



Rafael de Araujo Silva

**Correlação entre parâmetros de  
curvamento por indução de tubo API X80  
e propriedades mecânicas e  
microestruturais**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial  
para a obtenção do título de Mestre pelo Programa  
de Engenharia de Materiais e de Processos  
Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio.

Orientadora: Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro  
Outubro de 2009



**Rafael de Araujo Silva**

**Correlação entre parâmetros de curvamento  
por indução de tubo API X80 e propriedades  
mecânicas e microestruturais**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre pelo Programa de Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Dra. Ivani de S. Bott**

Orientadora e Presidente

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-Rio

**Dr. Luiz Henrique de Almeida**

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

**Dr. Dagoberto Brandão Santos**

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG

**Dr. Luís Felipe Guimarães de Souza**

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

**Prof. José Eugênio Leal**

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

Rio de Janeiro, 21 de Outubro de 2009.

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

### **Rafael de Araujo Silva**

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal Fluminense (2005). Estagiou como Engenheiro de Fundição e trabalhou por 2 anos (2005-2007) como Pesquisador CNPq em Projeto em cooperação tecnológica entre a PUC-Rio e o CENPES para estudo de aplicação de aço API X80.

### **Ficha Catalográfica**

Silva, Rafael de Araujo

Correlação entre parâmetros de curvamento por indução de tubo API X80 e propriedades mecânicas e microestruturais / Rafael de Araujo Silva ; orientador: Ivani de Souza Bott. – 2009.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Aços API5L X80. 3. Curvamento a quente por indução. 4. Caracterização microestrutural. 5. Tratamentos térmicos. I. Bott, Ivani de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. IIV. Título.

CDD: 620.11

Para minha Família, especialmente para  
minha mãe e meu irmão, Rute e Daniel,  
pelo apoio e amor incondicional.

## Agradecimentos

À Professora Ivani de S. Bott da PUC-Rio pela oportunidade, aprendizado, confiança e paciência.

Ao Heitor Guimarães Nuss, Supervisor do Laboratório de Metalografia e Tratamento Térmico da PUC-Rio, por auxiliar na execução das práticas laboratoriais e pela amizade.

Aos Engenheiros de Pesquisa Marcos Henrique e Maurício da PUC-Rio pelo auxílio e excelente contribuição com microscopia eletrônica de varredura.

Ao Professor Guillermo Solórzano e à Ana Luiza Andrade Rocha pela importante e enriquecedora colaboração com microscopia eletrônica de transmissão.

Aos Engenheiros Gilmar Zacca Batista e Eduardo Hippert Junior da Petrobras por todo auxílio prestado para a realização do Curvamento a quente e dos ensaios mecânicos observados nesta dissertação.

Agradeço à Protubo, em especial, ao Engenheiro Leonardo Naschpitz por possibilitar a realização do Curvamento a Quente desta dissertação.

Ao Prof. Luis Felipe Guimarães de Souza do CEFET – Rio de Janeiro por possibilitar as realizações de medições de dureza HV5.

Agradeço ao CNPq e a FAPERJ pelos auxílios concedidos.

Meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização desta dissertação.

## Resumo

Silva, Rafael de Araujo; Bott, Ivani de Souza. **Correlação entre parâmetros de curvamento por indução de tubo API X80 e propriedades mecânicas e microestruturais**. Rio de Janeiro, 2009. 260p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O presente trabalho compara os efeitos de dois parâmetros diferentes de curvamento a quente na microestrutura e nas propriedades mecânicas de um tubo de aço API 5L X80, com carbono equivalente Pcm de 0,17% e  $\Sigma$  NbTiV de 0,11% produzido pelo processo UOE e originado de chapa obtida por processamento termomecânico sem resfriamento acelerado, cujo limite de resistência é de 679 MPa. Os dois parâmetros de curvamento consideram potência de 105 kW e frequência de 2500 Hz, sendo que o segundo curvamento foi realizado com potência de 205 kW e frequência de 500 Hz. O aumento da potência e a redução da frequência promoveram um aporte térmico maior e uma camada de zona afetada mais espessa, onde o aquecimento ocorre por resistência à passagem das correntes induzidas, resultando em distribuição mais uniforme de tamanho de grão austenítico e aumento da temperabilidade. Durante o curvamento, um gradiente térmico é formado ao longo da espessura, onde a superfície externa é temperada em água e a superfície interna é resfriada ao ar calmo, resultando em alterações microestruturais e de propriedades mecânicas. Após curvamento com frequência de 500 Hz, os valores de limite de escoamento são limítrofes e os de resistência superiores aqueles normalizados pela API 5L, sendo estas variações creditadas a presença de uma maior fração volumétrica de ferrita bainítica através da espessura do tubo na curva. O tratamento térmico posterior a 600°C mostrou, em ambos os casos, que a temperatura otimizada melhora o limite de escoamento e a tenacidade do trecho curvado.

