



TENACIDADE À FRATURA DE DOIS AÇOS DA CLASSE API PARA EMPREGO EM DUTOS¹

Luiz Henrique Soares Barbosa²

Ricardo Porto³

Leonardo Barbosa Godefroid⁴

Resumo

No sentido de melhorar a produtividade de dutos e devido às grandes distâncias envolvidas entre os locais de exploração de petróleo e o consumidor final, as companhias petrolíferas têm demandado por aços com propriedades mecânicas elevadas. Neste contexto, a utilização de aços da classe API X80 aumentou de cerca de 0,5Mt na década de 1990 para 2,5Mt neste século. Com o objetivo de suprir a demanda futura da PETROBRAS para aços do tipo API X80 (espessura > 12,7mm e diâmetro > 24mm), a ARCELORMITTAL TUBARÃO iniciou a produção deste aço na forma de bobinas a quente, com rigoroso controle de composição química e de processamento termomecânico. O presente trabalho mostra resultados em termos de tenacidade à fratura (integral J) para um aço API X80, e compara o seu desempenho com um aço API X70, para diversas condições de fabricação.

Palavras-chave: Dutos; Tenacidade à fratura; Aço API X80.

FRACTURE TOUGHNESS OF TWO API STEELS

Abstract

In order to improve the productivity of pipelines and due to the huge distances from petroleum exploration sites to the final consumers, the petroleum companies have been demanded higher mechanical properties of the pipes. In this context, the use of X80 grade increased from 0.5Mt in 90's to 2.5 Mt in this century. In order to supply the future Petrobras demands for X80 grades (thickness > 12.7mm and diameter > 24mm), ArcelorMittal Tubarão started to develop this grade, using hot coils products, that are lower-priced product in comparison with heavy plate product. It was used a high strength low alloy steel and thermo-mechanical process control to develop this grade in order to reach tensile and toughness requirements of API Standard for X80 grade. This research compares the fracture toughness behavior of two API steels, X80 and X70 grades, in function of their thermomechanical controlled processing and related microstructures.

Keywords: Pipelines; Fracture toughness; API X80 steel.

¹ Contribuição técnica ao 65º Congresso Anual da ABM, 26 a 30 de julho de 2010, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

² Aluno de Física, UFOP, Ouro Preto – MG.

³ Eng. Metalurgista, ARCELORMITTAL TUBARÃO, Vitória, ES.

⁴ Professor, M.Sc., D.Sc., REDEMAT, UFOP, Ouro Preto – MG.

1 INTRODUÇÃO

A produção mundial de petróleo e gás e o consumo de seus derivados têm crescido de forma significativa. Para atender esta demanda, torna-se necessário que os dutos utilizados em seu transporte tenham maiores diâmetros e operem a pressões mais elevadas. Para isto, é preciso empregar aços de maior resistência mecânica, que evitam o uso de espessuras muito elevadas e, conseqüentemente, permitem a redução do peso e dos custos de construção dos dutos.

A fabricação de dutos para linhas de transmissão de petróleo e gás segue a Norma API 5L.⁽¹⁾ A Figura 1 mostra resumidamente a evolução no desenvolvimento de diversos graus de aços que atendem esta norma,⁽²⁾ a nível mundial e brasileiro, com crescente resistência mecânica. A Figura 2 mostra a elevada taxa de crescimento a partir do ano 2000 no consumo do aço API X80,⁽³⁾ que se apresenta como um candidato promissor para aplicações industriais.

