

AValiação DA GEOMETRIA DO CORPO DE PROVA NA TENACIDADE À FRATURA DE AÇO API-5L-X70¹

Wagner Duarte Flores²
Odair José dos Santos³
Leonardo Barbosa Godefroid⁴
Gustavo Henrique Bolognesi Donato⁵

Resumo

Resultados de ensaios da Mecânica de Fratura são utilizados para garantir a operação segura de estruturas que contenham defeitos do tipo trinca. Esses ensaios utilizam corpos de prova normatizados, dentre eles os dos tipos SENB e CT, cujas geometrias induzem elevado nível de restrição plástica na ponta da trinca. Esses corpos de prova fornecem valores conservadores de tenacidade à fratura (*lower bound*). Isso tem levado a um aumento contínuo de referências voltadas para a tentativa de introdução de corpos de prova do tipo SENT, não-normatizados, para a avaliação da integridade de estruturas com baixo nível de restrição plástica, como dutos. Esse tipo de corpo de prova apresenta maior similaridade com componentes reais em termos do nível de restrição plástica e das condições de fratura, fornecendo valores de tenacidade mais representativos das condições reais de operação. Neste trabalho, foi avaliado o efeito das geometrias de corpos de prova SENB, CT e SENT na tenacidade à fratura de um aço API-5L-X70 por meio do levantamento de curvas J-R. Os resultados indicaram que o corpo de prova SENT suporta níveis de carregamento significativamente maiores, fornecendo valores de tenacidade à fratura mais elevados.

Palavras-chave: Tenacidade à fratura; Restrição plástica; Curva J-R.

ANALYSIS OF SPECIMEN GEOMETRY ON THE FRACTURE TOUGHNESS OF API-5L-X70 STEEL

Abstract

Fracture Mechanics results are used in order to ensure safe operation of structures that contain defects like cracks. Standard specimens, such as SENB and CT, are employed in these tests, whose geometries induce high levels of plastic constraint at the crack tip. These specimens provide conservative values of fracture toughness (*lower bound*). This fact has led to an increased number of studies aimed to introduce specimens of SENT type, non-standardized, to assess the integrity of structures that provide low plastic constraint, such as pipelines. This kind of specimen induces similar level of plastic constraint and provides similar fracture conditions when compared to real structures, thus providing more representative toughness values of the real operation. In this paper, the effect of SENB, CT and SENT specimen geometries on the fracture toughness of an API-5L-X70 steel was evaluated using J-R curves. The results indicated that SENT specimen supports significantly higher loading levels, providing higher values of fracture toughness.

Key words: Fracture toughness; Plastic constraint; J-R curve.

¹ Contribuição técnica ao 67^o Congresso ABM - Internacional, 31 de julho a 3 de agosto de 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Eng. Metalurgista. Pesquisador, Usiminas, Mestrando, Redemat, UFOP.

³ Eng. Metalurgista. Pesquisador Especialista, D.Sc., Usiminas.

⁴ Eng. Metalurgista. Professor, D.Sc., Redemat, UFOP.

⁵ Eng. Mecânico. Professor, D.Sc., Depto. de Eng. Mecânica, Centro Universitário da FEI.

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, tem-se observado expressivos aumentos na produção e no consumo de petróleo e de gás natural no mundo, como ilustrado na Figura 1a. De 1991 a 2000, a produção desses recursos aumentou cerca de 14% e 20%, respectivamente. De 2001 a 2010, esses números foram da ordem de 10% e 29%, na mesma sequência. No Brasil (Figura 1b), esses aumentos foram ainda mais expressivos, com valores da ordem de 99% e 102% na década de 1990 e de 59% e 64% na década seguinte, respectivamente.^(1,2)

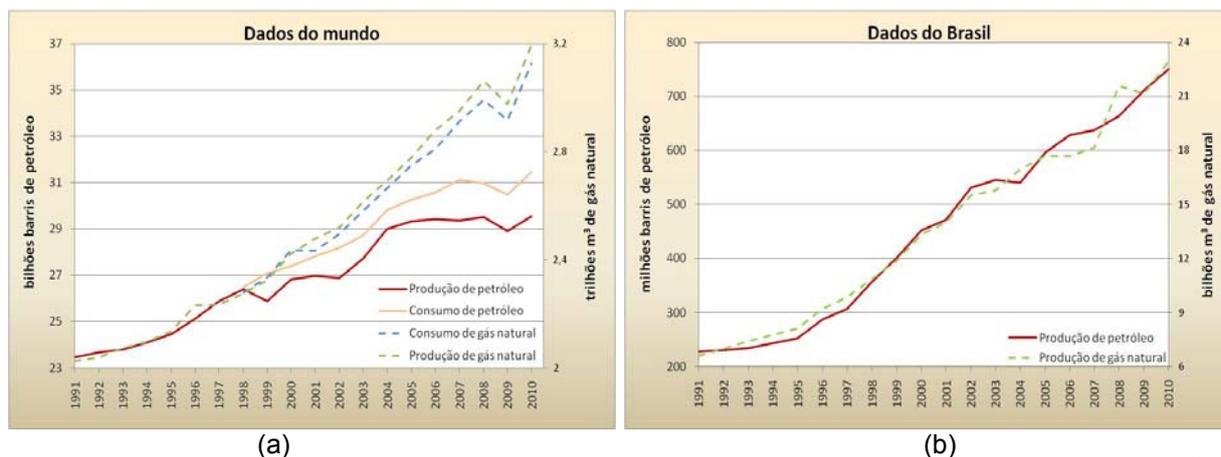


Figura 1. Evolução da produção e do consumo mundial e nacional de petróleo e de gás natural.^(1,2)