## Palavras-chave

Aços API5L X80, Curvamento a quente por indução, caracterização microestrutural.

## Abstract

Silva, Rafael de Araujo; Bott, Ivani de Souza (Advisor). **Correlation between the induction hot bending parameters for API X80 pipe and the resulting mechanical and microstructural properties**. Rio de Janeiro, 2009. 260p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The present work aimed to compare the effect of two different bending parameters on the microstructure and the yield stress of a API5L X80 steel pipe (679 MPa) with Pcm of 0.17% and  $\Sigma$  NbTiV of 0.11% produced by the UOE process and originated from a plate obtained by thermomechanical processing without accelerating cooling. The two bending parameters considered power of 105 kW and 2500 Hz of frequency and 205 kW and 500Hz. The increase in power lead to a higher heat input and a thicker layer of heat affected zone, due to the lower frequency and the resistance to the eddy currents which resulted in a more homogeneous distribution of the austenitic grain size increasing the hardenability. During the bending process, a temperature gradient is formed through the thickness, where this temperature gradient is formed, while the external surface is water quenched the internal surface is still air cooled, leading to a microstructural and mechanical properties changes. The strength values obtained after bent at 500Hz, closed to those determined by the API 5L, are credited to the presence of a higher depth and volume fraction of ferrite bainite through thickness. The post heat treatment at 600°C proved to be, in both cases, the optimized temperature in order to improve the yield stress and leading better values of toughness.

## Keywords

API5L X80 pipelines steel, Induction hot bending, microstructural characterization.

## Sumário

1 Introdução	27
2. Revisão Bibliográfica	30
2.1. Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL)	30
2.2. Tubulações para transporte de gás e petróleo	31
2.3. Temperabilidade	32
2.4. Laminação controlada (TMCP)	35
2.4.1. Microestrutura obtida na laminação controlada	36
2.4.2. Refino de grão por amaciamento	37
2.4.3. Refino de grão por precipitação	39
2.4.4. Efeitos da deformação plástica na transformação de fase	40
2.5. Precipitados de elementos de liga	41
2.5.1. Solubilidade dos precipitados	42
2.5.2. Morfologia dos precipitados	42
2.5.3. Precipitação interfásica	43
2.5.4. Endurecimento secundário	44
2.5.5. Quantificação de precipitados	45
2.6. Processo UOE	46
2.7. Curvamento a quente por indução	48
2.7.1. Aquecimento por indução	48
2.7.2. Otimização dos parâmetros do curvamento a quente e tratamento térmico posterior	54
2.8. Tratamentos térmicos	57
2.8.1. Aço temperado	58
2.8.2. Aço revenido	60
2.8.3. Tratamento térmico I	62
2.8.3.1. Efeitos do tamanho de grão austenítico	62
2.8.3.2. Efeitos das taxas de resfriamento	62
2.8.4. Tratamentos térmicos II	65
2.9. Nomenclatura e caracterização microestrutural	66



2.9.1. Nomenclatura de microestruturas segundo ISIJ e IIW	66
2.9.2. Características das reações bainíticas	70
2.9.3. Efeito da microestrutura de laminação na formação das delaminações	76
2.9.4. Ataques químicos	77
 3 Material e procedimento experimental	 79
3.1. Material	79
3.1.1. Composição química	79
3.1.2. Estimativas das temperaturas de transformação	81
3.1.3. Caracterização microestrutural do trecho reto	82
3.1.4. Propriedades mecânicas	83
3.2. Procedimento experimental	84
3.2.1. Processo e variáveis do curvamento a quente por indução	84
3.2.2. Estimativas das taxas de aquecimento e resfriamento	89
3.2.3. Estimativa da potência dissipada e camada afetada	91
3.2.4. Modelo simplificado para estimar as isotermas de temperaturas, na espessura do tubo, atuantes durante o curvamento a quente	93
3.2.5. Metodologia de avaliação do curvamento	100
3.2.5.1. Ensaio de tração	101
3.2.5.2. Ensaio Charpy	102
3.2.5.3. Ensaio de microdureza	103
3.2.6. Tratamentos térmicos	105
3.2.6.1. Tratamentos térmicos I	105
3.2.6.2. Tratamentos térmicos II	106
3.2.6.3. Tratamentos térmicos de revenimento após curvamento a quente	108
3.2.7. Caracterização microestrutural	110
3.2.7.1. Descrição dos ataques químicos	113
3.2.7.2. Metodologia utilizada em microscopia eletrônica de transmissão	114