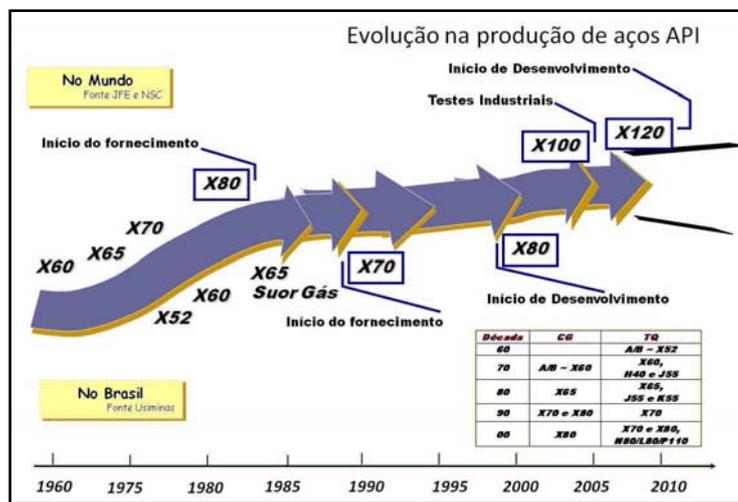


Figura 1: Evolução na produção de aços API.⁽²⁾

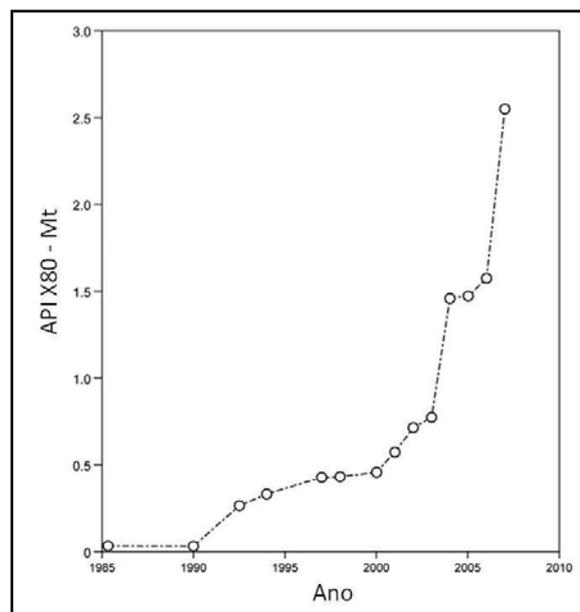


Figura 2: Consumo de aços API X80.⁽³⁾

O requisito de elevada resistência mecânica, aliado a uma boa tenacidade à fratura em baixas temperaturas e também boa soldabilidade, implica no emprego de aços

baixo carbono microligados, obtidos por processamento termomecânico controlado. O objetivo final é a obtenção de uma microestrutura com presença de fases bem selecionadas e refinado tamanho de grão. A Figura 3 ilustra a evolução microestrutural alcançada com estes aços,⁽⁴⁾ e consequente melhoria de propriedades mecânicas, ao longo das últimas décadas.

Este trabalho teve por objetivo a avaliação da tenacidade à fratura, em termos da integral J, de um aço API X80, e sua comparação com um aço API X70, em função da variação de diversos parâmetros operacionais durante o processamento por laminação controlada.

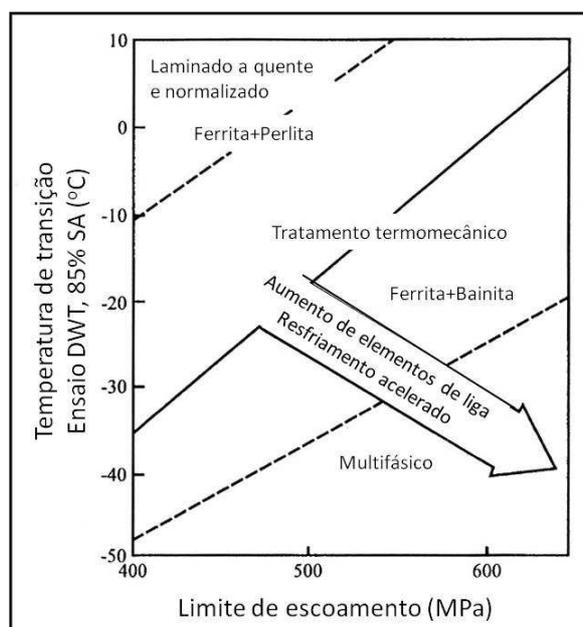


Figura 3: Alterações microestruturais para o desenvolvimento de aços API com elevados valores de resistência mecânica e tenacidade à fratura.⁽⁴⁾

2 MATERIAIS E PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Os dois aços estudados neste trabalho foram preparados com um teor de carbono menor do que 0,12%, baixos valores de carbono equivalente e de adições microligantes. Placas foram fabricadas por laminação controlada, com variação dos seguintes parâmetros: temperatura de fim de desbaste, temperatura de acabamento, temperatura de bobinamento e taxa de deformação.

