



Jose Luis Montalvo Andia

**Caracterização Microestrutural, Mecânica e Simulação
Física da ZTA em Aço API X80**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Profa. Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro
Agosto de 2012



Jose Luis Montalvo Andia

**Caracterização Microestrutural, Mecânica e Simulação
Física da ZTA em Aço API X80**

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

Profa. Ivani de Souza Bott

Orientador

Departamento de Engenharia de Materiais - PUC-Rio

Prof. Antonio José Ramírez Londono

Laboratório Nacional de Nanotecnologia de Brasil - LNNano/SP

Prof. Luís Felipe G. de Souza

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

Prof. Valter Rocha dos Santos

Departamento de Engenharia de Materiais- PUC-Rio

Prof. José Eugênio Leal

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

Rio de Janeiro, 15 de agosto de 2012

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

Jose Luis Montalvo Andia

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na Universidade Nacional de San Agustín de Arequipa, no Perú em (2009). Possui experiência profissional como Engenheiro na área de inspeção de Soldagem, controle de qualidade de produtos soldados além de ter experiência em operações e processos metalúrgicos de cobre, prata e ouro.

Ficha Catalográfica

Andia, Jose Luis Montalvo

Caracterização microestrutural, mecânica e simulação física da ZTA em aço API X80 / Jose Luis Montalvo Andia ; orientadora: Ivani de Souza Bott. – 2012.

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

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia de Materiais, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Aços API 5L grau X80. 3. Zona termicamente afetada. 4. Caracterização microestrutural. 5. Simulação térmica. 6. Tenacidade de impacto Charpy. I. Bott, Ivani de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

A meus pais Constantino Montalvo e Vilma Marcelina Andia de Montalvo e
irmãos Javier, Rildo, Jesus, Sandra pela motivação, apoio e estímulo na busca de
novos conhecimentos.

Agradecimentos

Agradeço a Deus pela saúde, fortaleza e paciência.

À minha orientadora e amiga, professora Ivani de S. Bott, pelo estímulo, ensinamentos, dedicação e amizade durante a realização deste trabalho.

Ao colega Rafael de Araujo Silva, pelo apoio e contribuições técnico-científicas.

Agradeço ao Laboratório Nacional de Nano Tecnologia (LNNano)- Campinas pela possibilidade de realização das simulações no equipamento Gleeble.

Aos engenheiros do Laboratório Nacional de Nanotecnologia Leonardo Wu e Thaís Alonso pelo apoio concedido.

Agradeço aos funcionários da PUC-Rio, em especial ao Heitor Nuss Guimarães.

Agradeço aos meus colegas da PUC-Rio, Patricia Pontón, Julio Suni, Natasha, Adriana, Fredy, Jorge e José pela ajuda e apoio durante a elaboração desta dissertação.

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

Agradeço a meu irmão Javier pelo apoio e conselhos e por estar sempre ao meu lado.

A todos os professores e funcionários do DCMM, pelos ensinamentos e ajuda.

A Capes, FAPERJ, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Resumo

Andia, Jose Luis Montalvo; Bott, Ivani de Souza. **Caracterização Microestrutural, Mecânica e Simulação Física da ZTA em Aço APIX80**. Rio de Janeiro, 2012. 135p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Foram utilizados dois sistemas de aço API 5L X80, Nb-Cr e Nb-Cr-Mo, para obter as diferentes regiões da ZTA pertencentes a uma soldagem multipasse. Estas regiões são denominadas de: região de grãos grosseiros inalterados (RGGI), região de grãos refinados reaquecidos supercriticamente (RGRRS), região de grãos grosseiros reaquecidos intercriticamente (RGGRI), região de grãos grosseiros reaquecidos subcriticamente (RGGRS). Estas regiões foram obtidas para dois aportes de calor (1,2 e 2,5 kJ/mm) e a RGGRI por ser considerada a região onde poderiam ser formadas zonas frágeis localizadas (ZFL) foram utilizados também aportes de calor de 3,0 e 4,0 kJ/mm. Cada uma das regiões obtidas pela simulação física foi submetida a ensaios mecânicos de impacto Charpy e dureza, assim como a análises metalográficos por microscopia ótica (MO) e microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi possível observar que as microestruturas pertencentes a uma ZTA simulada obtidas com o equipamento (Gleeble@3800) se mostram compatíveis com aquelas pertencentes a uma soldagem real. Este resultado comprova que as velocidades de resfriamento obtidas pela simulação foram similares àquelas da soldagem real. A adição de Mo ao sistema Nb-Cr-Mo não promoveu mudanças significativas tanto a nível microestrutural, observado por MO e MEV, como em termos de propriedades mecânicas.

