

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Adriana de Almeida Halfeld Vieira

**Avaliação Microestrutural de Aços da Classe API5LX80
Submetidos a Diferentes Ciclos Térmicos**

Dissertação de Mestrado

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

Orientadora: Ivani de Souza Bott

Rio de Janeiro
Setembro de 2007



ADRIANA DE ALMEIDA HALFELD VIEIRA

**Avaliação Microestrutural de Aços da Classe
API5LX80 Submetidos a Diferentes Ciclos Térmicos**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau 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. Luiz Henrique de Almeida

Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ

Prof. Luís Felipe Guimarães de Souza

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

Prof. Paulo Rangel Rios

Universidade Federal Fluminense - UFF

Prof. José Eugenio Leal

Coordenador Setorial de Pós-Graduação do Centro Técnico Científico da PUCRio

Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2007.

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

Adriana de Almeida Halfeld Vieira

Possui graduação em Engenharia Metalúrgica na Universidade Federal do Rio de Janeiro (1992) onde realizou trabalhos de pesquisa em soldagem e ensaios não-destrutivos. Trabalhou por 2 anos na Superintendência de Pesquisa e Desenvolvimento da Companhia Siderúrgica Nacional (1993-1995) na área de processo e produto da laminação a quente.

Ficha Catalográfica

Vieira, Adriana de Almeida Halfeld

Avaliação microestrutural de aços da classe API5LX80 submetidos a diferentes ciclos térmicos / Adriana de Almeida Halfeld Vieira ; orientadora: Ivani de Souza Bott. – 2007.

106 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Ciência dos Materiais e Metalurgia)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Ciência dos Materiais e Metalurgia – Teses.
2. Aços API5LX80. 3. Aços HTP. 4. Caracterização microestrutural. 5. Tratamento térmico. 6. MET. I. Bott, Ivani de Souza. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia. III. Título.

CDD: 669

Ao meu querido pai Bernardo,

Agradeço o apoio, carinho e atenção, sobretudo as palavras de incentivo,
que sempre me foram dadas para que eu lutasse pelos meus ideais.

Agradecimentos

À Prof. Ivani de S. Bott da PUC-Rio de Janeiro pela oportunidade e confiança para concluir esse trabalho, me integrando novamente na metalurgia.

Ao Prof. Walter Botta e a equipe do Departamento de Materiais da UFSCar-SP pelas investigações de microscopia eletrônica de transmissão.

Ao Prof. Sidnei Paciornik e Marcos Henrique da PUC-Rio pelo auxílio em microscopia óptica, microscopia de varredura e processamento de imagens para realização de quantificação e medidas.

Ao Heitor Guimarães Nuss, Rafael Araújo Silva e Nielson Reis do Laboratório de Metalografia da PUC-Rio de Janeiro pelo auxílio na preparação metalográfica, confecção de amostras e ensaios em geral.

Ao Prof. Guillermo Solórzano pelo apoio, ensinamentos e trabalhos realizados na área de microscopia eletrônica de transmissão.

Ao Prof. Luis Felipe Guimarães de Souza da CEFET- Rio de Janeiro por possibilitar realizar as medições da taxa de resfriamento.

À Ana Paula e Ana Luiza da PUC-Rio pelo auxílio na impressão e organização do trabalho final.

Ao meu marido e meus filhos que estiveram sempre ao meu lado e me apoiaram durante a realização desse trabalho.

Meu reconhecimento a todos aqueles que me ajudaram, com presteza, boa vontade e carinho, durante todo o tempo em que convivemos. Obrigado.

“A mais bela coragem é a confiança que devemos ter na capacidade do nosso esforço.”

Coelho Neto

(escritor e fundador da Academia Brasileira de Letras)