Amostras para metalografia foram preparadas e observadas em um microscópio ótico (MO) LEICA com analisador de imagens, usando o reativo químico de Nital 2% para revelação da microestrutura.

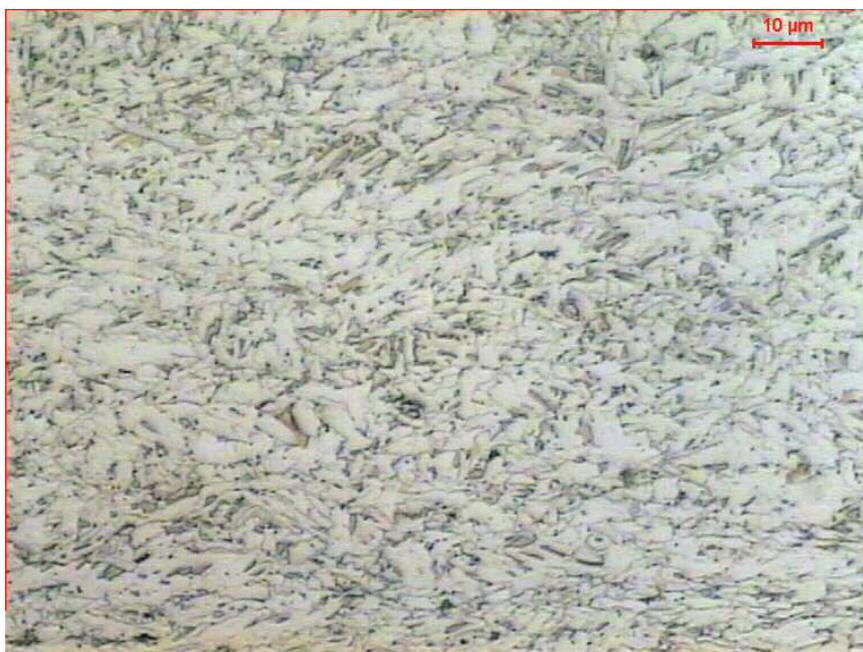
Ensaio de tração e de tenacidade à fratura foram realizados numa máquina servo-hidráulica MTS de 10 ton, com aquisição de dados por computador, na temperatura ambiente. As superfícies de fratura foram analisadas num microscópio eletrônico de varredura (MEV) JEOL.

Todos os corpos de prova foram preparados com a espessura $B = 12,7\text{mm}$, que corresponde a uma espessura real de aplicação dos aços em dutos. Os corpos de prova de tenacidade à fratura consistiram de uma geometria do tipo SE(B), orientação TL, com relação largura/espessura $W/B = 2$ e distância entre roletes $S = 4W$. Foram ensaiados cinco corpos de prova para cada situação.