Palavras-chave

Aços API 5L Grau X80; Zona Termicamente Afetada; Caracterização Microestrutural; Simulação Térmica; Tenacidade de Impacto Charpy.

Abstract

Andia, Jose Luis Montalvo; Bott, Ivani de Souza (Advisor). **API X80 HAZ Physical Simulation and Microstructural and Mechanical Characterization**. Rio de Janeiro, 2012. 135p. MSc. Dissertation - Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Two API 5L steels grade X80 of the systems Nb-Cr and Nb-Cr-Mo, were submitted to physical simulation in order to obtain different regions of the HAZ similar to those of a multipass welding, the coarse grained heat affected zone (CGHAZ), supercritically coarse grained heat affected zone (SCCGHAZ), intercritically coarse grained heat affected zone (ICCGHAZ), subcritically coarse grained heat affected zone (SCGHAZ). The welding simulation was carried out on a Gleeble ® 3800 considering two thermal cycles and different heat inputs 1.2, 2.5, 3.0 and 4,0 kJ/mm, typical of a girth weld. All HAZ zones were simulated only for 1.2 and 2.5kJ/mm. Since the ICCGHAZ is the probable weak link where a local brittle zone (LBZ) can occur, this region was simulated for all heat inputs studied. All simulated regions were subjected to traditional mechanical tests such as impact Charpy-V at -40 and -60°C and microhardness Hv_{1kg} . Metallographic analysis by optical microscopy (OM) and scanning electron microscopy (SEM) and fractography were also performed. The microstructures obtained for the different regions of the HAZ, by simulation were close to those of a real welding, however, the cooling rates obtained by simulation were slower than that obtained in a real welding. The mechanical properties and microstructure of the different regions of the HAZ for the systems NbCr and NbCrMo indicate that the microstructural and mechanical behavior of the intercritical region (ICCGHAZ) was considered to be similar to a local brittle zone (LBZ) for all conditions studied.

Keywords

Steels API 5L Grade X80; Heat Affected Zone (HAZ); Microstructural Characterization; Thermal Simulation; Impact Toughness Charpy.

Sumário

| | |
|---|----|
| 1 Introdução | 20 |
| 1.1. Objetivos | 21 |
| 2 - Revisão Bibliográfica | 22 |
| 2.1. Aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) | 22 |
| 2.1.1. Evolução de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) | 23 |
| 2.1.2. Fabricação de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) | 24 |
| 2.2. Soldagem de aços de alta resistência e baixa liga (ARBL) | 25 |
| 2.3. Fatores que afetam a tenacidade da ZTA em aços microligados | 27 |
| 2.3.1. A solubilidade dos elementos microligantes: | 27 |
| 2.3.2. Efeito dos elementos microligantes nas temperaturas de transformação | 29 |
| 2.3.3. Efeito de elementos de liga no tamanho de grão austenítico da ZTA | 31 |
| 2.4. Influência dos elementos microligantes na ZTA | 33 |
| 2.4.1. Efeito de nióbio na tenacidade da ZTA | 33 |
| 2.4.2. Influência do nitrogênio na tenacidade da ZTA | 35 |
| 2.4.3. Efeito de vanádio na tenacidade da ZTA | 36 |
| 2.4.4. Efeito do titânio na tenacidade da ZTA | 37 |
| 2.4.5. Efeito de molibdênio na tenacidade da ZTA | 38 |
| 2.4.6. Carbono equivalente (CE) | 39 |
| 2.5. Simulações de soldagem | 40 |
| 2.5.1. Gleeble® 3800 | 41 |
| 2.5.2. Modelos da Gleeble® 3800 | 42 |
| 2.5.3. Ciclo térmico | 44 |
| 2.5.4. Parâmetros que influenciam o ciclo térmico de soldagem | 45 |
| 2.5.4.1. Temperatura de preaquecimento | 45 |
| 2.5.4.2. Aporte de calor | 46 |
| 2.5.4.3. Temperatura pico | 47 |