Resumo

Adriana de Almeida Halfeld Vieira. **Avaliação Microestrutural de Aços da Classe API5LX80 Submetidos a Diferentes Ciclos Térmicos.** Rio de Janeiro 2007. 106p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Nesse trabalho foi realizada uma avaliação microestrutural da influência do ciclo térmico em três aços da classe API5LX80: Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V fabricados no Brasil. Estes aços foram fabricados através de processo termo-mecânico controlado sem passarem por uma etapa subsequente de resfriamento acelerado. Foi realizada uma caracterização microestrutural em duas condições, pós-laminação e austenitização a 900°C seguida de três (3) ciclos térmicos: resfriamento ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). Na condição de pós-laminado, os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, e Nb-Cr-Mo-V não apresentaram diferenças significativas quanto ao TG, distribuição de fases (ferrita, bainita e AM), dureza e microdureza mas foram verificadas diferenças em suas subestruturas (subgrãos, células e precipitação fina) observada em MET. Concluiu-se que a inclusão de Mo e V nos aços Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V não ocasionou influência a nível microestrutural, mas ocasionou mudanças a nível subestrutural verificadas em MET que talvez possam justificar a diferença entre propriedades mecânicas. Verificamos a diminuição do tamanho de grão com o aumento da taxa de resfriamento nos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, e Nb-Cr-Mo-V. Os valores de dureza e microdureza são os mesmos para os aços Nb-Cr e Nb-Cr-Mo na condição de após aplicação dos ciclos térmicos, e uma associação pode ser feita com a quantidade de fases de cada um, pois a distribuição quantitativa das fases para ambos os aços é muito similar. O aço Nb-Cr-Mo-V apresenta uma distribuição diferente, com a formação da fase martensítica já no resfriamento ao óleo (30°C/s) e o aumento da quantidade desta fase a medida que a taxa de resfriamento diminui.

Palavras-chave

Aços API5LX80, aços http, caracterização microestrutural, tratamento térmico, MET.

Abstract

Adriana de Almeida Halfeld Vieira. Microstructural Evaluation of API5LX80 Steels Subject to Different Cooling Rates. Rio De Janeiro 2007. 106p. MSc. Thesis - Department of Science of the Materials and Metallurgy, Pontifical University Catholic of Rio De Janeiro.

The present work presents a microstructural evaluation of three different chemical compositions of API5LX80 classified as Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V steel in two conditions, as received and after three applied cooling rates: air-cooled (1,5°C/s), oil-cooled (30°C/s) e water-cooled (115°C/s). This material under study is a microalloyed HSLA steel used for pipeline purposes produced in Brazil. Usually this steel is processed by thermo-mechanical controlled hot rolling followed by accelerated cooling. However, the material under study was not accelerated cooled after thermo-mechanical controlled hot rolling. Instead, chemical composition was changed to obtain similar mechanical properties of this class of steel. The Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, e Nb-Cr-Mo-V as-received steels studied in this work presented the same quantitative distribution of grain size and volumetric fraction of the phases (ferrite, bainite and MA), as well as, the same hardness Rockwell (HR_B) and Vickers (HV₁₀₀). However, the substructures (subgrains, cells and fine precipitation) of the three steels were different when examed in Transmission Electron Microscopy – TEM. The Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, e Nb-Cr-Mo-V steels, after submitted to the three cooling rates, presented a decrease in grain size with the increasing of the cooling rate. The same hardness Rockwell (HR_B) and Vickers (HV₁₀₀) values were found for Nb-Cr e Nb-Cr-Mo steels and this fact can be associated to the volumetric fraction of both steels, because both have very similar phase distribution. The Nb-Cr-Mo-V steel presented a different phase distribution with increased of martensite as the cooling rate decreases.

Keywords

API5LX80 steel, HTP steel, microstructural characterization, heat treatment, TEM.

Sumário

1 . INTRODUÇÃO	18
2 . REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1. Evolução dos aços ARBL	21
2.2. Mecanismos de aumento de resistência mecânica	23
2.3. Influência de elementos-liga e microestrutura/subestrutura de aços ARBL microligados	31
3 . MATERIAIS E MÉTODOS	41
3.1. Composição Química	41
3.2. Processo Termo-mecânico Controlado (TMCP)	42
3.3. Propriedades Mecânicas	44
3.4. Amostragem	45
3.5. Ciclos Térmicos	46
3.6. Metodologia de caracterização	46
3.6.1. Microscopia Óptica	47
3.6.2. Microscopia Eletrônica de Varredura	47
3.6.3. Microscopia Eletrônica de Transmissão	47
3.6.4. Fração volumétrica das fases	48
3.6.5. Dureza	49
3.6.6. Microdureza	49
3.6.7. Tamanho de grão	50
4 . RESULTADOS	51
4.1. Condição de pós-laminação	51
4.1.1. Caracterização metalográfica na condição de pós-laminação	51
4.1.2. Fração volumétrica das fases na condição de pós-laminação	65
4.1.3. Dureza na condição de pós-laminação	66
4.1.4. Microdureza na condição de pós-laminação	67
4.1.5. Tamanho de grão na condição de pós-laminação	67