De acordo com a *International Energy Agency* (IEA),⁽³⁾ a projeção de aumento da demanda mundial por fontes primárias de energia até 2030 é de 1,5% ao ano, devendo alcançar 16,8 toneladas de óleo equivalente (toe). Combustíveis fósseis continuarão sendo a principal fonte energética.

O aumento da produção de óleo e gás resulta no aumento da demanda por dutos para seu escoamento. Este é considerado o meio mais seguro e mais econômico para transporte de grandes volumes desses recursos a grandes distâncias.^(4,5)

Para garantir a operação de dutos em condições seguras, conceitos de mecânica de fratura têm sido utilizados com sucesso na avaliação da integridade estrutural desses equipamentos por meio de procedimentos como API579⁽⁶⁾ e BS7910.⁽⁷⁾ Tais metodologias permitem correlacionar uma propriedade mecânica do material (tenacidade à fratura) com as condições de carregamento e o tamanho de um defeito do tipo trinca. Com isso, é possível estimar, por exemplo, o tamanho crítico de uma trinca e, dessa forma, realizar inspeções programadas, reduzindo o risco de ocorrência de falhas.

A tenacidade à fratura do material é obtida a partir de ensaios normatizados em corpos de prova pré-trincados, sendo a ASTM E399,⁽⁸⁾ a ASTM E1290,⁽⁹⁾ a ASTM E1820⁽¹⁰⁾ e a ISO12135⁽¹¹⁾ as principais normas regulamentadoras com revisões recentes. Os corpos de prova mais utilizados nesses ensaios são o do tipo SENB (*Single Edge Notch Bend*) e do tipo CT (*Compact Tension*), os quais possuem geometria projetada para promover um nível de triaxialidade de tensões tal que gere elevada restrição plástica na ponta da trinca, limitando a extensão da região de deformação plástica ao seu redor. No entanto, vários estudos têm demonstrado que estruturas como tubos possuem baixo nível de restrição plástica, contrastando com os corpos de prova normatizados, e que corpos de prova do tipo SENT (*Single Edge Notch Tension*), não-normatizados, apresentam níveis similares de restrição plástica

(parâmetros T, Q ou M) em relação a esse tipo de estrutura,⁽¹²⁻¹⁴⁶⁾ como ilustrado esquematicamente na Figura 2.

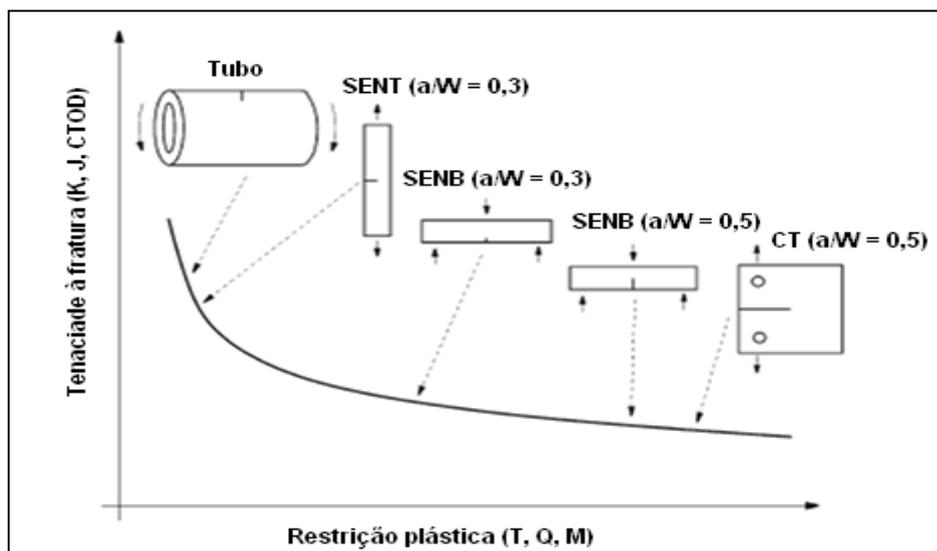


Figura 2. Ilustração esquemática do efeito da geometria do corpo de prova na restrição plástica e na tenacidade à fratura.⁽¹⁵⁾

Apesar de ainda não serem contemplados em normas de ensaio, procedimentos como DNV-OS-F101⁽¹⁷⁾ e DNV-RP-F108⁽¹⁸⁾ já recomendam a utilização de corpos de prova SENT na determinação da tenacidade à fratura. Esse fato está associado ao excesso de conservadorismo nos valores de tenacidade obtidos com a utilização de corpos de prova dos tipos SENB e CT, o que, de certa forma, pode induzir a reparos desnecessários ou mesmo à condenação de estruturas que ainda possuem vida útil remanescente.⁽¹⁹⁾

