



Rafael de Araujo Silva

**Influência dos parâmetros de curvamento
a quente por indução de alta frequência e
revenimento posterior sobre os
mecanismos de endurecimento de tubo
de aço API 5L X80**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais da PUC-Rio.

Orientadora: Profa. Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro
Dezembro de 2013



Rafael de Araujo Silva

**Influência dos parâmetros de curvamento
a quente por indução de alta frequência e
revenimento posterior sobre os
mecanismos de endurecimento de tubo
de aço API 5L X80**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos do Departamento de Engenharia de Materiais do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

Profa. Ivani de S. Bott

Orientadora e Presidente

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. Paulo Rangel Rios

Universidade Federal Fluminense – UFF

Dr. Marcos Henrique de P. Maurício

Departamento de Engenharia de Materiais – PUC-Rio

Prof. Luis Felipe G. de Souza

Centro Federal de Educação Tecnológica – CEFET/RJ

Prof. André Luis Pinto

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF

Dr. Oleksii Kuznetsov

Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – INMETRO/RJ

Prof. José Eugenio Leal

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

Rio de Janeiro, 19 de Dezembro de 2013

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 em 2005. 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 aços API X80, possuindo artigos na área de curvamento a quente e tratamentos térmicos destes aços. Obteve título de Mestre em Materiais e de Processos Químicos e Metalúrgicos pela PUC Rio em 2009.

Ficha Catalográfica

Silva, Rafael de Araujo

Influência dos parâmetros de curvamento a quente por indução de alta frequência e revenimento posterior sobre os mecanismos de endurecimento de tubo de aço API 5L X80 / Rafael de Araujo Silva ; orientadora: Ivani de Souza Bott. – 2013.

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

Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Aço API X80. 3. Curvamento a quente. 4. Revenimento e mecanismo de endurecimento. I. Bott, Ivani de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

À minha Família.

Agradecimentos

Meu reconhecimento e sinceros agradecimentos a todos aqueles que contribuíram para a realização desta Tese:

Pela colaboração com Microscopia Eletrônica de Transmissão: Dr. Eduardo Valencia Morales da Universidade Central de Las Villas (Cuba), Dr. André Luis Pinto e Cilene Labre do Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

Pela colaboração com Difração de Raios X: Dr. Oleksii Kuznetsov e equipe do Laboratório de Cristalografia e Difração de Raios X do INMETRO Rio, Dr. Roberto Avillez da PUC Rio, Dr. Bojan Marinkovic da PUC Rio, Ronaldo Pedro e Mayara Marzano do Laboratório de Cristalografia e Difração de Raios X da PUC Rio.

Pela colaboração com os parâmetros do TENUPO: Natasha Midori Suguihiro.

Pela colaboração com o Dilatômetro: Luciana Prates Prisco.

Ao Engenheiro de Pesquisa da PUC-Rio Marcos Henrique pelo auxílio com Microscopia Eletrônica de Varredura.

À empresa TORK Controle Tecnológico de Materiais Ltda. pela cortesia de ensaiar em tração a condição recozida do aço desta Tese.

À Professora Ivani de S. Bott da PUC-Rio meus sinceros agradecimentos.

Capex e CNPq pelos auxílios concedidos.

Resumo

Silva, Rafael de Araujo; Bott, Ivani de Souza. **Influência dos parâmetros de curvamento a quente por indução de alta frequência e revenimento posterior sobre os mecanismos de endurecimento de tubo de aço API 5L X80.** Rio de Janeiro, 2013. 274p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia dos Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

As correlações dos parâmetros de processamento com a microestrutura e propriedades mecânicas resultantes apresentam grande relevância para o controle da qualidade e manutenção do grau API do tubo curvado por indução. Este trabalho enfoca principalmente nas alterações dos mecanismos de endurecimento para avaliar os efeitos do curvamento a quente e do revenimento posterior. Foi observado que além do refino de grão, a precipitação fina dos microligantes na austenita e a densidade de discordâncias são responsáveis pelas propriedades mecânicas do material como recebido. O endurecimento por solução sólida caracterizado para todas as amostras foi aproximadamente igual. O endurecimento devido ao refino de grão dependeu do fator de endurecimento. Nas curvas as transformações de fases de baixas temperaturas foram induzidas pela elevação da temperabilidade em função de maiores temperaturas de curvamento, contudo a extensão das camadas temperadas ficou limitada pelas taxas de resfriamento. A principal alteração promovida pelo curvamento a quente e diretamente associada ao projeto de liga do aço é devido à inibição da precipitação do vanádio e sua manutenção em solução sólida. O endurecimento das curvas a quente devido à precipitação do molibdênio, transformação de fases e densidade de discordâncias não foi suficiente para atingir o limite de escoamento mínimo especificado pela API, para o grau X80, sem a aplicação de revenimento posterior a 600°C para obter precipitação fina de vanádio.

Palavras – chave

Aço API X80; curvamento a quente; revenimento; mecanismos de endurecimento.

Abstract

Silva, Rafael de Araujo; Bott, Ivani de Souza (Advisor). **Effect of the high frequency hot induction bending parameters and post tempering heat treatment on the strengthening mechanism of an API 5L X80 pipe steel.** Rio de Janeiro, 2013. 274p. Doctoral Thesis – Departamento de Engenharia dos Materiais, Pontificia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The correlation between high frequency hot induction bending parameters with microstructure and mechanical properties is very important in order to keep the bent pipe within the API grade, in according with the API Specification 5L after the induction bending. The measured values of yield strength are a function of hardening mechanisms in both the tangent end and the bent section. The changes imposed by the thermal cycles of hot bending and tempering can modify the contribution of the strengthening mechanisms. This work aims to evaluate the changes of mechanical properties in the tangent end and the bent section from the point of view of the strengthening mechanisms such as phase transformation, dislocation density and precipitation. The results of the microstructural evaluations of the tangent section have shown that the hardening by grain refinement, precipitation in the austenite and the high dislocation density were responsible for high yield strength. The restrict range of cooling rate originated from the hot bending temperature was the most significant parameter on the microstructure, precipitation, dislocation density and hardening of the layers of the bent section. However, in the bend sections the restriction of precipitation of Vanadium significantly decreased the yield strength level. After hot bending the contributions of the strengthening mechanisms such as precipitation, phase transformation and dislocation hardening did not produce the desired minimum value of 552 MPa for the yield strength. Only after the tempering heat treatment at 600°C it was possible to obtain an increase in the yield strength.

Keywords

API X80 steel; hot bending; tempering; hardening mechanisms.

