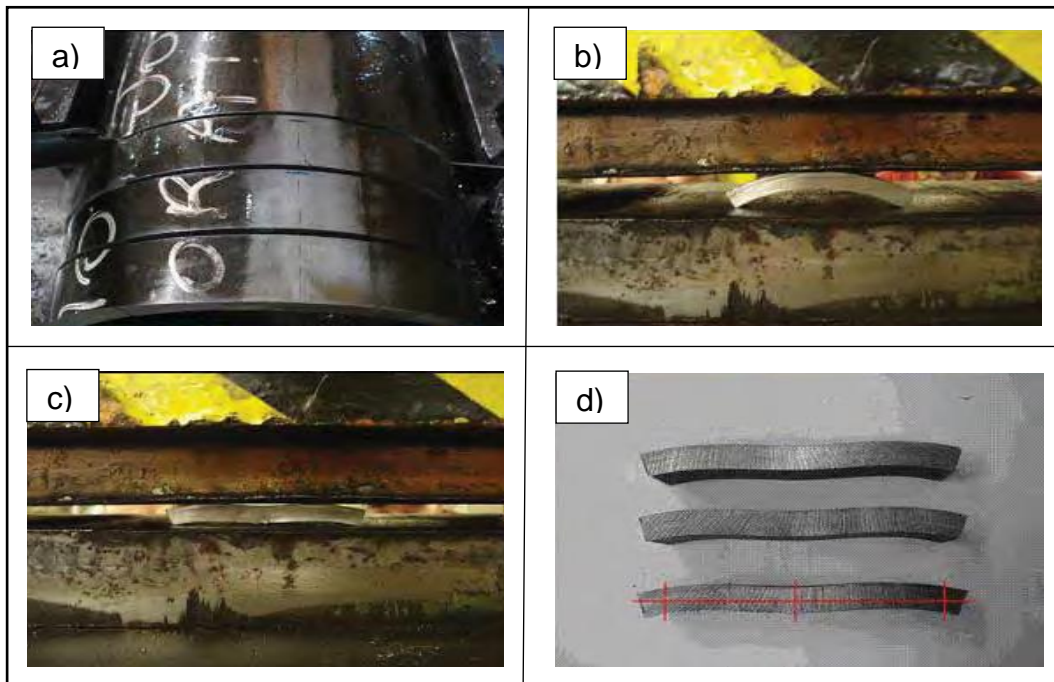


Figura 3 – Retirada de amostras da parede do tubo, com posterior planificação: a) processo de corte transversal do tubo para a retirada de espécimes na largura desejada; (b) espécime disposto na prensa; (c) processo de planificação; (d) geometria final do corpo de prova.

Foram ensaiados dois corpos de prova por flexão por três pontos, a temperatura ambiente, a uma velocidade de 0,5 mm/min, na mesma máquina em que foram realizadas as pré-trincas por fadiga, seguindo-se também as normas ASTM E1820 e BS7448. Deve-se destacar que tais normas exigem praticamente os mesmos parâmetros de ensaio, diferenciando-se apenas na equação para a determinação do valor de CTOD. O objetivo de se utilizar as duas normas foi verificar se os valores calculados de CTOD tendem a convergir para um valor comum. Para tal, as curvas Carga *versus* CMOD auxiliaram os cálculos de CTOD fornecendo o CMOD (V_p), conhecido como parcela plástica do deslocamento, e a Área (A_p) sob a curva Carga vs. CMOD, parâmetros esses adotados respectivamente, pelas normas BS e ASTM.

A análise das superfícies de fratura foi realizada em um microscópio eletrônico de varredura (MEV) da marca ZEISS, modelo EVO/LS15. Esta análise consistiu em varrer duas superfícies de fraturas de amostras ensaiadas por CTOD,

de forma a identificar os principais mecanismos de fratura atuantes durante a propagação da trinca do material.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A figura 4 mostra o resultado da análise microestrutural do aço, que revelou uma microestrutura refinada, com presença de perlita, ferrita poligonal e ferrita acicular, tanto na direção longitudinal, quanto transversal. Basicamente todo o material é constituído por ferrita (regiões claras) e perlita (regiões escuras), sendo esta encontrada em menor fração devido ao baixo teor de carbono do material analisado. De acordo com a classificação da norma ASTM E112, nota-se que o aço apresentou um tamanho de grão ASTM=9,5.