| | |
|---|----|
| 2.5.4.4. Tempo de resfriamento ($\Delta t_{8/5}$) | 49 |
| 2.6. Zona Termicamente Afetada (ZTA) | 50 |
| 2.6.1. Característica da ZTA de uma solda de passe único. | 50 |
| 2.6.2. Características da ZTA de uma solda multipasse | 52 |
| 2.6.3. Influência de zonas frágeis localizadas (ZFL) na ZTA | 54 |
| 2.6.3.1. Principais mecanismos que influenciam a (ZFL) | 54 |
| | |
| 3 - Metodologia Experimental | 56 |
| 3.1. Descrição do método experimental | 56 |
| 3.2. Características das amostras empregadas na simulação | 57 |
| 3.3. Características das amostras empregadas na soldagem real | 58 |
| 3.4. Parâmetros de simulação de soldagem | 59 |
| 3.5. Parâmetros da soldagem real | 60 |
| 3.6. Execução da simulação | 60 |
| 3.7. Execução da solda real | 62 |
| 3.8. Codificação para a avaliação da ZTA | 63 |
| 3.9. Análise Metalográfica | 64 |
| 3.9.1. Microscopia Ótica (MO) | 65 |
| 3.9.2. Microscopia Eletrônica de varredura (MEV) | 65 |
| 3.10. Ensaio de Impacto Charpy-V | 66 |
| 3.11. Caracterização Metalográfica e Fractográfica dos corpos de prova Charpy | 67 |
| 3.11.1. Análises de fratura interna dos corpos de prova Charpy | 67 |
| 3.12. Ensaio de microdureza Vickers (HV) | 68 |
| | |
| 4 . Resultados | 70 |
| 4.1. Determinação dos ciclos térmicos simulados | 70 |
| 4.2. Cálculos do tempo $\Delta t_{8/5}$ e velocidade de resfriamento | 74 |
| 4.3. Estudo da Influência do aporte de calor | 74 |
| 4.4. Caracterização metalográfica | 77 |
| 4.4.1. Macrografia da ZTA | 77 |
| 4.4.2. Caracterização Microestrutural do metal base | 78 |
| 4.4.3. Caracterização microestrutural das regiões ZTA por MO | 78 |

| | |
|--|-----|
| 4.5. Caracterização microestrutural do constituinte austenita martensita (AM) por MEV | 83 |
| 4.5.1. Metal de base (MB) | 83 |
| 4.5.2. Zona termicamente afetada (ZTA) | 84 |
| 4.5.3. Comparação do constituinte AM entre MO e MEV | 90 |
| 4.6. Ensaaios de impacto | 93 |
| 4.6.1. Análise fractográfica | 95 |
| 4.6.2. Análise da fratura interna das trincas | 103 |
| 4.7. Ensaaios de microdureza Vickers (HV 1kg) nas regiões da ZTA real | 107 |
| 4.8. Ensaaios de microdureza Vickers (HV1kg) para as regiões simuladas | 107 |
| 5 . Discussão | 110 |
| 5.1. Evolução microestrutural | 110 |
| 5.1.1. Região de grãos grosseiros inalterados (RGGI ZTA) 1200 °C | 110 |
| 5.1.2. Região de grãos grosseiros refinados reaquecidos supercriticamente (RGRRS ZTA) 1000 °C | 115 |
| 5.1.3. Região de grãos grosseiros reaquecidos intercriticamente (RGGRI ZTA) 800 °C | 118 |
| 5.1.4. Região de grãos grosseiros reaquecidos subcriticamente (RGGRS ZTA) 600 °C | 121 |
| 6 . Considerações finais e conclusões | 125 |
| 6.1. Sugestões para trabalhos futuros | 126 |
| 7 . Revisão Bibliografica | 127 |

Lista de figuras

| | |
|--|----|
| Figura 2-1 Relação entre a tenacidade caracterizada pela temperatura de transição obtida a 27 J e a tensão de escoamento [1]. | 23 |
| Figura 2-2 Evolução dos graus API ao longo dos anos respeito a tensão de escoamento [5, 12] | 24 |
| Figura 2-3 Solubilidade dos principais compostos na região de grãos grosseiros na ZTA [19], onde (Wt%A) recebe o percentual em massa do primeiro elemento do precipitado (Nb ou V ou Ti), e (Wt%B) recebe o percentual em massa do segundo elemento químico do precipitado (C ou N). | 28 |
| Figura 2-4 Influência do manganês (a), b) e cromo (c), (d) nas temperaturas críticas de transformação, Ac1(a) e Ac3(b) [29]. | 31 |
| Figura 2-5 Influência de nitrogênio e titânio no tamanho de grão austenítico [32]. | 32 |
| Figura 2-6 Influência da velocidade de aquecimento no tamanho de grão austenítico, em aços ARBL. [28] | 33 |
| Figura 2-7 Influência do nióbio na tenacidade a fratura em ensaios Charpy (a) e CTOD (b) realizados em aços ARBL e soldados com um aporte de calor de 2kJ/mm. | 35 |
| Figura 2-8 Influência do teor de nitrogênio na energia de impacto (a), influência do nitrogênio livre na energia de impacto (b). [40] | 36 |
| Figura 2-9 Influência do Ti na temperatura de transição de impacto da ZTA, soldado com um aporte de calor de 4.5KJ/mm [45]. | 37 |
| Figura 2-10 Relação entre a microdureza e aporte de calor na região intercrítica da ZTA para diferentes teores de Mo [50]. | 38 |
| Figura 2-11 Comparação microestrutural da ZTA na (RGGRI) Tp2-800 °C, para uma solda real (a) e simulada (b). | 42 |