Sumário

1. Introdução	36
2. Revisão bibliográfica	43
2.1. Curvamento a quente por indução	43
2.2. Efeitos da composição química	46
2.3. Efeitos da potência de indução e densidade de potência	49
2.4. Efeitos da frequência de indução	50
2.5. Efeitos das taxas de aquecimento	51
2.6. Efeitos da temperatura de austenitização	53
2.7. Efeitos da velocidade de curvamento	60
2.8. Efeitos da deformação	62
2.9. Efeitos da taxas de resfriamento	65
2.10. Efeitos do revenimento posterior	69
2.11. Alterações dimensionais	73
2.12. Microestruturas e propriedades mecânicas resultantes do curvamento por indução	75
2.13. Mecanismos de endurecimento dos aços	79
2.13.1. Endurecimento por solução sólida	80
2.13.2. Endurecimento por tamanho de grão	81
2.13.3. Endurecimento por precipitação	82
2.13.4. Endurecimento por discordâncias	85
2.13.5. Endurecimento por transformação de fases	92
2.13.5.1. Relação entre a microestrutura ferrítica – perlítica e propriedades mecânicas	92
2.13.5.2. Relação entre as microestruturas bainíticas e propriedades mecânicas	93

2.13.5.3. Relação de microestrutura e propriedades mecânicas para a martensita revenida	96
2.13.5.4. Relação de microestrutura e propriedades mecânicas para aços contendo constituintes AM e fases duras na matriz ferrítica	96
2.13.6. Efeitos do revenimento sobre o endurecimento por precipitação	97
2.14. Metodologias aplicadas na caracterização dos mecanismos de endurecimento por precipitação e por densidade de discordâncias	98
2.14.1. Caracterização da precipitação por microscopia eletrônica de transmissão	98
2.14.2. Caracterização da densidade de discordâncias por microscopia eletrônica de transmissão	99
2.14.3. Caracterização da densidade de discordâncias por DRX	102
2.14.4. Cálculos das contribuições dos mecanismos de endurecimento para o limite de escoamento	109
3. Materiais e Métodos	111
3.1. Composição química	112
3.2. Temperaturas de transformação de fase	112
3.3. Processamento	113
3.4. Formação das microfases e dos constituintes	116
3.5. Ensaio de temperabilidade (Jominy)	117
3.6. Efeitos da taxa de resfriamento	120
3.7. Metodologia de avaliação dos efeitos do curvamento a quente por indução e do revenimento posterior	120
3.7.1. Propriedades mecânicas	122
3.7.2. Microdureza	123
3.7.3. Caracterização microestrutural	124

3.7.4. Dissolução ácida da matriz metálica	126
3.8. Caracterização dos mecanismos de endurecimento	127
3.8.1. Solução sólida	127
3.8.2. Tamanho de grão	129
3.8.3. Caracterização da precipitação	130
3.8.3.1. Determinando a fração volumétrica de nano precipitados	130
3.8.3.2. Determinando a distribuição de tamanhos dos precipitados	131
3.8.4. Caracterização da densidade de discordâncias	132
3.8.4.1. Difração de Raios X	132
3.8.4.2. Microscopia eletrônica de transmissão	134
3.8.5. Cálculos das contribuições dos mecanismos de endurecimento para o limite de escoamento	135
4. Resultados e Análise dos Resultados	136
4.1. Caracterização microestrutural do material como recebido e como curvado	136
4.2. Efeitos do revenimento sobre a microestrutura nas condições de como recebido e como curvado	146
4.3. Correlações entre características microestruturais	148
4.4. Propriedades mecânicas nas condições de como recebido, curvado e revenido	149
4.5. Estudo das distribuições das microdurezas	150
4.6. Correlações entre propriedades mecânicas	158
4.7. Correlações entre o expoente de encruamento e parâmetros de processamento, características microestruturais e propriedades mecânicas	162
4.8. Evolução microestrutural correlacionada com propriedades mecânicas	165

4.9. Formação das microfases e dos constituintes	170
4.10. Ensaio de temperabilidade (Jominy)	178
4.11. Efeitos das taxas de resfriamento	184
4.12. Correlações da evolução microestrutural com os parâmetros de processamento	188
4.12.1. Temperaturas de curvamento a quente	189
4.12.2. Considerações a respeito da solubilidade dos carbonitreto durante o curvamento a quente	193
4.12.3. Considerações a respeito dos efeitos da deformação a quente e a fração volumétrica de ferrita primária	196
4.12.4. Efeitos das taxas de resfriamento	197
4.13. Mecanismos de endurecimento	201
4.13.1. Mecanismos de endurecimento por transformação de fases	201
4.13.1.1. Endurecimento devido às ferritas bainítica e acicular	201
4.13.1.2. Endurecimento devido ao constituinte AM	204
4.13.2. Mecanismos de endurecimento por refino de grão	206
4.13.3. Mecanismos de endurecimento por solução sólida	209
4.13.4. Mecanismos de endurecimento por precipitação	214
4.13.4.1. Identificação das fases precipitadas por EDS e DRX dos resíduos sólidos da dissolução ácida	214
4.13.4.2. Distribuição de tamanho das fases precipitadas via microscopia eletrônica de transmissão	224
4.13.4.3. Cálculos das contribuições para o endurecimento devido à precipitação de carbonetos contendo Mo, Nb e V	230
4.13.5. Caracterização da densidade de discordâncias	232
4.13.6. Contribuições dos mecanismos de endurecimento para o limite de escoamento	239

4.13.7. Correlações entre mecanismos de endurecimento, propriedades mecânicas, microestrutura e parâmetros de processamento	241
4.14. Considerações finais	253
4.14.1. Quanto a temperabilidade do aço API X80 em estudo	253
4.14.2. Parâmetros de processamento e tratamento térmico	254
4.14.2.1. Temperaturas de curvamento	254
4.14.2.2. Taxas de resfriamento	254
4.14.2.3. Deformação	255
4.14.2.4. Revenimento posterior	255
4.14.3. Mecanismos de endurecimento	255
4.14.3.1. Endurecimento por solução sólida	255
4.14.3.2. Endurecimento por refino de grão	256
4.14.3.3. Endurecimento por transformação de fases	256
4.14.3.4. Endurecimento por precipitação	257
4.14.3.5. Endurecimento por densidade de discordâncias	258
4.14.3.6. Sinergia dos mecanismos de endurecimento	258
5. Conclusões	259
6. Referências Bibliográficas	260

