



**Giselle Caloi**

**Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos Testes Tekken e de Implante.**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a 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.

Orientadora: Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro

Abril de 2008



**Giselle Caloi**

**Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos Testes Tekken e de Implante.**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a 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.

**Profa. Ivani de Souza Bott**

Orientadora

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

**Dr. Eduardo Hippert Júnior**

Centro de Pesquisas e Desenvolvimento – CENPES/PETROBRÁS

**Prof. Alexandre Queiroz Bracarense**

Universidade Federal de Minas Gerais

**Prof. Luis Felipe Guimarães de Souza**

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca –  
CEFET/RJ

**Dr. Valter Rocha dos Santos**

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

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

Rio de Janeiro, 04 de abril de 2008

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

## **Giselle Caloi**

Graduou-se em Engenharia de Produção Metalúrgica na PUC- Rio em dezembro de 2005. Foi aluna de iniciação científica e bolsista da FAPERJ no ano de 2003 pelo Departamento de Física da PUC-Rio.

### Ficha Catalográfica

Caloi, Gisele

Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos testes Tekken e de implante / Gisele Caloi ; orientadora: Ivani de S. Bott. – 2008.

145 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

Inclui bibliografia

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses. 2. Soldabilidade. 3. Teste Tekken. 4. Teste de implante. 5. Hidrogênio difusível. 6. Aço ARBL API 5L X-80. 7. Trincas induzidas por hidrogênio. I. Bott, Ivani de S. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Para minha família, meu namorado, meus amigos e, em especial para minha mãe, que foi quem mais me incentivou e contribuiu para esta etapa da minha vida.

Dedico também a meu pai que, infelizmente, não pode ver a conclusão deste momento tão importante na minha vida.

## Agradecimentos

Agradeço à minha orientadora Ivani de Souza Bott pela grande disponibilidade, atenção, dedicação e amizade durante toda a realização deste trabalho.

Agradeço aos Professores Valter Rocha dos Santos, Luis Felipe de Souza e Alexandre Bracarense pela colaboração e ajuda na realização deste trabalho.

Agradeço ao SENAI-RJ pelos auxílios concedidos.

Agradeço ao CNPq, à PUC-Rio e à UFMG.

Agradeço aos meus colegas da PUC-Rio, Daniel Coelho, Richard Sanz, Adriana Forero, Rafael e Evelyn Nigri pela ajuda e apoio durante a elaboração desta dissertação.

Agradeço aos funcionários da PUC-Rio, em especial ao Heitor e ao Marques.

Agradeço a minha mãe por ter me incentivado e por não medir esforços em me ajudar.

Agradeço às minhas irmãs Bruna e Vera, minhas primas Carla e Mariane, meus tios Vera e Carlos Alberto e minhas grande amigas Marcia, Marília, e Patricia pelo apoio e por estarem sempre ao meu lado.

Por fim, agradeço ao meu amigo, conselheiro e namorado Eduardo Abritta pela paciência e por ser a pessoa em quem eu mais posso confiar e contar em todos os momentos difíceis.

## Resumo

Caloi, Giselle; Bott, Ivani de Souza. **Análise da soldabilidade do aço API 5L X-80 por meio dos Testes Tekken e de Implante.** Rio de Janeiro, 2008. 145 p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho apresenta um estudo da soldabilidade do aço API 5L X-80 utilizando os Testes Tekken e de Implante. A pesquisa avalia a soldabilidade do aço X-80 para a soldagem circunferencial com eletrodo revestido e arame tubular com relação à formação de trincas induzidas por hidrogênio. O objetivo é viabilizar diferentes opções de processos de soldagem para o aço em questão. Para o Teste Tekken foram soldados dois pares de chapas pelo processo SMAW utilizando o consumível E8010-G e mais dois pares pelo processo FCAW-G com o consumível E101T1-GM-H8. Para o Teste de Implante foram utilizados três chapas de suporte e dez implantes, sendo que quatro implantes foram soldados pelo processo SMAW com E8010-G e seis pelo processo FCAW-G com E101T1-GM-H8. Todos os implantes apresentavam 6 mm de diâmetro. Para todos os testes a temperatura de preaquecimento foi de 100°C. A quantidade de hidrogênio difusível nos metais de solda produzidos pelos dois consumíveis foi medida pelo processo de Cromatografia Gasosa. Após a realização dos testes, todas as amostras foram observadas sem e com ataque no MO e no MEV para que as trincas induzidas por hidrogênio na ZTA e no MS (no caso do Teste Tekken) pudessem ser analisadas e medidas. A partir desse procedimento foi possível observar que todas as amostras apresentaram trincas transgranulares com comprimentos da ordem de 17,68  $\mu\text{m}$ , muito pequenas e improváveis de serem prejudiciais ao aço. Isso possibilita dizer que o aço X-80 pode ser soldado utilizando os consumíveis avaliados, sem riscos de danos maiores para o material.