| | |
|--|----|
| Figura 2-12 Comparação de ciclos térmicos de soldagem desenvolvidos por três modelos de fluxo de calor, Rosenthal – Rykalin 2D – Rykalin 3D [54]. | 44 |
| Figura 2-13 Influência da temperatura de preaquecimento na dureza (a) e tenacidade (b), [67]. | 46 |
| Figura 2-14 Influência da temperatura de pico na tenacidade da ZTA de uma solda multipasse [76]. | 48 |
| Figura 2-15 Presença do constituinte AM na região reaquescida intercrítica da ZTA na forma massiva e alongada. Aumento 200X (a), aumento 1000X(b). [77]. | 49 |
| Figura 2-16 Influência do tempo de resfriamento na formação e decomposição do constituinte AM. [77] | 50 |
| Figura 2-17 Diagrama esquemático dos constituintes da ZTA [71] de um aço com 0.15% C [81]. | 51 |
| Figura 2-18 diagrama esquemático dos constituintes da ZTA de uma solda multipasse [82] | 53 |
| Figura 3-1 Equipamento Gleeble @3800. | 56 |
| Figura 3-2 Dimensões de corpos de prova para a simulação de soldagem. | 57 |
| Figura 3-3 Soldador de termopar, modelo 3S50. | 61 |
| Figura 3-4 Câmara interna do simulador termomecânico Gleeble 3800®, mostrando as garras de cobre (indicadas pela seta). | 61 |
| Figura 3-5. (a) Geometria da junta circunferencial, onde a= 3mm, b= 2.5mm, E= 16mm; (b) sequência de passes. | 63 |
| Figura 3-6 Localização da extração dos corpos de prova segundo a norma API-1104 | 64 |
| Figura 3-7 Superfície examinada nos corpos de prova simulados (a) e real (b) por MO e MEV. | 65 |
| Figura 3-8 Dimensões do corpo de prova Charpy V segundo a norma ASTM E23. | 67 |
| Figura 3-9 Desenho do corte realizado nos corpos de prova segundo a norma API RP2Z | 68 |
| Figura 3-10 Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza da solda real. | 69 |

| | |
|---|----|
| Figura 3-11 Desenho esquemático dos pontos de medidas de dureza da solda simulada. | 69 |
| Figura 4-1. Comparação dos ciclos térmicos programados e simulados (a), ampliação de ambos ciclos (b), gerados pelo modelo de curva Rykalin 3D, | 70 |
| Figura 4-2 Ciclos térmicos das regiões da ZTA, (RGGI), (RGRRS), (RGGRI) (RGGRS) para (a) 1,2 kJ/mm, (b) 2,5 kJ/mm, (c) 3,0 kJ/mm, (d) 4,0 kJ/mm para o sistema Nb-Cr. | 72 |
| Figura 4-3 Ciclos térmicos das regiões da ZTA, (RGGI), (RGRRS), (RGGRI) (RGGRS) para 1,2 kJ/mm (a), 2,5 kJ/mm(b), 3,0 kJ/mm(c), 4,0 kJ/mm (d) para sistema Nb-Cr-Mo. | 73 |
| Figura 4-4 Comparação dos ciclos térmicos simulados para diferentes aportes de calor, nos sistemas Nb-Cr-Mo (a), Nb-Cr(b), na RGGRI. | 75 |
| Figura 4-5 influencia do aporte de calor no tempo de resfriamento ($\Delta t_{8/5}$), em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 75 |
| Figura 4-6 influencia do aporte de calor no tempo de resfriamento ($\Delta t_{8/5}$), em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr na (RGGRI). | 76 |
| Figura 4-7 Influência do aporte de calor na velocidade de resfriamento em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 76 |
| Figura 4-8 Influência do aporte de calor na velocidade de resfriamento em aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr na (RGGRI). | 77 |
| Figura 4-9 Macrografia da ZTA real (a) e da ZTA simulada (b), realizadas por um mosaico (aumento de 20X), (nital 2%). | 77 |
| Figura 4-10 Microestrutura do metal de base na condição de como recebido dos sistemas Nb-Cr-Mo (a) e Nb-Cr (b). todas as imagens foram obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%). | 78 |
| Figura 4-11 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA, as imagens (a), (e), (i), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), (j), pertencem a (RGRRS); as imagens (c),(g),(k); pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), (l) pertencem (RGGRS) para 12 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500 x, (Nital 2%). | 80 |
| Figura 4-12 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA simuladas a 2,5 kJ/mm, as imagens (a), (e), pertencem a (RGGI); | |

