

Marcelo Toledo Valim

**Tenacidade a Fratura da Junta Soldada Obtida a Arco
Submerso de Aço API 5L Grau X-80**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio.

Orientadora: Ivani de S. Bott

Rio de Janeiro, Setembro de 2005



Marcelo Toledo Valim

**Tenacidade a Fratura da Junta Soldada Obtida
a Arco Submerso de Aço API 5L Grau X80**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica e de Materiais pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica do Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Prof. Ivani de S. Bott

Orientadora

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

Prof. Eduardo Hippert Júnior

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento - CENPES

Prof. Fathi Aref Ibrahim Darwish

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da
PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de setembro de 2005.

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

Marcelo Toledo Valim

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal Fluminense em 2001. Possui experiência profissional como Engenheiro de Vendas.

Ficha Catalográfica

Valim, Marcelo Toledo

Tenacidade a fratura da junta soldada obtida a arco submerso de aço API 5L grau X80 / Marcelo Toledo Valim ; orientador: Ivani de S. Bott. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2005.

86 f. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia.

Inclui bibliografia.

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Metalurgia. 3. Soldagem. 4. Aços API. 5. Mecânica da fratura. I. Bott, Ivani de S. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. IV. Título.

CDD: 669

“A vida não é um corredor reto e tranqüilo que nós percorremos livres e sem empecilhos, mas um labirinto de passagens, pelas quais nós devemos procurar nosso caminho, perdidos e confusos de vez em quando presos em becos sem saída. Porém, se tivermos fé, uma porta sempre será aberta para nós, não talvez aquela sobre a qual nós mesmos nunca pensamos, mas aquela que definitivamente se revelará boa para nós.”

(A.J.Cronin)

Ao meu pai e a minha mãe pela dedicação, apoio e estímulo na busca de novos conhecimentos.

À minha irmã Patrícia pelo incentivo ao longo desses anos.

Agradecimentos

À minha orientadora e amiga, professora Ivani de S. Bott, PhD, pelo estímulo, ensinamentos e parceria durante a realização deste trabalho.

Ao professor Telmo Strohaecker do Lamef / UFRGS pela orientação na realização do ensaio de Integral J e pelo acolhimento em Porto Alegre-R.S.

A ANP (Agencia Nacional do Petróleo) pela concessão da bolsa de estudos através da participação no Programa PRH-ANP

Ao Engenheiro José Cláudio Guimarães Teixeira, MSc, da PETROBRAS/CENPES pela co-orientação inicial do trabalho.

Ao Engenheiro do DCMM Marcos Henrique de Pinho Maurício, PhD, pelo auxílio nos ensaios experimentais.

Ao Técnico de Laboratório Heitor Nuss Guimarães, pelo auxílio concedido.

À colega e amiga Ana Carolina, pelo convívio, estímulo e auxílios inestimáveis.

Ao colega Engenheiro Francisco de Araújo Martins, pelo apoio constante.

Ao colega Engenheiro Eduardo Campelo, pelas palavras de apoio e estímulo.

A CONFAB pela doação dos tubos dos aços X80.

A PETROBRAS/CENPES pela realização de parte dos ensaios.

Aos meus colegas da PUC-Rio, em geral, pelo apoio.

A todos os professores e funcionários do DCMM, em especial o professor Fathi Aref Ibrahim Darwish, Ph.D, pelos ensinamentos e ajuda.

Aos amigos da UFRGS pela ajuda na montagem do ensaio de Integral J.

Resumo

Valim, Marcelo Toledo. **Tenacidade a Fratura da Junta Soldada Obtida a Arco Submerso de Aço API 5L Grau X-80**. Rio de Janeiro, 2005.86p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho de tese faz parte de um estudo de desenvolvimento de aço API X80 e o objetivo deste trabalho foi avaliar o crescimento estável de uma trinca superficial localizada na zona termicamente afetada (ZTA) da junta longitudinal obtida pelo processo de arco submerso. Foram estudados dois aços API 5L X80 pertencentes aos sistemas NbCr e NbCrMo. Considerando que dutos operam sob altas pressões, gerando um estado de tensão severo sob um defeito ou trinca presente no material pode ocorrer falha da estrutura. Deste modo, torna-se necessário estudar a natureza destas trincas e o potencial de crescimento, permitindo assim controlar e prever o crescimento estável da trinca. Para avaliar o comportamento da trinca, foi utilizada a metodologia de integral J. Esta metodologia objetiva avaliar e prever o comportamento à fratura. Os resultados esperados no ensaio de integral J é a obtenção da curva de resistência J-R e o valor do J_{Ic} , que representa o valor de J no início do crescimento estável de trinca.