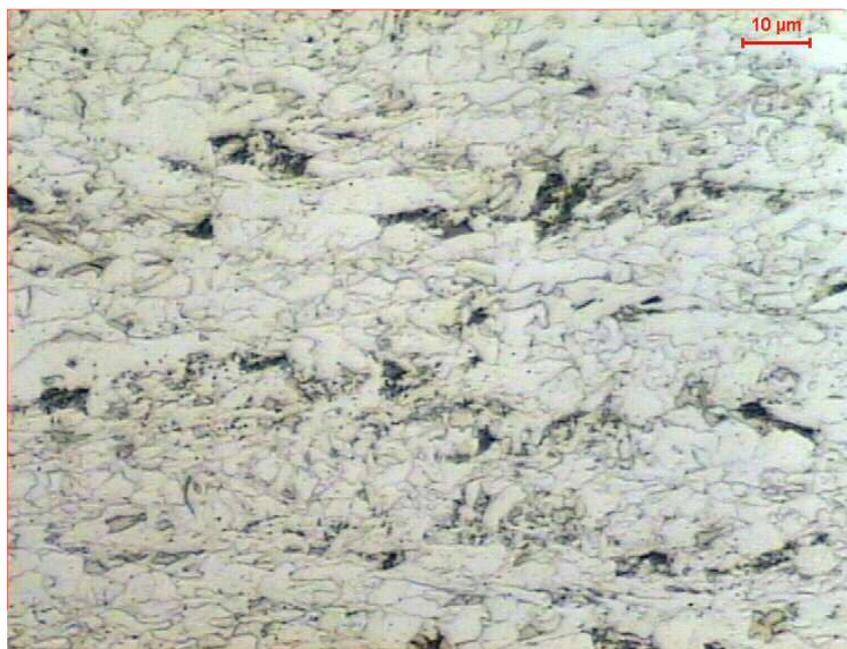
Os parâmetros utilizados⁽⁵⁾ nos ensaios de integral J foram: relação a/W de 0,65, incremento de deslocamento de 0,2mm, taxa de incremento de 2mm/min, porcentagem de descarregamento em cada passo de 10%, duas etapas de descarregamento em cada passo, intervalo para propagação de trinca de 5s em cada passo. A partir da obtenção de curvas $P-COD$, foram traçadas as curvas $J-\Delta a$ para os aços em questão e calculado o valor de J_Q , seguido de verificações para obtenção de J_{IC} .

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Duas microestruturas do aço API X80 são apresentadas na Figura 4(a,b). Estas microestruturas foram obtidas para condições distintas de laminação. Na Figura 4(a) tem-se uma mistura de ferrita acicular/poligonal, com ilhas de bainita/martensita, tamanho de grão relativamente pequeno. Esta microestrutura é proveniente de uma laminação com temperaturas mais reduzidas, e uma taxa de deformação mais elevada nas cadeiras finais do trem acabador, e caracteriza um produto obtido por laminação controlada.^(6,7) Na Figura 4(b) tem-se a presença de ferrita poligonal e perlita, tamanho de grão relativamente maior e distribuição mais heterogênea. Esta microestrutura é proveniente de uma laminação com temperaturas mais elevadas, e uma taxa de deformação mais elevada nas cadeiras iniciais do trem acabador. Neste caso, a laminação no trem acabador foi realizada em temperaturas superiores à temperatura de não recristalização, não sendo, portanto, alcançados os objetivos da laminação controlada.^(6,7) Esta situação possivelmente foi agravada pelo uso de taxas de redução mais elevadas justamente nesta região.



(a)



(b)

Figura 4: Microestrutura do aço API X80. Direção transversal. Reativo Nital 2%. MO 1000X. (a) Ferrita acicular/poligonal, com ilhas de bainita/martensita. (b) Ferrita poligonal e perlita.

