



**Adriana Forero Ballesteros**

**Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas  
Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob  
Tensão na presença de sulfetos e Susceptibilidade à  
Fragilização por Hidrogênio**

**Tese de Doutorado**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processo Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos.

Orientador: Ivani de Souza Bott  
Co-orientador: José A. da Cunha Ponciano

Rio de Janeiro  
Abril de 2009



**Adriana Forero Ballesteros**

**Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de  
Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de sulfetos e  
Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processo Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Ivani de Souza Bott**

Orientadora

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

**Prof. José Antônio da Cunha Ponciano**

Co-orientador

Programa de Engenharia Metalúrgica e Materiais – COPPE/UFRJ

**DSc. Annelise Zeemann do Pinho**

TECMETAL – Consultoria em Materiais Ltda

**PhD. Denise Souza de Freitas**

INT-RJ

**DSc. Hermano Cezar Medaber Jambo**

PETROBRAS

**DSc. Eduardo Hippert Jr**

CENPES PETROBRAS

**Prof. Jose Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico-PUC-Rio

Rio de Janeiro, 27 de abril de 2009

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

### **Adriana Forero Ballesteros**

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Industrial de Santander - UIS (Bucaramanga, Colômbia) em 2000.

#### Ficha Catalográfica

Ballesteros, Adriana Forero

Avaliação da resistência de juntas soldadas circunferenciais de aço API 5L X-80 à corrosão sob tensão na presença de sulfetos e susceptibilidade à fragilização por hidrogênio / Adriana Forero Ballesteros ; orientadora: Ivani de Souza Bott ; co-orientador: José Antônio da Cunha Ponciano. – 2009.

290 f. : il. (color.) ; 30 cm

Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)– Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Soldagem circunferencial. 3. API 5L X80. 4. Corrosão sob tensão. 5. Fragilização por hidrogênio. 6. Susceptibilidade. I. Bott, Ivani de Souza. II. Ponciano, José Antônio da Cunha. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IV. Título.

CDD: 620.11

A Deus, minha mãe  
meus irmãos , meus sobrinhos , meu namorado e  
todos meus amigos, pelo apoio, estímulo e confiança em  
todo momento, e pelo amor incondicional na distância.

## Agradecimentos

A Deus por tornar possível esta conquista e sempre fazer parte e ser guia em cada decisão na minha vida.

A minha mãe quem sempre me apóia, anima e aconselha em todo momento.

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

Ao meu Co-orientador, Professor José A. da Cunha Ponciano, pelos ensinamentos, e orientação durante a realização dos experimentos.

À Empresa USIMINAS e ao Eng. Odair Santos, pelo apoio e contribuição técnica e científica, interesse demonstrado e facilidades oferecidas na realização dos ensaios NACE.

Aos Técnicos e amigos Moreira e Altair do Laboratório de Corrosão da USIMINAS pelo apoio oferecido, realização e acompanhamento dos ensaios NACE.

Ao DSc. Walter Cravo e a Carla, do Laboratório de Biocorrosão-PUC-Rio, pela contribuição técnica e auxílio nos ensaios.

Aos Técnicos do Laboratório de Corrosão da COPPE-UFRJ, Alecir e Flavio, e Professores Lucio e Miranda, pela contribuição técnica e científica na realização dos ensaios.

Ao Professor Marcos Henrique e Eng. Mauricio, pelo auxílio nos ensaios experimentais.

Ao Técnico do Laboratório de Metalurgia Heitor Nuss Guimarães e Eng. Richard e Rafael, a Ana Paula e Ana Luiza, pelo apoio, estímulo e auxílio na realização deste trabalho.

Ao Técnico de laboratório Ronaldo, pelo auxílio nos ensaios de Difração de Raios – X.

À Capes, CNPq, FAPERJ e Petrobras, pelo apoio financeiro.

A todos os professores do DCMM, pelos ensinamentos.

Aos meus amigos Sully, Johanna, Jesús, José, Lina, Ana, Percy, Sônia, Patrícia, Renato, Milagros, Fanny, Lilia, Claudia, Mauricio, Gabriel, Carlos, Alex, Freddy, Javier, e a meu namorado Marco, pela parceria e convívio durante a realização do presente trabalho. E a todas as pessoas, que me apoiaram e estimularam.

## Resumo

Adriana Forero Ballesteros; Ivani de Souza Bott. **Avaliação da Resistência de Juntas Soldadas Circunferenciais de Aço API 5L X-80 à Corrosão sob Tensão na presença de sulfetos e Susceptibilidade à Fragilização por Hidrogênio.** Rio de Janeiro, 2009. 290 p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A susceptibilidade à corrosão sob tensão em aços para dutos é dependente de uma série de eventos que vão desde a manufatura do aço, fabricação do tubo, montagem dos dutos e tipo de substância transportada pelo duto. O procedimento de soldagem envolvido na montagem dos dutos pode modificar as propriedades mecânicas do metal de base na região da zona termicamente afetada (ZTA), assim como as propriedades metalúrgicas e de resistência à corrosão, tornando potencialmente a região da junta soldada com maior probabilidade de incidência de corrosão sob tensão. Este trabalho tem como objetivo estudar a resistência à corrosão sob tensão em presença de sulfeto e fragilização pelo hidrogênio, em soldas circunferenciais de tubo API 5L X80. Foram realizados: -Ensaio de acordo com norma NACE TM0177/96, Método A -Ensaio de Baixa Taxa de Deformação (BTD) de acordo com a norma ASTM G129-00/2006, em solução contendo Tiosulfato de Sódio. Os resultados mostraram que o metal base foi considerado aprovado segundo os requisitos dos testes NACE TM0177/96. Porém as juntas soldadas originadas nos diferentes processos de soldagem estudados apresentaram susceptibilidade à corrosão sob tensão em presença de sulfeto e fragilização pelo hidrogênio, segundo o mesmo critério, fraturando em um período inferior a 720h. Esta susceptibilidade foi comprovada com os resultados dos ensaios de tração BTD, tendo sido constatada uma queda significativa no limite de resistência, alongamento e tempo de ruptura, em comparação aos ensaios realizados ao ar na mesma taxa de deformação. O mecanismo de fratura predominante nos ensaios foi fratura transgranular.

## Palavras- chave

Soldagem circunferencial; API 5L X80; Corrosão sob Tensão; Fragilização por hidrogênio, susceptibilidade.