Neste trabalho, procurou-se avaliar o efeito da geometria do corpo de prova na tenacidade à fratura de um aço destinado à fabricação de tubos para escoamento de óleo e gás, por meio do levantamento de curvas J-R. Esse tipo de curva é utilizado para avaliar a tenacidade de materiais dúcteis, possibilitando estimar seu comportamento à fratura com base no crescimento estável da trinca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material avaliado foi um aço API-5L-X70, produzido na Usiminas por laminação controlada na forma de chapa grossa, destinado à fabricação de tubos para escoamento de petróleo e gás. Sua caracterização microestrutural foi feita após preparação metalográfica, em seção polida e após ataque com reativo nital 4%.

Três geometrias de corpos de prova, sendo dois corpos de prova para cada geometria, foram utilizadas nos ensaios de tenacidade à fratura para obtenção de curvas J-R, sendo eles do tipo SENB, SENT e CT (Figura 3). Esses foram usinados em orientação T-L, ou seja, o comprimento do corpo de prova foi orientado transversalmente à direção de laminação enquanto a direção de propagação da trinca foi longitudinal à mesma. Além disso, foram usinados entalhes laterais em todos os corpos de prova para evitar crescimento irregular da frente da trinca (efeito de tunelamento). Esses entalhes laterais tiveram profundidade de 1 mm. Os parâmetros dimensionais dos corpos de prova estão apresentados na Tabela 1.

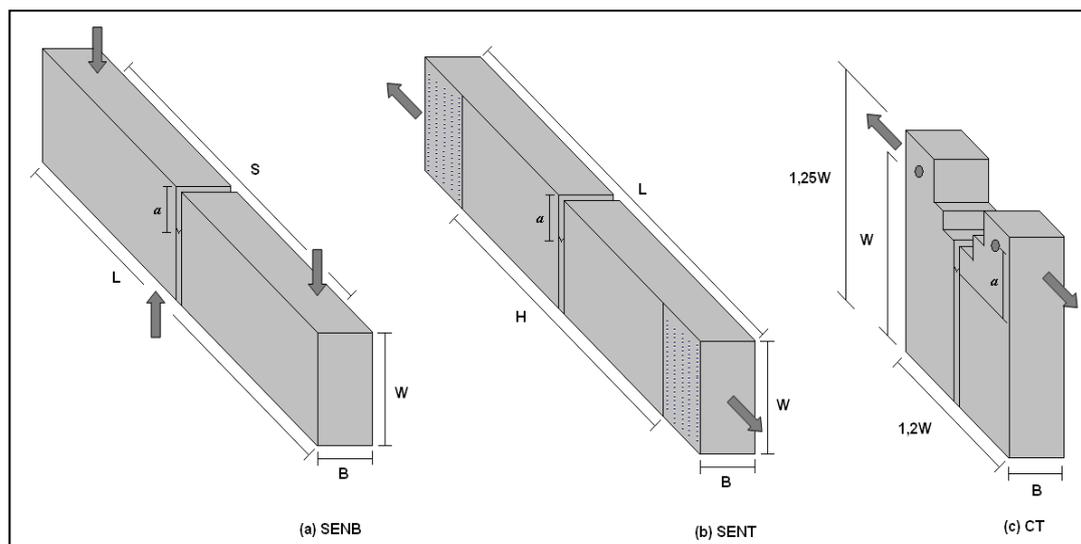


Figura 3. Configuração geométrica dos corpos de prova avaliados. B, W e L são, respectivamente, a espessura, a largura e o comprimento do corpo de prova. S é a distância entre os pontos de apoio, H é a distância entre as regiões de fixação das garras e a é o comprimento original da trinca.