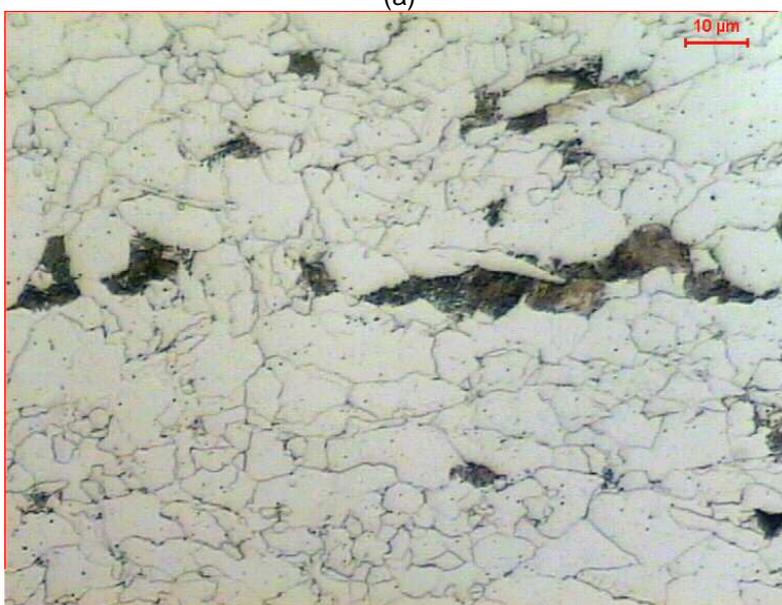
Duas microestruturas do aço API X70 são apresentadas na Figura 5(a,b). Estas microestruturas foram obtidas para condições de laminação análogas à descrição apresentada para a Figura 4(a,b). As variações microestruturais são semelhantes à análise realizada com o aço X80, com a única diferença de um maior tamanho de grão para as amostras do aço X70.

A literatura cita⁽⁸⁻¹²⁾ que a microestrutura usualmente encontrada em aços do tipo API X80 obtido por laminação controlada é a ferrita acicular, devido a sua boa combinação de elevada resistência mecânica e elevada tenacidade, além da redução do efeito Bauschinger. Por outro lado, a presença de outros microconstituintes deve alterar estas características. Assim, deve-se procurar controlar de forma adequada os parâmetros operacionais de processamento termomecânico, para se ter um material que atenda as especificações.

Propriedades mecânicas de tração dos dois aços (direção transversal) são apresentadas na Tabela 1. Esta Tabela indica os aços que foram caracterizados pela análise microestrutural anterior. A variação de propriedades para cada aço está relacionada com a variação dos parâmetros de laminação controlada e consequentes mudanças microestruturais. Observa-se que o aço API X80 apresentou a maior resistência mecânica, sem perda significativa de ductilidade. Por outro lado, a análise fractográfica mostrou uma fratura dúctil para os dois aços, com um mecanismo de nucleação, crescimento e coalescimento de microcavidades, independente do processamento termomecânico adotado.



(a)



(b)

Figura 5: Microestrutura do aço API X70. Direção transversal. Reativo Nital 2%. MO 1.000X. (a) Ferrita acicular/poligonal, com ilhas de bainita/martensita. (b) Ferrita poligonal e perlita.

Tabela 1: Resultados de propriedades mecânicas de tração

Aço	LE	LR	ALO
	MPa	MPa	%
API-X70 B=12,7mm			
A (Figura 5b)	559	618	38
B	564	663	33
C	531	634	36
D (Figura 5a)	531	633	40
E	564	668	35
API-X80 B=12,7mm			
A (Figura 4b)	614	690	34
B (Figura 4a)	627	717	32
C	631	732	31
D	631	736	31



Um gráfico típico de resistência $J-\Delta a$ que caracteriza a tenacidade à fratura dos aços estudados está apresentado na Figura 6. O valor da integral J correspondente ao início do crescimento estável de trinca, está mostrado também nesta Figura. Pode-se observar o melhor desempenho do aço API X80. Os requisitos exigidos pela norma ⁽⁵⁾ sobre espessura mínima, ligamento remanescente mínimo e inclinação da curva J-R foram atendidos, de tal sorte que $J_Q = J_{IC}$. A análise fratógráica da região correspondente ao valor de J_Q mostrou novamente um comportamento dúctil para os dois aços. A Figura 7(a,b) ilustra este comportamento.