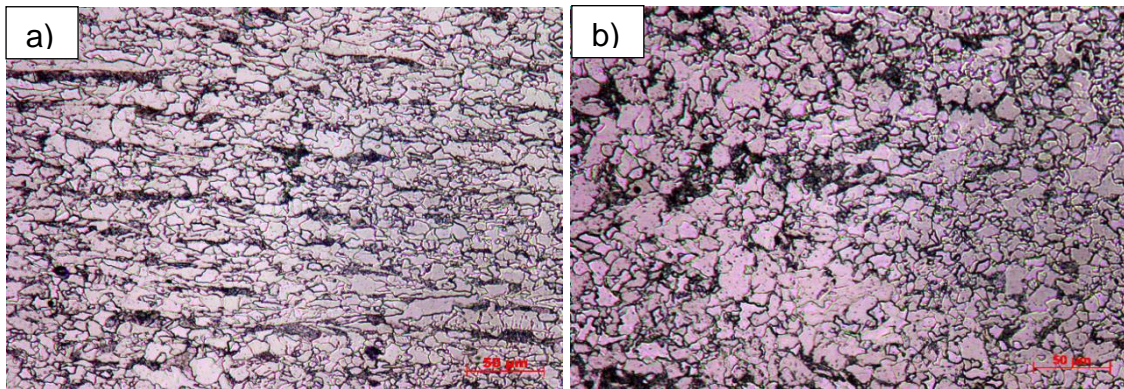


Figura 4 - Análise microestrutural do aço API X70: a) na direção longitudinal (L), b) na direção transversal (T). Ampliação 200x.

Os ensaios de tração apresentaram um valor médio para o limite de escoamento (LE) de 562 ± 12 MPa, de 600 ± 13 MPa para o limite de resistência (LR) e alongamento total médio de 31,6%. De acordo com os requerimentos da norma API 5L, os valores mínimos para o limite de escoamento (LE) e limite de resistência à tração (LR) são, respectivamente, 485 MPa e 565 MPa, ou seja, os resultados obtidos foram coerentes com o especificado pela norma.

A partir dos dados gerados pela máquina durante ensaio CTOD, foi possível levantar a curva característica Carga [kN] versus CMOD [mm] para cada corpo de prova, conforme representado na figura 5. A partir dessa curva determinou-se a carga máxima suportada pelo corpo de prova momentos antes da fratura (F) e o correspondente deslocamento da abertura da “boca” da trinca (V_p). A integral da

área sob a curva Carga vs CMOD forneceu a área (A_p). Os valores de F e V_p foram empregados na determinação do cálculo do CTOD pela norma BS 7448(1991), enquanto os valores de F e A_p foram usados para o cálculo do CTOD através da norma ASTM E1820-11. A figura 6 mostra as fotografias tiradas das duas superfícies de fratura obtidas após os ensaios.

