

EFEITO DE DELAMINAÇÕES SOBRE CURVAS *J-R* DO AÇO API 5L X80 PRODUZIDO POR LAMINAÇÃO CONTROLADA – PARTE I: INVESTIGAÇÃO EXPERIMENTAL¹

Maurício de Carvalho Silva²
Sebastian Cravero³
Rodrigo Magnabosco⁴
Claudio Ruggieri⁵

Resumo

O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno das delaminações e sua influência sobre a tenacidade à fratura de um aço API 5L X80 produzido no Brasil por laminação controlada com baixa temperatura de acabamento (abaixo da temperatura A_{r3}). A ocorrência de delaminações foi constatada durante o ensaio experimental de tenacidade à fratura para obtenção de curvas *J-R* do aço API 5L X80. Tais ensaios foram conduzidos utilizando-se corpos-de-prova compactos C(T), com espessura $B=15\text{mm}$, largura $W=30\text{mm}$ e relação entre o tamanho de trinca e largura, $a/W=0,6$. Para avaliar os efeitos das delaminações nestes resultados, foram conduzidas análises metalográficas para identificar sua profundidade e localização assim como seu mecanismo de formação. As delaminações ocorrem na frente de trinca principal em propagação e podem alterar os resultados das curvas *J-R*, incrementando a tenacidade à fratura do corpo-de-prova com a diminuição da restrição plástica (*constraint*) na ponta do defeito (trinca). Por outro lado, as delaminações dificultam a medição experimental da curva de resistência, uma vez que causa grande dispersão dos resultados experimentais e produz uma frente de trinca bastante irregular; ambos os efeitos podem invalidar o ensaio segundo a norma ASTM E1820.

Palavras-chave: Curvas *J-R*; Crescimento dúctil de trincas; Aços ARBL; Delaminações.

¹Apresentado no 60° Congresso Anual da ABM – Internacional – Belo Horizonte, 25 a 28 de julho de 2005.

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

³Doutorando do Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP, sebastian.cravero@poli.usp.br

⁴Prof. Dr. do Departamento de Engenharia Mecânica do Centro Universitário da FEI, rodrmagn@fei.edu.br

⁵Prof. 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 $3\mu\text{m}$ a $6\mu\text{m}$ [2]. Pode ser visto na Figura 1 que a faixa de temperatura onde a recristalização não ocorre é representada pela faixa de temperaturas entre 950°C e a temperatura A_{r3} , sendo que abaixo da A_{r3} haverá formação de ferrita [3-5].

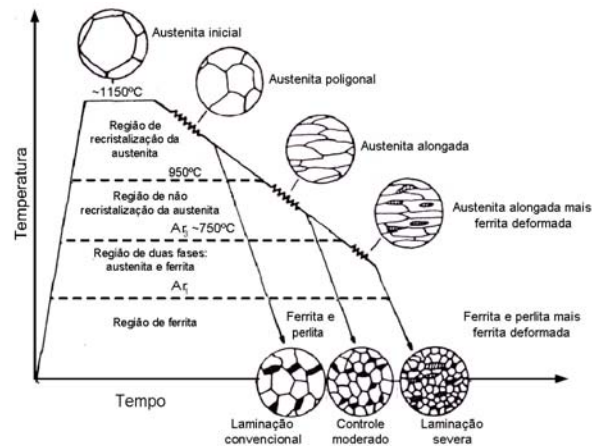


Figura 1. Ilustração do processo de laminação controlada em função da microestrutura obtida [3].

A utilização da laminação controlada para fabricação dos aços ARBL tem gerado discussões relacionadas à influência das delaminações (cavidades geradas durante o processo de fratura paralelas à direção de laminação) na tenacidade à fratura do material [4, 6-10]. Acredita-se que a ocorrência da delaminação está relacionada a uma tensão perpendicular à tensão principal no modo I de deformação, que interfere no fraturamento produzindo tanto a clivagem de grãos grandes como a fratura-decoação de interfaces fracas na matriz metálica [8, 11].