Lista de figuras

Figura 1 – Curvas X80 (L555M) por indução e conexão de campo [3]	37
Figura 2 – (a) Esquema da operação de curvamento a quente [4], (b) Esquema da bobina de indução, onde I_b e I_t são, respectivamente, a corrente que passa pela bobina de indução e a corrente induzida no tubo [23] e (c) geometria da curva [11], onde D e D_i são os diâmetros externo e interno do tubo, respectivamente	44
Figura 3 – Efeitos do Nióbio no controle do tamanho de grão austenítico por Kondo et al [4], após ciclo térmico com taxa de aquecimento de 3°C/s , encharque de 3 min e têmpera	47
Figura 4 – Diagramas de transformação em resfriamento contínuo [24], austenitização a 990°C durante 3 minutos (a) $CE_{I\text{IW}} = 0,41\%$ (b) $CE_{I\text{IW}} = 0,459\%$. Onde LBF = ripas de ferrita bainítica, AF = ferrita acicular, P = perlita e PF = ferrita poligonal	48
Figura 5 – (a) Efeitos da taxa de aquecimento sobre Ac_1 e Ac_3 e (b) no tamanho de grão austenítico por Hashimoto et al. [7], onde HF = High frequency (alta frequência)	52
Figura 6 – (a) Distribuição de isotermas abaixo da bobina de indução por Hu et al [38] e (b) efeitos da temperatura sobre as curvas de escoamento de um aço doce [38] em comparação com um aço microligado com Nb e Ti [39]	54
Figura 7 - Simulação do curvamento a quente por Wang, Xu [24] mostrando a evolução microestrutural para aço API X80 com $CE_{I\text{IW}} = 0,41\%$ em função da variação da temperatura de aquecimento durante 105 s, mantendo a taxa de resfriamento fixa em 15°C/s	55
Figura 8 – Propriedades mecânicas em tração em função da temperatura de aquecimento (a, b) Resultados obtidos por Wang, Xu [24] e (c) do tubo reto tratado por Meireles [23] na velocidade de $0,9\text{ mm/s}$ e nas temperaturas de $900, 980$ e 1080°C	56
Figura 9 – (a) Efeitos da velocidade de curvamento por Kondo et al. [4] e (b) Propriedades mecânicas em tração do tubo reto submetido às velocidades de $0,3, 0,9$ e $1,3\text{ mm/s}$ na temperatura de 980°C (sem deformação) [23]	61

- Figura 10 – (a) Distribuição da deformação plástica em curva 5D, segundo Muthmann e Grimpe [46], para tubo de aço com 48” de diâmetro e 24 mm de espessura e (b) Propriedades mecânicas em tração de tubo curvado a quente a 980°C e 0,9 mm/s em comparação com tubo submetido a simulação do ciclo térmico de curvamento com os mesmos parâmetros, porém sem deformação ($\varepsilon = 0$) [23]. Onde ε_r é deformação no sentido da espessura nos trechos curvados (extradorso, intradorso e linha neutra) 63
- Figura 11 – Curva CCT de aço com 0,066%C – 0,037%Nb – 0,062%V – 0,017%Ti (a) sem deformação prévia e (b) com 0,6 de deformação da austenita a 860°C: PF – ferrita poligonal, P – perlita, AF – ferrita acicular, B – bainita [47] 64
- Figura 12 – (a) Efeitos da espessura na taxa de resfriamento segundo Kondo, J. et al. [4], (b) Efeitos das taxas de resfriamento no limite de resistência por Ishikawa et al. [5] 66
- Figura 13 – (a) A evolução microestrutural para o aço com $CE_{IIV} = 0,41\%$ em função das taxas de resfriamento, (b) Propriedades mecânicas em tração em função das taxas de resfriamento [24]. LE = limite de escoamento e LR = limite de resistência 68
- Figura 14 – (a) Efeitos do revenimento a 600°C após variação dos parâmetros de austenitização e taxas de resfriamento [7], (b) na variação da energia absorvida Charpy em função da taxa de resfriamento anterior ao revenimento [7] 71
- Figura 15 – (a) Efeitos do revenimento a 600°C e do carbono equivalente sobre (a) resistência mecânica em tração [7] e (b) Variação da dureza e pico de endurecimento em função do parâmetro de revenido [28] 72
- Figura 16 – Alterações na espessura devido ao curvamento a quente. (a) Mapeamento da espessura ao longo da região curvada [23], (b) esquema da variação na espessura por trecho de curva (c) transição da deformação na curva [3] (d) Mudanças do comprimento circunferencial [7] 74

- Figura 17 – (a,b,c) Ferrita bainítica e a martensita de baixo carbono, por microscopias eletrônica de varredura (a) e de transmissão (b,c), em amostras de aços ARBL com boro austenitizadas a 1150°C (durante 10 minutos), não deformadas e resfriadas a 100°C/s segundo H. J. Jun et al. [54]; (d,e) Ferrita acicular em microscopias eletrônica de varredura (d) e de transmissão (e), segundo H. J. Jun et al. [54], em aço ARBL submetido a 20% de deformação e resfriado a 10°C/s. As setas indicam a presença de constituinte AM. (f) Constituinte AM em API X80 (Nb-Cr-Mo-V) após laminação caracterizado por Vieira [55] e (g) Colônias de agregados eutectóides presente em aço API X80 (0,067%C) de matriz ferrítica poligonal por González et al. [56] 75
- Figura 18 – Evolução microestrutural no trecho reto e na curva (extradorso, intradorso e linha neutra), onde as barras de escala são de 10 µm [2]. E = externo, C = centro e I = interno 77
- Figura 19 – Curvas de transição dúctil-frágil comparando trecho reto e curvado [2] 78
- Figura 20 – (a) Precipitado coerente (deformáveis), (b) Precipitação incoerente (indeformáveis) [62, 64] 83
- Figura 21 – Desenvolvimento da estrutura de densidade de discordâncias em aço ferrítico durante diferentes quantidades de deformação a quente na faixa de 1100°C a 900°C, (a) 10%, discordâncias aleatórias, (b) 30%, estrutura irregular de discordâncias, (c) 55%, clusters e (d) 96%, estrutura de células de discordâncias [70] 87
- Figura 22 – Deformação crítica para a completa recristalização de austenita, comparando um aço ao carbono com um aço microligado ao nióbio, quando deformados na faixa de temperatura de deformação entre 950 a 1100°C [72] 88
- Figura 23 – Estrutura de discordâncias para o aço C-Nb-V na condição como laminado (a) região com alta e (b) baixa densidade de discordância, (c,d) na condição como recozido a 550°C por 30 min (e) looping de discordâncias ao redor de um precipitado de microligante, na condição laminado e (f) Interação entre discordância e precipitado exibindo o corte de uma partícula rica em Nb, Ti e V por uma discordância [62] 89
- Figura 24 – Densidade de discordâncias da martensita, bainita, ferrita acicular e da ferrita de Widmanstätten em função da temperatura de transformação [28] 91