4 Resultados (Parte 01)	115
4.1. Caracterização microestrutural do trecho reto	115
4.1.1. Fração volumétrica, tamanho de grão e microdureza	119
4.1.2. Precipitação interfásica	120
4.1.3. Linhas de microsegregação	121
4.2. Correlação de propriedades mecânicas e microestrutura	123
5 Resultados (Parte 02)	127
5.1. Temperabilidade	127
6 Resultados (Parte 03)	133
6.1. Tratamentos térmicos II	133
6.1.1. Caracterização microestrutural após resfriamento contínuo com aplicação de patamar isotérmico na temperatura de 700°C	133
6.1.2. Caracterização microestrutural após resfriamento contínuo com aplicação de patamar isotérmico nas temperaturas Bs (623°C), Bi (542°C) e Ms (462°C)	136
6.2. Fração volumétrica	139
6.3. Resultados de microdureza	139
7 Resultados (Parte 04)	140
7.1. Tratamentos térmicos I	140
7.1.1. Caracterização microestrutural	140
7.1.2. Correlação entre microestrutura e propriedades mecânicas	145
7.1.3. Efeitos do revenimento na microestrutura e nas propriedades mecânicas após tratamentos térmicos I	147
8 Resultados (Parte 05)	151
8.1. Mudanças dimensionais na espessura de parede do tubo	151
8.2. Caracterização microestrutural na curva	151
8.2.1. Precipitados de elementos de liga	156

8.2.2. Caracterização microestrutural da região externa da espessura de parede na curva	158
8.2.3. Caracterização microestrutural das regiões centro-internas da espessura de parede na curva	162
8.2.4. Evolução de tamanho de grão da austenita prévia	163
8.2.5. Evolução da fração volumétrica dos microconstituintes através da espessura de parede na curva	164
8.3. Perfis de microdureza ao longo da espessura de parede na curva	169
8.3.1. Propriedades mecânicas e correlações	172
9 Resultados (Parte 06)	176
9.1. Propriedades mecânicas em Tração	176
9.2. Energia absorvida Charpy	179
10 Resultados (Parte 07)	181
10.1. Efeitos do curvamento a quente na junta soldada longitudinal	181
11 Resultados (Parte 08)	187
11.1. Efeito sobre a tenacidade	187
11.2. Efeito sobre a distribuição de microdurezas	190
11.3. Efeito dos revenimentos sobre as propriedades mecânicas em tração	192
11.4. Efeitos do ciclo térmico	198
11.4.1. Auto Revenimento	198
11.4.2. Na região curvada	200
11.5. Revenimento a 500°C após curvamento a 2500 Hz	203
11.6. Endurecimento secundário	204
11.7. Influência do tempo de revenimento	206
11.8. Caracterização dos precipitados por dissolução ácida da matriz	207

12 Discussão dos resultados	210
12.1. Caracterização do trecho reto	210
12.1.1. Microestrutura	210
12.1.2. Grãos ferríticos com endurecimento adicional	213
12.1.3. Microsegregação	214
12.1.4. Propriedades mecânicas	215
12.1.4.1. Propriedades mecânicas em tração	215
12.1.4.2. Ensaio de impacto Charpy	215
12.2. Temperabilidade do trecho curvado	218
12.2.1. Carbono equivalente	218
12.2.2. Homogeneidade da austenita	219
12.2.3. Tamanho de Grão da austenita	221
12.3. Tratamentos térmicos I	222
12.3.1. Efeitos das taxas de resfriamento	222
12.3.2. Tratamentos térmicos II	226
12.3.2.1. Variação das taxas de resfriamento a partir da Isoterma de 700°C	227
12.3.2.2. Temperatura de início da reação bainítica no aço API X80 (isotermas 623°C e 542°C)	228
12.3.2.3. Temperatura de início da reação martensítica no aço API X80 (isoterma $M_s = 462^\circ\text{C}$ )	230
12.4. O trecho curvado	231
12.4.1. Mudanças dimensionais no sentido da espessura	231
12.4.2. Efeito do curvamento na junta soldada longitudinal	232
12.4.3. Caracterização microestrutural da região externa da espessura de parede na curva	234
12.4.4. Caracterização microestrutural das regiões centro- internas da espessura de parede na curva	237
12.4.5. Comparações entre os curvamentos a quente realizados com diferentes parâmetros de frequência e potência	239
12.5. Tratamentos térmicos de revenimento após operação de curvamento a quente	243

12.5.1. Efeito sobre a tenacidade	243
12.5.2. Efeito sobre a distribuição de microdurezas	244
12.5.3. Efeito sobre as propriedades mecânicas em tração	244
12.5.4. Auto revenimento	246
12.5.5. Efeitos microestruturais na curva	246
12.5.6. Tratamento térmico tradicionalmente aplicado após o curvamento	247
12.5.7. Endurecimento secundário	247
12.5.8. Dissolução Ácida e precipitação	249
 13 Conclusões	 250
 14 Sugestões para trabalhos futuros	 251
 15 Referências bibliográficas	 252