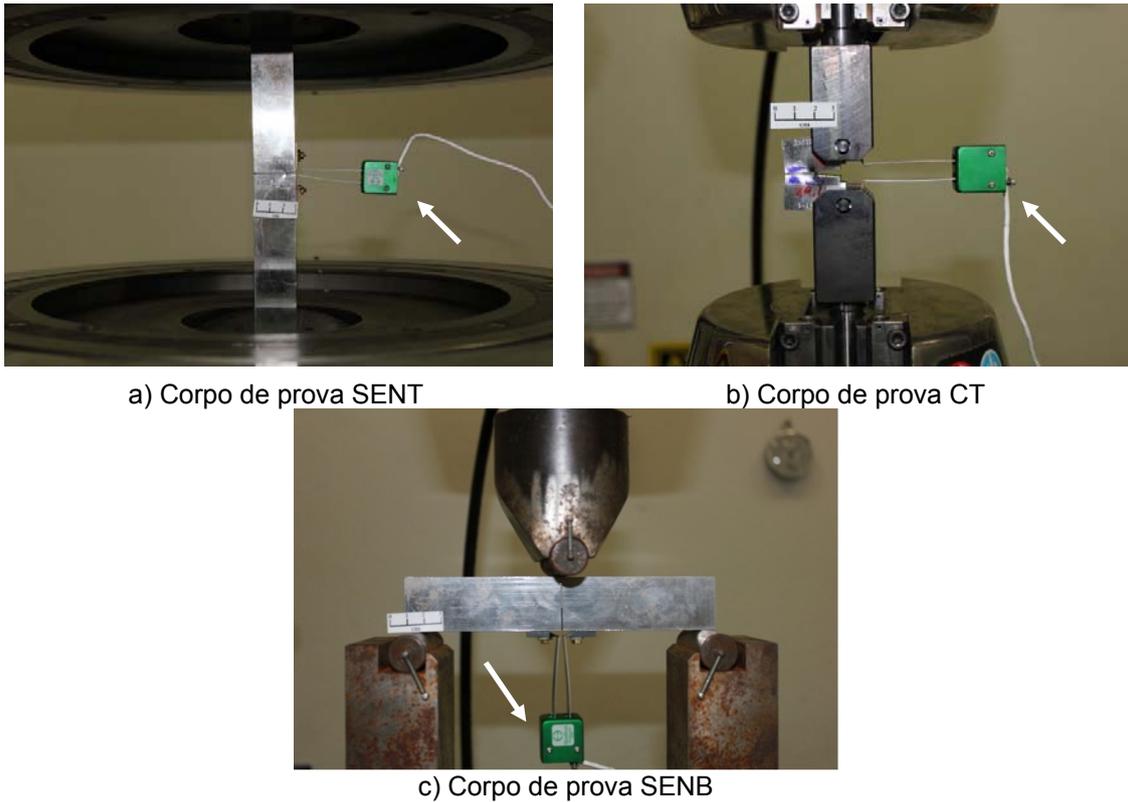
Tabela 1. Parâmetros geométricos dos corpos de prova

Geometria	B (mm)	B_N (mm)	W (mm)	S (mm)	L (mm)	H/B	a/W
SENB	16	14	32	128	148	-	0,5
SENT				-	248	8	
CT				-	-	-	

Obs.: B, W, L, S, H e a estão definidos na figura 3. B_N é a espessura líquida do corpo de prova, medida na raiz dos entalhes laterais.

Os corpos de prova foram pré-trincados por fadiga a uma razão entre tensões $R = 0,1$ e sob frequência de 25 Hz. Após a etapa de pré-trincamento, os ensaios foram realizados em máquina servo-hidráulica Instron de 10 t, para os corpos de prova SENB e CT, e de 100 t, para o SENT em razão das cargas máximas previstas, à temperatura ambiente. Os corpos de prova foram solicitados em tração (corpos de prova SENT e CT) ou em flexão em três pontos (corpo de prova SENB) à velocidade de 1 mm/min. Durante esse carregamento foram registrados os valores de carga e de deslocamento da abertura da trinca (CMOD), este último medido com o auxílio de um *clip-gage*, conforme a Figura 4.

A solicitação dos corpos de prova foi realizada empregando-se sucessivos descarregamentos parciais, da ordem de 10% da carga momentânea, para determinação de valores de integral J e da extensão da trinca. A técnica utilizada para estimação do tamanho da trinca foi a da flexibilidade elástica (*compliance*), que é o inverso da inclinação da curva Carga-Deslocamento no trecho de descarregamento, como ilustrado na Figura 5. Nessa técnica, o tamanho da trinca é relacionado com a flexibilidade instantânea do corpo de prova.



a) Corpo de prova SENT

b) Corpo de prova CT

c) Corpo de prova SENB

Figura 4. Corpos de prova SENB, SENT e CT durante ensaio. Os *clip gages* são indicados pelas setas.

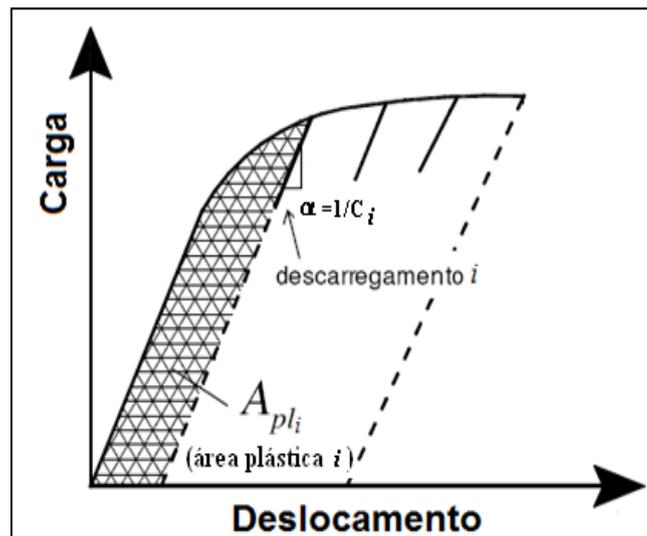


Figura 5. Curva carga-deslocamento.