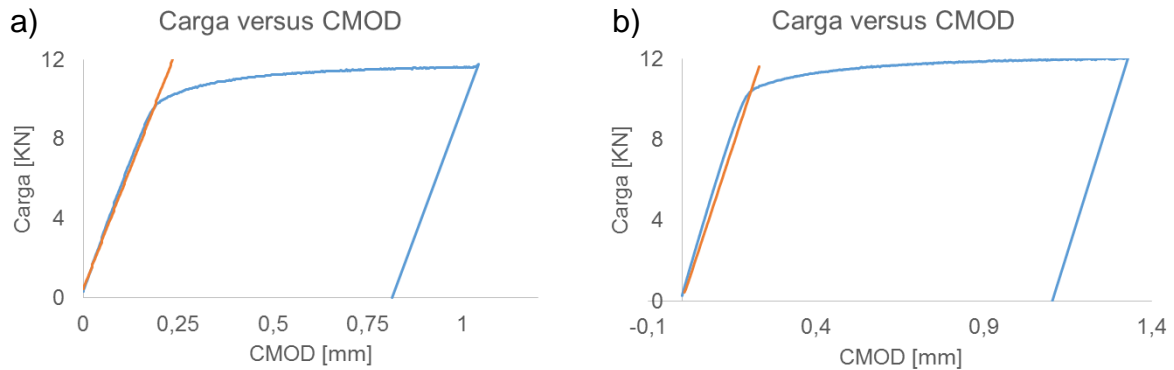


Figura 5 – Curvas Carga [kN] versus CMOD [mm] geradas a partir de dados da máquina para: a) corpo de prova 1; b) corpo de prova 2.

A partir do comportamento das curvas Carga vs. CMOD foi possível analisar qualitativamente a tenacidade do material, uma vez que, o formato e o tamanho da área sob a curva pode ser um indicativo da quantidade de energia absorvida ao longo da propagação da trinca. Ambas as curvas apresentadas na figura 5 apresentaram uma considerável plasticidade.

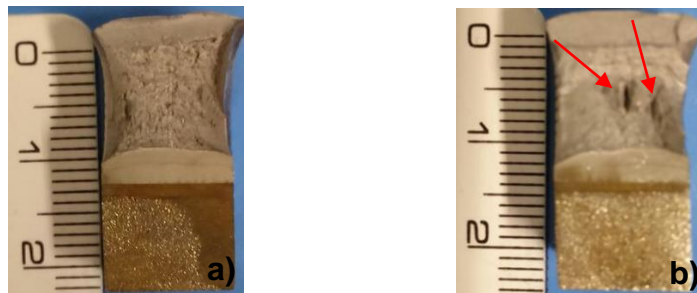


Figura 6 – Imagens das superfícies de fratura: a) corpo de prova 1; b) corpo de prova 2.

A partir da análise das superfícies de fratura indicadas na figura 6, foi possível mensurar o tamanho médio inicial da trinca (a_0). As medidas foram realizadas em projetor de perfil, seguindo as normas BS 7448-Parte 1 (1991) e ASTM E1820-11.

Conforme indicado na figura 6-b), notou-se a presença de delaminações, que são cavidades características do processo de laminação controlada, e que ocorrem paralela à direção de laminação. Acredita-se que sua ocorrência seja consequência de tensões perpendiculares à direção de propagação da fratura, as quais geram restrição plástica no material à frente da trinca durante o carregamento ⁽¹⁰⁾.

As Tabelas 2 e 3 apresentam os valores de CTOD obtidos para os dois corpos de prova, determinados pelas normas BS7448-Parte 1 (1991) e ASTM E1820-11, respectivamente.

Tabela 2 - Valores de CTOD obtidos pela norma BS 7448 (1991).

| Cdp | Vp [mm] | Carga Máxima [kN] | a ₀ [mm] | a ₀ /W | CTOD elástico [mm] | CTOD plástico [mm] | CTOD [mm] |
|-----|------------|-------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 0,8139 | 11,75 | 11,2120 | 0,5087 | 0,0310 | 0,2206 | 0,2517 |
| 2 | 1,1031 | 12,09 | 10,9095 | 0,5001 | 0,0338 | 0,3058 | 0,3396 |

Tabela 3 - Valores de CTOD obtidos pela norma ASTM E1820-11.

| Cdp | A [kN.mm] | Carga Máxima [kN] | a ₀ [mm] | a ₀ /W | CTOD elástico [mm] | CTOD plástico [mm] | CTOD [mm] |
|-----|--------------|-------------------------|------------------------|-------------------|--------------------------|--------------------------|--------------|
| 1 | 7,87 | 11,75 | 11,2120 | 0,5087 | 0,0356 | 0,1829 | 0,2185 |
| 2 | 11,57 | 12,09 | 10,9095 | 0,5001 | 0,0389 | 0,2690 | 0,3079 |