## Lista de figuras

Figura 01 – Microestrutura da chapa de aço Nb-Cr-Mo-V após a laminação caracterizada por Vieira [16] como ferrita poligonal, bainita e constituinte AM em microscopia eletrônica de varredura. Nital 2% .	36
Figura 02 – Colônias de agregados eutetóides com alinhamento paralelo ao sentido de laminação presente em aço API X80 (0,067%C) de matriz ferrítica poligonal por González, Landgraf, Goldenstein e Gorni [17].	37
Figura 03 – Ferrita acicular em microscopias eletrônica de varredura (a) e transmissão (b), segundo H. J. Jun et al [24], em aço ARBL contendo B.	40
Figura 04 – Espectro por EDS do resíduo produto da dissolução ácida da matriz do aço X100 de Lu, Ivey et al [34], revelando Mo, Nb, Ti e Si.	46
Figura 05 – Processo UOE. Fonte: tenaris.com.br (Tenaris Confab)	48
Figura 06 – (a) Mistura de ferrita bainítica e martensita (MEV); (b) Ferrita bainítica com constituintes alongados (AM, austenita retida ou martensita) nos contornos de grãos; e (c) Martensita, caracterizadas por H. J. Jun et al [24] em microscopia eletrônica de transmissão.	60
Figura 07 – Caracterização microestrutural por MEV da decomposição austenítica para diferentes velocidades de resfriamento observada por González, Landgraf, Goldenstein e Gorni [17].	63
Figura 08 – Microestrutura resultante da transformação isotérmica a 480 °C, de aços de baixo carbono contendo Mo-Nb-Cu-B, realizada por Zhao et al [49].	65
Figura 09 – (a) Esquema de formação da bainita superior (b) Bainita em aço com 0,47% C, Metals Handbook volume 09 [56].	72
Figura 10 - Trecho do diagrama de equilíbrio Ferro-carbono [64].	81
Figura 11 – Curva de transição dúctil-frágil para o tubo obtida para três regiões distintas da junta soldada longitudinal no trecho reto (metal solda, zona termicamente afetada e metal de base).	84
Figura 12 – Esquema das atividades desenvolvidas para o tubo API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$ .	85

Figura 13 – Esquema aplicado para gerar o tubo com dimensões que possibilitassem a realização do curvamento.	87
Figura 14 – Esquema da operação de curvamento a quente [07].	87
Figura 15 – Operação de curvamento a quente. Teste para a frequência de 500 Hz.	88
Figura 16 – Ciclo térmico de aquecimento e resfriamento da superfície externa do tubo, curvamento a quente com parâmetro de frequência de 500 Hz.	89
Figura 17 – Estimativas para as taxas de aquecimento e resfriamento aplicadas durante o processo de curvamento a quente.	90
Figura 18 – Espessuras afetadas pelas correntes induzidas em acordo com o modelo embasado em tratamentos térmicos de aquecimento por indução nas condições testadas (material, temperatura de austenitização, etc...) por Novikov [40].	92
Figura 19 – (a) As cartas de profundidade de penetração de corrente em função da resistividade elétrica para várias frequências em aquecimento por indução dos aços processados em diferentes operações. (b) Espessura de camada afetada (película) em função da densidade de potência para diferentes frequências [39].	92
Figura 20 – Esquema proposto para o aquecimento.	94
Figura 21 – Elemento de tubo analisado.	96
Figura 22 – Distribuição de temperaturas ao longo da espessura em modelo sem geração de calor.	97
Figura 23 – (a) Isotermas em diferentes curvamentos; (b) isotermas em função da variação de espessura do tubo na região da curva (500 Hz) e (c) distribuição de temperaturas ao longo da espessura no curvamento com frequência de 500 Hz em função da profundidade de penetração das correntes induzidas.	99
Figura 24 – regiões do tubo curvado.	100
Figura 25 - Dimensões dos corpos de prova, segundo a norma API 5L, removidos das regiões de interesse do tubo curvado.	102
Figura 26 – Dimensões dos corpos de prova de impacto Charpy de acordo com a ASTM A 370 [67].	103