## Abstract

Adriana Forero Ballesteros; Ivani de Souza Bott.(Advisor) **Evaluation of the Resistance To Sulphide Stress Corrosion Cracking And Hydrogen Embrittlement of API 5L -X80 Girth Welds.** Rio de Janeiro, 2009. 290p. DCs. Thesis — Departamento Engenharia de Materiais,, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The susceptibility of pipeline steels to stress corrosion cracking (SCC) depends on a series of factors ranging from the manufacture of the steel, the pipe fabrication, the assembly of the pipeline and the type of substances to be transported. Additionally, the welding procedures adopted during the production of the tubes and for construction of the pipelines (field welding), can modify the properties of the base metal in the heat affected zone (HAZ), potentially rendering this region susceptible to sulphide stress corrosion cracking and hydrogen embrittlement. This study evaluates the resistance of girth welds in API 5LX80 pipes to hydrogen embrittlement and also to stress corrosion cracking in the presence of sulphides. The evaluation was performed according to NACE TM0177/96, Method A, applying the criterion of fracture/no fracture, and slow strain rate tensile tests (SSRT) were undertaken using a sodium thiosulphate solution according to the ASTM G29 standard. According to the requirements of the NACE TM0177/96 test, the base metal was considered approved. The weld metal exhibited susceptibility to SCC in the presence of sulphides, failing in a period of less than 720h. The susceptibility of the welded joint to SCC in the presence of sulphides was confirmed by the results obtained with SSRT tensile tests, where a significant decrease in the ultimate tensile strength, elongation and time to fracture were observed. The mechanism of fracture for the tests was predominantly transgranular.

## Keywords

Girth welding; API 5L X80; Stress Corrosion Cracking; Hydrogen Embrittlement; Susceptibility.

# SUMÁRIO

1 . INTRODUÇÃO	29
2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	33
2.1. AÇOS	33
2.1.1. Classificação dos Aços	33
2.1.2. Aços Microligados	35
2.1.2.1. Aços API	35
2.1.2.2. Aços ARBL (Alta Resistência Baixa Liga)	36
2.1.3. Processos de fabricação de tubos API	39
2.1.4. Processos de Conformação das Chapas	40
2.1.5. Influência da Composição Química nas Propriedades dos Aços	42
2.1.5.1. Carbono	43
2.1.5.2. Manganês	44
2.1.5.3. Silício	45
2.1.5.4. Enxofre	45
2.1.5.5. Fósforo	47
2.1.5.6. Cobre, Níquel, Cromo e Molibdênio.	47
2.1.5.7. Alumínio	49
2.1.5.8. Níobio, Titânio e Vanádio	49
3 . CORROSÃO	51
3.1. FORMAS DE CORROSÃO	51
3.2. CORROSÃO SOB TENSÃO (CST)	53
3.2.1. Características da corrosão sob tensão	54
3.2.2. Mecanismos de Corrosão Sob Tensão	55
3.2.3. Seqüência do processo de Corrosão sob tensão	57
3.2.4. Fatores que Influenciam a Corrosão Sob Tensão	
3.2.4.1. Fatores mecânicos	61
3.2.4.2. Fatores Metalúrgicos	62
3.2.4.3. Fatores Ambientais	66



3.3. FRAGILIZAÇÃO PELO HIDROGÊNIO	70
3.3.1. Efeito de Hidrogênio nos metais	71
3.3.1.1. Mecanismos de Fragilização	71
3.3.1.2. Solubilidade do Hidrogênio nos aços.	73
3.3.1.3. Difusibilidade do Hidrogênio no aço	74
3.3.1.4. Aprisionamento do hidrogênio no material e teorias de fragilização pelo hidrogênio.	75
3.4. EFEITO DOS MEIOS AQUOSOS CONTENDO H <sub>2</sub> S	77
3.5. PERMEAÇÃO DE HIDROGÊNIO	80
3.5.1. Fatores que influenciam a permeação de hidrogênio	80
4 . SOLDAGEM	82
4.1. A SOLDAGEM POR FUSÃO	82
4.2. SOLDAGEM DE DUTOS	82
4.2.1. Soldagem mecanizada e semi-automática	83
4.3. A SOLDABILIDADE DO AÇO DE ALTA RESISTÊNCIA E BAIXA LIGA (ARBL).	83
4.3.1. Cálculo de carbono equivalente (CE)	84
4.3.2. Processos de soldagem por arco elétrico	85
4.3.2.1. Soldagem com eletrodo revestido (SMAW) <sup>[69]</sup>	85
4.3.2.2. Processo de soldagem MIG/MAG	86
4.3.2.3. Processo de soldagem STT ®	87
4.3.2.4. Soldagem com Arame Tubular (Flux Cored Arc Welding FCAW)	89
4.4. METAL DE SOLDA	90
4.4.1. Zona Termicamente Afetada	92
4.4.2. Propriedades Mecânicas da Junta Soldada	95
4.4.3. Mudanças Microestruturais pelo Processo de Soldagem.	96
5 . METODOLOGIA E MÉTODOS DE ENSAIO	98
5.1. MATERIAIS	98
5.1.1. Amostragem – Codificação / Posição	101
5.1.2. Composição Química	102
5.1.3. Propriedades Mecânicas	104
5.1.3.1. Ensaios de Tração Metal Base	104
5.1.3.2. Ensaios de Tração das Juntas Soldadas.	106
5.1.3.3. Perfil de Microdureza e ensaios de Dobramento Lateral.	107