A ocorrência de delaminação do tipo clivagem está relacionada à textura cristalográfica do material. Tal textura geralmente aparece em aços API microligados que sofreram grandes deformações plásticas durante a laminação controlada conduzida em temperaturas abaixo da A_{r3} (Fig.1). Uma de suas características principais é a orientação preferencial de determinados planos cristalográficos em relação à direção de máxima deformação, gerando anisotropia no material [8]. Um outro tipo de delaminação é aquela formada a partir de inclusões não metálicas alongadas presentes no material como, por exemplo, sulfetos de manganês. Segundo Hippert [8], no entanto, este tipo de delaminação não é comum nos aços ARBL atuais, uma vez que os níveis de inclusões estão bastante reduzidos.

Thaulow et. al [11] e Faucher e Dogan [12] estudaram as propriedades de fratura em aços produzidos por laminação controlada contendo delaminações e associaram as dificuldades experimentais encontradas durante a medição do crescimento dúctil de trincas à forma irregular da frente de trinca provocada pela presença de delaminações.

O objetivo deste trabalho é estudar o fenômeno das delaminações e sua influência sobre a tenacidade à fratura, em particular nas curvas de resistência J - R obtidas experimentalmente para um aço API 5L X80 produzido no Brasil por laminação controlada com baixa temperatura de acabamento (abaixo da temperatura A_{r3}). Estas curvas foram obtidas utilizando-se corpos-de-prova compactos C(T), com espessura $B=15\text{mm}$, largura $W=30\text{mm}$ e relação entre o tamanho de trinca e largura, $a/W=0,6$. Para avaliar os efeitos das delaminações nestes resultados, foram conduzidas análises metalográficas para identificar sua profundidade e localização assim como seu mecanismo de formação. Adicionalmente, a *Parte II* deste artigo contempla um estudo mais detalhado em relação ao efeito das delaminações sobre a triaxialidade de tensões à frente da trinca.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O material utilizado neste trabalho é o aço API 5L X80 desenvolvido no Brasil pela *USIMINAS*, produzido por laminação controlada, com temperatura de acabamento de 680°C (ou seja, dentro da região de duas fases: austenita e ferrita, conforme Fig.1). Dados de composição química e propriedades mecânicas (σ_{LE} : limite de escoamento; σ_{LR} : limite de resistência; A_T : alongamento total em 50mm; CVN : energia absorvida no ensaio de impacto *Charpy*) estão descritas na Tabela 1. Estes valores estão de acordo com os requisitos da norma API 5L [13].

Tabela 1. Composição química e propriedades mecânicas do aço API 5L X80.

Composição Química (%massa)											
C	Mn	Si	Al	Nb	V	Cr	Ni	Mo	Ti	N	Ceq*
0,04	1,85	0,18	0,033	0,073	0,005	0,32	0,02	0,03	0,016	0,0037	0,16
Propriedades Mecânicas											
σ_{LE} [MPa]		σ_{LR} [MPa]		A_T [%]		CVN (-20°C) [J]					
550		676		27,5		232					

$$* Ceq = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B \quad [14].$$

Para os ensaios experimentais de curvas J - R , foram utilizados corpos-de-prova compactos C(T) [15, 16] usinados pelo CENPES (Centro de Pesquisa da Petrobrás) com espessura $B=15\text{mm}$ e largura $W=30\text{mm}$, mostrados na Figura 2.

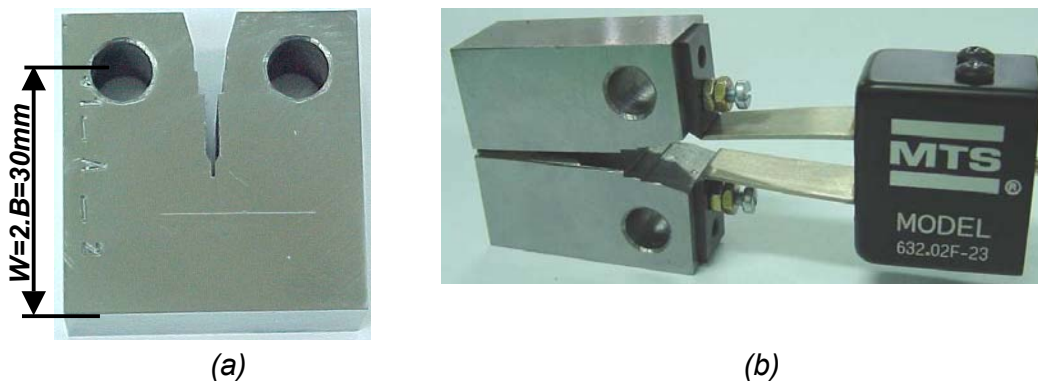


Figura 2. (a) Corpo-de-prova compacto C(T) utilizado nos ensaios de curvas J - R . (b) Posicionamento do extensômetro no corpo-de-prova.