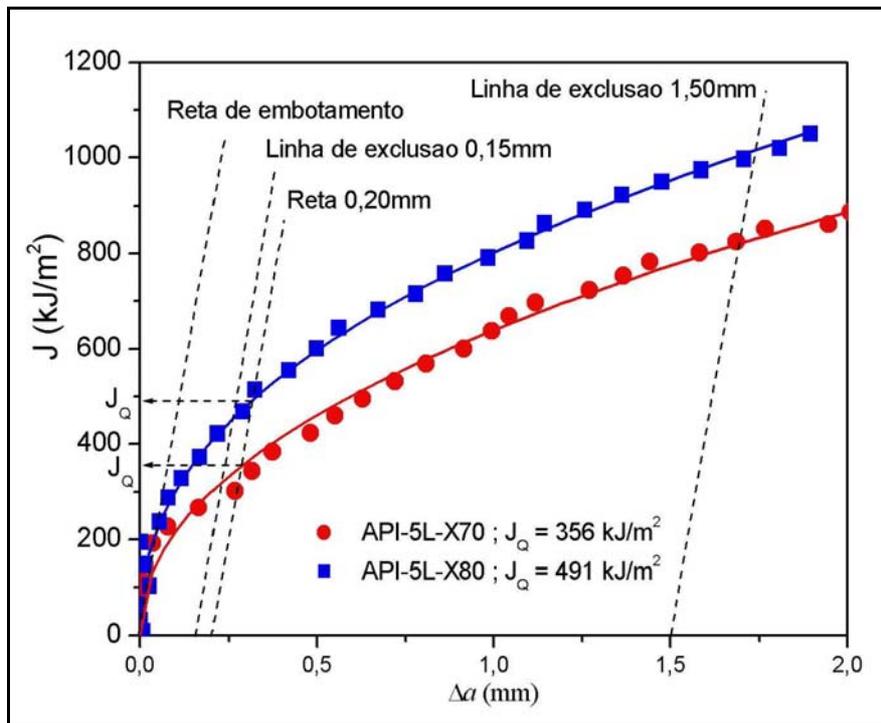
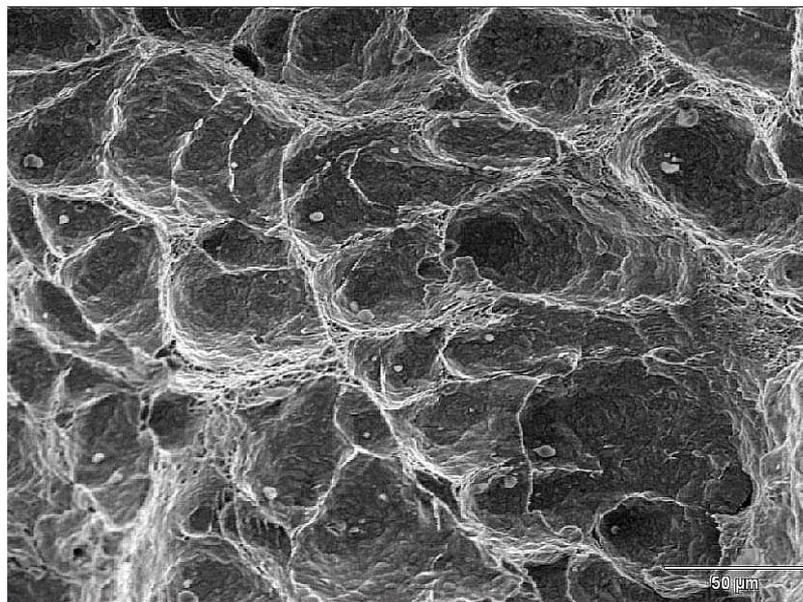
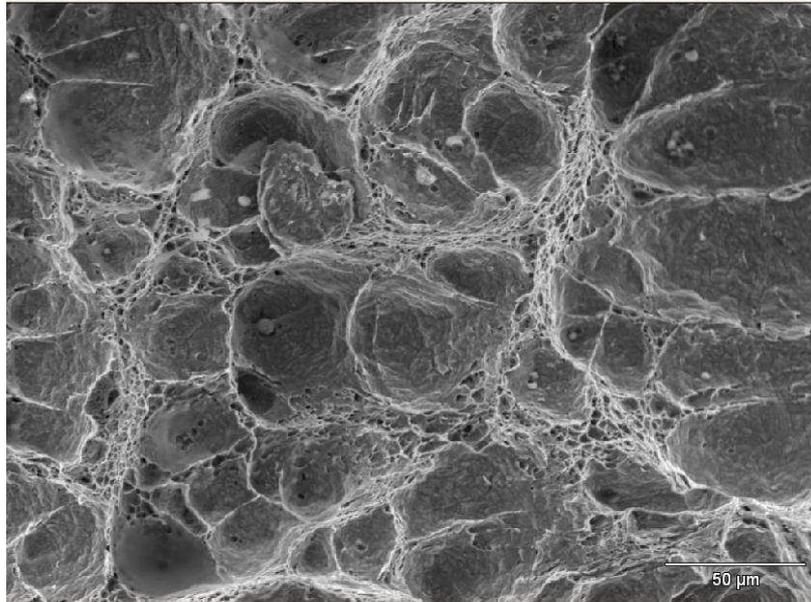


