



Gilmar Zacca Batista

**Curvamento por Indução de Tubo
da Classe API 5L X80**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro
Dezembro de 2005



GILMAR ZACCA BATISTA

Curvamento por Indução de Tubo da Classe API 5L X80

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

Profa. Ivani de S. Bott

Orientadora

Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia - PUC-Rio

Prof. Paulo Rangel Rios

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. Eduardo Hippert Júnior

CENPES/PETROBRAS

Prof. José Eugenio Leal

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

Rio de Janeiro, 21 de dezembro de 2005

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

Gilmar Zacca Batista

Técnico em Mecânica pela Escola Técnica Estadual Visconde de Mauá em 1994. Graduado em Engenharia Industrial Metalúrgica pela Universidade Federal Fluminense em 2000 onde desenvolveu trabalhos de iniciação científica. Estagiou na Valesul Alumínio e Forjas Brasileiras. Trabalhou na PUC no desenvolvimento de tubos API 5L X80 para dutos, passou pela Marinha do Brasil e atualmente trabalha na Petrobras como Engenheiro de Equipamentos.

Ficha Catalográfica

Batista, Gilmar Zacca

Curvamento por indução de tubo da classe API 5L X80 / Gilmar Zacca Batista; orientadora: Ivani de Souza Bott. – Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2005.

122 f. ; 30 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Ciência dos materiais e metalurgia – Teses. 2. Aços de alta resistência. 3. API 5L X80. 4. Curvamento por indução. 5. Propriedades mecânicas. I. Bott, Ivani. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

À Cristiane, minha esposa, pelo
incentivo, amor e compreensão
ao longo desta jornada.

Agradecimentos

À Jesus Cristo que restaurou minha vida e está comigo em todos os momentos.

Aos meus avós Moacyr[†] e Glória, meus pais Gilberto e Cristina, minha querida irmã Letícia e minha amada esposa Cristiane, que estiveram ao meu lado em mais esta conquista na minha vida.

À professora e amiga Ivani Bott pela orientação e apoio na realização deste e de outros trabalhos.

À Petrobras e a PUC pelo investimento concedido para a conclusão deste estudo.

À Confab e a Protubo pelo fornecimento do material e apoio técnico.

Aos amigos da Petrobras pelo auxílio nos momentos em que foi preciso.

Aos amigos da PUC, que tornaram esta caminhada mais agradável.

Aos profissionais que colaboraram com as etapas experimentais deste estudo: Na PUC: Heitor, Percy, Adriano, Rafael, Luciano e Edilaine. No CENPES: Hippert e Lorena. Meu muito obrigado.

Aos participantes da comissão examinadora.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra tem contribuído para o meu desenvolvimento profissional e humano.

Resumo

Batista, Gilmar Zacca. **Curvamento por Indução de Tubo da Classe API 5L X80**. Rio de Janeiro, 2005. 122p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho são apresentados os efeitos do processo de curvamento a quente por indução na microestrutura e nas propriedades mecânicas do tubo API 5L X80, fabricado pelo processo UOE, com chapa produzida através do processo de laminação controlada sem resfriamento acelerado. O curvamento foi realizado com aquecimento localizado, provocado por uma bobina de alta frequência, seguido de resfriamento por jatos de água. O tubo curvado foi avaliado e comparado com o tubo reto. Adicionalmente, foi realizado um tratamento térmico de revenido em parte da região curvada. Foram realizados ensaios mecânicos de tração, microdureza e impacto Charpy-V, análises dimensionais e avaliação microestrutural. Verificou-se uma alteração significativa na microestrutura da região curvada, resultando em uma curva com menores valores de temperatura de transição e limite de escoamento inferior ao do tubo original e ao requerido por norma. O tratamento térmico aplicado na região curvada, mostrou-se eficiente para elevar o limite de escoamento para valores acima do mínimo especificado pela norma API 5L para o X80.

Palavras-chave

Aços de Alta Resistência; API 5L X80; Curvamento por Indução; Propriedades Mecânicas.

Abstract

Batista, Gilmar Zacca. **Induction Hot Bending of Steel Pipe API 5L X80.** Rio de Janeiro, 2005. 122p. Master Dissertation - Department of Materials Science and Metallurgy, Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro.