Figura 27 – (a) Perfil de microdureza em função da espessura, (b) esquema para distribuição de microdureza em função da espessura do tubo aplicado para verificar endurecimento secundário após revenimento e (c) perfil de microdureza na região da junta soldada longitudinal presente no tubo submetido a curvamento a quente.	104
Figura 28 – Curva CCT para chapa grossa de aço API 5L X80.	106
Figura 29 – Esquema dos perfis microestruturais levantados nos trechos de curva.	111
Figura 30 – Microscopias Óptica e eletrônica de varredura do trecho reto, longitudinal ao sentido de laminação, com nital 2%.	115
Figura 31 – Microscopias Óptica e eletrônica de varredura do trecho reto, transversal ao sentido de laminação, com nital 2%.	116
Figura 32 – Constituinte AM disperso e microfases no trecho reto do tubo API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$ . Ataque Nital 2%.	117
Figura 33 – Morfologia da bainita granular. Tubo de aço API grau X80.	118
Figura 34 – Aço API X80 (a) Trecho reto, (b) temperado em óleo, (c) normalizado. Atacado com reagente Behara.	119
Figura 35 – Distribuição de microdurezas em grãos ferríticos do trecho reto e parte interna da curva.	120
Figura 36 – Trecho reto, precipitados do tipo II observados por microscopia eletrônica de transmissão em campo claro.	121
Figura 37 – Linhas de microsegregação presente no trecho reto do tubo de aço API X80 com $P_{cm} = 0,17\%$ .	122
Figura 38 – Perfil de microdureza do trecho reto.	123
Figura 39 – Fractografia das delaminações observadas em corpos de prova Charpy do trecho reto do tubo de aço API X80.	124
Figura 40 – Nucleação e propagação de trincas de delaminação, reagentes nital 2% e LePera modificado.	125
Figura 41 - Fratura dúctil em corpo de prova charpy (0°C) do trecho reto do tubo API X80 revenido a 600°C durante uma hora, com energia absorvida de 228 J.	125



Figura 42 – Corpo de prova de tração API 5L da junta soldada longitudinal presente no trecho reto tratado termicamente a 610°C.	126
Figura 43 – Vista frontal da frente de fratura atacada com nital 2%.	126
Figura 44 – Evolução do tamanho de grão austenítico com a temperatura de austenitização.	128
Figura 45 – Perfil de microdureza em função da espessura para diferentes temperaturas de austenitização e influência do tamanho de grão austenítico nas propriedades de dureza de amostras de aço API X80 com Pcm = 0,17%.	128
Figura 46 – Microestrutura da camada endurecida e média de microdureza HV (0,2 kg, 15 s) da (a) Bainita superior revenida e (b) Martensita revenida. Ataque Nital – Picral.	129
Figura 47 – Inclusões não metálicas observadas no trecho reto e na curva. Ataque Nital 2%.	130
Figura 48 – Carbonitreto observados no trecho reto e na curva em MO e MEV (elétrons secundários). Ataque: LePera Modificado.	131
Figura 49 – Fractografia dos corpos de prova de aço API X80 exibindo fratura dúctil com alguns alvéolos nucleados a partir de inclusões.	132
Figura 50 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 700°C (15 min) seguido de resfriamento final em água (a,b,c), em ar calmo (d,e,f) e no forno (g,h,i). Microscopia óptica com ataque LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco) e microscopia eletrônica da varredura com ataque com nital 2%.	134
Figura 51 – (a) Microestrutura ferrítica, perlítica exibida por aços dos graus API X70 e (b) API X80 com 0,05% de carbono e Pcm = 0,17% e austenitizado a 1000°C, resfriado até a isoterma de 700°C (15 min) e submetido a resfriamento, até a temperatura ambiente, dentro do forno (condições lentas de resfriamento). Microscopia Óptica, Nital 2%.	135
Figura 52 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 623°C (15 min) seguido de resfriamento final em água. Microscopia Óptica.	136

- Figura 53 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamares isotérmicos a 623°C (a, b,c), 542°C (d,e,f) e 462°C (g,h,i) durante 15 minutos seguido de resfriamento final em água. Microscopia óptica com ataque LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco) e microscopia eletrônica da varredura com ataque com nital 2%. 137
- Figura 54 – Tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo e aplicação de patamar isotérmico a 462°C (15 min) seguido de resfriamento final em ar calmo. (a) Resultados para o LePera modificado revelando a presença de constituinte AM (em branco). (b,c) Microscopia eletrônica da varredura. Ataque com nital 2%. 138
- Figura 55 – Aço API 5L X80 (NbCrMoV) de Pcm = 0,17% submetido a tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo a partir de austenitização a 1000°C durante 30 minutos e resfriamento em diferentes meios. Caracterização em microscopia eletrônica de varredura. Ataque com Nital 2%. 141
- Figura 56 – Aço API 5L X80 (NbCrMoV) de Pcm = 0,17% submetido a tratamento térmico com transformações em resfriamento contínuo a partir de austenitização a 900°C durante 30 minutos e resfriamento em diferentes meios. Caracterização em microscopia eletrônica de varredura. Ataque com Nital 2%. 142
- Figura 57 – Quantificação da fração volumétrica de constituinte AM. 143
- Figura 58 – (a) e (b) Trechos austenitizados a 1000°C e (c) e (d) a 900°C submetidos a diferentes taxas de resfriamento. Observação (em branco) de constituinte AM em microscopia óptica; ataque LePera Modificado. 144
- Figura 59 – Correlação entre microestrutura e microdureza obtidas após tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo de amostras de aço API grau X80 (Pcm = 0,17%) austenitizadas a 1000°C. 145
- Figura 60 – (a) Microdurezas e (b) limite de resistência estimado em função dos tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo. 145
- Figura 61 - Fractografia dos corpos de prova de tração do aço API X80 de Pcm = 0,17 % usinados a partir de amostras austenitizadas a 1000 e 900°C e resfriadas em água e ar calmo. 146