Estes corpos-de-prova foram pré-trincados até atingir a razão pré-especificada entre o tamanho de trinca (a) e a largura de $a/W=0,6$ e em seguida entalhados lateralmente até a espessura $B_N=0,8.B$ (redução de 20%). Após a execução do pré-trincamento, entalhe lateral e posicionamento do extensômetro (tipo *clip gage*), conforme mostra a Figura 2(b), as amostras foram carregadas monotonicamente sob o modo de controle por COD (*crack opening displacement*), para obtenção da integral J e da propagação estável de trinca, Δa . O ensaio foi realizado seguindo os requisitos da norma ASTM E1820 [16], em temperatura ambiente e utilizando a técnica de corpo-de-prova único (*single specimen*) através do método de flexibilidade no descarregamento (*unloading compliance method*) [15, 17].

3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Análise metalográfica conduzida sobre o aço API 5L X80 em estudo revela (Figura 3) microestrutura bandeada (sentido longitudinal) e refinada composta por ferrita (área clara) e colônias de perlita (área escura). As Figuras 3(a) e (b) são referentes ao sentido longitudinal de laminação, enquanto que as Figuras 3(c) e (d) correspondem ao sentido transversal.

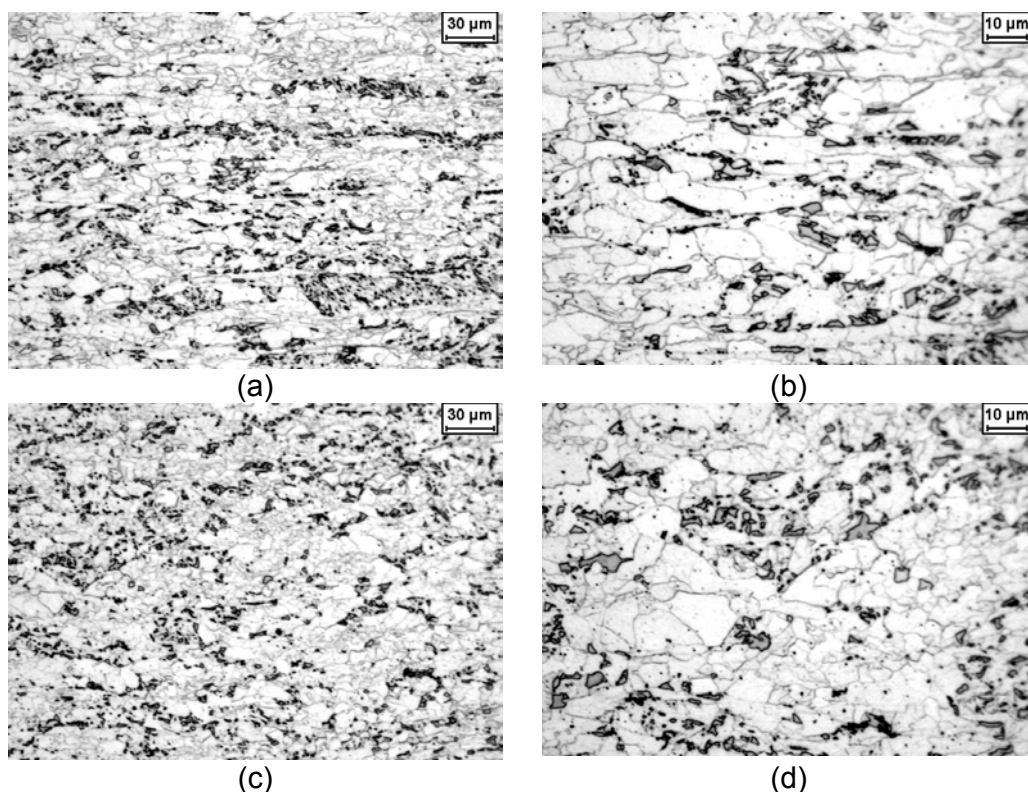


Figura 3. Análise metalográfica conduzida no aço API 5L X80: microestrutura composta por ferrita (área clara) e colônias de perlita (área escura). (a) e (b) Sentido longitudinal. (c) e (d) Sentido transversal.