5.1.4. Análise Metalográfica	109
5.1.4.1. Metal base	109
5.1.4.2. Juntas soldadas	110
5.2. CARACTERIZAÇÃO DE MEIOS CORROSIVOS	115
5.2.1. Caracterização colorimétrica e potenciométrica dos meios com Tiosulfato para ensaios BTM e Soluções para ensaios NACE.	115
5.3. ENSAIOS ELETROQUÍMICOS.	120
5.3.1. Curvas de Polarização	120
5.3.2. Condições de ensaio das curvas de polarização.	123
5.4. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA RESISTÊNCIA À CST E FRAGILIZAÇÃO	124
5.4.1. Ensaio NACE TM 0177/96 – Método A (Standart Tensile Test)	124
5.4.1.1. Condições de Ensaios NACE	125
5.4.2. Ensaio de tração com baixa taxa de deformação (BTM)	128
5.4.2.1. Condições de Ensaios BTM	129
5.5. CARACTERIZAÇÃO FRACTOGRÁFICA	131
5.6. ANÁLISE DE DIFRAÇÃO DE RAIOS X	132
5.7. ENSAIOS DE PERMEAÇÃO	133
6 . RESULTADOS	136
6.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS	136
6.1.1. Ensaios de Tração	136
6.1.2. Ensaios de Microdureza	139
6.1.3. Ensaios de Dobramento Lateral	140
6.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE H <sub>2</sub> S EM MEIOS CORROSIVOS COM TIOSSULFATO E SOLUÇÃO NACE.	141
6.3. CURVAS DE POLARIZAÇÃO	149
6.4. ENSAIOS BTM	155
6.5. ENSAIOS NACE	163
6.5.1. Metal de Base	163
6.5.2. Juntas Soldadas	164
6.6. CARACTERIZAÇÃO FRACTOGRÁFICA.	175
6.6.1. Ensaios de tração	175
6.6.2. Ensaios BTM	178
6.6.2.1. Metal Base ensaiado ao ar	179

6.6.2.2. Metal de Base ensaiado em solução	184
6.6.2.3. Juntas Soldadas ensaiadas ao ar	189
6.6.2.4. Juntas Soldadas ensaiadas em Solução	194
6.6.3. Ensaio NACE	211
6.6.3.1. Metal de Base	213
6.6.3.2. Juntas Soldadas	213
6.7. ANÁLISE DE CAMADA DE PRODUTOS DE CORROSÃO	224
6.8. ENSAIOS DE PERMEAÇÃO DE HIDROGÊNIO.	240
7 . DISCUSSÃO	246
7.1. PROPRIEDADES MECÂNICAS	246
7.2. DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE H <sub>2</sub> S EM MEIOS CORROSIVOS COM TIOSSULFATO E SOLUÇÃO NACE.	249
7.3. ENSAIOS DE POLARIZAÇÃO ELETROQUÍMICA	252
7.4. ENSAIOS BTM	256
7.5. ENSAIOS NACE	264
7.6. ANÁLISE DE CAMADA DE PRODUTOS DE CORROSÃO FORMADA.	269
7.7. ENSAIOS DE PERMEAÇÃO DE HIDROGÊNIO	275
8 . CONCLUSÕES	278
8.1. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	281
9 . BIBLIOGRAFIA	282

## Lista de figuras

Figura 1. Classificação de aços. Fonte: D.M. Stefanescu, Alabama, University of Tuscaloosa. Metals Handbook. ASTM.	34
Figura 2. Evolução dos aços utilizados na fabricação de tubos .	36
Figura 3. Transformações de fase que ocorrem durante a laminação controlada na fabricação de aços para tubos.	38
Figura 4. Processo UOE de fabricação de tubos. (Confab Industrial S.A).	39
Figura 5. Representação esquemática do comportamento do limite de escoamento durante os processos de conformação	43
Figura 6. Efeito do teor de carbono nas curvas de temperatura de transição de aços.	43
Figura 7. Influência do Carbono e o Manganês na resistência a trincamento pelo hidrogênio .	45
Figura 8. Otimização do controle da forma das inclusões de enxofre como uma função da formação de óxidos-sulfetos de Cálcio.	46
Figura 9. Influência do conteúdo de Fósforo na segregação de aços ARBL produzidos por lingotamento contínuo.	47
Figura 10. Influência do conteúdo de elementos ligantes na taxa de absorção de Hidrogênio, para aço de alta resistência e baixa liga.	48
Figura 11. Esquema das formas de corrosão pela aparência da superfície mais comuns.	52
Figura 12. Condições para corrosão sob tensão.	54
Figura 13. Esquema generalista do processo de Corrosão sob Tensão.	55
Figura 14. Esquema da seqüência dos fenômenos típicos da CST.	58
Figura 15. Etapas da corrosão sob tensão.	59
Figura 16. Curva típica tensão versus deformação.	61
Figura 17. Correlação entre a resistência à CST e a resistência a escoamento de aços microligados.	62
Figura 18. Correlação entre a resistência a polarização e dureza.	65
Figura 19. Correlação entre a resistência a polarização e resistência	

à CST.	66
Figura 20. Regiões de domínio em função da pressão de H <sub>2</sub> S e pH do meio.	67
Figura 21. CST Intergranular	68
Figura 22. CST Transgranular.	68
Figura 23. Estabilidade do H <sub>2</sub> S em função do pH.	78
Figura 24. Esquema básico do processo de solda por eletrodo revestido (SMAW).	86
Figura 25. Esquema básico processo de Soldagem MIG/MAG.	87
Figura 26. Relação entre a Tensão – Corrente em função do tempo para o processo STT®.	88
Figura 27. Soldagem arco elétrico com Arame Tubular Autoprottegido.	89
Figura 28. Fatores que controlam o modo de crescimento durante a solidificação de metais líquidos.	91
Figura 29. Zonas ou regiões da Zona Termicamente afetada.	93
Figura 30. Parâmetros de Soldagem para as juntas X80-1 e X80-2, dimensões em milímetros.	100
Figura 31. Parâmetros de Soldagem para a junta X80-3, dimensões em milímetros.	100
Figura 32. Parâmetros de Soldagem para a junta X80-4, dimensões em milímetros.	101
Figura 33. Distribuição de corpos de prova para ensaios de corrosão e metalografia ao longo da Junta Soldada X80-1.	101
Figura 34. Esquema da Codificação adotada para ensaios.	102
Figura 35. Dimensões dos corpos de prova longitudinais para ensaios de tração.	104
Figura 36. Dimensões dos corpos de prova transversais para ensaios de tração.	105
Figura 37. Máquina universal de ensaios e corpos de prova longitudinais para ensaios de tração.	105
Figura 38. Dimensões do corpo-de-prova para ensaio de tração segundo a norma API 1104 .	105
Figura 39. Máquina do ensaio de Tração e posicionamento do	