Figura 25 – Efeitos da temperatura de transformação (a) na tendência qualitativa da microestrutura bainítica, (b) na espessura das subunidades de ferrita bainítica para vários aços e (c) no limite de resistência [28]	95
Figura 26 – Sistema de iluminação para diferentes técnicas [83]	98
Figura 27 – Equivalência entre uma linha de teste na imagem projetada e um plano de teste na lâmina fina [85]	100
Figura 28 – Operação de curvamento a quente. Teste para a frequência de 500 Hz. (a) Austenitização completa da espessura e resfriamento ao ar calmo da espessura interna (b) resfriamento da espessura externa de parede do tubo com jatos de água [17]	114
Figura 29 – Esquema para simulação dos constituintes do aço API X80 sob diferentes condições de processamento [17]	116
Figura 30 – Ensaio de extremidade Jominy (a) Geometria dos corpos de prova e esquema de ensaios [136] (b) Dispositivo Jominy para determinação da temperabilidade dos aços [25]	118
Figura 31 – Regiões do tubo curvado	121
Figura 32 – Material como recebido (A1), Microscopia Óptica. (a) e (b) longitudinal ao sentido de laminação com ataque nital 2% (c) e (d) transversal ao sentido de laminação com ataque LePera modificado. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 8 – inclusões TiN, 9 – ferrita bainítica, 10 – Ferrita acicular	137
Figura 33 – Material como recebido (A1), longitudinal ao sentido de laminação. Microscopia Óptica. Ataque: Nital 2%. Onde: 6 – bainita granular e 9 – ferrita bainítica	138
Figura 34 – Material como recebido (A1) no sentido transversal ao de laminação. Microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários). Ataque nital 2%. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular e 7 – AM parcialmente decomposto	138
Figura 35 – Material como recebido (A1) no sentido transversal ao de laminação [67], Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro. Onde: (a) 3 – constituinte AM e (b) 11 – martensita maclada do constituinte AM	139

Figura 36 – Microestrutura do extradorso. Microscopia Óptica, (a, b) ataque nital 2% e (c, d) ataque LePera Modificado. (a, c) Curva C2500, (b,d) Curva C500. Onde: 3 – constituinte AM, 9 – ferrita bainítica e 10 – Ferrita acicular	140
Figura 37 – Microestrutura do intradorso. Microscopia Óptica, (a, b) ataque nital 2% e (c, d) ataque LePera Modificado. (a, c) Curva C2500, (b,d) Curva C500. Onde: 3 – constituinte AM, 9 – ferrita bainítica e 10 – Ferrita acicular	140
Figura 38 – Microscopia eletrônica de varredura (elétrons secundários). Ataque: Nital 2%. (a, c) Curva C2500, (b,d) Curva C500. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 6 – bainita granular, 9 – ferrita bainítica e 10 – Ferrita acicular	141
Figura 39 – Microscopia eletrônica de transmissão, campo claro. (a, b) Curva C2500, (c,d) Curva C500. Onde: 1 – ferrita poligonal, 9 – Ferrita bainítica e 10 – ferrita acicular	142
Figura 40 – Gráfico da evolução microestrutural ao longo da espessura de parede na curva C2500 [17, 20]	143
Figura 41 – Gráfico da evolução microestrutural ao longo da espessura de parede na curva C500 [17, 20]	143
Figura 42 – Efeitos do curvamento a quente sobre a evolução microestrutural do material como recebido (A1) [17, 20]	144
Figura 43 – Efeitos do curvamento a quente sobre a distribuição de tamanhos de grão (10 mm da espessura externa de parede)	145
Figura 44 – Efeitos do curvamento a quente sobre o tamanho de grão final ao longo da espessura	145
Figura 45 – Material como recebido revenido a 600°C (1h), amostra A2, (a) e (b) decomposição do constituinte AM, (c) e (d) formação de novos grãos isentos de deformação	146
Figura 46 – Região do intradorso (C2500) revenida a 600°C (1h). (a), (b) e (c) precipitação nos contornos de grãos, (d), (e) e (f) decomposição do constituinte AM	147
Figura 47 – Fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular em função do tamanho de grão da austenita prévia, curvas C2500 e C500	148
Figura 48 – Tamanho de grão final experimental em função do tamanho de grão da austenita prévia, curvas C2500 e C500	148

Figura 49 – Estudo da distribuição das microdurezas HV10g dos grãos de ferrita (poligonal e quasi poligonal) ao longo da espessura de parede no material na condição de como recebido, A1. (a) distribuição geral de microdurezas, (b) frequência das diferenças entre duas medidas de microdureza em um mesmo grão e (c) estratificação das distribuições das microdurezas ao longo da espessura de parede	151
Figura 50 – Estudo da distribuição das microdurezas HV10g dos microconstituintes do material como recebido (A1). Os grãos ferríticos são referentes à posição de 10 mm da espessura de parede	153
Figura 51 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando o material como recebido (A1) com o seu estado normalizado (A1’)	154
Figura 52 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando o material como recebido (A1) e o seu estado normalizado (A1’) com os trechos da curva C2500	154
Figura 53 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando o material como recebido (A1) e o seu estado normalizado (A1’) com os trechos da curva C500	155
Figura 54 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando os trechos das curvas C2500 e C500	155
Figura 55 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando o material como recebido (A1) com o seu estado após os revenimentos a 600 e a 650°C	156
Figura 56 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando a curva C2500 (extradorso) com seu estado após os revenimentos a 500°C, 600°C e 650°C	156
Figura 57 – Distribuição das microdurezas em função do tamanho de grão ferrítico comparando a curva C500 (extradorso) com seu estado após revenimento a 600°C	157
Figura 58 – Correlação entre limite de resistência e escoamento para o aço API X80 em estudo	158
Figura 59 – Correlação entre limite de escoamento e microdureza HV0,5kg para o aço API X80 em estudo	158
Figura 60 – Correlação entre limite de resistência e microdureza HV0,5kg para o aço API X80 em estudo	159