A Figura 4 mostra a análise adicional por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Nota-se a presença do constituinte MA e de perlita (constituente lamelar). Portanto, esta microestrutura é composta por ferrita, perlita e constituinte MA conforme descrição de Bramfitt e Speer [18]. A presença do constituinte MA em aços API 5L X80 fabricado no Brasil também foi visualizado por Lazzari et. al [19].

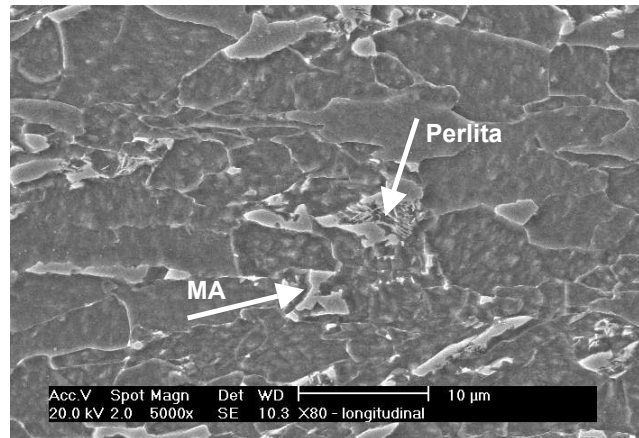


Figura 4. Análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV): presença do constituinte MA e de perlita (constituinte lamelar), ambos indicados por setas.

A Figura 5 mostra os resultados obtidos de curva J - R para o aço API 5L X80 testado nas direções TL e LT. As letras L (longitudinal) e T (transversal) estão relacionadas ao sentido de laminação. A primeira indica a direção da tensão de tração principal aplicada (que é sempre perpendicular ao plano da trinca no modo I de sollicitação) e a segunda corresponde ao sentido de propagação da trinca. Por exemplo, a orientação LT06 corresponde ao carregamento na direção longitudinal e a propagação da trinca na direção transversal ao sentido de laminação referente ao corpo-de-prova número 06 (seis). Nota-se que a evolução de J versus Δa depende da direção de ensaio; tal comportamento das curvas J - R é característico de material anisotrópico.

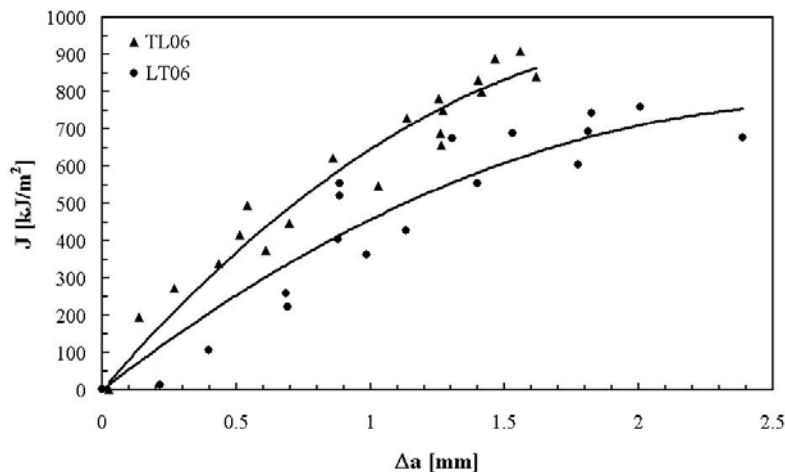


Figura 5. Curvas J - R determinadas para o aço API 5L X80 em corpos-de-prova C(T), relação $a/W=0,6$ nas orientações TL e LT.