corpo-de-prova	107
Figura 40.(a) Perfil de dureza segundo a Norma NACE MR0175 em uma junta em V com ângulo de 60°. (b) Características dimensionais do Corpo de prova para ensaios de dobramento segundo a Norma API 1104	109
Figura 41. Aço API X80 matriz ferrítica com microconstituente AM – Aço API X56 matriz ferrítica com perlita.	109
Figura 42. Caracterização microestrutural das juntas soldadas dos EPS X80-1 e X80-2.	110
Figura 43. Caracterização microestrutural das juntas soldadas dos EPS X80-3 e X80-4.	110
Figura 44. Caracterização microestrutural da zona termicamente afetada das juntas soldadas dos EPS X80-1 e X80-2.	111
Figura 45. Caracterização microestrutural da zona termicamente afetada das juntas soldadas dos EPS X80-3 e X80-4.	112
Figura 46. Corpo de prova para determinação da concentração de H <sub>2</sub> S no sistema, antes do início do ensaio.	115
Figura 47. Montagens dos ensaios em meio corrosivo de Tiosulfato, para determinar o teor de H <sub>2</sub> S produzido aa reação do meio com o material.	115
Figura 48. Amostras das soluções NACE tratadas e armazenadas para determinação de H <sub>2</sub> S.	117
Figura 49. Montagem do procedimento de determinação de H <sub>2</sub> S pelo método colorimétrico de azul de metileno.	118
Figura 50. Curvas de Titulação potenciométrica segundo a Norma da Petrobras.	119
Figura 51. (a) Potencial anódico e catódico. (b) Curvas de Polarização anódica e catódica.	121
Figura 52. Curvas de polarização de um aço para duto (API) em meio corrosivo com pH alto.	122
Figura 53. Curvas de polarização de um aço de duto (API) em meio corrosivo com pH baixo.	122
Figura 54. (a) Esquema do corte dos Cps para ensaios eletroquímicos. (b) Cp preparado para ensaio eletroquímico.	123

Figura 55. Arranjo experimental para ensaios eletroquímicos.	124
Figura 56. Dimensões (mm.) dos corpos de prova utilizados no ensaio NACE.	125
Figura 57. Anéis de tração utilizados nos ensaios NACE.	126
Figura 58. Dimensões (mm) dos corpos de prova para os ensaios BTB.	129
Figura 59. Montagem de ensaio na máquina BTB.	131
Figura 60. Desenho esquemático do CP para análise fractográfico.	132
Figura 61. CP para ensaios de permeação de Hidrogênio.	133
Figura 62. Montagem utilizada nos ensaios de Permeação de Hidrogênio.	134
Figura 63. Esquema de aquisição de dados do ensaio de permeação de Hidrogênio.	135
Figura 64. Defeito de solda apresentado nos ensaios de tração da junta X80-1	137
Figura 65. Comparação dos valores de resistência a tração obtidos para o processo com ER, junta X80-1 e os materiais base X80-A e X80-B.	138
Figura 66. Comparação dos resultados obtidos para o processo com ER (Junta dissimilar) X80-2 e MB X56 (na direção transversal e longitudinal a direção de laminação).	139
Figura 67. Aspecto visual do corpo de prova (a) 0 Horas de ensaio (b) depois de 5 horas de ensaio.	141
Figura 68. Condição dos corpos de prova (a) depois de 30 horas de ensaio. (b) depois de 45 horas de ensaio. Avaliação da camada de produtos de corrosão formada.	142
Figura 69. Condição dos corpos de prova depois de tirar a camada de produtos de corrosão.	142
Figura 70. Condição do corpo de prova depois do decapagem.	142
Figura 71. Imagem do MEV, (a) Zonas atacada preferencialmente no ensaio com pH=3.4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato de sódio. (b) Zona atacada preferencialmente no ensaio com pH=4.4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato.	143
Figura 72. Imagem da cavidade (pite) e o espectro obtido no	

interior desta cavidade. Ensaio com pH= 3,4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato. 500x.	143
Figura 73. Imagem de produto de corrosão depositado em um pite e o espectro obtido neste ponto. Ensaio com pH= 3,4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato. 200x.	144
Figura 74. Imagem da superfície corroída e o espectro obtido na superfície sem dano. Ensaio com pH= 3,4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato.	145
Figura 75. Gráfico comparativo da concentração de $H_2S$ em meios corrosivos com diferente pH e diferentes quantidades de tiosulfato.	146
Figura 76. Gráfico comparativo da concentração de $H_2S$ medido por dos diferentes técnicas em meios corrosivos NACE com diferente pH e diferentes razões de vazão.	147
Figura 77. Curvas de Polarização Catódica na Solução 1.	150
Figura 78. Curvas de Polarização Catódica na Solução 2.	150
Figura 79. Curvas de Polarização Catódica na Solução 3.	151
Figura 80. Curvas de Polarização na Solução 4.	151
Figura 81. Curvas de Polarização anódica na Solução 1.	152
Figura 82. Curvas de Polarização anódica na Solução 2.	152
Figura 83. Curvas de Polarização anódica na Solução 3.	153
Figura 84. Curvas de Polarização anódica na Solução 4.	153
Figura 85. Superfícies dos Cps para ensaios eletroquímicos. (a) Superfície da junta X80-1 após ensaio. (b) Superfície junta X80-2 após ensaio. (c) Superfície da junta X80-3 após ensaio. (d) Superfície d Junta X80-4 após ensaio.	154
Figura 86. Curva Tensão- Deformação Metal de Base X80 no Ar.	155
Figura 87. Curva Tensão-Deformação Metal de Base X56 no Ar	155
Figura 88. Curva tensão-Deformação Junta X80-1 em solução 1	155
Figura 89. Curva Tensão-Deformação Junta X80-2 em solução 2	155
Figura 90. Curva Tensão-Deformação Junta X80-3 em solução 3	156
Figura 91. Curva Tensão-Deformação Junta X80-4 em solução 4	156
Figura 92. Curvas Tensão-Deformação para a junta soldada X80-1 em todos os meios ensaiados, mostrando as superfícies de fratura obtidas.	156
Figura 93. Curvas Tensão-deformação para a junta soldada X80-2	