Palavras-chave

Soldagem; Tenacidade a Fratura; Integral J

Abstract

Valim, Marcelo Toledo. Fracture Toughness of the Welded Joint Gotten the Submerged Arc of Steel API 5L Grade X80. Rio De Janeiro, 2005.86p. Master Dissertation - Department of Science of the Materials and Metallurgy, Pontifical University Catholic of Rio De Janeiro.

This work of thesis is part of a study of steel development API X80 and the objective of this work was to evaluate superficial the steady growth of one crack located in the heat affected zone (HAZ) of together the longitudinal one gotten by the process of submerged arc. Two pertaining steel API had been studied 5L X80 to the systems NbCr and NbCrMo. Considering that pipes operate under high pressures, generating a severe state of tension under a present defect or crack in the material imperfection of the structure can occur. In this way, one becomes necessary to study the nature of these cracks and the potential of growth, being thus allowed to control and to foresee the steady growth of crack. To evaluate the behavior of crack, the methodology of integral J was used. This objective methodology to evaluate and to foresee the behavior to the breaking. The results waited in the assay of integral J are the attainment of the curve of resistance J-R and the value of the J_{Ic} , which represents the value of J in the beginning of the steady growth of crack.

Keywords

Welding; Toughness; Integral J

Sumário

1 - Introdução	16
2 - Revisão Bibliográfica	18
2.1. Aços para dutos	18
2.2. Especificação API 5L	19
2.3. Processos de fabricação de tubos API	21
2.4. O Processo de Soldagem	23
2.4.1. Soldabilidade	24
2.4.2. Metal de Solda	25
2.4.3. Zona Termicamente Afetada	26
2.5. Mecânica da Fratura	27
2.5.1. Mecânica da Fratura Elasto-Plástica	28
2.5.2. Integral J	30
2.5.2.1. Considerações sobre o comportamento da Tensão e da Deformação no material	33
2.5.2.2. Considerações sobre o balanço energético que envolve a Integral J	34
2.5.2.3. A integral J como critério de fratura	36
2.5.2.4. Determinação da curva J-R e J_{Ic} segundo a norma ASTM E1820(01)	37
2.5.2.5. O Método de Flexibilidade no Descarregamento (“Unloading compliance”)	42
3 - Materiais e Métodos	46
3.1. Caracterização do Material	46
3.1.1. Material	46
3.1.2. Análise Macro e Microestrutural	48
3.1.3. Ensaio de dureza	49
3.1.4. Ensaio de Tenacidade à Fratura	49
3.1.4.1. Pré-trincamento por Fadiga	50

3.1.4.2. Realização do ensaio de integral J	53
4 - Resultados Experimentais	55
4.1. Ensaio de Microdureza	55
4.2. Resultados do Ensaio para a caracterização da Integral J	57
4.2.1. Pré-Trincamento por fadiga	57
4.2.2. Curvas Carga-Deslocamento	57
4.2.3. Fractografias	59
4.2.4. Análises Metalográficas	64
5 - Discussão	71
5.1. Caracterização microestrutural e de microdureza dos aços estudados	72
5.2. Ensaio de tenacidade	72
5.2.1. Análises Fratógráficas e Metalográficas	74
6 - Conclusões	78
7 - Sugestões para Trabalhos Futuros	80
8 - Bibliografia	81
9 – Apêndice	85
9.1. Método para medida de CTODi: Método do perfil da trinca	85
9.2. Correlação entre δ_i e J_{IC}	86
9.3. Referência Bibliográfica	87

Lista de Figuras

Figura 1- Classe típica de aços API versus Limite de Escoamento ^[4]	19
Figura 2: Processo UOE de fabricação de Tubos (Confab Industrial S.A) ^[7]	22
Figura 3: Técnica tandem arc com três eletrodos ^[8]	23
Figura 4- Regiões de soldagem caracterizado pelas diferentes microestruturas ^[15]	27
Figura 5 – Comportamento elástico não-linear e comportamento plástico ^[20]	30
Figura 6- Uma trinca em um corpo bidimensional com contorno r originando na parte inferior da superfície da trinca e caminhando no sentido anti-horário, finalizando na parte superior da superfície da trinca ^[15]	31
Figura 7 Curva J-R esquemática do processo de fratura para um material dúctil ^[15] .	37
Figura 8 – Comportamento da curva integral J versus comprimento de trinca	40
Figura 9- Curva J-R, segundo a norma ASTM E-1820 ^[26]	41
Figura 10- Curva J-R mostrando a região de dados qualificados, segundo a norma ASTM E1820 ^[26]	42
Figura 11-Diagrama Carga(P)-Deslocamento (V) com as linhas de descarregamento elástico, método da variação da Flexibilidade Elástica, C_i , para monitoração do crescimento de trinca	44
Figura 12: Notação da norma ASTM E1820 para orientação da direção de posicionamento de entalhes nos corpos de prova	47
Figura 13- Desenho esquemático mostrando a posição de retirada dos corpos de prova	47
Figura 14- Seccionamento do corpo de prova após a realização do ensaio de integral J	48
Figura 15- Esquema do posicionamento para medições de microdureza Vickers (H_V)	49