Figura 62 – Metaestabilidade do constituinte AM em aço API X80 revenido (500°C durante 1h). Ataque eletrolítico duplo de Ikawa, MEV.	147
Figura 63 – Efeitos do revenimento a 600°C (1h) sobre a microestrutura e microdureza do aço API X80 temperado a partir de austenitização a 1000°C (a,b) e a 900°C (c,d).	148
Figura 64 – Correlação entre microconstituintes e microdureza.	149
Figura 65 – Variação das propriedades mecânicas após realização dos tratamentos térmicos com transformações em resfriamento contínuo seguido de revenido.	150
Figura 66 – Caracterização Microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, da linha neutra e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.	152
Figura 67 – Caracterização Microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, do extradorso e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.	153
Figura 68 – Caracterização Microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, do intradorso e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.	154
Figura 69 – Caracterização Microestrutural, por microscopia eletrônica de varredura, dos trechos da zona de transição (ZT) e fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada. Ataque com nital 2%.	155
Figura 70 – Morfologia dos precipitados. Microscopia eletrônica de varredura (MEV). Ataque LePera Modificado com pré ataque em Nital 2%.	156
Figura 71 – Precipitação grosseira (0,92 $\mu\text{m}$ ) cuboidal, possivelmente (em função de sua morfologia) um carbonitreto de Nb e Ti.	157
Figura 72 – Microestrutura caracterizada 1 mm da superfície externa no intradorso, tubo API X80 com $P_{cm} = 0,17\%$ , curvado com frequência de 2500 Hz.	158
Figura 73 – Alterações microestruturais decorrentes de curvamentos a quente com parâmetros diferenciados de frequência e potência. Ataque nital 2%, MEV.	159
Figura 74 – Aspecto microestrutural da parte externa da espessura de parede do intradorso como curvado a 2500 Hz. Microscopia eletrônica de transmissão em campo claro.	160

Figura 75 – Grãos ferríticos com elevada densidade de discordâncias e constituinte AM (seta) nos contornos de grão, observados para a região curvada a 2500 Hz.	161
Figura 76 – Alterações microestruturais decorrentes de curvamentos a quente com parâmetros diferenciados de frequência e potência. Ataque nital 2%, MEV.	162
Figura 77 – Evolução do tamanho de grão da austenita prévia para trechos que compõem as curvas 2500 Hz (a) e 500 Hz (b).	163
Figura 78 – Distribuição de constituinte AM em função da espessura de parede do tubo na curva 2500 Hz. Microscopia Óptica, Ataque LePera modificado.	165
Figura 79 – Correlação de fração volumétrica de AM com espessura de parede do tubo na curva 2500 Hz.	166
Figura 80 – Evolução das frações volumétricas de (a) ferrita primária, (b) ferrita com segunda fase alinhada, (c) constituinte AM e (d) agregados de ferrita e carbonetos, ao longo da espessura de parede das curvas 2500 Hz e 500 Hz e zona de transição 500 Hz.	168
Figura 81 – Fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada em função do tamanho de grão da austenita prévia, presente na espessura interna de parede das curvas submetidas a resfriamento em ar calmo.	169
Figura 82 – Distribuição de microdurezas ao longo da espessura de parede nas curvas e da zona de transição (Profundidade de têmpera).	170
Figura 83 – Microdurezas ao longo da espessura de parede na curva e na zona de transição.	171
Figura 84 – Tamanho de grão da austenita prévia e microdurezas ao longo da espessura de parede para as curvas 2500 Hz e 500 Hz.	172
Figura 85 – Correlação entre microdureza, fração volumétrica de ferrita com segunda fase alinhada e tamanho de grão austenítico obtida para a espessura interna de parede nas curvas 2500 Hz e 500 Hz e zona de transição 500 Hz.	173
Figura 86 – Correlação entre fração volumétrica média de ferrita com segunda fase alinhada (através da espessura de parede nas curvas e zona de transição) com microdureza e limite de resistência estimado (estratificado em função da espessura).	174