Após a avaliação e qualificação da pré-trinca de fadiga, pôde-se perceber que ambos os ensaios atenderam a condição dos intervalos $0,45 \leq (a_0/W) \leq 0,55$ e $0,45 \leq (a_0/W) \leq 0,70$ imposta, respectivamente, pelas normas BS7448(1991) e ASTM E1820-11. Analisando as imagens das superfícies de fratura, figura 6, percebe-se que as pré-trincas de fadiga de ambas as amostras foram uniformes. Desta forma ambos os ensaios foram validados pelas normas BS7448(1991) e ASTM E1820-11, e os valores de CTOD obtidos puderam ser usados como referência para o valor crítico da tenacidade à fratura do material. Embora as duas normas citadas adotem diferentes parâmetros para a determinação do valor de CTOD, os valores obtidos foram bem próximos, conforme pode ser visto nas tabelas 2 e 3.

Os resultados obtidos com os ensaios de CTOD foram coerentes com os valores de CTOD de amostras retiradas de chapas e da parede de tubos, sem posterior planificação, encontrados na literatura ⁽¹¹⁾, o que indica que a utilização de corpos de prova “asa de gaivota” podem ser utilizados, principalmente por representarem condições ainda mais próximas às encontradas em serviço.

As imagens capturadas por MEV apresentadas na figura 7 referem-se às zonas de estiramento (ZE) das superfícies de fratura. A ZE é definida como a região de transição formada entre a propagação estável e a propagação instável da trinca, provocada pela sobrecarga que leva à ruptura final, e a sua morfologia pode ser correlacionada à tenacidade à fratura do material ⁽¹²⁾. A formação de uma parede inclinada pode ser vista em ambas as superfícies, indicando uma fratura de comportamento dúctil.

A figura 8 apresenta as microfractografias da região de propagação instável da trinca, sendo as representadas por a) e b), referentes ao corpo de prova 1, e as representadas por c) e d), referentes ao corpo de prova 2. Uma grande presença de dimples foi encontrada nas duas superfícies de fratura, indicando que a fratura teve comportamento dúctil. A figura 8-b) é uma ampliação da região indicada na figura 8-a), enfatizando uma depressão que pode ter sido ocupada por uma inclusão de sulfeto que se desprendeu durante o ensaio de CTOD. A figura 8-c) mostra a delaminação apresentada na figura 6-b). A figura 8-d) apresenta o interior da delaminação com facetas de clivagem, sendo estas oriundas do alinhamento de planos de clivagem paralelos à direção de laminação ⁽¹⁰⁾.

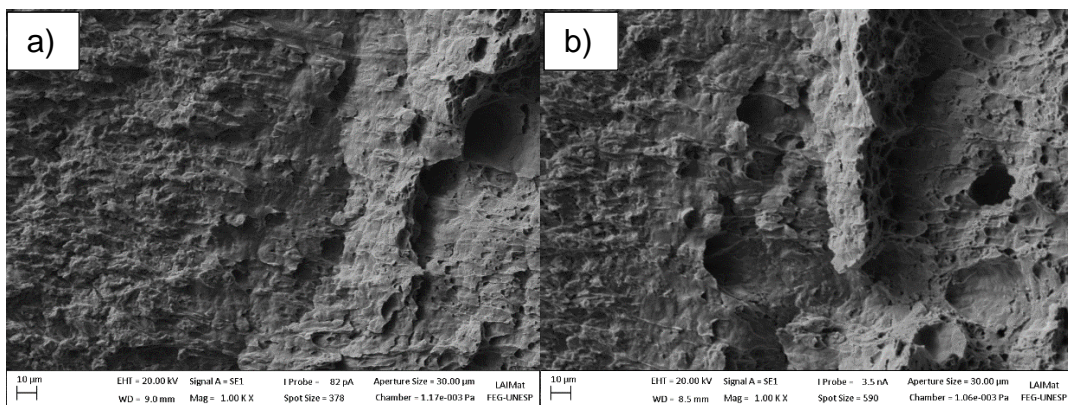


Figura 7 – Microfractografia da zona de estiramento: a) do corpo de prova 1; b) do corpo de prova 2. Aumento: 1000X.