Figura 61 – Correlação entre alongamento e limite de resistência para o aço API X80 em estudo	160
Figura 62 – Correlação entre alongamento e microdureza HV0,5kg para o aço API X80 em estudo	160
Figura 63 – Correlação entre energia absorvida Charpy e limite de resistência para o aço API X80 em estudo	161
Figura 64 – Correlação entre energia absorvida Charpy e microdureza HV0,5kg para o aço API X80 em estudo	161
Figura 65 – Correlação entre expoente de encruamento e a temperatura de austenitização. Aço API X80 em estudo em estado temperado e revenido a 500°C (1h)	162
Figura 66 – Correlação entre expoente de encruamento e a temperatura de revenimento. Linha neutra da C2500 revenida	162
Figura 67 – Correlação entre expoente de encruamento e o tamanho de grão (TG) da austenita prévia, após austenitização a 900, 950 e 1000°C, têmpera e revenido a 500°C (1h)	163
Figura 68 – Correlação entre expoente de encruamento e microdureza HV10g média de 100 grãos ferríticos a 10 mm da espessura externa de parede do tubo. Amostras A1, A1", A3 e A4	163
Figura 69 – Correlação entre expoente de encruamento e limite de escoamento. Amostras A1, A1", A3 e A4	164
Figura 70 – Correlação entre expoente de encruamento e a razão do limite de escoamento com a microdureza HV0,5kg. Amostras do aço API X80 austenitizadas a 1000°C, resfriadas em ar calmo, ar forçado, óleo e água e revenidas a 500°C (1h)	164
Figura 71 – Correlação entre limite de escoamento e fração volumétrica de ferrita (poligonal, quasi poligonal)	166
Figura 72 – Correlação entre limite de resistência e fração volumétrica de ferrita (poligonal e quasi poligonal)	166
Figura 73 – Correlação entre a razão LE/LR e fração volumétrica de ferrita (poligonal e quasi poligonal)	167
Figura 74 – Correlação entre alongamento e fração volumétrica de ferrita (poligonal e quasi poligonal)	167
Figura 75 – Correlação entre alongamento e fração volumétrica de ferritas alongada com segunda fase alinhada, tipo ferrita bainítica, e ferrita acicular	168

- Figura 76 – Correlação entre alongamento e tamanho de grão final 168
- Figura 77 – Correlação entre energia absorvida Charpy e tamanho de grão final. Aço API X80 em estudo no estado temperado (900, 950 e 1000°C) e revenido a 500°C (1h) 169
- Figura 78 – Microfases e constituintes do material na condição de como recebido, A1, (a, c, d) Nital 2% e (b) LePera modificado. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 7 – AM parcialmente decomposto, 8 – inclusões TiN, 9 – ferrita bainítica, 10 – Ferrita acicular e 11 – martensita 170
- Figura 79 – Microfases em região de constituinte AM parcialmente decomposto em agregados de ferrita e carbonetos. Material na condição de como recebido [17]. Microscopia Eletrônica de Varredura e valores de microdureza HV10g. Ataque: Nital 2%. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 7 – AM parcialmente decomposto, 8 – inclusões TiN, 9 – ferrita bainítica, 10 – Ferrita acicular e 11 – martensita 171
- Figura 80 – Microfases em região de constituinte AM parcialmente decomposto em agregados de ferrita e carbonetos. Material na condição de como curvado a quente. Microscopia Eletrônica de Varredura. Ataque: Nital 2%. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 7 – AM parcialmente decomposto, 8 – inclusões TiN, 9 – ferrita bainítica, 10 – Ferrita acicular e 11 – martensita 172
- Figura 81 – Influências das temperaturas e tempos de recozimento sobre a microestrutura do aço API X80 deste estudo. (a, c) Nital 2%, (b, d, e, f, g, h) LePera Modificado. Onde: 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 7 – AM parcialmente decomposto e 11 – martensita 173
- Figura 82 – Evolução microestrutural e microdureza HV50g em acordo com o tempo e a taxa de resfriamento após recozimento a 700°C, observado em MEV. Ataque: Nital 2%. Onde: 1 – Ferrita poligonal, 2 – ferrita quasi poligonal, 3 – constituinte AM, 4 – constituinte β , 5 – agregados de ferrita e carbonetos, 6 – bainita granular, 10 – Ferrita acicular e 11 – martensita 174
- Figura 83 – Distribuição de microdureza após tratamento térmico (a) dos grãos de ferrita e do constituinte β , (b) Perfil de microdureza passando pela interface α/β da amostra recozida a 700°C durante 15 min e com resfriamento final em água 175

Figura 84 – Efeitos (a) da temperatura e (b) do tempo de espera sobre a concentração de carbono na austenita remanescente e sobre Ar_3 e Ms	176
Figura 85 – Efeito da temperatura de austenitização (2 minutos) seguida de resfriamento em água (25°C, 126 mL/s) sobre a microestrutura do aço API X80 em estudo à (a) 1 mm (b) 19 mm e (c) 50 mm de distância para a extremidade temperada	178
Figura 86 – Curvas de temperabilidade Jominy, avaliando os efeitos das temperaturas de austenitização após (a) período de austenitização de 2 min e resfriamento em água a 25°C, (b) período de austenitização de 2 min e resfriamento em água a 10°C e (c) período de austenitização de 30 min e resfriamento em água a 25°C	180
Figura 87 – Efeitos da temperatura de austenitização na camada temperada após (a) período de austenitização de 2 min e resfriamento em água a 25° e a 10°C e (b) períodos de austenitização de 2 min e 30 min seguidos de resfriamento em água a 25°C	181
Figura 88 – Curvas de temperabilidade Jominy, avaliando os efeitos da vazão de meio resfriador após resfriamento em água a 25°C	181
Figura 89 – Efeitos da temperatura e da vazão da água sobre a extensão da camada temperada	182
Figura 90 – Efeitos da temperatura de austenitização no refino de grão final a 10 e 19 mm de distância da extremidade temperada	183
Figura 91 – Efeitos da temperatura do meio de resfriamento no refino de grão final a 10 e 19 mm de distância da extremidade temperada	183
Figura 92 – Variação da taxa de resfriamento em função da massa de aço, após austenitização a 1050°C e resfriamento em água a 10°C	184
Figura 93 – Efeitos das taxas de resfriamento sobre a microestrutura e microdureza (temperatura de austenitização de 1050°C)	185
Figura 94 – Evolução do constituinte AM com a taxa de resfriamento, ataque LePera modificado (AM em branco)	185
Figura 95 – Evolução microestrutural em função da taxa de resfriamento	186

Figura 96 – Influência das taxas de resfriamento sobre o refinamento de grão	186
Figura 97 – Microdureza em função das taxas de resfriamento	187
Figura 98 – Estimativas para a temperatura de austenitização ao longo da espessura de parede comparando o extradorso (A3) da curva C2500 com o extradorso (A5) da curva C500	190
Figura 99 – Tamanho de grão austenítico prévio medido, das curvas C2500 e C500, a 1 mm da espessura externa da parede	190
Figura 100 – Influência da variação da temperatura de curvamento, nas superfícies externas e internas da espessura de parede, na fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular do aço API X80 em estudo	192
Figura 101 – Influência da variação da temperatura de curvamento, nas superfícies externas e internas da espessura de parede, na resistência do aço API X80 em estudo	192
Figura 102 – Solubilidade dos precipitados em função das condições de curvamento a quente	194
Figura 103 – Precipitados grosseiros caracterizados na curva C2500. Microscopia óptica, partículas com cor laranja (setas)	195
Figura 104 – Precipitados grosseiros caracterizados na curva C2500 (setas). Microscopia eletrônica de varredura: (a) Precipitado de Nb e Ti, (b) Precipitado rico em Ti, contendo Nb e (c) Precipitado de Nb puro [17]	195
Figura 105 – Precipitado cubóide da curva C2500 com 0,92 μm de lado, possivelmente um carbonitreto de Nb e Ti. Microscopia eletrônica de transmissão mostrando os defeitos internos do precipitado através do contraste de difração: (a) campo claro e (b) campo escuro e padrão de difração [17]	196
Figura 106 – Fração volumétrica de ferrita (poligonal e quasi poligonal) em função das taxas de resfriamento	198
Figura 107 – Fração volumétrica de ferrita bainítica em feixes em função das taxas de resfriamento	199
Figura 108 – Limite de escoamento em função da fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular	201
Figura 109 – Limite de resistência em função da fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular	202