Os valores de integral J foram determinados em cada descarregamento, baseando-se na área plástica, de acordo com a equação 1.⁽¹⁰⁾

$$J_i = \frac{K_i^2(1-\nu^2)}{E} + \left[J_{i-1}^{pl} + \frac{\eta_{i-1}}{b_{i-1}} \left(\frac{A_{pli} - A_{pli-1}}{B_N} \right) \right] \left[1 - \frac{\gamma_{i-1}}{b_{i-1}} (a_i - a_{i-1}) \right] \quad (1)$$

Nessa equação:

K_i = i-ésimo fator de intensidade de tensão;

ν = coeficiente de Poisson;

E = módulo de elasticidade;

η_i = i-ésimo fator eta (função de a/W)⁽¹⁰⁾;

b_i = i-ésimo ligamento remanescente ($W - a$);

A_{pli} = i-ésima área plástica sob a curva carga-deslocamento;

γ = i-ésimo fator gama (função de a/W)⁽¹⁰⁾;

B_N = espessura líquida do corpo de prova;

a_i = i-ésimo comprimento da trinca.

O fator de intensidade de tensão, K_i , utilizado na equação 1, é calculado através das equações 2 e 3.⁽¹²⁾

- Corpo de prova SENB:

$$K_i = \left[\frac{P_i S}{(B B_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (2)$$

- Corpos de prova CT e SENT

$$K_i = \left[\frac{P_i}{(B B_N)^{1/2} W^{3/2}} \right] f \left(\frac{a}{W} \right) \quad (3)$$

em que:

P_i = é a carga no instante i ;

S = é a distância entre os pontos de apoio no caso do corpo de prova SENB.

$f(a/W)$ = é uma função adimensional que introduz o efeito geométrico do corpo de prova na distribuição das tensões na ponta da trinca.

Normas para ensaios de Mecânica de Fratura disponibilizam expressões de $f(a/W)$ para corpos de prova normalizados.⁽¹⁰⁾ Para o corpo de prova SENT, foi utilizada a expressão obtida por Chiodo e Ruggieri:⁽¹⁹⁾

$$f \left(\frac{a}{W} \right) = 0,2852 + 3,8168 \left(\frac{a_i}{W} \right) - 1,4522 \left(\frac{a_i}{W} \right)^2 + 3,5078 \left(\frac{a_i}{W} \right)^3 + 9,4071 \left(\frac{a_i}{W} \right)^4 - 7,8491 \left(\frac{a_i}{W} \right)^5 \quad (4)$$

Após a obtenção dos valores de J e da extensão da trinca (Δa) em cada descarregamento, foram construídas as curvas J-R para avaliação do comportamento da propagação da trinca.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização Microestrutural

Por meio de análise metalográfica em região no centro da espessura, verificou-se que o aço API-5L-X70 avaliado apresentou inclusões de óxido globular e alumina uniformemente distribuídas na matriz metálica, não sendo identificada a presença de inclusões de sulfeto de manganês na forma alongada. A microestrutura apresentou-se bandeada, sendo constituída, basicamente, por ferrita e perlita, e não foi observada segregação central, como pode ser visto na Figura 6.

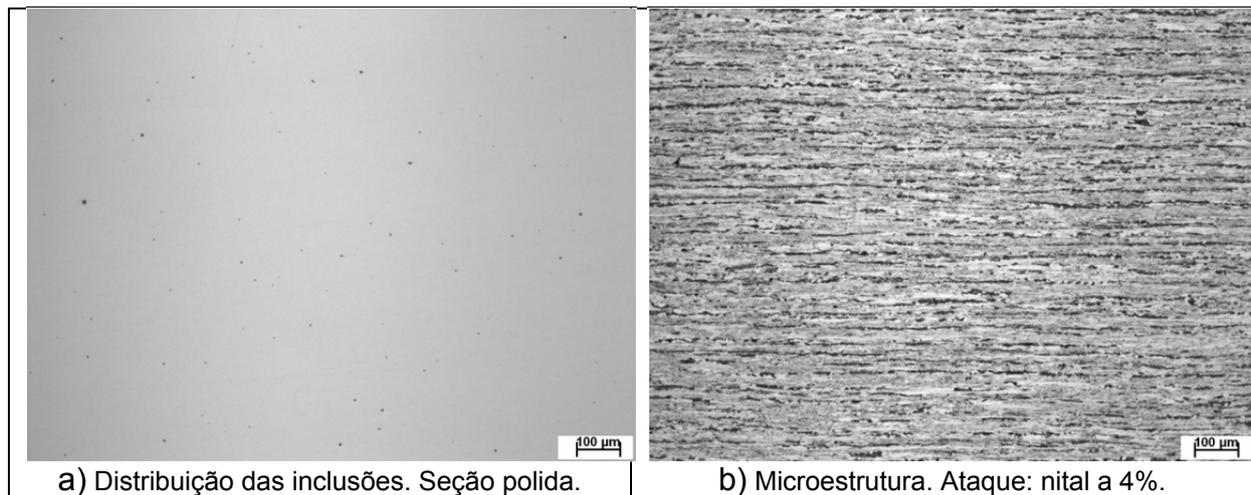


Figura 6. Caracterização microestrutural na região do centro da espessura em plano paralelo à direção de laminação. Ampliação original: 100X. Ataque: nital 4%.

3.2 Curvas carga-CMOD

As curvas carga-CMOD dos corpos de prova SENB, CT e SENT testados estão mostradas na Figura 7. Os corpos de prova dos tipos SENB e CT suportaram níveis similares de carregamento, com carga máxima da ordem de 22 kN e 30 kN, respectivamente. Já os do tipo SENT suportaram um carregamento cerca de cinco vezes maior, com carga máxima da ordem de 140 kN.