nas diferentes soluções, com as superfícies de fratura obtidas de cada ensaio.	157
Figura 94. Curvas Tensão-deformação para a junta soldada X80-3 nas diferentes soluções de ensaio.	157
Figura 95. Curvas Tensão-deformação para a junta soldada X80-4 em todas as soluções de ensaio BTB.	158
Figura 96. Gráfico comparativo da redução de área dos Cps testados nos diferentes ambientes.	161
Figura 97. Gráfico comparativo da Redução de área para as juntas soldadas ensaiadas em diferentes meios.	162
Figura 98. Cps ensaiados nos Ensaio NACE. (a) Cps Metal Base X80 em solução I (pH =3,4 razão de vazão rápida). (b) Cps Metal de base X56 solução I. (c) Cps de Metal de base X80 solução IV (pH = 4,4 razão de vazão lenta). (d) Cps de Metal de base X56 solução IV.	163
Figura 99. Ensaio de líquido penetrante nos Cps dos ensaios NACE. (a). MB X80 em solução I (pH = 3,4 e razão de vazão rápida) (b) MB X56 em solução I. (c) MB X80 em solução IV (pH = 4,4 e razão de vazão lenta) (d) MB X56 em solução IV.	164
Figura 100. Corpos de prova NACE fraturados. (a) Junta X80-1 Solução I (pH = 3,4 razão de vazão rápida). (b) Junta X80-1 Solução II (pH = 3,4 razão de vazão lenta). (c) Junta X80-1 Solução III (pH = 4,4 razão de vazão rápida). (d) Junta X80-1 Solução IV (pH = 4,4 razão de vazão lenta).	166
Figura 101. Gráfico comparativo de tempo de falha e condição de saturação de H <sub>2</sub> S para Ensaio NACE com 85%LE de tensão aplicada e pH= 3,4.	166
Figura 102. Gráfico comparativo de tempo de falha e % de Tensão aplicada para Ensaio NACE com pH= 3,4 e condição de H <sub>2</sub> S rápida.	167
Figura 103. Gráfico comparativo de tempo de falha e pH para Ensaio NACE com solução rápida de H <sub>2</sub> S e 85%LE de tensão aplicada.	167
Figura 104. Corpos de prova NACE fraturados. (a) Junta X80-2 Solução I (pH=3,4 rápida). (b) Junta X80-2 Solução II. (c) Junta	

X80-2 Sol III. (d) Junta X80-2 Solução IV.	168
Figura 105. (a) Junta X80-2 Cp 2C12 em solução I (pH=3,4 e razão de vazão rápida). (b) Trincas transversais na superfície após ensaio de líquidos penetrantes. (c) Junta X80-2 Cp 2C31 em solução II (pH = 3.4 razão de vazão lenta). (d) Trincas longitudinais na superfície após ensaio de líquidos penetrantes.	170
Figura 106. (a) Junta X80-3 Cp 3C21 Solução III (pH = 4,4 razão de vazão rápida). fratura na LF. (b) Junta X80-3 Cp 3C42 em Solução III, fratura na LF. (c) Junta X80 3 Cp 3C33 Solução I (pH = 3,4 razão de vazão rápida) , fratura na ZTA. (d) Junta X80-3 Cp 3C23 Solução II (pH = 3,4 razão de vazão lenta), fratura no MS.	171
Figura 107. Cps Junta X80-3. (a) Cp 3C12 em solução I. (b) Cortes transversais do Cp para Análise da camada. (c) Cp 3C38 em solução III. (c) Cp 3C38 após líquido penetrante	171
Figura 108. (a) Junta X80-4 Cp 4C11 em Solução I (pH = 3,4 razão de vazão rápida), 90%LE. (b) Junta X80-4 Cp 4C21 em Solução III (pH = 4,4 razão de vazão rápida), 100%LE. (c) Junta X80-4 Cp 4C30 em Solução I (pH = 3,4 razão de vazão rápida), 85%LE . (d) Junta X80-4 Cp 4C32 em Solução II (pH = 3,4 razão de vazão lenta), 85%LE.	172
Figura 109. Junta X80-4. (a). Cp 4C39 (pH = 4,4 razão de vazão rápida), com camada de produtos de corrosão. (b) Cp 4C39 ensaio de líquido penetrante evidenciando ausência de trincas. (c). Cp 4C33 (pH = 3,4 razão de vazão rápida),com camada formada. (d) Cp 4C33 ensaio de líquidos penetrantes evidenciando a presença de trincas na elipse vermelha.	173
Figura 110. Curva de % de Tensão aplicada VS Log. Tempo de fratura para Solução I (equivalente à Solução NACE B com pH = 3,4 e razão de vazão rápida) para todos os materiais estudados.	174
Figura 111. Curva de % de Tensão Aplicada VS Log. de Tempo de Fratura para Solução III (pH = 4,4 razão de vazão rápida) para metais base e juntas soldadas.	174
Figura 112. Análise macroscópica de corpos de prova de ensaios de tração.	176

Figura 113. Superfície de fratura do Cp de tração T3B1 (Metal Base X80-B), aço API X-80 apresentando todas as zonas características de fratura dúctil.	177
Figura 114. Superfícies de fratura dos ensaios de tração mecânica no MEV, (500x e 2000x), apresentando fratura dúctil e impurezas.	178
Figura 115. Aspecto macrográfico de Cps BTB testados em diferentes médios.	179
Figura 116. Microscopia ótica da superfície de fratura típica do MB X80 após o ensaio BTB ao ar.	179
Figura 117. Microscopia ótica da superfície de fratura típica do MB X56 após o ensaio BTB ao ar.	180
Figura 118. Vista da superfície de fratura do metal de base X80 no MEV. Ensaio BTB ao ar.	180
Figura 119. Aspecto das inclusões achadas no metal base X80 e espectro EDS de uma das inclusões analisadas.	181
Figura 120. Detalhes Macros e microscópicos de superfície delaminada no metal de base X80.	182
Figura 121. (a) MB X56 superfície de fratura vista no MO. (b) Detalhe da microestrutura bandada após o ensaio BTB. (c) MB X80 superfície de fratura vista MO. (d) Detalhe da microestrutura ferrítica após o ensaio BTB.	183
Figura 122. Microscopia ótica da superfície de fratura corpo de prova MB X80 após o ensaio BTB na solução 1, com pH= 3.4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato.	184
Figura 123. Microscopia ótica da superfície de fratura corpo de prova MB X56 após o ensaio BTB na solução 1, com pH=3.4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato.	184
Figura 124. Vista da superfície de Fratura do MB X80 Cp 1CB7 no MEV. Ensaio BTB em solução 1.	185
Figura 125. MB X80 ensaio BTB em solução 1. (a) Superfície lateral com trinca. (b) Espectros EDS de diferentes pontos da camada de produtos de corrosão. (c) Presença de trincas no interior e no contorno de grão (círculos vermelhos) e microestrutura após o ensaio.	186