Figura 87 – Correlação entre fração volumétrica média de ferrita com segunda fase alinhada e propriedades mecânicas obtidas em ensaios de tração.	175
Figura 88 – Limites de escoamento e resistência após curvamento a quente utilizando frequência de 500 Hz.	178
Figura 89 – Alongamento após curvamento a quente utilizando frequência de 500 Hz.	178
Figura 90 – Resumo (por região) para valores de limites de escoamento e resistência após curvamento a quente utilizando frequência de 500 Hz.	179
Figura 91 – Valores de energia absorvida Charpy obtidas após curvamento a quente utilizando frequência de 500 Hz.	180
Figura 92 – Macrografia da junta soldada longitudinal AS exibindo as regiões analisadas.	181
Figura 93 – Micrografia da junta soldada AS na região do primeiro passe presente na espessura externa do tubo no trecho reto, na zona de transição e na curva.	182
Figura 94 – Micrografia da junta soldada AS na região do segundo passe presente na espessura interna do tubo no trecho reto, na zona de transição e na curva.	183
Figura 95 – Distribuição de microdurezas na junta soldada AS (primeiro passe) presente na espessura externa do tubo no trecho reto, na zona de transição e na curva.	185
Figura 96 – Distribuição de microdurezas na junta soldada AS (segundo passe) presente na espessura interna do tubo no trecho reto, na zona de transição e na curva.	185
Figura 97 – Distribuição de microdurezas na junta soldada AS (primeiro e segundo passes) para o trecho reto e trecho curvado.	186
Figura 98 – Gráfico de energia de impacto Charpy para o trecho curvado a 2500 Hz (API X80 de Pcm = 0,17%), e revenido a diferentes temperaturas.	187
Figura 99 – Distribuição de energia absorvida para trechos do tubo API X80 curvado a quente a 2500 Hz e revenido a 610 (a) e 640°C (b).	188
Figura 100 – (a) Fractografia e (b) aspecto microestruturais da região da zona de transição do intradorso 2500 Hz tratada a 610°C.	189

Figura 101 – Energias de impacto Charpy absorvidas a 0°C registradas para trechos da curva 500 Hz.	190
Figura 102 – Distribuição de microdureza após revenimento para as curvas (a) 2500 Hz e (b) 500 Hz.	191
Figura 103 – Distribuição de microdureza após revenimento para as zonas de transição (a) 2500 Hz e (b) 500 Hz.	191
Figura 104 – Distribuição dos valores individuais de limites de escoamento e resistência observados para o trecho reto.	193
Figura 105 – Perfis de limites de escoamento (a) e resistência (b) dos trechos que compõem a curva 2500 Hz e comparação entre os valores individuais de limites de escoamento e resistência em função dos revenimentos aplicados (c, d).	194
Figura 106 – Propriedades em tração na solda longitudinal presente na curva 2500 Hz, zona de transição e trecho reto submetidas a revenido a 600 e 650°C.	195
Figura 107 – Distribuição dos valores individuais de limites de escoamento (a) e resistência (b) e alongamento (c) observados para os trechos que compõem a curva 500 Hz (extradorso, intradorso e linha neutra) antes e após revenimento a 600°C.	196
Figura 108 – Evolução das propriedades mecânicas em tração para as curvas 2500 e 500 Hz antes e após o revenimento a 600°C.	196
Figura 109 – Evolução percentual das propriedades mecânicas em tração da curva 2500 Hz após revenimento (500 e 650°C) e após alterações dos parâmetros de curvamento (500 Hz).	197
Figura 110 – Possibilidade de auto-revenido na parte externa da espessura de parede na curva. Aço API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$ .	199
Figura 111 – Aspectos microestruturais obtidos pelo revenido na região externa da espessura de parede no intradorso do tubo de aço API X80 ( $P_{cm} = 0,17\%$ ). Nital 2%, MO e MEV.	200
Figura 112 – Região curvada a 2500 Hz, tratada a 600 e 650°C em comparação com o mesmo do trecho (Intradorso) como curvado. Ataque Nital 2%, MEV.	201
Figura 113 - Precipitação presente na curva 2500 Hz, do tubo API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$ , tratada a 600 e 650°C. MEV e MET (campo claro).	202