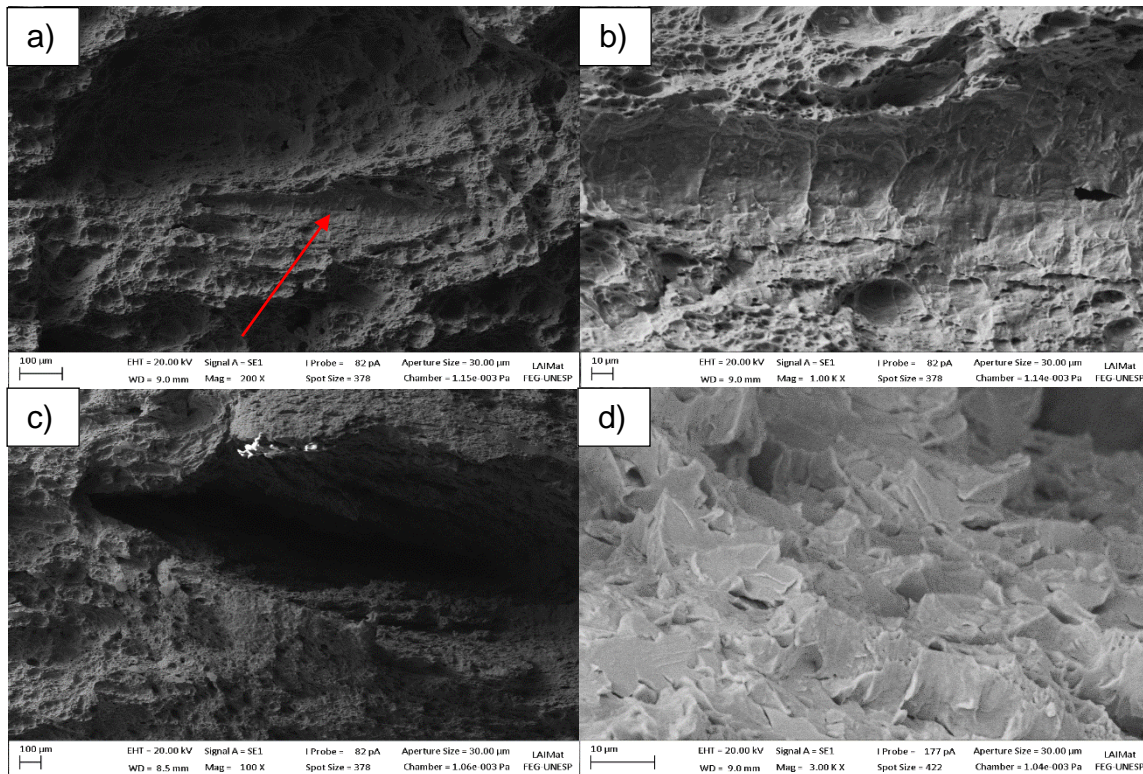


Figura 8 - Microfractografia da região de propagação instável da trinca: a) fratura dúctil, com aumento de 200x; b) região que pode ter sido ocupada por inclusão de sulfeto, com aumento de 1000x; c) delaminação encontrada no corpo de prova 2, com aumento de 100x; d) interior da delaminação, com aumento de 3000x.

CONCLUSÕES

Conclui-se que a metodologia empregada para o estudo da integridade estrutural por meio do ensaio de CTOD com amostras extraídas diretamente da parede do tubo, com posterior planificação, mostrou-se adequada. A comparação entre as normas BS7448 (1991) e ASTM E1820-11 permitiu concluir que ambas as metodologias tendem a convergir para um valor comum, já que os resultados obtidos por ambas as normas foram bem próximos.

Pode-se concluir também que os resultados obtidos com os ensaios de tração foram condizentes com o especificado pela norma API 5L.

A microestrutura obtida está de acordo com a composição do aço e o tratamento de laminação controlada ao qual o material foi submetido.

De acordo com os mecanismos de fratura obtidos, o material apresentou fratura com comportamento dúctil, o que está de acordo com a temperatura à qual o

ensaio de CTOD foi submetido.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à empresa Apolo Tubulars S.A., pelo fornecimento de material para a realização dessa pesquisa, à FAPESP – processo 2008/56424-5, ao CNPq pela bolsa de produtividade – processo 310044/2004-6, e à CAPES pela bolsa de mestrado.