as imagens (b), (f), pertencem a (RGRRS); para 2,5 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%). 81

Figura 4-13 Microestruturas das diferentes regiões da ZTA pertencentes a 2,5 kJ/mm, as imagens (c), (g), pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), pertencem (RGGRS) para 2,5 kJ/mm, imagens obtidas com aumento de 500x, (Nital 2%). 82

Figura 4-14 Microestruturas da (RGGRI) da ZTA simulada para 3,0 kJ/mm, (a) sistema Nb-Cr-Mo e (b) sistema Nb-Cr, aumento de 500x nital (2%). 83

Figura 4-15 Microestruturas da (RGGRI) da ZTA simulada para 4,0 kJ/mm, (a) sistema Nb-Cr-Mo e (b) sistema Nb-Cr, aumento de 500x nital (2%). 83

Figura 4-16 Metal base, sistema Nb-Cr-Mo (a), Nb-Cr (b). Aumento 3000X, microconstituente AM nas formas massiva e alongada. (Lepera modificado) 84

Figura 4-17 Morfologias do microconstituente AM presente nas regiões da ZTA, alongado (Tipo I), massivo (Tipo II). Aumento 20000x. (Lepera modificado) 84

Figura 4-18 Caracterização do microconstituente AM nas regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (a), (e), (i), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), (j), pertencem a (RGRRS); as imagens (c), (g), (k); pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), (l) pertencem (RGGRS) para 1,2 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado). 86

Figura 4-19 Caracterização microestrutural das diferentes regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (a), (e), pertencem a (RGGI); as imagens (b), (f), pertencem a (RGRRS) para 2,5 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado). 87

Figura 4-20 Caracterização microestrutural das diferentes regiões da ZTA obtidas pelo (MEV), as imagens (c), (g), pertencem a (RGGRI) e as imagens (d), (h), pertencem (RGGRS) para 2,5 kJ/mm. Aumento de 3000x. (Lepera modificado). 89

| | |
|--|----|
| Figura 4-21 Caracterização microestrutural do microconstituente AM na (RGRRI) para aportes de calor de 3.0 kJ/mm, aumento 3000X, (Lepera modificado). | 90 |
| Figura 4-22 Caracterização microestrutural do microconstituente AM na (RGRRI) para aportes de calor de e 4.0 KJ/mm, aumento 3000X, (Lepera modificado). | 90 |
| Figura 4-23 Caracterização do AM por MO e MEV das regiões, RGGI (a), (e), RGRRS (b(f)), da ZTA simulada pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo, imagens obtidas com um aumento de (1000x), (Lepera modificado). | 91 |
| Figura 4-24 Caracterização do AM por MO e MEV das regiões, RGGRI (c)(g), RGGRS (d)(h), da ZTA simulada pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo, imagens obtidas com um aumento de (1000x), (Lepera modificado). | 92 |
| Figura 4-25 Tenacidade das diferentes regiões da ZTA caracterizadas por suas temperaturas de pico, pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr para aportes de calor de (a) 1,2 kJ/mm e (b) 2,5 kJ/mm a -40 e -60 °C. | 94 |
| Figura 4-26 Influência do aporte de calor a tenacidade da RGGRI da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr para aportes de calor de 1,2 kJ/mm, 2,5 kJ/mm, 3,0 k/mm e 4,0 kJ/mm, a -40 e -60 °C. | 95 |
| Figura 4-27 Fractografia dos Cp's ensaiados na região (RGGRS) pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 96 |
| Figura 4-28 Fractografia dos Cp's ensaiados na região (RGGRS) pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 97 |
| Figura 4-29 Fractografia dos Cp's ensaiados na região (RGGRI), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 98 |
| Figura 4-30 Fractografia dos Cp's ensaiados na região (RGGRI ZTA), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 99 |