Figura 114 – Variações das propriedades mecânicas em tração na curva de tubos de aço API X80, com diferentes valores de carbono equivalente, em função do tratamento térmico tradicional aplicado posteriormente ao curvamento a quente [07,10 e 44].	203
Figura 115 – (a) distribuição de valores de microdureza em função das temperaturas de revenimento e (b) Perfil de microdureza em função das temperaturas de revenimento e espessura de parede do tubo.	205
Figura 116 – Propriedades mecânicas de tração da curva 2500 Hz, do tubo de Pcm = 0,17%, apresentando endurecimento secundário na faixa de temperatura de revenido entre 600 e 650°C.	205
Figura 117 – Endurecimento secundário em chapa de aço ARBL (API X80), sem adição de vanádio.	206
Figura 118 – Variação do tempo de revenido aplicado ao aço API X80 de Pcm = 0,17%. Média de microdureza na espessura em função da temperatura e tempo de revenido.	207
Figura 119 – EDS dos resíduos obtidos por dissolução ácida da matriz do aço API X80, revelando Mo, Nb, Ti e Si.	208
Figura 120 – Precipitação de Nb e Ti presente na parte externa da espessura de parede no intradorso 2500 Hz tratado termicamente a 650°C. Microscopia eletrônica de transmissão (campo claro e EDS).	209
Figura 121 – Martensítica e bainítica transformadas na região das linhas de microsegregação após etapa de patamar de resfriamento de 700°C e resfriamento final em água.	215
Figura 122 – Intradorso 2500 Hz. Observação de precipitação em contornos de grão da austenita prévia por contraste de difração em campo claro e campo escuro centrado. Há a presença de partículas de morfologia irregular nos contornos de grão e degraus devido ao ancoramento. Microscopia eletrônica de transmissão.	220
Figura 123 – Caracterização microestrutural da decomposição austenítica para diferentes velocidades de resfriamento observadas por González, Landgraf, Goldenstein e Gorni [17] em comparação com as regiões centro-internas da espessura de parede na curva 2500 Hz. Microscopia eletrônica de varredura.	225

## Lista de tabelas

Tabela 01 – Distribuição dos elementos de liga	34
Tabela 02 – Microconstituintes dos aços e ataques geralmente indicados	77
Tabela 03 – Efeitos dos ataques coloridos sobre os microconstituintes	78
Tabela 04 – Composição química do tubo	80
Tabela 05 – Temperaturas empíricas de transformação de fase	82
Tabela 06 – Propriedades médias de tração das chapas e do tubo API 5L X80	83
Tabela 07 – Identificação e parâmetros aplicados nas operações de curvamento a quente do tubo API X80 de $P_{cm} = 0,17\%$	86
Tabela 08 – Efeitos da frequência de indução na espessura afetada pelas correntes induzidas, nas condições de material e operação propostas por Novikov [40]	91
Tabela 09 – Tratamentos térmicos I aplicados ao trecho reto	105
Tabela 10 – Tratamentos térmicos II aplicados ao trecho reto	108
Tabela 11 – Parâmetros dos tratamentos térmicos posteriores ao curvamento a quente aplicados, em escala laboratorial, a trechos de 150 x 150 mm da curva 2500 Hz	109
Tabela 12 – Parâmetros dos tratamentos térmicos posteriores ao curvamento a quente aplicados, em escala industrial, a segmentos de tubo removidos da curva 2500 Hz	110
Tabela 13 – Ataques, formulação e indicações de uso	113
Tabela 14 – Caracterização microestrutural do trecho reto	119
Tabela 15 – Propriedades mecânicas do trecho reto	123
Tabela 16 – Limite de resistência estimado do trecho reto e fração volumétrica	124
Tabela 17 – Variação do tamanho de grão austenítico em função da temperatura de austenitização e efeitos nas propriedades mecânicas após têmpera em água e revenimento a 500°C durante 1 hora	127



Tabela 18 – Microestruturas caracterizadas a partir da evolução microestrutural do trecho reto API X80 de P <sub>cm</sub> = 0,17% submetido a diferentes ciclos térmicos e microdurezas médias resultantes dos tratamentos térmicos	143
Tabela 19 – Propriedades mecânicas do trecho reto como recebido em comparação com o estado como temperado	146
Tabela 20 – Espessura de parede no trecho reto, zona de transição (ZT) e na curva	151
Tabela 21– Propriedades médias em tração obtidas após curvamento (500 Hz)	176
Tabela 22 – Quadro comparativo de propriedades mecânicas em tração na curva para diferentes condições de processamento e carbono equivalente	177
Tabela 23 – Energias Absorvidas para o ensaio de impacto Charpy V (0°C), como curvado a 500 Hz e tratado termicamente a 600°C	179
Tabela 24 – evolução das propriedades mecânicas em função do carbono equivalente dos tubos API X80 antes e após operação de curvamento a quente a 2500 Hz	219
Tabela 25 – Composição química e temperatura Bs (formação da bainita superior)	228

*“Aquele que desceu é também o mesmo que subiu acima de todos os céus, para cumprir todas as coisas.”*

*Epístola de Paulo Apóstolo aos Efésios (cap. 04,10)*