Figura 126. Vista da superfície lateral e superfície de fratura do MB X56 do ensaio BTB em solução 1 ( $\text{pH} = 3,4$ e $10^{-3}$ mol de tiosulfato).	187
Figura 127. MB X56 ensaio BTB em solução 1. (a) Superfície lateral com pites. (b) Trincamento secundário e Espectros EDS dos diferentes pontos analisados. (c) Iniciação e propagação da trinca.	188
Figura 128. Micrografias dos Cps BTB das juntas soldadas testados ao ar evidenciando a localização da fratura.	189
Figura 129. Detalhes Macrográficos das superfícies de fratura das juntas soldadas dos ensaios BTB ao ar.	190
Figura 130. Fractografia das superfícies de fratura das juntas soldadas dos ensaios BTB ao ar, vistas no MEV.	191
Figura 131. Junta X80-1 Espectros EDS em diferentes zonas da trinca na superfície de fratura do material.	192
Figura 132. Junta X80-4 Espectros EDS em diferentes zonas da trinca na superfície de fratura do material.	193
Figura 133. Superfícies de fratura transversal e visão lateral das diferentes juntas após ensaios BTB em solução 1.	195
Figura 134. Junta X80-1, ensaio BTB em solução 1. (a) Superfície de fratura transversal e características morfológicas antes e após remoção de produtos de corrosão. (b) Inclusão e espectro EDS. (c) Espectro EDS da superfície de fratura metálica da junta.	196
Figura 135. Junta X80-2(a) Superfície de fratura transversal. (b) Trincas secundárias na superfície de fratura longitudinal. (c) Aparência da camada de produtos de corrosão. (d) Aparência da superfície transversal após remoção dos produtos de corrosão. (e) Zona de fratura dúctil. (f) Zona de fratura frágil.	197
Figura 136. Junta X80-3 (a) Superfícies de fratura transversal. (b) trincas secundárias na superfície de fratura longitudinal. (c) Aspecto da camada de produtos de corrosão. (d) Superfície de fratura escalonada. (e) Zona de fratura dúctil (dimples). (f) Zona de fratura frágil (quase clivagem).	198
Figura 137. Aspecto da superfície de fratura da junta X80-3 Cp 3C25. (a) Vista Lateral no MO mostrando as características das	

Trincas Chevron. (b) Microestrutura, iniciação e propagação de trinca, trincamento interno (setas vermelhas).	198
Figura 138. Aspecto da superfície de fratura na vista lateral, microestrutura, modo de propagação da trinca e espectros EDS de diferentes regiões da junta X80-3 no MEV.	199
Figura 139. Junta X80-4 ensaios BTB em solução 1. (a) Trincamento secundário Cp 4C25. (b) Trincamento secundário Cp 4C24. (c) Trincamento interno na superfície transversal. (d) Aparência da superfície de fratura transversal do Cp 4C25. (e) zona de fratura dúctil Cp 4C25. (f) Zona frágil apresentando quase clivagem. (g) Aparência da superfície de fratura transversal do Cp 4C24. (h, i) Zona de fratura mista (dimples e quase clivagem).	200
Figura 140. Superfícies de fratura lateral e transversal das diferentes juntas testadas para os ensaios BTB em solução 2.	201
Figura 141. Caracterização fractográfica Junta X80-1 Cp 1C34 (pH=4,4 e $10^{-3}$ mol de tiosulfato). (a) Detalhes macros e micros da superfície de fratura evidenciando a presença de defeito de solda (falta de fusão). (b) Aspecto da superfície transversal apresentando mecanismo de fratura mista. (c) Espectro de EDS do defeito encontrado, evidenciando a presença de Cl e O, provenientes possivelmente da solução de ensaio.	202
Figura 142. Junta X80-2. (a) Superfície de fratura transversal apresentando trincas de delaminação. (b) Detalhe de trincas de delaminação. (c) Fratura dúctil (dimples).	203
Figura 143. Superfícies de fratura lateral e transversal das diferentes juntas testadas para os testes BTB na solução de ensaio3.	204
Figura 144. Detalhes da superfície de fratura da junta X80-1 Cp 1C39 ensaio BTB em solução 3. (a) Superfície transversal com defeitos de solda. (b) Defeito de Solda (porosidade alinhada). (c) Defeito de Solda (inclusão). (d) Espectro EDS da inclusão.	205
Figura 145. Junta X80-1 Cp 1C30 ensaio BTB em solução 3. (a) Superfície transversal com defeitos de solda. (b) Detalhe da superfície transversal sem defeitos evidenciando mecanismo de fratura dúctil. (c) Defeito de solda (falta de fusão e inclusões). (d)	

Espectro EDS de inclusão. (e) Detalhe de defeito (falta de fusão). (f) Espectro EDS da falta de fusão.	206
Figura 146. Junta X80-2 ensaios BTB Solução 3. (a) Caracterização fractográfica Cp 2C45. (b) Caracterização fractográfica do Cp 2C18.	207
Figura 147. Superfícies de fratura lateral e transversal das juntas soldadas ensaiados nos testes BTB em solução 4.	209
Figura 148. Detalhes da superfície de fratura da junta X80-1 Cp 1C38. Caracterização do defeito de solda (inclusão de escória).	210
Figura 149. Detalhes das juntas soldadas, ensaio BTB em solução 4 (pH=4.4 e $10^{-4}$ mol de tiosulfato). (a) Junta X80-2 Cp 2C26. Aparência da superfície lateral e transversal e mecanismo de fratura dúctil. (b) Junta X80-3 Cp 3C20. Aparência da superfície transversal, superfície delaminada e mecanismo de fratura dúctil. (c) Junta X80-4 Cp 4C16. Aparência da superfície transversal e longitudinal (trinca secundária) e mecanismo de fratura dúctil.	211
Figura 150. Macrografias e Micrografias obtidas de alguns dos testes NACE em diferentes condições de ensaio, representando os resultados mais significativos.	212
Figura 151. Junta X80-2 NACE condição 1. (a) Superfície de fratura longitudinal. (b) Superfície de fratura transversal (fratura mista). (c) Detalhe de zona frágil (quase clivagem). (d,e) Trincas secundárias. (f) Propagação da trinca transgranular.	214
Figura 152. Junta X80-3 NACE condição 1. (a) Superfície de fratura longitudinal. (b) Superfície de fratura transversal (fratura mista). (c) Detalhe de zona frágil (quase clivagem). (d) Trincas secundárias na superfície longitudinal. (e) Trincas internas (f) Propagação da trinca transgranular.	215
Figura 153. Junta X80-4 NACE condição 1. (a) Superfície de fratura longitudinal. (b) Superfície de fratura transversal (fratura mista). (c) Detalhe de zona frágil (quase clivagem). (d,e) Trincas secundárias. (f) Modo de propagação da trinca transgranular.	216
Figura 154. Junta X80-1 em condição de ensaio 1. Corpo de prova 1C11. (a) Macros da superfície longitudinal e transversal. (b) Trincas secundárias na superfície longitudinal e cavidades de corrosão	