| | |
|---|-----|
| Figura 4-31 Fractogáfia dos Cp's ensaiados na região (RGRRS), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 100 |
| Figura 4-32 Fractogáfia dos Cp's ensaiados na região (RGRRS), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 101 |
| Figura 4-33 Fractogáfia dos Cp's ensaiados na região (RGGI), pertencente ao sistema Nb-Cr-Mo representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 102 |
| Figura 4-34 Fractogáfia dos Cp's ensaiados na região (RGGI), pertencente ao sistema Nb-Cr representando as energias máximas e mínimas a 1000x. | 103 |
| Figura 4-35 trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%. | 104 |
| Figura 4-36 Trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%. | 105 |
| Figura 4-37 Trincas secundarias pertencentes a (RGGI) por microscopia ótica (MO) 500X e microscopia eletrônica de varredura (MEV) 2000X, Nital 2%. | 106 |
| Figura 4-38 Mapeamento da microdureza nas diferentes regiões da ZTA para o sistema (a) Nb-Cr-Mo, (b) Nb-Cr. | 108 |
| Figura 4-39 Influencia do tempo de resfriamento na microdureza. | 109 |
| Figura 4-40 influencia da velocidade de resfriamento na microdureza. | 109 |
| Figura 5-1 Comparação do tempo de resfriamento (a) e velocidade de resfriamento (b) nos sistemas (Nb-Cr-Mo e Nb-Cr) da RGGI para aportes de calor de 1,2 e 2,5 KJ/mm. | 112 |
| Figura 5-2 Comparação do tempo de resfriamento (a) e velocidade de resfriamento (b) nos sistemas (Nb-Cr-Mo e Nb-Cr) da RGGI para um determinado aporte de calor. | 116 |

Figura 5-3 Variação do tempo de resfriamento (a) e velocidade de resfriamento (b) nos sistemas (Nb-Cr-Mo e Nb-Cr) da RGGI para um determinado aporte de calor.

119

Lista de tabelas

| | |
|--|----|
| Tabela 2-1 Temperatura de preaquecimento de acordo com as especificações técnicas para construção de plataformas fixas de aço da Petrobras [30, 69]. | 45 |
| Tabela 3-1 Propriedades mecânicas dos aços API 5L X80 Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 57 |
| Tabela 3-2 Composição química do aço API 5L X80 do sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 58 |
| Tabela 3-3 Composição química da chapa utilizada para a fabricação do tubo. | 58 |
| Tabela 3-4 Parâmetros empregados na simulação de soldagem. | 59 |
| Tabela 3-5 Propriedades físicas do aço API 5L X80. | 60 |
| Tabela 3-6 Parâmetros do processo de soldagem real. | 60 |
| Tabela 3-7 Relação da segunda temperatura de pico TP2 com as regiões da ZTA. | 62 |
| Tabela 3-8 Codificação dos corpos de prova empregados no processo de simulação e no ensaio de impacto Charpy V. | 63 |
| Tabela 3-9 Codificação dos corpos de prova da soldagem real | 64 |
| Tabela 3-10 Ataques químicos utilizados no MEV. | 66 |
| Tabela 3-11 Distribuição dos corpos de prova Charpy para cada região da ZTA | 67 |
| Tabela 4-1 Códigos das diferentes regiões da ZTA pertencente ao sistema Nb-Cr. | 71 |
| Tabela 4-2 Códigos das diferentes regiões da ZTA pertencentes ao sistema Nb-Cr-Mo. | 71 |
| Tabela 4-3 Valores meios do tempo e velocidades de resfriamento para os sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 74 |
| Tabela 4-4 Valores médios resultantes dos ensaios de impacto Charpy-V, para as diferentes regiões da ZTA pertencentes aos sistemas Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 93 |

| | |
|---|-----|
| Tabela 4-5 Resultados de microdureza do sistema (Nb-Cr-Mo) | 107 |
| Tabela 4-6 Valores médios da microdureza para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 107 |
| Tabela 4-7 Influência do tempo de resfriamento na dureza na (RGGRI), para o sistema Nb-Cr-Mo e Nb-Cr. | 108 |