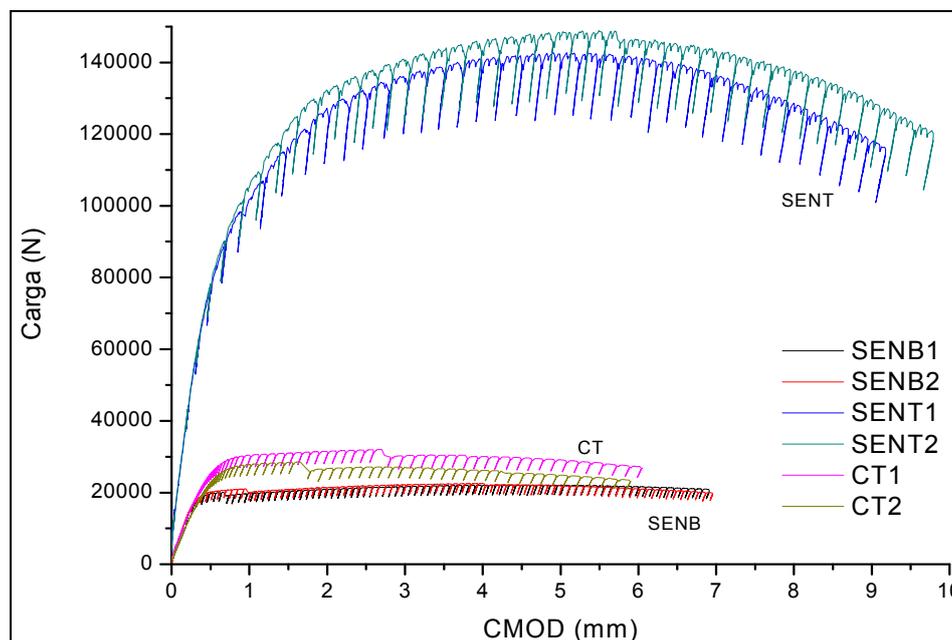


Figura 7. Curvas carga-CMOD dos corpos de prova ensaiados.

Em avaliação das superfícies de fratura observou-se um maior crescimento estável da trinca e uma deformação lateral maior nos corpos de prova SENT, comparativamente aos demais, corroborando a ideia de que essa geometria promove menor nível de restrição plástica.

Nas curvas relativas aos corpos de prova SENB e CT foram observadas descontinuidades, denominadas *pop-in*, que podem estar associadas à ocorrência de delaminações (ou separações). Essas delaminações são trincas formadas em plano perpendicular ao plano da fratura principal. Na Figura 8 são apresentados

detalhes das curvas carga-CMOD, evidenciando essas discontinuidades, e também as superfícies de fratura, nas quais estão indicadas a separação e a região de crescimento estável da trinca.

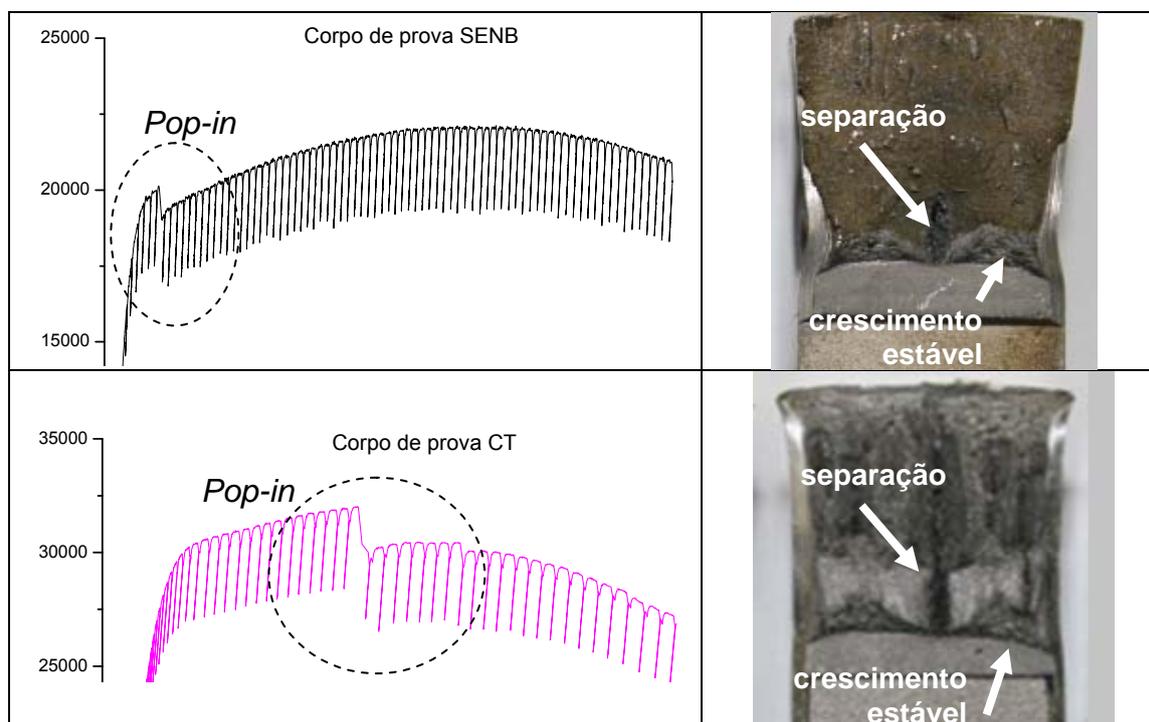


Figura 8. Detalhe das curvas carga-CMOD evidenciando a ocorrência de *pop-in* e superfície de fratura dos corpos de prova SENB e CT.