localizada (pites). (c) Detalhe de defeito na solda (porosidade).	217
Figura 155. Junta X80-1 em condição de ensaio 1. Corpo de prova 1C12. (a) Macros superfície longitudinal e transversal. (b) Trincas secundárias na superfície longitudinal e pits. (c) Detalhe de defeito na solda (falta de fusão e inclusão de escória).	218
Figura 156. Espectros EDS de defeito de solda na junta X80-1 para teste NACE com condições de ensaio 1.	219
Figura 157. Corte transversal de superfícies de fratura da junta X80-1, CPs 1C11 e 1C12, sem ataque químico, microscópio ótico.	220
Figura 158. Imagem transversal das superfícies trincadas da junta X80-1, CPs 1C11 e 1C12, no MEV, mostrando o modo de propagação transgranular da trinca.	220
Figura 159. Detalhes macros e micrográficos da junta X80-1 ensaios NACE na condição 2. (a) Trincamento secundário na superfície longitudinal. (b) Modo de propagação da trinca.	221
Figura 160. Detalhes macroscópicos das superfícies laterais representativas das juntas X80-2, X80-3 e X80-4 com trincamento secundário na condição 2 de ensaios NACE.	222
Figura 161. Características do mecanismo de fratura para os ensaios NACE na condição de ensaio 2.	223
Figura 162. Macros e Micrografias obtidas para a junta X80-3 Cp 3C11 ensaio NACE. (a) Vista longitudinal do Cp com camada formada. (b) Cortes transversais após embutir em resina. (c) Micros por MEV em diferentes pontos dos cortes transversais para análise das camadas.	224
Figura 163. Espectros EDS de um ponto (camada com menor espessura no MS) no corte transversal da Junta X80-3 cp 3C11, para análise das camadas de produtos de corrosão formadas.	225
Figura 164. Espectros EDS de outro ponto (camada com maior espessura no MB) no corte transversal da Junta X80-3 Cp 3C11, para análise das camadas de produtos de corrosão formadas.	226
Figura 165. Macros e Micrografias e Espectros EDS do corte transversal da junta X80-4 (cp 4C26), para análise das camadas de produtos de corrosão formadas.	228

Figura 166. Imagens da camada de produtos de corrosão formada na superfície de corpo de prova da junta X80-3 para ensaios NACE.	229
Figura 167. Morfologia da camada de produtos de corrosão formada na superfície longitudinal do corpo de prova da junta X80-3, pH=4.4, H <sub>2</sub> S = rápida.	230
Figura 168. Camada da Interface Metal-Solda.	230
Figura 169. Camada do metal de base.	231
Figura 170. Macros da junta X80-2 (cp 2C32). Vistas laterais da camada de produtos de corrosão formada sobre a superfície longitudinal.	231
Figura 171. Micrografias por MEV das diferentes morfologias da camada de produtos de corrosão formada na junta X80-2.	232
Figura 172. Micrografias do MEV da camada uniforme mais próxima a superfície metálica e dos cristais formados de produtos de corrosão da junta X80-2.	233
Figura 173. Espectros EDS de cristais e da camada próxima aos cristais no ensaio NACE da junta X80-2 (cp 2C32).	234
Figura 174. Espectros EDS de cristais e da camada uniforme afastada aos cristais no ensaio NACE da Junta X80-2 (cp 2C32).	235
Figura 175. Micrografias e espectros EDS da camada de produtos de corrosão formada na Junta X80-2 (cp 2C26) dos ensaios BTB em solução com pH=4.4 e 10 <sup>-4</sup> mol de tiosulfato.	236
Figura 176. Difratograma Raios X para camada de produtos de corrosão de ensaios NACE. Junta X80-3 (cp 3C12) em solução com pH = 3,4, razão de vazão de H <sub>2</sub> S rápida.	237
Figura 177. Difratograma Raios X da camada de produtos de corrosão de Ensaios NACE. Junta X80-4 (cp 4C26) em solução com pH=4,4, razão de vazão H <sub>2</sub> S rápida.	236
Figura 178. Difratograma Raios X da camada de produtos de corrosão de Ensaios NACE. Junta X80-4 (cp 4C39) em solução com pH=4,4, razão de vazão H <sub>2</sub> S rápida.	238
Figura 179. Difratograma Raios X da camada de produtos de corrosão de Ensaios NACE. Metal Base X56 (cp 2CB6)	