A Figura 6(a) apresenta a curva de *Carga (P) vs. Deslocamento (COD)* obtida experimentalmente para o corpo-de-prova TL08. Esta curva apresenta regiões de queda repentina de carga. Isto indica o instante no qual as delaminações ocorreram no interior do corpo-de-prova. Este fato também foi relatado por Silva [4] e Hippert [8]. A Figura 6(b) apresenta a superfície de fratura do corpo-de-prova C(T) TL08, onde foi possível observar a presença de diversas delaminações. Estas

delaminações tornaram a frente de trinca bastante irregular, a ponto de invalidar o ensaio para este corpo-de-prova segundo a norma ASTM E1820 [16].

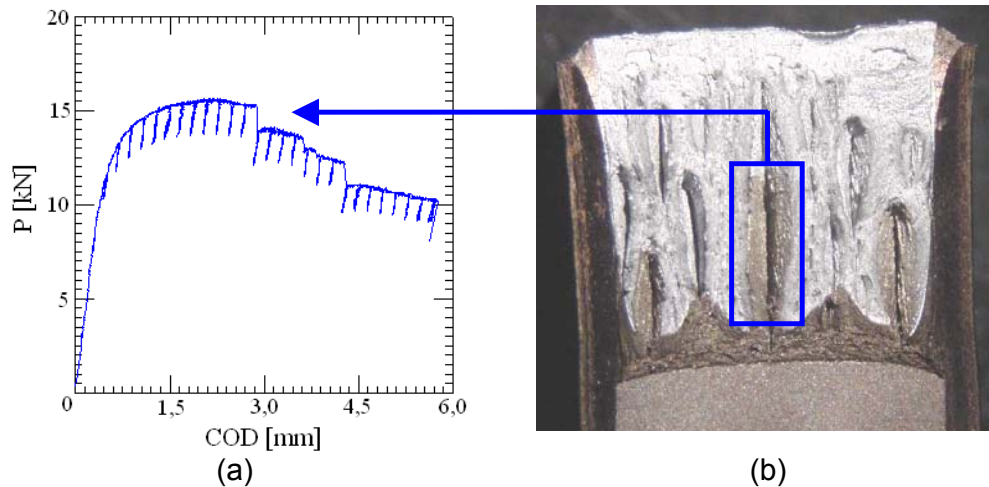


Figura 6. Corpo-de-prova TL08. (a) Curva de P vs. COD. (b) Ocorrência de delaminações na superfície de fratura, e frente irregular de crescimento estável de trinca devido às delaminações.

Para mostrar que a delaminação mais profunda ocorre no centro do corpo-de-prova (conforme observado por Hippert [8]), foi executado um corte perpendicular ao plano de propagação da trinca (Figura 7(a)) para exame metalográfico. Este fato pode ser comprovado na Figura 7(b); adicionalmente, percebe-se a ocorrência de delaminações paralelas à principal.

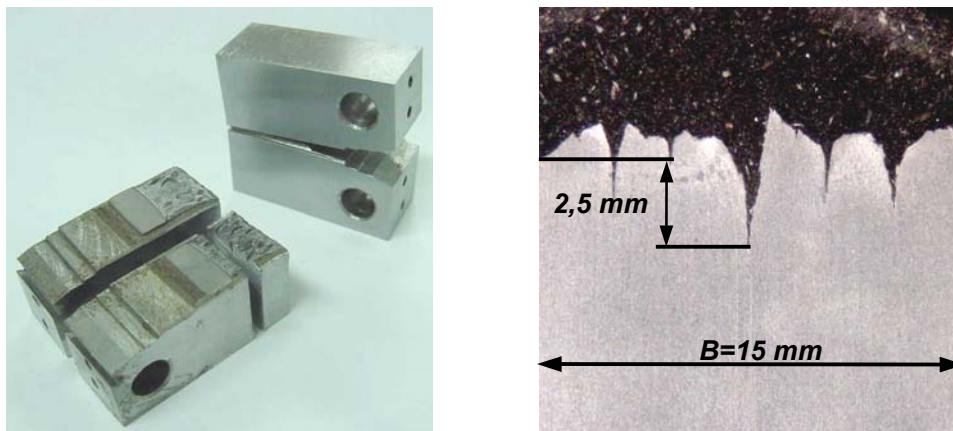


Figura 7. (a) Indicação de corte no corpo-de-prova C(T) para avaliar a profundidade das delaminações. (b) Profundidade das delaminações.