Também na superfície de fratura dos corpos de prova SENT foi evidenciada a presença de separação, como pode ser visto na Figura 9. No entanto, nas curvas carga-CMOD desse corpo de prova não se observaram discontinuidades, conforme pode ser observado na Figura 7.



Figura 9. Superfície de fratura do corpo de prova SENT.

As separações nos aços podem ser geradas pelo alinhamento de inclusões alongadas de MnS, segregação de carbonetos em contornos de grão, textura e bandeamento microestrutural ou ainda por uma combinação desses fatores.^(21,22) Assim, com base nas análises microestruturais do aço avaliado nesse estudo, conclui-se que elas devem ter sua origem associada ao bandeamento microestrutural, bem como à texturização do material. Essa textura está relacionada à condição de processamento do aço por laminação controlada com temperatura de acabamento no campo intercrítico.^(21,22)

O efeito das separações na tenacidade à fratura é bem conhecido, e sua formação resulta no alívio de tensões na ponta da trinca. Todos os corpos de prova exibiram separações, porém somente as curvas carga-CMOD dos corpos de prova SENB e CT apresentaram *pop-in*. Esse resultado pode estar relacionado ao fato da relaxação das tensões nos corpos de prova SENB e CT ter sido muito maior que nos tipo SENT, sendo evidenciada pela redução na carga.

3.3 Curvas J-R

As curvas J-R foram construídas a partir das curvas carga-CMOD de cada geometria de corpo de prova (Figura 10). Ao compará-las, verificou-se que a curva relativa ao corpo de prova SENT apresentou maior capacidade de carregamento, representada pelo parâmetro J. Tal fato era esperado, já que este parâmetro está relacionado com a área sob a curva carga-CMOD, que foi maior para esse tipo de corpo de prova, comparativamente aos demais. Tais resultados indicam que o corpo de prova do tipo SENT fornece valores de tenacidade menos conservadores que os demais.

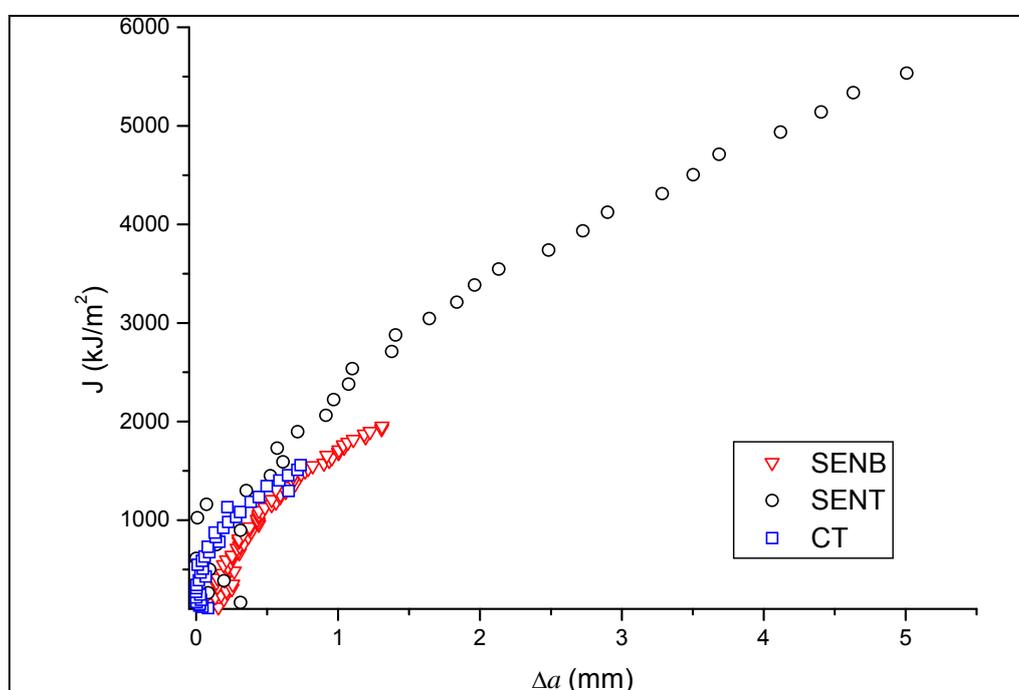


Figura 10. Curvas J-R dos corpos de prova ensaiados.