4.2. Condição após aplicação dos ciclos térmicos	68
4.2.1. Determinação da taxa de resfriamento	68
4.2.2. Caracterização metalográfica após aplicação dos ciclos térmicos	69
4.2.3. Fração volumétrica das fases após aplicação dos ciclos térmicos	85
4.2.4. Dureza após a aplicação dos ciclos térmicos	88
4.2.5. Microdureza após aplicação dos ciclos térmicos	90
4.2.6. Tamanho de grão após aplicação dos ciclos térmicos	92
5 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	94
6 . CONCLUSÕES	101
7 . REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	103

Lista de figuras

- Figura 1. Efeitos dos elementos-liga em aços ARBL ferríticos-perlíticos no mecanismo de aumento de resistência por solução sólida substitucional e alguns exemplos elementos solutos intersticiais [14]. 24
- Figura 2. Efeito do tamanho de grão ferrítico no limite de escoamento e na temperatura de transição dúctil-frágil no aço com 0,1%C [1]. 26
- Figura 3. Carbetos e nitretos na austenita como função da temperatura [17]. 28
- Figura 4. Comparação entre as contribuições em mecanismo de aumento de resistência dos 4 aços estudados no trabalho de Poorhaydari, Patchett e Ivey mostrando que a maior contribuição foi devido ao refino de grão[20]. 31
- Figura 5. Variação de entalpia comparativa entre elementos-liga que agem como: (a) formadores de ferrita; (b) formadores de austenita [21]. 32
- Figura 6. Diagrama CCT (Continuous Cooling Transformation) para o aço 1,46%Mn, 0,19%Mo e 0,16%V. Para cada taxa de resfriamento a microdureza Vickers está indicada [11]. 34
- Figura 7. Imagens em MET do constituinte AM em aços forjados e resfriados em diferentes taxas (a) Campo claro do constituinte AM massivo no aço resfriado na areia (0,68°C/s) com padrão de difração de área selecionada (b) Campo escuro (c) Campo claro mostra constituinte AM (seta) entre ripas para o aço resfriado a água (taxa de resfriamento de 35°C/s) (d) Campo claro de constituinte AM para o aço resfriado ao ar (taxa de resfriamento de 1,15°C/s) [25]. 37
- Figura 8. Imagem em MET de martensita maclada no aço resfriado ao ar (1,5°C) (a) Campo claro com padrão de difração de área selecionada (b) Campo escuro da martensita maclada [25]. 38
- Figura 9. (a) Imagem em campo claro da interface bainita/martensita na microestrutura do aço ferrítico-bainítico-martensítico resfriado em duas etapas. (b) Filme de austenita retida. (c) Padrão de difração e relação entre orientações [27]. 39
- Figura 10. (a) Imagem em campo claro do grão de ferrita poligonal após recozimento do aço ferrítico-bainítico-martensítico resfriado em duas etapas. (b) Imagem em campo escuro de precipitados de carbeto de Vanádio (c)

- Padrão de difração [27]. 40
- Figura 11. Fluxograma do processo de laminação controlada para as chapas dos aços API5LX80. Fonte: USIMINAS. 43
- Figura 12. Dimensões (mm) dos corpos de prova para aplicação dos ciclos térmicos. 45
- Figura 13. Corpo de prova para aplicação de ciclo térmico. 46
- Figura 14. Exemplos de micrografias analisadas para fazer medição de fração volumétrica (a) aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar calmo (b) aço Nb-Cr-Mo resfriado a água. 48
- Figura 15. Localização das identações para medição da dureza Rockwell B das amostras de aço Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V nas condições de pós-laminado e após aplicação dos ciclos térmicos. 49
- Figura 16. Localização das identações para medição da microdureza Vickers das amostras de aço Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V nas condições de pós-laminado e após aplicação dos ciclos térmicos. 50
- Figura 17. Exemplo de micrografia analisada para fazer medição do tamanho de grão através do Método do Intercepto Circular. Aço Nb-Cr-Mo-V pós-laminado. 50
- Figura 18. Micrografias do aço Nb-Cr pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 18(c) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas micrografias pela seta. Ataque Nital 2%. 52
- Figura 19. Micrografias do aço Nb-Cr pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV e apresentam AM alongado ajudando a visualização dos contornos. Ataque Nital 2%. 53
- Figura 20. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 20(d) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas

- micrografias pela seta. Ataque Nital 2%. 54
- Figura 21. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita envolta a AM, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal com precipitados no seu interior. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV pois algumas vezes o AM encontra-se nos contornos facilitando a visualização. Ataque Nital 2%. 55
- Figura 22. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo-V pós-laminado em MO. Verificam-se grãos de ferrita poligonal sendo que alguns alongados, com uma distribuição de tamanho heterogênea, alguns contornos de grãos pouco visíveis como na Figura 22(d) (área circundada), bainita e o constituinte AM nas amostras (c) e (d) com aumento maior. O sentido de laminação está indicado nas micrografias pela seta. Ataque Nital 2%. 56
- Figura 23. Micrografias do aço Nb-Cr-Mo-V pós-laminado em MEV. Verificam-se fases como a bainita, constituinte AM massivo e grãos de ferrita poligonal com precipitados no seu interior. Alguns contornos de grãos são pouco visíveis mas podem ser melhor observados no MEV pois partículas de AM encontram-se nos contornos facilitando a visualização. Ataque Nital 2%. 57
- Figura 24. Sub-grão na amostra do aço Nb-Cr. Figura de difração abrangendo o sub-grão e o grão adjacente. A área circundada mostra o local onde a abertura foi colocada, ou seja, no contorno entre grão e o sub-grão. As figuras de difração são muito próximas. 59
- Figura 25. Imagens em MET da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo (a) Grão de bainita alongado (b) Aumento do grão de bainita mostrando os carbonetos. 60
- Figura 26. Imagem em MET de uma fase escura localizada entre grãos de ferrita poligonal, na amostra de aço Nb-Cr-Mo pós-laminado. A fase escura é um constituinte AM. 61
- Figura 27. (a) Imagem em campo claro de um grande precipitado na matriz do aço Nb-Cr-Mo (b) Imagem em campo escuro centrado do ponto no padrão de difração (c) Espectro de EDS. 61
- Figura 28. (a) Imagem em campo claro de uma colônia de carbo-nitretos (área circundada A) no aço Nb-Cr-Mo pós-laminado (b) e (c) Imagens em campo escuro centrado de diferentes precipitados e anexados aos padrões de difração respectivos (d) Microanálise do precipitado mostrado na figura 5(c)

- mostrando picos de Nb e Ti. 62
- Figura 29. (a) Imagem em campo claro de precipitados finos no aço Nb-Cr-Mo (b) Imagem em campo escuro dos precipitados (c) Padrão de difração de área selecionada 63
- Figura 30. (a) Subestrutura de células na amostra do aço Nb-Cr-Mo-V. (b) Ampliação do grão alongado apresentando medidas das células do seu interior. 64
- Figura 31. (a) Figura de difração em grão de ferrita do aço Nb-Cr-Mo-V que apresenta concentração de discordâncias. (b) Campo claro do grão ferrítico mostrando as discordâncias. (c) Campo escuro da mesma região mostrando os precipitados, obtido após seleção de área do padrão de difração. 64
- Figura 32. Imagem em campo claro da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo-V. AM (fases escuras) alongados (A) e massivos (B). 65
- Figura 33. Fração volumétrica das fases para os três tipos de aço Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V. 66
- Figura 34. Curvas de resfriamento e taxas médias de resfriamento para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V resfriado (a) ao ar, (b) ao óleo e (c) a água. 68
- Figura 35. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao ar calmo ($1,5^{\circ}\text{C/s}$). Verificam-se as fases de ferrita poligonal, sendo que alguns grãos de ferrita apresentam precipitação interna, bainita e o constituinte AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 35). Ataque Nital 2%. 71
- Figura 36. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao ar calmo ($1,5^{\circ}\text{C/s}$). Verificam-se grãos de ferrita poligonal, bainita e AM basicamente massivo e muitas vezes associado a grãos de bainita. Ataque Nital 2%. 72
- Figura 37. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao óleo (30°C/s). Verificam-se as fases de ferrita poligonal, bainita e o AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 37). O aço Nb-Cr-Mo-V apresenta também matensita em sua microestrutura. Ataque Nital 2%. 73
- Figura 38. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento ao óleo (30°C/s). Verificam-se grãos de ferrita poligonal, bainita