The present work discusses the effect of the induction bending process on the microstructure and the mechanical properties of an API 5L X80, 20" pipe produced by the UOE process. The key characteristic of the pipe was the manufacturing process of the steel plate, involving thermomechanical controlled rolling without accelerated cooling. The pipe bending was carried out applying local induction heating followed by water quenching and a further temper heat treatment was applied to the curved section. The methodology of analysis compared the curved section with the original body pipe, taking into account dimensional analysis, microstructural evaluation and mechanical tests which included Charpy-V impact, tensile and microhardness. A significant microstructural change and decrease, not only in the transition temperature, but also in the yield strength occurred after induction bending, this reduction was below the standard requirements. The subsequent tempering heat treatment applied to the curved section produced an increase in the yield strength to achieve the API 5L requirements for this class of steel.

Keywords

High Strength Steel; API 5L X80; Induction Hot Bending; Mechanical Properties.

Sumário

1 Introdução	14
2 Revisão Bibliográfica	17
2.1. Metodologias Utilizadas na Fabricação de Aços para Dutos	17
2.2. Classificação dos Aços para Dutos	25
2.3. Influência da Composição Química	27
2.4. Processo de Fabricação dos Tubos	35
2.5. Curvamento a Quente por Indução	41
3 Material e Procedimento Experimental	76
3.1. Material	76
3.2. Procedimento Experimental	79
4 Resultados e Discussão	86
4.1. Análise Dimensional	86
4.2. Caracterização Microestrutural do Tubo Curvado	88
4.3. Efeito do Curvamento nas Propriedades Mecânicas do Tubo	94
4.4. Avaliação da Junta Soldada	101
4.5. Efeito do Tratamento Térmico na Microestrutura e Propriedades do Tubo Curvado	111
5 Conclusões	116
5.1. Recomendações ao Fabricante	118
5.2. Sugestões para Trabalhos Futuros	118
6 Referências Bibliográficas	120

Lista de figuras

Figura 1- Perspectiva de crescimento do mercado de gás natural.	14
Figura 2- Desenvolvimento dos aços para dutos.	17
Figura 3- Comparação entre o tamanho de grão obtido pelos diferentes processos de laminação.	18
Figura 4- Diferentes processos de nucleação.	19
Figura 5- Estágios da laminação controlada.	21
Figura 6- Processo de recristalização.	22
Figura 7- Resumo dos aços para tubos produzidos para dutos de alta resistência na Europa, nas Américas e Japão.	26
Figura 8- Efeito dos diferentes mecanismos de endurecimento na temperatura de transição.	27
Figura 9- Efeito do teor de carbono (% de perlita) nas curvas de temperatura de transição de aços ferríticos-perlíticos.	28
Figura 10- Efeito da adição de Ti na tenacidade da ZTA de aços C-Mn após a soldagem por arco submerso.	29
Figura 11- Efeito do teor de Ti na temperatura de transição para aços C-Mn após soldagem por arco submerso.	30
Figura 12- Influência dos elementos de liga no retardo da recristalização da austenita.	31
Figura 13- Efeito do teor de Mn na susceptibilidade a trinca induzida por hidrogênio.	33
Figura 14 – Influência do teor de P na segregação.	34
Figura 15- Processo U-O-E.	36
Figura 16- Comparação da tenacidade da ZTA com o metal de base dos tubos e das chapas para um aço API 5L X80 produzido por laminação controlada.	37
Figura 17- Deformação ocorrida na conformação da chapa em tubo.	38
Figura 18- Representação esquemática do comportamento do limite de escoamento durante os processos de conformação.	39

Figura 19- Resfriamento com jatos de água após passar pela bobina.	43
Figura 20- Desenho esquemático do curvamento por indução.	43
Figura 21- Desenho esquemático das variações do processo de fabricação.	44
Figura 22 – Efeito do Nb no crescimento do grão austenítico durante o aquecimento.	46
Figura 23- Efeito do teor de carbono nas propriedades mecânicas nas condições de como temperado e temperado e revenido.	47
Figura 24- Influência do C_{eq} nas propriedades mecânicas nas condições de temperado e temperado e revenido.	48
Figura 25- Comparação da resistência entre curvas a quente e chapas.	49
Figura 26- Efeito da espessura na taxa de resfriamento.	51
Figura 27- Efeito do teor de oxigênio na tenacidade do metal de solda temperado e temperado e revenido.	53
Figura 28- Efeito do teor de oxigênio na tenacidade do metal de solda nas condições de como curvado e como soldado.	54
Figura 29- Efeito dos teores de C e Ti na tenacidade do metal de solda nas condições de como curvado e como soldado.	54
Figura 30- Efeito dos teores de Mn, Ni e B na tenacidade do metal de solda nas condições de como curvado e como soldado.	55
Figura 31- Variação da espessura do tubo após o curvamento.	56
Figura 32- Efeito da velocidade de curvamento na dureza.	58
Figura 33- Largura da zona de transição para grandes e pequenas espessuras.	59
Figura 34- Resultado dos testes de HIC.	63
Figura 35- Mudanças dimensionais provocadas pelo teste de estouro realizado na curva X60.	64
Figura 36- Resultados do ensaio de tração para o tubo API 5L X65 antes e após o curvamento e tratamento térmico.	66
Figura 37- Energia absorvida pelo metal de solda da curva 2.	67