Além do parâmetro J, observou-se ainda que a extensão da trinca (Δa) também foi significativamente maior no corpo de prova SENT, o que sugere que esse tipo de corpo de prova possibilita maior crescimento estável da trinca antes da ocorrência de falha. Esse fator, aliado à ausência de *pop-in*, maior capacidade de carga e maior deformação lateral, sugere que os corpos de prova do tipo SENT promoveram mais baixo nível de triaxialidade de tensão e mais baixa restrição plástica na ponta da trinca, comparativamente aos demais.

4 CONCLUSÃO

Os resultados de tenacidade obtidos com o corpo de prova não-padronizado, SENT, foram significativamente superiores, sugerindo que tal geometria de corpo de prova induz mais baixo nível de restrição plástica na ponta da trinca e fornece valores de

tenacidade menos conservadores, comparativamente aos corpos de prova padronizados. Considerando-se que estruturas do tipo tubos podem induzir baixo nível de restrição plástica, menor que o dos corpos de prova padronizados e similar ao do corpos de prova SENT, a utilização desse último na avaliação da sua integridade estrutural fornecerá valores menos conservadores, que poderão evitar reparos e/ou substituições desnecessárias, que aumentariam o custo de produção sem necessariamente aumentar os níveis de segurança.

REFERÊNCIAS

- 1 ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2011.
- 2 ANP - Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, Anuário Estatístico Brasileiro de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, 2001.
- 3 IEA - International Energy Agency, World Energy Outlook, 2009.
- 4 ANTAKI, G. A., Piping and Pipeline Engineering - Design, Construction, Maintenance, Integrity and Repair, Aiken, South Carolina - USA : Marcel Dekker, 2003.
- 5 TOFFOLO, R. B., CANDIDO, L. C.; GODEFROID, L. B.; MATTIOLI, R., Fracture Behavior of Two API Steels Used in Iron Ore Pipelines. Ouro Preto, IX Encontro da SBPMat, 2010.
- 6 API-579/ASME-FFS-1. Fitness for Service Evaluation. 2007.
- 7 British Standard, BS. BS7910 - Guide to Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, 2005.
- 8 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E399 - Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials, 2005.
- 9 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E1290 - Standard Test Method for Crack-Tip Opening Displacement (CTOD) Fracture Toughness Measurement, 2008.
- 10 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, ASTM E1820 - Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness, 2011.
- 11 INTERNATIONAL STANDARD, ISO12135 - Metallic Materials - Unified Method of Test for the Determination of Quasistatic Fracture Toughness, 2002.
- 12 MOREIRA, C. F.; OLIVEIRA, G. P.; DONATO, G. H. B.; MAGNABOSCO, R., Avaliação Numérico-Experimental de Curvas de Crescimento de Trincas (curvas R) em Aço AISI 1020 Utilizando Espécimes SE(T) Solicitados por Pinos e Garras, 65^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2010.
- 13 CRAVERO, S. e RUGGIERI, C. Correlation of Fracture Behavior in High Pressure Pipelines with Axial Flaws using Constraint Designed Test Specimens - Part I: Plane-Strain analyses, Vol. 72, pp. 1344-1360, 2005.
- 14 CRAVERO, S., Desenvolvimento de Procedimentos para Avaliação de Curvas J-R em Espécimes à Fratura SE(T) Utilizando o Método de Flexibilidade, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007.
- 15 CHIESA, M., NYHYS, B., SKALLERUD, B., THAULOW, C., Efficient Fracture Assessment of Pipelines. A Constraint-corrected SENT Specimen Approach, Engineering Fracture Mechanics, vol. 68, pp 527-547, 2001.
- 16 PIOVATTO, R. R., CARVALHO, A. L. M., FILHO, W. W. B., SPINELLI, D., RUGGIERI, C., Aplicação da Técnica de Normalização Linear da Carga em Espécimes SE(T) para a Avaliação de Integridade Estrutural em Dutos Condutores de Gás e Petróleo, 17^o Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 2006.
- 17 DET NORSKE VERITAS, DNV-OS-F101 - Submarine Pipeline Systems, 2007.
- 18 DET NORSKE VERITAS, DNV-RP-F108, Fracture Control for Pipeline Installation Methods Introducing Cyclic Plastic Strain. 2006.

- 19 CHIODO, M. S. e RUGGIERI, C., Determinação de Fatores de Intensidade de Tensões (SIFs) em Espécimes SE(T) Fixados por Pinos e Garras, 61^o Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, 2006.
- 20 CRAVERO, S. e RUGGIERI, C., Estimation procedure of J-resistance Curves for SE(T) Fracture Specimens Using Unloading Compliance, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 74, pp. 2736-2757, 2007.
- 21 SILVA, M. C., CRAVERO, S., MAGNABOSCO, R., RUGGIERI, C., Efeito de Delaminações sobre Curvas J-R do Aço API 5L X80 Produzido por Laminação Controlada – Parte I: Investigação Experimental, 60^o Congresso Anual da ABM, Belo Horizonte, 2005.
- 22 HIPPERT, Jr. E., Investigação Experimental do Comportamento Dúctil de Aços API-X70 e Aplicação de Curvas de Resistência J- Δ a para Previsão de colapso em dutos, Tese de Doutorado – Escola Politécnica da USP, 2004.