em solução com pH=3,4, razão de vazão H <sub>2</sub> S rápida.	238
Figura 180. Difractograma Raios X da camada de produtos de corrosão de Ensaios NACE. Metal Base X80 (cp 1BE6) em solução com pH=3,4, razão de vazão H <sub>2</sub> S rápida.	239
Figura 181. Difractograma Raios X da camada de produtos de corrosão de Ensaios NACE. Junta X80-2 (cp 2C32) em solução com pH=3,4, razão de vazão H <sub>2</sub> S lenta.	239
Figura 182. Curvas de permeação de hidrogênio para metal de base X80 e junta soldada X80-1 em Solução 1 e 4 dos ensaios BTB.	240
Figura 183. Curvas de permeação de hidrogênio para metal de base X56 e X80 e junta soldada X80-2 em solução 1 e 4 dos ensaios BTB.	241
Figura 184. Curvas de permeação de hidrogênio para metal de base X80 e junta soldada X80-3 em solução 1 e 4 dos ensaios BTB.	241
Figura 185. Curvas de permeação de hidrogênio para metal de base X80 e junta soldada X80-4 em solução 1 e 4 dos ensaios BTB.	242
Figura 186. Macros e Micrografias da camada de produtos de corrosão formada no ensaio de permeação de hidrogênio da junta X80-1 Solução 4, pH=4.4 e 10 <sup>-4</sup> mol de Tiossulfato.	243
Figura 187. Macros e Micrografias da camada de produtos de corrosão formada no ensaio de permeação de hidrogênio da junta X80-3 Solução 1, pH=3.4 e 10 <sup>-3</sup> mol de tiossulfato.	244
Figura 188. Espectros EDS da interface área exposta à solução corrosiva / área não exposta à solução corrosiva, no ensaio de permeação de hidrogênio, Junta 4 Sol 1, pH = 3.4 e 10 <sup>-3</sup> mol de Tiossulfato.	245
Figura 189. Comparação dos resultados obtidos do teor de H <sub>2</sub> S para diferente pH. Resultados obtidos pelo Método Colorimétrico de azul de metileno.	250
Figura 190. Gráfico comparativo da concentração de H <sub>2</sub> S em meios corrosivos com diferente quantidade de tiossulfato	

em junta soldada e material base	251
Figura 191. Comparação de curvas de Polarização catódica para meios com pH diferentes.	253
Figura 192. Diagrama de Pourbaix modificado para CST	255
Figura 193. Curva Tensão-deformação para Metal de base X80 e para a Junta soldada X80-4 em solução 1.	256
Figura 194. Gráfico comparativo dos tempos de ruptura para as diferentes juntas em diferentes meios nos Ensaios BTB.	257
Figura 195. Comparação dos resultados da razão de redução de áreas para as juntas soldadas em cada solução de teste.	258
Figura 196. Diagrama de Domínio pH VS $P_{H_2S}$ determinando a agressividade dos meios utilizados nos diferentes testes BTB e NACE.	268
Figura 197. Diagrama de Pourbaix para o sistema Fe-S- $H_2O$ a 25 <sup>o</sup> C.	270
Figura 198. Macros das diferentes morfologias e espessuras obtidas para os Cps submetidos as mesmas condições de ensaio em testes NACE. (direita) Junta X80-2 em ambiente com pH=3,4, $P_{H_2S}$ = 0, 5763 e 85%LE. (esquerda) MB X80 em ambiente com pH=3,4, $P_{H_2S}$ = 0,688 e 90%LE.	271
Figura 199. Gráfico comparativo dos espectros DRX obtidos das diferentes camadas de produtos de corrosão analisados.	272
Figura 200. Micrografia da morfologia camada de produtos de corrosão formada em ensaio NACE para O MB X80.	273
Figura 201. Esquema de modelo de corrosão em meios aquosos contendo $H_2S$ sugerido por Ramanarayanan.	274

## Lista de tabelas

Tabela 1 Classificação dos aços para dutos	35
Tabela 2. Resultados de Ensaios HIC para aço X70 desenhado por Hillenbrand.	50
Tabela 3. Efeito da morfologia dos carbeto no comportamento a CST.	63
Tabela 4. Resumo dos processos de soldagem utilizados por EPS.	99
Tabela 5– Composição Química do Metal de Base X80 e X56 em %Wt.	102
Tabela 6. Cálculo do CE dos tubos dos metais base.	103
Tabela 7. Composição química dos arames usados na EPS 1-2 segundo o fabricante	103
Tabela 8. Composição química dos arames usados na EPS-3, segundo o fabricante	103
Tabela 9. Composição química dos arames usados na EPS-4, segundo o fabricante	103
Tabela 10. Composição Química média das juntas soldadas	104
Tabela 11– Identificação dos Corpos de Prova para ensaios de Tração	106
Tabela 12 Composição química dos meios com Tiosulfato de Sódio	116
Tabela 13. Amostras recolhidas das soluções dos Ensaios NACE para determinação de H <sub>2</sub> S.	116
Tabela 14. Composição química da solução utilizada no ensaio NACE.	126
Tabela 15. Matriz Experimental para Ensaios NACE TM0177/96	127
Tabela 16. Matriz de Experimentos para Ensaios BTB	130
Tabela 17. Propriedades Mecânicas do Metal de Base	136
Tabela 18. Propriedades Mecânicas dos Consumíveis	137
Tabela 19. Valores médios dos ensaios de tração das juntas soldadas.	137
Tabela 20. Média dos valores de microdureza Vickers obtidos	

para as diferentes juntas	140
Tabela 21. Resumo dos resultados obtidos nos ensaios de dobramento lateral.	140
Tabela 22. Resultados obtidos da determinação de H <sub>2</sub> S pela técnica colorimétrica de azul de metileno para soluções com Tiosulfato.	146
Tabela 23. Resultados obtidos da determinação de H <sub>2</sub> S pelo Método colorimétrico de azul de metileno e o Método potenciométrico, para soluções NACE.	147
Tabela 24. Tabela da média dos valores obtidos para diferentes parâmetros dos ensaios BTB	159
Tabela 25– Mapeamento da região de ocorrência de fratura e presença de trincas secundárias nos ensaios BTB para as diferentes juntas nos diferentes ambientes.	160
Tabela 26. Resultados de Tempo e condição de fratura dos ensaios NACE	165
Tabela 27. Mapeamento da região de ocorrência e a presença de trincas secundárias obtidas nos ensaios NACE para as diferentes Juntas nos diferentes ambientes.	169
Tabela 28. Resumo das respostas das juntas soldadas na condição de ensaio 1.	213
Tabela 29. Resumo das respostas das juntas soldadas na condição de ensaio 2.	221
Tabela 30. Resumo das respostas das juntas soldadas na condição de ensaio 3.	223
Tabela 31. Resumo das respostas das juntas soldadas na condição de ensaio 4.	223
Tabela 32. Mapeamento da região de fratura, trincas secundárias e trincas internas nos ensaios BTB.	262
Tabela 33. Mapeamento da região de ocorrência e a presença de trincas secundárias obtidas nos ensaios NACE para as diferentes juntas nos diferentes ambientes.	265