Através da observação por MEV, ficou constatado que o modo de falha nas paredes laterais da delaminação é clivagem (fratura frágil). Isto pode ser visto na Figura 8(b), sendo que na superfície de propagação de trinca (ao lado da delaminação) tem-se o aspecto de fratura dúctil, como observado na Figura 8(c).

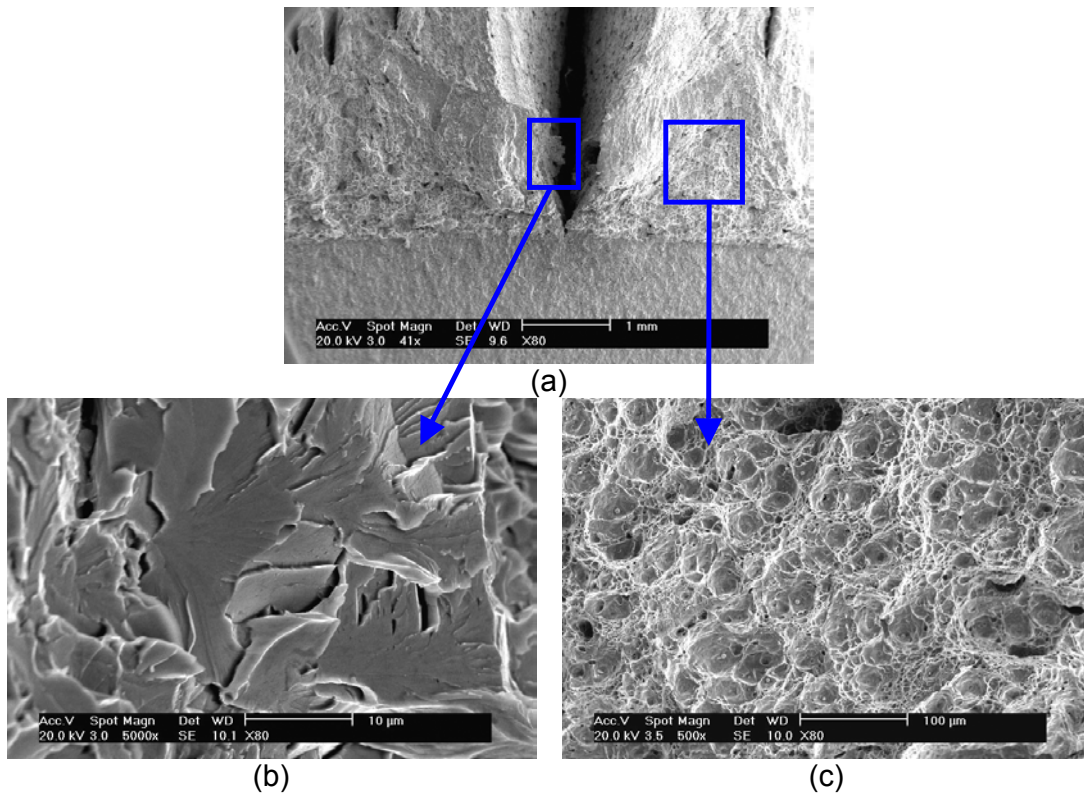


Figura 8. (a) Delaminação central ocorrida no corpo-de-prova C(T), aço API 5L X80. (b) Aspecto frágil de fratura no interior da delaminação. (c) Aspecto dúctil de fratura na superfície de propagação de trinca.

4 DISCUSSÃO

A análise da Figura 5 revela que o corpo-de-prova na direção TL apresenta uma maior resistência à propagação dúctil de trinca em comparação à direção LT. Tal comportamento é algo distinto do que seria normalmente antecipado em ensaios de curvas *J-R* de materiais similares. De fato, Silva [5] determinou curvas *J-R* de aços API X60 utilizado em dutos e obteve a orientação TL como a mais crítica em relação à iniciação e propagação de trincas em tubulação. Este aumento de resistência na direção TL e as dispersões observadas nas curvas *J-R* do aço API 5L X80 testado são associadas à severa ocorrência de delaminações na superfície de propagação de trinca. Neste caso, a decoesão de interfaces posicionadas perpendicularmente à direção de propagação da trinca diminui a espessura efetiva do corpo-de-prova (Figura 6(b)) o que diminui, conseqüentemente, a restrição plástica (*constraint*) do corpo-de-prova. Entretanto, a ocorrência destas delaminações dificulta a determinação experimental de curvas *J-R* [6-8].