Figura 110 – Razão LE/LR em função da fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular	202
Figura 111 – Parâmetro $C = LE/HV_{0,5kg}$ em função da fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular	203
Figura 112 – Evolução do refino de grão, a 10 mm da espessura de parede do tubo, em função das condições de processamento. MEV, elétrons secundários. Ataque: Nital 2%	207
Figura 113 – Correlação do limite de escoamento com o tamanho de grão final para amostras das curvas C2500 e C500	207
Figura 114 – Dependência do limite de escoamento com o tamanho de grão final para o aço em estudo tratado termicamente a 1000°C seguido de resfriamento em água (AG), óleo (OL), ar forçado (AF) e ar calmo (AC) e revenido a 500°C (1h)	208
Figura 115 – Tenacidade ao entalhe, a 0°C, em função do tamanho de grão final. Amostras A1, A5, A6 e A7	209
Figura 116 – Efeitos (a) do vanádio e (b) do molibdênio sobre o limite de escoamento do aço API X80 em estudo	212
Figura 117 – Solução sólida de vanádio e molibdênio em função da temperatura de revenimento	213
Figura 118 – Efeitos do endurecimento por solução sólida sobre a ductilidade	213
Figura 119 – Espectros de EDS (MEV) nos resíduos da dissolução ácida. (a) Material como recebido, (b) e (c) curvado a quente e (d) curvado a quente e revenido	215
Figura 120 – Mapeamento de vanádio via EDS (MEV) nos resíduos da dissolução ácida. (a) Material como recebido, (b) curvado a quente e (c) curvado a quente e revenido	216
Figura 121 - Efeito das operações de curvamento a quente sobre a composição química dos resíduos sólidos da dissolução ácida (a) $Mo[\%]/i[\%]$ e (b) $V[\%]/i[\%]$. CQ nominal = composição química nominal	217
Figura 122 - Efeito do revenimento da curva sobre a composição química dos resíduos sólidos da dissolução ácida (a) $Mo[\%]/i[\%]$ e (b) $V[\%]/i[\%]$. CQ nominal = composição química nominal	219

Figura 123 – Difractogramas calculados para os carbonetos NbC e TiVC ₂ (a) A1 (b) A3 (c) A5. TMC = tamanho médio dos cristalitos	222
Figura 124 – Precipitados com estrutura complexa, ricos Ti e Nb, não dissolvidos pelos ciclos térmicos de curvamento a quente (a, b) matriz metálica da curva a quente e (c, d) resíduo da dissolução ácida da curva a quente	224
Figura 125 – Precipitação fina na austenita, material como recebido A1 [67]: (a) campo claro, (b) campo escuro, (c) padrão de difração indicando a posição da abertura objetiva, correspondendo a reflexão do carbonitreto $g\frac{1}{4}[200]$ e (d) diagramas mostrando a relação de Baker-Nutting $(311)_{\alpha} // (263)_{CN}$, $(311)_{\alpha} // (201)_{CN}$. Os círculos brancos pequenos são as reflexões dos carbonitretos e os círculos pretos correspondem aos spots da fase ferrita para aquela orientação	225
Figura 126 – Distribuição de tamanhos dos carbonitretos do material como recebido A1 [67]	225
Figura 127 – Precipitação fina na austenita, material curvado: (a), (b) e (c) C2500 (A3), (d), (e) e (f) C500 (A5). Imagens de campo claro e campo escura para obtenção da distribuição de tamanhos dos precipitados nas amostras A3 e A5	226
Figura 128 – Amostra A3. Distribuição de tamanhos dos carbonitretos da condição curvada a quente C2500 (a) distribuição geral, (b) faixa de interesse	227
Figura 129 – Amostra A5. Distribuição de tamanhos dos carbonitretos da condição curvada a quente C500 (a) distribuição geral, (b) faixa de interesse	228
Figura 130 – Amostra A2. Distribuição de tamanhos dos carbonitretos da condição revenida (a) distribuição geral, (b) faixa de interesse	229
Figura 131 – Material como recebido, densidade de discordâncias	233
Figura 132 – Gráfico de Williamson–Hall (W-H). Efeitos do curvamento a quente	234
Figura 133 – Gráfico de Williamson–Hall modificado (W-Hm). Efeitos do curvamento a quente	235
Figura 134 – Gráfico de Williamson–Hall (W-H). Efeitos do revenimento da curva C2500	235
Figura 135 – Gráfico de Williamson–Hall modificado (W-Hm). Efeitos do revenimento da curva C2500	236

Figura 136 – Quadrado da deformação média em função das condições de processamento do aço API X80 em estudo	236
Figura 137 – Caráter das discordâncias em função das condições de processamento do aço API X80 em estudo, aplicando $A_i = 2,46$ e $c_{12}/c_{44} = 2,51$ para obter os valores de referência para q quanto ao caráter das discordâncias tipo hélice pura e cunha pura	237
Figura 138 – Efeitos da temperatura de curvamento (T_γ) sobre o tamanho de grão da austenita prévia (d_γ) e o refinamento microestrutural final (d_{final})	242
Figura 139 – Efeitos da fração volumétrica de $VC_{0,75}$ no fator de endurecimento aplicado para calcular as contribuições devido ao tamanho de grão	243
Figura 140 – Efeitos da fração volumétrica de ferritas bainítica e acicular no fator de endurecimento aplicado para calcular as contribuições devido ao tamanho de grão	243
Figura 141 – Efeitos da densidade inicial de discordâncias no fator de endurecimento aplicado para calcular as contribuições devido ao tamanho de grão	244
Figura 142 – Influência das diferenças de temperaturas de curvamento entre as superfícies externa e interna da espessura de parede (ΔT_γ) no endurecimento médio de 100 grãos ferríticos avaliados a 10 mm da espessura externa (resfriada em água)	244
Figura 143 – Influência do endurecimento por precipitação na microdureza média de 100 grãos ferríticos avaliados a 10 mm da espessura externa de parede (resfriada em água)	245
Figura 144 – Influência do endurecimento por precipitação de $VC_{0,75}$ na microdureza média de 100 grãos ferríticos avaliados a 10 mm da espessura externa de parede (resfriada em água)	245
Figura 145 – Influência do endurecimento por discordâncias na microdureza média de 100 grãos ferríticos avaliados a 10 mm da espessura externa de parede (resfriada em água)	246
Figura 146 – Influência do endurecimento por precipitação de $VC_{0,75}$ no expoente de encruamento	246
Figura 147 – Efeitos da temperatura de curvamento sobre o tamanho dos nano precipitados de MoC e seu efeito endurecedor (fração volumétrica média aproximadamente igual $0,162 \pm 0,002\%$)	247