Figura 6: Curvas de resistência $J-\Delta a$ obtidas a partir do ensaio de integral J para os aços estudados. O gráfico mostra as construções realizadas para a determinação de J_{IC} .



(a) Aço API X80.



(b) Aço API X70

Figura 7: Fratografias de corpos de prova de tenacidade à fratura dos aços estudados. Região correspondente ao valor de J_{IC} . 500X. MEV.

Para evidenciar o efeito da variação de parâmetros da laminação controlada nas propriedades dos aços estudados, a Figura 8 mostra a relação entre a tenacidade à fratura (valor de J_{IC}) e a resistência mecânica por tração (limite de resistência). Observa-se que o aço API X80 apresentou uma maior resistência mecânica, sem perder sua tenacidade à fratura, em comparação com o aço API X70. A grande variação de resultados encontrados deve-se à variação microestrutural, em decorrência da variação dos parâmetros de laminação controlada. Conforme já comentado, temperaturas elevadas nas diversas etapas do processo de laminação e uma maior taxa de redução no início desse processo serão responsáveis por uma microestrutura que fornece menores valores tanto para a resistência à tração quanto para a tenacidade à fratura.^(6,7)

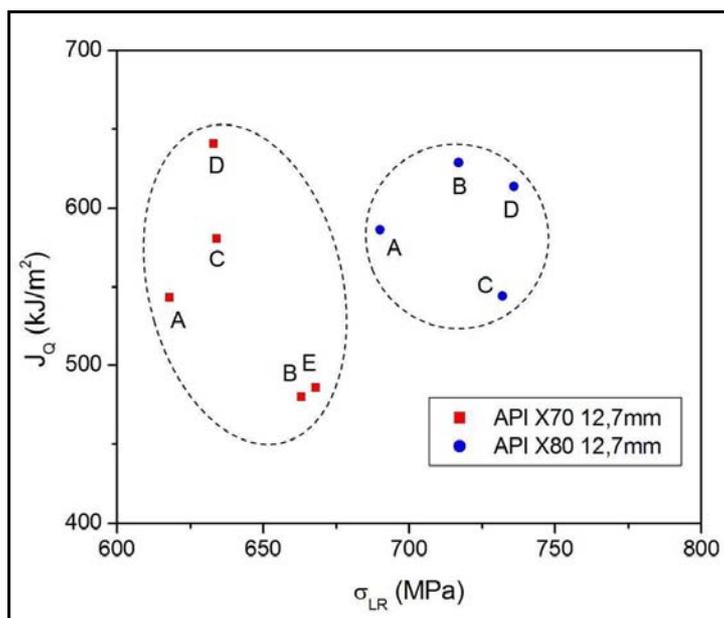


Figura 8: Relação entre a tenacidade à fratura e o limite de resistência por tração para os dois aços API estudados. Para identificação de cada aço, deve-se reportar à Tabela 1.

4 CONCLUSÕES

A alteração simultânea de valores para a temperatura de fim de desbaste, a temperatura de acabamento, a temperatura de bobinamento e a taxa de deformação na laminação dos aços API X70 e X80 provocou significativas modificações microestruturais e comportamentais.