Conforme esquematizado na Figura 9(a), ao aplicar um carregamento no corpo-de-prova desenvolve-se um estado triaxial de tensões à frente da trinca (maiores detalhes são abordados na *Parte II* deste artigo). As tensões na direção Z atuam sobre um plano de menor resistência, devido à textura cristalográfica do material, e podem gerar superfícies perpendiculares às mesmas (Figura 9(b)). Isto justifica, portanto, a ocorrência das delaminações em aços produzidos por laminação controlada, principalmente na direção TL.

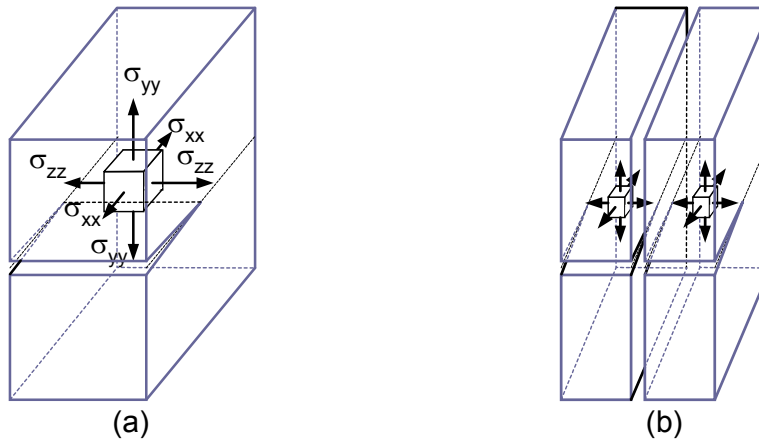


Figura 9. Esquema do corpo-de-prova C(T). (a) Representação do estado triaxial de tensões. (b) Geração de superfície perpendicular à direção Z.

5 CONCLUSÕES

O estudo da ocorrência de delaminações e seu efeito sobre a tenacidade do aço API 5L X80 permite obter as seguintes conclusões:

- A caracterização metalográfica do material revelou um aço de microestrutura bandeada e refinada composta por ferrita, colônias de perlita e constituinte MA.
- A curva *J-R* obtida para o corpo-de-prova na direção TL apresenta uma maior resistência à propagação dúctil de trincas se comparado à direção LT. Este aumento de resistência na direção TL e as dispersões observadas nas curvas *J-R* do aço API 5L X80 testado são associadas à ocorrência de delaminações na superfície de propagação de trincas.
- A ocorrência de delaminações, a qual representa uma consequência do processamento termomecânico conduzido em temperaturas abaixo da A_{r3} , incrementa a tenacidade à fratura do corpo-de-prova em função da diminuição da restrição plástica (*constraint*) na ponta do defeito (trinca).
- Adicionalmente, as delaminações dificultam a medição experimental, fazendo com que os resultados obtidos apresentem grandes dispersões e algumas vezes produzindo uma frente de trinca bastante irregular, a ponto de invalidar o ensaio segundo a norma ASTM E1820.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Centro Universitário da FEI pela disponibilização das facilidades laboratoriais, à Petrobrás pela disponibilização dos corpos-de-prova C(T), em especial aos Eng. Eduardo Hippert Jr. e José Cláudio G. Teixeira pelas discussões e contribuições, à CONFAB pela disponibilização de amostras de tubos de aço API 5L X80 e à USIMINAS pelas informações técnicas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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. ESTADOS UNIDOS. 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. GUO, W.; DONG, H.; LU, M.; ZHAO, X. *The coupled effects of thickness and delamination on cracking resistance of X70 pipeline steel*. Pressure Vessels and Piping, v.79, p.403-412, 2002.
7. SHANMUGAM, P.; PATHAK, S.D. *Some studies on the impact behaviour of banded microalloyed steel*. Engineering Fracture Mechanics, v.53, p.991-1005, 1996.
8. HIPPERT JR., E. *Investigação experimental do comportamento dúctil de aços API-X70 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.
9. SILVA, M.C. *Caracterização das propriedades mecânicas e metalúrgicas do aço API 5L X80 e determinação experimental de curvas J-R para avaliação da tenacidade à fratura*. 2004. Dissertação apresentada para obtenção do título de mestre em engenharia. Departamento de Engenharia Naval e Oceânica da Escola Politécnica da USP. São Paulo.
10. CHAWLA, K.K. *The phenomenon of separations in microalloyed control-rolled pipeline steels*. In: Proceedings of the International Congress on Fracture - Fracture Prevention in Energy and Transport Systems. Rio de Janeiro, 1983. p.101-108.
11. THAULOW, C.; PAAUW, A. J.; GUNLEIKSRUD, A.; TROSET, J. *Fracture mechanical properties in controlled rolled CMn thermomechanically treated steels with splittings*. In: Engineering Fracture Mechanics, v.24, p.263-276, 1986.
12. FAUCHER, B.; DOGAN, B. *Evaluation of the fracture toughness of hot-rolled low-alloy Ti-V steel*. In: Metallurgical Transactions A, v.19A, p.505-516, Mar. 1988.
13. ESTADOS UNIDOS, American Petroleum Institute. *Specification for line pipe steel API5L*. 42a. edição. New York, 2001.
14. BATISTA, G.Z.; SOUZA, L.F.G.; BOTT, I.S.; RIOS, P.R. *Estudo da correlação microestrutura-propriedades mecânicas de aço da classe API X80*. In: 58º Congresso anual da ABM, Rio de Janeiro, jul. 2003.
15. ANDERSON, T.L. *Fracture mechanics: Fundamentals and applications*. 2.ed. New York: CRC Press, 1995. p.122-143, 385-391.
16. AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. *Standard test method for measurements of fracture toughness*. ASTM E1820. New York, 1996.
17. JOYCE, J. *Manual on elastic-plastic fracture: Laboratory test procedures*. Pensilvânia: ASTM manual series-MNL 27, 1996.
18. BRAMFITT, B.L.; SPEER, J.G. *A perspective on the morphology of bainita*. Metallurgical Transactions A, v.21A, p.817-828, Apr. 1990.
19. LAZZARI, V; MACHADO, S.; SILVA, C.; NETO, O.; MOREIRA, J. *Industrial data on the first API X80 line pipe produced in Latin América*. Cosipa Works, São Paulo.

EFFECT OF DELAMINATION ON *J-R* CURVES OF API 5L X80 CONTROLLED ROLLED PIPELINE STEEL – PART I: EXPERIMENTAL INVESTIGATION¹

Maurício de Carvalho Silva²
Sebastian Cravero³
Rodrigo Magnabosco⁴
Claudio Ruggieri⁵

Abstract

This work addresses the effect of delamination on fracture toughness of API 5L X80 controlled rolled pipeline steel with low finish rolling temperature (below A_{r3}). The delamination phenomenon was observed during experimental fracture toughness test to measure *J-R* curves, using compact C(T) specimens. The fracture specimens have thickness (B) of 15mm, width (W) of 30mm and crack length to width ratio (a/W) of 0.6. To evaluate the effects of delaminations on the experimental results, metallographic analyses are carried out in tested specimens to identify depth, location and mechanism of delamination. The occurrence of delamination influenced the *J-R* curves results, which increased the specimen fracture toughness as a function of the loss of constraint at the crack tip. The delaminations also caused large scatter in the experimental results and an irregular crack front in some specimens, which invalidates the test according to ASTM E1820 standard.

Key-words: *J-R* curves; Ductile crack growth; HSLA steel; Delaminations.

¹ Paper presented at 60th Annual International Congress of ABM – São Paulo, July 25th to 28th, 2005.

² Graduate Student, Naval Engineering Department – EPUSP, carvalho.silva@poli.usp.br.

³ Graduate Student, Naval Engineering Department – EPUSP, sebastian.cravero@poli.usp.br.

⁴ Assistant Professor, Mechanical Engineering Department – FEI, rodrimagn@fei.edu.br.

⁵ Associate Professor, Naval Engineering Department – EPUSP, claudio.ruggieri@poli.usp.br.