Figura 148 – (a) Efeitos da temperatura de curvamento sobre o endurecimento por transformação de fases, (b) efeitos dos endurecimentos por transformação de fases e sua sinergia com o endurecimento por densidade de discordâncias (c) consequências sobre o limite de escoamento	249
Figura 149 – Influências das diferenças de temperaturas de curvamento entre as superfícies externa e interna da espessura de parede (ΔT_γ) e do livre caminho médio de ferrita sobre o endurecimento por densidade de discordâncias	249
Figura 150 – Influências da temperatura de revenimento sobre a fração volumétrica de $VC_{0,75}$ e no respectivo endurecimento por precipitação	250
Figura 151 – Influências das temperaturas de revenimento sobre a densidade inicial de discordâncias e o respectivo endurecimento por encruamento	251
Figura 152 – Influências da temperatura de revenimento sobre o coeficiente de endurecimento devido ao refino de grão e sua sinergia com os endurecimentos por precipitação e por densidade de discordâncias	251
Figura 153 – Influências da solução sólida de vanádio e da fração volumétrica de $VC_{0,75}$ sobre o limite de escoamento	252
Figura 154 – Contribuições dos mecanismos de endurecimento para o limite de escoamento do aço API X80 em estudo submetido a diferentes condições de processamento	253

Lista de tabelas

Tabela 1 – Efeito da frequência na profundidade aquecida pela resistência do aço a passagem das correntes induzidas [35]	51
Tabela 2 – Constantes dos produtos de solubilidade [42]	58
Tabela 3 - Efeitos do revenimento em aço API X80 temperado [53]	70
Tabela 4 – Coeficientes de endurecimento dos solutos na ferrita por solução sólida [61]	80
Tabela 5 – Fatores de multiplicação para determinar a contribuição para a resistência devido à precipitação [66]	85
Tabela 6 – Constantes elásticas de segunda ordem (c_{11} , c_{12} e c_{44}) para aços	106
Tabela 7 – Valores de referência para \bar{C}_{h00} e q caracterizados por Dutta [98] e calculados	107
Tabela 08 – Composição química nominal do aço API X80 em estudo	112
Tabela 09 – Temperaturas de transformação de fase estimadas empiricamente	112
Tabela 10 – Identificação e parâmetros aplicados nas operações de curvamento a quente [17]	114
Tabela 11 – Parâmetros dos tratamentos térmicos aplicados após curvamento a quente por indução [17]	115
Tabela 12 – Condições de ensaio avaliadas	119
Tabela 13 – Amostras utilizadas para caracterização microestrutural, propriedades mecânicas e determinação das contribuições dos mecanismos de endurecimento	122
Tabela 14 – Ataques, formulação e indicações de uso	125
Tabela 15 – Parâmetros aplicados para DRX dos resíduos da dissolução ácida	127
Tabela 16 – Relatório de Calibração da ICP-MS	128
Tabela 17 – Relatório de Calibração da ICP-OES	129
Tabela 18 – Fator de contraste das discordâncias (ANIZC)	134

Tabela 19 – Propriedades mecânicas em tração e energia absorvida Charpy das amostras principais [17]	149
Tabela 20 – Propriedades mecânicas em tração e energia absorvida Charpy das amostras adicionais [17]	150
Tabela 21 – expoente de encruamento (n) e coeficiente de resistência (k)	150
Tabela 22 – Valores de n após revenimentos laboratoriais da curva C2500	165
Tabela 23 – Percentual de carbono, estimado da equação 50, em função da microdureza média	175
Tabela 24 – Evolução das camadas temperadas para o aço em estudo	184
Tabela 25 – Parâmetros de processamento estimados do curvamento a quente	191
Tabela 26 – Tamanho de grão austenítico estimado e tamanhos de grão final e efetivo medidos nas condições curvadas C2500 e C500	191
Tabela 27 – Tamanho máximo solúvel de precipitado em 2 min de curvamento a quente	194
Tabela 28 – Efeitos da deformação devido à esforços em tração e compressivos, no sentido da espessura, sobre a fração volumétrica de ferrita poligonal	197
Tabela 29 – Contribuição da fração volumétrica de ferrita bainítica na resistência	204
Tabela 30 – Tamanho e fração volumétrica do constituinte AM, contiguidade e livre caminho médio da ferrita, obtidos entre 8 a 12 mm da espessura de parede	204
Tabela 31 – Limites de escoamento e de resistência experimentais e comparação com os valores modelados em função de $L\alpha\alpha$, fração volumétrica de AM e tamanho de constituinte AM	205
Tabela 32 – Contribuições para resistência devido à presença do constituinte AM e $L\alpha\alpha$	206
Tabela 33 – Contribuições para resistência devido ao tamanho de grão	208
Tabela 34 – Percentual em massa dos elementos de liga em solução sólida na ferrita	210

Tabela 35 – Porcentagem em solução sólida da composição química nominal dos elementos de liga em solução sólida	210
Tabela 36 – Contribuição da solução sólida ($\Delta\sigma_{ss}$) na resistência e propriedades mecânicas	211
Tabela 37 – Efeitos das operações de curvamento a quente sobre o percentual em massa de Nb, Ti, Mo e V dos resíduos sólidos da dissolução ácida	216
Tabela 38 – Efeitos do revenimento industrial a 600°C (1h) sobre o percentual em massa de Nb, Ti, Mo e V dos resíduos sólidos da dissolução ácida	218
Tabela 39 – Proporção Mo/V pré revenimento em comparação com a composição química nominal do aço em estudo e de um aço microligado ao vanádio	220
Tabela 40 – Resultados do refinamento Rietveld para os difratogramas obtidos dos resíduos da dissolução ácida	221
Tabela 41 – Análise quantitativa e tamanho de cristalitos dos carbonetos tipo NbC e TiVC ₂	222
Tabela 42 – Efeitos do curvamento a quente sobre o endurecimento por precipitação	230
Tabela 43 – Efeitos do curvamento a quente e revenimento posterior sobre o endurecimento por precipitação	231
Tabela 44 – Estimativas para as densidades de discordâncias em função da temperatura de transformação da austenita para ferrita e respectivas contribuições	233
Tabela 45 – Densidades de discordâncias e respectivas contribuições	233
Tabela 46 – Mecanismos de endurecimento de aço API X80 submetido a curvamento a quente e revenimento posterior	239
Tabela 47 – Mecanismos de endurecimento das curvas aplicando as contribuições para o endurecimento devido às ferritas bainítica (FB) e acicular (FA), ao livre caminho médio ferrítico ($L_{\alpha\alpha}$) e fração volumétrica de ferritas poligonal e quasi poligonal ($\% \alpha$)	240
Tabela 48 – Mecanismos de endurecimento das curvas em função das frações volumétricas de ferritas bainítica (FB) e acicular (FA) e devido às ferritas poligonal e quasi poligonal ($\% \alpha$)	240