A utilização de temperaturas relativamente mais baixas nas etapas do processo de laminação à quente (temperatura de não recristalização) e a utilização de taxa de deformação mais elevada nas cadeiras finais do trem acabador conduziram ao desenvolvimento de uma microestrutura típica de laminação controlada, isto é, ferrita acicular/poligonal e ilhas de bainita/martensita, com tamanho de grão reduzido. Caso contrário, os objetivos da laminação controlada não foram alcançados, e a microestrutura desenvolvida consistiu de ferrita poligonal e perlita.

Em termos de propriedades mecânicas, o aço API X70 conseguiu valores relativamente elevados para a tenacidade à fratura somente quando a microestrutura se aproximou das características típicas de laminação controlada. Isto também aconteceu para o aço API X80, mas neste caso a resistência mecânica por tração foi sempre superior. Daí, verifica-se a vantagem de se optar pelo aço API X80 para aplicações em gasodutos e oleodutos.

REFERÊNCIAS

- 1 American Petroleum Institute: **Specification for Line Pipe. ANSI/API Specification 5L**, Forty-Four Edition, Oct/2008.
- 2 TAISS, E.J.M.: O Mercado de Aços de Elevado Valor Agregado – Tendências Tecnológicas e a estratégia da Usiminas no Atendimento às Demandas. **Workshop: Inovações para Desenvolvimento de Aços de Alto Valor Agregado - Tubos de Alta Resistência para Aplicações Estruturais e Transmissão de Fluidos**, 62^o Congresso Anual da ABM, Vitória, ES, 2007.
- 3 SICILIANO, F.; STALHEIM, D. G.; GRAY, M. J.: Modern High Strength Steels for Oil and Gas Transmission Pipelines, **7th International Pipeline Conference**, Set/2008, Calgary – Canada.
- 4 LLEWELLYN, D.T.: **Steels – Metallurgy & Applications**. Butterworth-Heinemann Ltd., 1994.
- 5 ASTM E-1820-05, **2006 Annual Book of ASTM Standards**.
- 6 PORTO, R., TARSO, P. e GODEFROID, L.B.: Avaliação da influência dos parâmetros de laminação a quente na tenacidade do aço microligado para gasodutos, submetido para publicação em **65^o Congresso Anual da ABM**, Rio de Janeiro - RJ, 26 a 30 de julho de 2010.
- 7 PORTO, R., SOUZA, M.V., TARSO, P., CARVALHO, R.D., BARBOSA, G.M e GODEFROID, L.B.: Development of API 5L-X80 as hot coils at ArcelorMittal Tubarão, **ICAM-2009**, Rio de Janeiro, setembro/2009.
- 8 GRAF, M.; SCRODER, J.; SCHWINN, V.; HULKA, K.: Production of Large Diameter Pipes Grade X70 with High Toughness Using Acicular Ferrite Microstructures. Disponível em <http://www.cbmm.com.br>
- 9 BHADSHIA, H.K.D.H, LEE, C.H., LEE, H.C.: Effect of Plastic Deformation on the Formation of Acicular Ferrite. Londres, 2003. Disponível em: <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans>
- 10 BHADSHIA, H.K.D.H; YANG, J.R.: Thermodynamics of the acicular ferrite transformation in alloy steel weld deposits. Londres, 1987. Disponível em <http://www.msm.cam.ac.uk/phase-trans>



- 11 WEIWEI, L.; CHUNYONG, H.; QIURONG, M.; YAORONG, F.: The Development of Large Diameter & Thickness X80 HSAW Linepipe, **7th International Pipeline Conference**, Alberta, Canadá, Set/08
- 12 STALHEIM, D.G.; BARNES, K.R.; MCCUTCHEON, D.B: Alloy Designs for High Strength Oil and Gas Transmission Linepipe Steels. **CBMM-TMS International Symposium Microalloyed Steels for the Oil and Gas Industry**, Jan/2006, Araxá, Brasil.