Figura 38- Resultados do ensaio de tração para o tubo API 5L X70 antes e após o curvamento.	68
Figura 39- Energia absorvida pelo metal de solda da curva 3.	69
Figura 40- Influência do V nas propriedades mecânicas de um aço Mn-Mo-Nb após têmpera e revenido.	70
Figura 41- Influência do Mn nas propriedades mecânicas de um aço Mn-Mo-Nb-V após têmpera e revenido.	71
Figura 42- Composição química e propriedades mecânicas.	72
Figura 43- Dimensões do tubo API 5L X80 utilizado no estudo.	76
Figura 44- Comparação entre o limite de escoamento da chapa e do tubo.	77
Figura 45- Resultado do ensaio Charpy-V.	78
Figura 46- Curvamento por indução realizado na PROTUBO.	80
Figura 47- Retirada do tubo após o curvamento.	80
Figura 48- Tubo curvado.	81
Figura 49- Regiões avaliadas com ensaios mecânicos e metalografia.	82
Figura 50- Dimensões dos corpos de prova para ensaio de tração. Extraído da API 5L.	83
Figura 51- Orientação dos corpos de prova de tração.	84
Figura 52- Orientação dos corpos de prova e do entalhe para o ensaio Charpy.	84
Figura 53- Local de medição da microdureza Vickers das juntas soldadas.	85
Figura 54- Alterações dimensionais decorrentes do curvamento.	87
Figura 55- Micrografias do tubo original e das regiões da linha neutra, extradorso e intradorso.	89
Figura 56- Micrografias do tubo original e das regiões da linha neutra, extradorso e intradorso.	91
Figura 57- Micrografias das zonas de transição.	92
Figura 58- Micrografias das zonas de transição.	93
Figura 59- Comparação entre as curvas de transição construídas a partir de corpos de prova Charpy-V longitudinal (L) e transversal (T).	95

Figura 60- Comparação da temperatura de transição do tubo original com as diferentes regiões da curva.	96
Figura 61- Limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR).	98
Figura 62- Resultado do ensaio de microdureza Vickers.	99
Figura 63- Resultado do ensaio de microdureza Vickers com as barras de erro.	100
Figura 64- Seqüência do processo de soldagem e macrografia da junta.	101
Figura 65- Micrografia das regiões da junta soldada.	102
Figura 66- Curvas de transição para metal de base, metal de solda e ZTA.	104
Figura 67- Resultados de microdureza para o tubo utilizado neste estudo.	104
Figura 68- Micrografia da junta soldada na região curvada do tubo.	106
Figura 69- Micrografia da junta soldada na zona de transição do tubo.	107
Figura 70- Efeito do curvamento nas temperaturas de transição do MS e ZTA.	108
Figura 71- Microdureza das regiões da junta soldada para Metal de Base (MB), Metal de Solda (MS) e Zona Termicamente Afetada (ZTA).	109
Figura 72- Limite de resistência da junta soldada e do metal de base na linha neutra.	110
Figura 73- Comparação entre a dureza da junta soldada para o tubo reto, zona de transição e curva.	111
Figura 74- Limite de escoamento (LE) e limite de resistência (LR) com e sem tratamento térmico.	112
Figura 75- Variação dos limites de resistência e escoamento após curvamento e tratamento térmico.	112
Figura 76- Micrografias das regiões do extradorso e intradorso após tratamento térmico.	114
Figura 77- Resultado do ensaio de microdureza Vickers.	115

Lista de tabelas

Tabela 1- Classificação dos aços para dutos.	25
Tabela 2- Composição química.	60
Tabela 3- Processo e parâmetros de curvamento.	61
Tabela 4- Propriedades mecânicas.	62
Tabela 5- Descrição dos tubos e parâmetros de curvamento.	65
Tabela 6- Composição química.	65
Tabela 7- Propriedades mecânicas do teste de qualificação.	71
Tabela 8- Valores de carbono equivalente e espessura dos tubos estudados em 2.5.8.	74
Tabela 9- Composição química.	77
Tabela 10- Variáveis do processo de curvamento.	79
Tabela 11- Resultados do ensaio de tração.	98
Tabela 12- Composição química do metal de solda.	102
Tabela 13- Resultados do ensaio de tração.	113