## Palavras-chave

Soldabilidade; Teste Tekken; Teste de Implante; hidrogênio difusível; aço ARBL API 5L X-80; trincas induzidas por hidrogênio.

## Abstract

Caloi, Giselle; Bott, Ivani de Souza. **Weldability analyses of API 5L X-80 steel using Tekken Test and Implant Test.** Rio de Janeiro, 2008. 145 p. MSc. Dissertation – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work shows a study of the weldability of API 5L X-80 steel using the Tekken Test and the Implant Test. The research analyses the weldability of HSLA X-80 steel for orbital circumferencial welding with the Shielded Metal Arc Weld and the Flux Core Arc Weld processes with regard to hydrogen induced cracking formation. The aim is to make feasible different options of welding process for the steel at issue. For the Tekken Test two pairs of plates were welded by SMAW process using E8010-G consumable and two more pairs by FCAW-G process using E101-T1-GM-H8. The Implant Test used three base plates and ten implants, being four implants welded by SMAW process and with E8010-G consumable and six by FCAW-G process with E101T1-GM-H8 consumable. All the implants have 6 mm of diameter. For all tests the preheating temperature was 100°C. The diffusible hydrogen content deposited by both consumables was measured by the Gas Chromatography Method. After the tests all the samples were examined without and with attack by means of optical microscope and SEM to allow hydrogen induced cracking in the HAZ and in the weld metal (for Tekken Test) to be viewed and measured. By means of this procedure it was possible to observe that all samples showed transgranular cracking with length of 17,68  $\mu\text{m}$ , too small and unlikely to be bad to the steel. It allows saying that X-80 steel can be welded using the consumables tested, without a risk of damage of the material.

## Keywords

Weldability; Tekken Test; Implant Test; diffusible hydrogen; HSLA API 5L X-80 steel; hydrogen induced cracking.

## Sumário

1	Introdução	18
1.1	Objetivos	19
1.2	Motivação do trabalho	19
2	Aço alta resistência e baixa liga (ARBL)	20
2.1	Histórico	20
2.2	Soldagem dos tubos API 5L X-80	22
3	Processo de soldagem	24
3.1	Soldagem com eletrodo revestido	24
3.2	Soldagem com arame tubular	25
3.3	Soldagem a arco gás-metal	25
3.4	Comparação entre os processos de soldagem	26
4	Soldabilidade	27
4.1	Testes de soldabilidade	27
4.2	Testes de soldabilidade auto-restringidos	30
4.2.1	Teste Tekken	30
4.2.1.1	Método de teste	30
4.2.1.2	Formas e dimensões	32
4.2.1.3	Medição das trincas	33
4.2.2	Teste Lehigh	34
4.2.3	Teste CTS (Controlled Thermal Severity Test)	35
4.3	Testes de soldabilidade com restrição controlada	36
4.3.1	Teste de Implante	36
4.3.1.1	Método de teste	36
4.3.1.2	Formas dimensões e especificações	38
4.3.1.3	Resultados	41
4.3.2	Teste RRC (Rigid Restraint Cracking Test)	41
4.3.3	Teste TRC (Tension Restraint Cracking Test)	42

4.4	Comparação entre alguns testes de soldabilidade	43
5	Trincas	46
5.1	Trincas a frio ou induzidas por hidrogênio	47
5.1.1	Condições necessárias para o aparecimento das trincas a frio	47
5.1.2	Hidrogênio na solda	50
5.1.3	Fontes de hidrogênio	53
5.1.4	Tipos de trincas provocadas pelo hidrogênio	54
5.1.5	Variáveis essenciais	56
5.1.5.1	Pré-aquecimento	56
5.1.5.2	Pós-aquecimento	57
5.1.5.3	Tempo de resfriamento entre 800 e 500°C	57
6	Medição do hidrogênio difusível	59
6.1	Cromatografia gasosa	59
7	Carbono equivalente	61
8	Material utilizado e procedimento experimental	63
8.1	Material utilizado	66
8.1.1	Metodologia	67
8.2	Procedimento experimental	68
8.2.1	Medição do hidrogênio difusível	68
8.2.2	Teste Tekken	70
8.2.2.1	Cortes e soldas	70
8.2.2.2	Ensaio de líquidos penetrantes	77
8.2.2.3	Análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura	78
8.2.2.4	Ensaio de microdureza Vickers	80
8.2.3	Teste de Implante	80
8.2.3.1	Cortes e soldas	80
8.2.3.2	Cálculo da carga	92
8.2.3.3	Análise por microscopia ótica e eletrônica de varredura	93
8.2.3.4	Ensaio de microdureza Vickers	94