Figura 16- Dimensões do Corpo do corpo de prova tipo SE [B], segundo a norma ASTM E-1820.	49
Figura 17- Foto mostrando o posicionamento para confecção do entalhe	52
Figura 18- Foto do ensaio de pré-trincamento por fadiga – Cenpes/Petrobras	52
Figura 19 - Marcação do corpo de prova SE[B] para o acompanhamento do crescimento da trinca de fadiga	53
Figura 20 – Vista geral do ensaio de Integral J no equipamento MTS, Lamef/UFRGS	54
Figura 21 – Detalhe do Corpo de Prova SE [B] durante o ensaio no equipamento MTS, Lamef/UFRGS	54
Figura 22 – Gráfico da Microdureza Vickers (H_V) para o aço A	55
Figura 23 – Gráfico da microdureza Vickers (H_V) para o aço B	56
Figura 24 – Gráfico da microdureza Vickers (H_V) para os aços A e B	56
Figura 25- Diagramas de carga (P) - deslocamento da abertura do extensômetro (V) para o aço A	58
Figura 26 - Diagrama de carga (P) - deslocamento da abertura do extensômetro (V) para o aço B	59
Figura 27- Imagens dos aspectos das superfícies fraturadas dos Corpos de prova A1, A2, B1 e B2 dos aços A e B	60
Figura 28- Imagens do aço A, corpo de prova A1, A2. Observa-se os aspectos gerais da superfície de fratura nas regiões de interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca.	61
Figura 29 – Imagens do aço B, corpo de prova B1 e B2, mostrando os aspectos gerais da superfície de fratura na interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca.	62
Figura 30- Imagens dos aços A e B, corpos de prova A1, A2, B1 e B2, mostrando os aspectos gerais da superfície de fratura na interface entre a pré-trinca por fadiga e a “propagação” estável da trinca e detalhes da formação de microvazios durante a propagação da trinca	63

Figura 31- Panorama da junta soldada mostrando o posicionamento da trinca.	64
Figura 32– Imagens mostrando os perfis de trinca dos corpos de prova dos aços A e B, seccionados após o ensaio de integral J	65
Figura 33-Imagens do microscópio ótico e do microscópio eletrônico de varredura, caracterizando as regiões em torno das trincas dos corpos de prova do aço A. Observa-se a presença de vazios e muitas deformações em torno das trincas.	66
Figura 34 – Imagens do microscópio ótico e do microscópio eletrônico de varredura caracterizando as regiões em torno das trincas dos corpos de prova do aço B. Observa-se a presença de vazios e muitas deformações em torno das trincas.	67
Figura 35- Imagens do corpo de prova A3 do aço A, onde é observado muitas deformações e a formação de microvazios.	68
Figura 36- Aço B, corpo de prova B3. Detalhes da propagação dúctil da trinca	69
Figura 37-Imagens dos aços A e B, corpos de prova A5 e B6. Observam-se muitas deformações da microestrutura e a formação de vazios.	70
Figura 38-Aspectos dos corpos de prova após os ensaios de Charpy (a) - 20° C, (b) -40°C (c) -60°C, (d) -80°C.	73
Figura 39- Curvas J-R para os aços API 5L X80 e de X60 em corpos de prova C(T)na orientação TL ^[30]	76
Figura 40 – Perfil da trinca do corpo de prova CTOD – Integral J, no plano de corte	85
Figura 41- Metodologia para medidas do perfil de abertura da trinca (método EPRI)	86

Lista de tabelas

Tabela 1- Graus típicos, uso e classes de tubos ^[4]	18
Tabela 2 – Composição química dos aços utilizados.....	46
Tabela 3 – Propriedades mecânicas dos aços utilizados.....	46
Tabela 4 – Valores de cargas máximas e mínimas obtidas para o pré-trincamento	57
Tabela 5 – Valores de CTODi (δ_i) - pelo método do perfil	86
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e parâmetros da tenacidade.....	87