Lista de nomenclaturas

API 5L – American Petroleum Institute (API) Specification 5L (Specification for Line Pipe)

PSL2 – Product Specification Level

TMCP – Thermo-Mechanical Control Process

Processo UOE – Processo de conformação da chapa em tubo constituído pelas seguintes etapas: dobramento em U, dobramento em O, solda longitudinal arco submerso e expansão a frio para atingir as tolerâncias geométricas

ARBL – Aços de alta resistência e baixa liga

API X65 – Aço da classe API com limite de escoamento mínimo de 65.000 psi

API X80 – Aço da classe API com limite de escoamento mínimo de 80.000 psi

p% – percentual em massa

CE_{IWW} – Valor de carbono equivalente calculado conforme a fórmula do International Institute of Welding

CE_{Pcm} – Valor de carbono equivalente calculado conforme a fórmula de Ito-Bessyo para aços baixo carbono ($\%C \leq 0,12\%$)

Constituinte AM – Constituinte austenita/martensita

Constituinte β – Constituinte martensita – bainita

Austenita remanescente – austenita não transformada em ferrita durante a passagem pelo campo bifásico (austenita + ferrita) no ciclo térmico de resfriamento a partir do campo austenítico

Austenita prévia – Contornos de grãos austeníticos resultantes da etapa de aquecimento no campo austenítico

T_{γ} – Temperatura de austenitização

Tamanho de grão efetivo – No caso deste trabalho, trata-se do tamanho de grão final da microestrutura, caracterizado via microscopia eletrônica de varredura (3000X), considerando contornos de grãos, de fases e contornos entre as ripas que compõem os feixes de uma fase

Adjacência ou contiguidade das fases – O grau de contato entre os grãos de uma mesma fase

F_v – Fração volumétrica

LE – Limite de escoamento

$LE_{0,2\%}$ – Limite convencional de escoamento correspondente à uma deformação plástica de 0,002, por unidade de comprimento, depois que ultrapassa o limite de proporcionalidade

LR – Limite de resistência

LE/LR – Razão elástica

Al – Alongamento (corpos de prova com comprimento inicial igual a 25,4 mm)

Ch – Energia absorvida Charpy

A_{e1} – Temperatura de transformação de fase do diagrama Fe-C, correspondente à linha A_1 no estado de equilíbrio

A_{e3} – Temperatura de transformação de fase do diagrama Fe-C, correspondente à linha A_3 no estado de equilíbrio

A_{c1} – Temperatura de transformação de fase durante o aquecimento fora do estado de equilíbrio, correspondente à linha A_1 do diagrama Fe-C

A_{c3} – Temperatura de transformação de fase durante o aquecimento fora do estado de equilíbrio, correspondente à linha A_3 do diagrama Fe-C

A_{r1} – Temperatura de transformação de fase durante o resfriamento fora do estado de equilíbrio, correspondente à linha A_1 do diagrama Fe-C

A_{r3} – Temperatura de transformação de fase durante o resfriamento fora do estado de equilíbrio, correspondente à linha A_3 do diagrama Fe-C

M_s – Temperatura de início da transformação martensítica

B_s – Temperatura de início da transformação bainítica

Temperatura de encharque – Temperatura aplicada durante um determinado tratamento térmico (revenimento, recozimento, têmpera, etc.), na qual o material fica submetido a um determinado período de espera dentro do forno

Tenacidade ao entalhe por impacto Charpy – Tenacidade medida através do ensaio de impacto Charpy com corpos de prova fragilizados pela presença de entalhe padrão e redução da temperatura

Tubo-mãe – Tubo como recebido (tubo original) fabricado a partir de chapa laminada através do processo UOE

Trecho reto – Parte reta nas extremidades de uma curva por indução (tubo-mãe), que não sofre os efeitos térmicos do curvamento a quente

Curvamento por indução – Processo de curvamento contínuo que utiliza aquecimento por indução para criar uma faixa aquecida, estreita e circunferencial ao redor do material que está sendo curvado

Ângulo de curvamento – Quantidade de alteração de direção ao longo da curva (ângulo entre as tangentes da curva)

Raio de curvamento – Distância entre o centro de curvatura e a linha de centro do tubo curvado

Relação D/t – Relação entre o diâmetro nominal (D) e a espessura de parede (t) do tubo

Zona de transição – Áreas no início e fim do curvamento, que incluem o material que se estende desde a parte não aquecida do tubo-mãe até o material que tenha sido aquecido até a temperatura plena de curvamento

Extradorso (extrados) – Seção externa do arco da curva

Intradorso (intrados) – Seção interna do arco da curva

Linha neutra – Região da curva que não sofre o esforço de tração nem o de compressão durante a fabricação

Redução de espessura – Total de redução da espessura original da parede do tubo até a espessura da parede do extradorso após curvamento

MET – Microscopia Eletrônica de Transmissão

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MO – Microscopia Óptica

HV – Dureza Vickers

ICP MS – Espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado

ICP OES – Espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado

DRX – Difração de Raios X

g – Vetor da rede recíproca em MET

k , K ou k – Vetor de difração em DRX

b – Vetor de Burgers

a – Parâmetro de rede

ICSD – Inorganic Crystal Structure Database

LVOL-IB - Integral breadth based LVol

Relação de Baker-Nutting – Na análise do padrão de difração, para uma dada orientação, se os spots da matriz (ferrita) e dos precipitados (carbonitreto) obedecem a relação de Baker-Nutting, $(311)\alpha // (26-3)CN$ e $(311)\alpha \sim (201)CN$, a precipitação ocorreu na ferrita (α)

*Uma pessoa que nunca cometeu um
erro nunca tentou algo novo.*
Albert Einstein