9	Resultados	95
9.1	Medição do hidrogênio difusível pela técnica de cromatografia gasosa	95
9.2	Carbono equivalente	96
9.3	Teste Tekken	96
9.3.1	Líquidos penetrantes	97
9.3.2	Análise por microscopia	97
9.3.2.1	Microscopia eletrônica de varredura	97
9.3.2.2	Microscopia ótica	99
9.3.3	Quantificação	108
9.3.3.1	Com relação à quantidade de trincas	108
9.3.3.2	Com relação ao tipo de consumível	109
9.3.3.3	Com relação à chapa	111
9.3.4	Ensaio de microdureza Vickers	113
9.4	Teste de Implante	116
9.4.1	Tempo de resfriamento	116
9.4.2	Carga aplicada	116
9.4.3	Análise por microscopia	120
9.4.3.1	Microscopia eletrônica de varredura	120
9.4.3.2	Microscopia ótica	122
9.4.4	Quantificação	128
9.4.4.1	Com relação à quantidade de trincas	128
9.4.4.2	Com relação ao tipo de consumível	129
9.4.5	Ensaio de microdureza Vickers	130
10	Discussão dos resultados	131
10.1	Teste Tekken	131
10.2	Teste de Implante	134
11	Conclusão	137
11.1	Teste Tekken	137
11.2	Teste de Implante	137
11.3	Aço X-80	138
12	Referências bibliográficas	139

## Lista de figuras

Figura 1 – Comparação entre as quantidades de hidrogênio difusível depositados pelos diferentes processos de soldagem	26
Figura 2 – Cordão de solda do teste Tekken	31
Figura 3 – Chanfro em forma de Y	31
Figura 4 – Teste Tekken – dimensões	33
Figura 5 – Seções transversais	34
Figura 6 – Teste Lehigh	35
Figura 7 – Teste CTS	36
Figura 8 – Implante	37
Figura 9 – Dimensões do implante	38
Figura 10 – Entalhe circular	39
Figura 11 – Entalhe helicoidal	40
Figura 12 – Chapa suporte	40
Figura 13 – Teste RRC	42
Figura 14 – Teste TRC	43
Figura 15 – Variação do teor de hidrogênio com a temperatura – Curva de Sieverts	52
Figura 16 – Tipos de trincas induzidas por hidrogênio na ZTA	55
Figura 17 – (a) Materiais utilizados (b) Cromatógrafo e Sample	68

Figura 18 – (a) Chapa T2 antes da soldagem, (b) e (c) com arame de 1,5 mm	71
Figura 19 – Chapas (a) T1 e (b) T2 com solda de ancoragem	72
Figura 20 – Chapas (a) T3 e (b) T4 com solda de ancoragem	72
Figura 21 – Chapas (a) T1 e (b) T2 com solda de teste	75
Figura 22 – Chapas (a) T3 e (b) T4 com solda de teste	75
Figura 23 – Chapa com marcações de corte	76
Figura 24 – Corpos-de-prova	77
Figura 25 – Corpos-de-prova limpos	77
Figura 26 – Corpos-de-prova com líquido penetrante vermelho	78
Figura 27 – Corpos-de-prova com revelador	78
Figura 28 – Corpo-de-prova com quadrados	79
Figura 29 – Pontos do ensaio de microdureza do Teste Tekken	80
Figura 30 – Implante	81
Figura 31 – Chapa de suporte com 4 furos e dimensões	81
Figura 32 – Chapa de suporte com 2 furos e dimensões	82
Figura 33 – Máquina de implante	83
Figura 34 – Máquina de implante	84
Figura 35 – Computador ligado ao equipamento de aquisição de dados	84
Figura 36 – Implante aparafusado (a) vista inferior (b) vista	

superior	85
Figura 37 – Implante e chapa antes da solda e marcações	86
Figura 38 – Termômetro digital infravermelho	86
Figura 39 – Soldas com arame tubular (a) I1-1 e (b) I1-2	89
Figura 40 – Soldas com arame tubular (a) I1-3 e (b) I1-4	89
Figura 41 – Parte de trás das soldas com arame tubular I1-1, I1-2, I1-3 e I1-4	89
Figura 42 – Soldas com eletrodo revestido (a) I2-3 e (b) I2-4	89
Figura 43 – Parte de trás das soldas com eletrodo revestido (a) I2-3 e (b) I2-4	90
Figura 44 – Soldas com arame tubular (a) IT-1 e (b) IT-2	90
Figura 45 – Cortes e dimensões	91
Figura 46 – Medições da máquina de implante	92
Figura 47 – Pontos de microdureza do Teste de Implante	94
Figura 48 – Líquido penetrante	97
Figura 49 – Amostra T4-2, imagens (a), (b) e (c) do MEV	99
Figura 50 – Amostra T1-1: ZTA sem ataque	100
Figura 51 – Amostra T1-4: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque	100
Figura 52 – Amostra T1-3: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque	101
Figura 53 – Amostra T3-3: imagens (a), (b) e (c): ZTA sem	