REFERÊNCIAS

1. GORNI, A.A.; SILVEIRA, J.H.D.; REIS, J.S.S. Aços microligados na fabricação de tubos soldados com grande diâmetro. *Tubo & Companhia*, 5:26, Set-Out 2009, pág. 52-63
2. CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos: características gerais, tratamentos térmicos, principais tipos. São Paulo: ABM, 1990. 576 p.
3. JUNIOR, J. C. S.; ROCHA, D. B.; BRANDI, S.D. Uma Breve Revisão Histórica do Desenvolvimento da Soldagem dos Aços API para Tubulações. *Soldagem & Inspeção*, São Paulo, v. 18, n. 2, p. 176-195, Abr/Jun 2013.
4. ALÍPIO, P. H.; BARBOSA, C. H.; BRITO, V. L.; NUNES, C. A.; RATNAPULI, P. C. Evolução dos aços para tubos API utilizados no transporte de óleo e gás. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 14, 2000, São Pedro. Anais... São Pedro: CBECIMAT, 2000. p. 45801-45813.
5. XU CHEN, HONGSHENG LU, GANG CHEN, XIN WANG. A comparison between fracture toughness at different locations of longitudinal submerged arc welded and spiral submerged arc welded joints of API X80 pipeline steels. *Engng Fract Mech* 2015;148:110-121.
6. ZERBST U, HEINIMANN M, DALLE DONNE C, STEGLICH D. Fracture and damage mechanics modelling of thin-walled structures-an overview. *Engng Fract Mech* 2009;76:5–43.
7. ZHU XK, JOYCE JA. Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization. *Engng Fract Mech* 2012;85:1–46.
8. TERADA, Y., Kiyose, A., Doi, N., Morimoto, H., Kojima, A., Nakashima, T. Hara, T., Sugiyama, M., High-Strength Linepipes with Excellent HAZ Toughness. *NIPPON Steels*, Technical Report No 90, pp. 88-93, July, 2004.
9. KOJIMA, S. S., Sampaio, M. A. C. A., Bott, I. S., The Development of API 5L X80 Steel for Pipe Production by the TMCR Process. *T&B Petroleum Journal*, v. 15, pp. 68-70, 2004.
10. HIPPERT JR., E. Investigação experimental do comportamento dúctil de aços APIX70 e aplicação de curvas de resistência J- Δa para previsão de colapso em dutos. 2004. Tese apresentada para obtenção do título de doutor em

engenharia. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP. São Paulo.

11. TOFFOLO, R. V. B. Estudo comparativo dos aços microligados API 5L X60 e API 5L X70, usados para confecção de tubos, quanto à tenacidade à fratura. 2008. Tese apresentada para obtenção do título de mestre em Engenharia de Materiais da REDEMAT. Ouro Preto.
12. HEIN, L.R.O. Estudo da zona de estiramento através de técnica de reconstrução tridimensional. 1996. 113 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1996.

STUDY OF A NEW SPECIMENS GEOMETRY IN EVALUATING OF THE FRACTURE TOUGHNESS OF A STEEL PIPE GRADE API 5L X70

ABSTRACT

The increasing demand for oil and its products has driven the development of materials for products with fracture toughness and high mechanical strength, such as HSLA steels of API classes. The aim of this work is to study the toughness of steel pipes API X70, used in the oil and gas industry, from data obtained with CTOD tests bending specimens by three points, type SE (B) “gull wind”. The proposed methodology involves CTOD test at room temperature, performed according to ASTM E1820-11 and BS 7448(1991), and consists in the use of body-specimens taken directly from the pipe wall, with subsequent flattening. The results obtained with the CTOD test were consistent with the results of CTOD samples taken from plates and tube wall, without further planning, found in the literature. The CTOD results obtained by both standards converge to a common value.

Palavras-chave: Toughness, API 5L X70 steel, CTOD tests, “gull wind”.