e com ataque	102
Figura 54 – Amostra T4-4: imagens (a) e (b): região de ligação entre a ZTA e o MS sem e com ataque	103
Figura 55 – Amostra T4-1: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque	103
Figura 56 – Amostra T3-4: imagens (a), (b), (c), (d) e (e): ZTA sem e com ataque	105
Figura 57 – Amostra T1-3: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque	105
Figura 58 – Amostra T4-3: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque	106
Figura 59 – Amostra T2-1: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque	106
Figura 60 – Amostra T2-3: imagens (a) e (b): MS sem e com ataque	107
Figura 61 – Gráfico da quantidade de trincas x tipo de consumível (a) do MS, (b) da ZTA	110
Figura 62 – Gráfico da quantidade de trincas x chapa (a) do MS, (b) da ZTA	112
Figura 63 – (a), (b), (c) e (d) gráficos das microdurezas	114
Figura 64 – Gráficos das cargas medidas pela célula de carga	118
Figuras 65 – (a) e (b): Amostra IT-1: fratografia	119
Figura 66 – Amostra I1-1A: imagem (a) e (b): ZTA sem ataque (MEV)	121
Figura 67 – Amostra I1-1A: imagem ZTA sem ataque	122

Figura 68 – Amostra I1-2B: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque	123
Figura 69 – Amostra I1-4B: imagem: ZTA sem ataque	123
Figura 70 – Amostra I1-3A: imagens (a) e (b): ZTA sem e com ataque	124
Figura 71 – Amostra I2-1A: imagem: ZTA sem ataque	124
Figura 72 – Amostra I2-2A: imagem: ZTA sem ataque	125
Figura 73 – Amostra I1-2A: imagem: ZTA sem e com ataque	125
Figura 74 – Amostra I1-3B: imagem: ZTA sem e com ataque	126
Figura 75 – Amostra I2-3B: imagem: ZTA sem e com ataque	126
Figura 76 – Amostra I1-1B: imagem: ZTA sem ataque	127
Figura 77 – Amostra IT-2A: imagem: ZTA sem ataque	127
Figura 78 – Gráfico: quantidade de trincas x tipo de consumível (ZTA)	129
Figura 79 – Gráfico de microdureza	130

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Graus dos aços API	22
Tabela 2 – Tipo de testes de soldabilidade	29
Tabela 3 – Formas e dimensões	32
Tabela 4 – Comparação entre os testes de soldabilidade	45
Tabela 5 – EPS, processos de soldagem, ensaios não destrutivos e mecânicos	64
Tabela 6 – Parâmetros de soldagem da EPS X80-3	65
Tabela 7 – Composição química do aço	66
Tabela 8 – Condições de soldagem recomendadas pelo fabricante	67
Tabela 9 – Composição química do metal de solda fornecida pelo fabricante	67
Tabela 10 – Propriedades mecânicas do metal de solda fornecidas pelo fabricante	67
Tabela 11 – Processos de soldagem e direções de corte das chapas do teste Tekken	70
Tabela 12 – Dimensões de cada chapa	70
Tabela 13 – Parâmetros de soldagem	74
Tabela 14 – Dimensões dos implantes	83
Tabela 15 – Dados da soldagem dos implantes	88

Tabela 16 – Dimensões das amostras	91
Tabela 17 – Cálculo da carga e carga aplicada	93
Tabela 18 – Quantidade de hidrogênio difusível nos consumíveis	95
Tabela 19 – Pcm, CEq e CE nos consumíveis e no metal de base	96
Tabela 20 – (a): SMAW – Transversal, (b): SMAW – Paralela, (c): FCAW-G – Transversal e (d): FCAW-G – Paralela	108
Tabela 21 – Quantidade média de trincas	108
Tabela 22 – Medidas da taxa de resfriamento $\Delta t_{8-5}$	116
Tabela 23 – Calibração da célula de carga	117
Tabela 24 – Erro médio da célula de carga	120
Tabela 25 – Quantidade de trincas: (a) FCAW-G, (b) SMAW, (c) FCAW-G	128
Tabela 26 – Médias das quantidades de trincas	128