- e AM alongado e massivo e muitas vezes associado a grãos de bainita. Ataque Nital 2%. 74
- Figura 39. Micrografias em MO dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento a água (115°C/s). Verificam-se as fases de ferrita, bainita, martensita e o AM é identificado com o auxílio do MEV (Figura 39). Ataque Nital 2%. 75
- Figura 40. Micrografias em MEV dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo, Nb-Cr-Mo-V após resfriamento a água (115°C/s). Verificam-se grãos de ferrita, bainita, martensita e AM alongado e massivo. Ataque Nital 2%. 76
- Figura 41. Observação no MET da microestrutura do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar (1,5°C/s) : AM - constituinte austenita retida-martensita, B - bainita, F – ferrita 78
- Figura 42. Grão de bainita com fases escuras, que aparentam ser o constituinte AM, no contorno de grão do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar (1,5°C/s). 79
- Figura 43. (a) Grão de bainita no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar (1,5°C/s). O grão de ferrita adjacente possui várias discordâncias e a ponta do grão de bainita apresenta uma partícula de AM alongado. 79
- Figura 44. Imagem em campo claro mostrando (a) constituinte AM massivo (b) região de grão de ferrita com precipitados associados a discordâncias no aço Nb-Cr-Mo resfriado ao ar. 80
- Figura 45. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s). Grãos envoltos a constituintes AM com características geométricas. 80
- Figura 46. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado ao óleo (30°C/s) com subestruturas diferentes no interior do AM. Uma delas apresenta-se parcialmente decomposta internamente (A), já a outra parece apresentar martensita maclada no seu interior (B). 81
- Figura 47. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado a água (115°C/s). Observa-se ferrita acicular. 82
- Figura 48. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo resfriado a água (115°C/s). Podem ser vistos grãos de martensita. 82
- Figura 49. Microestrutura vista em MET do aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar (1,5°C/s). Observam-se grãos poligonais e constituintes AM massivos em pontos triplos de contorno de grão. 83

- Figura 50. (a) Contornos de grão isócrinos (setas) e AM localizado em ponto triplo de grão no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar, (b) AM no interior do grão e precipitados e associados a discordâncias e (c) EDS de precipitado. 84
- Figura 51. Fase escura com uma subestrutura interna visível no aço Nb-Cr-Mo-V resfriado ao ar. A fase parece ser um AM em fase de decomposição. 85
- Figura 52. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado ao ar (1,5°C/s). 86
- Figura 53. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado ao óleo (30°C/s). 86
- Figura 54. Comparação entre as frações volumétricas das fases para cada tipo de aço resfriado a água (115°C/s). 87
- Figura 55. Mapeamento das frações volumétricas das fases obtidas em cada ciclo térmico para os três aços: Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V. 87
- Figura 56. Comparação entre os valores de Dureza Rockwell B (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V os após aplicação dos ciclos térmicos ao ar calmo (1,5°C), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 89
- Figura 57. Dureza Rockwell (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos ao ar calmo (1,5°C/s) ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 90
- Figura 58. Microdureza (HV₁₀₀) para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V separado para cada taxa de resfriamento aplicada: ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 91
- Figura 59. Microdureza (HV₁₀₀) para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V separado para cada taxa de resfriamento aplicada: ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 92
- Figura 60. Tamanho de grão(μm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V para cada ciclo térmico aplicado. 93
- Figura 61. Comparação geral entre tamanhos de grão(μm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos com resfriamento ao ar (1,5°C/s), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 96
- Figura 62. Tamanho de grão medido dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V na condição de pós-laminados e após tratamentos térmicos (PL – pós-laminado, AR – ar calmo, OL – óleo, AG – água). 97
- Figura 63. Limite de escoamento estimado (MPa) versus condição dos aços

estudados neste trabalho (PL – pós-laminado, AR – ar calmo, OL – óleo, AG – água) [39]. 97

Figura 64. Comparação geral entre as frações volumétricas das fases obtidas nos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos. 99

Figura 65. Microdureza HV_{100} para os aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminados e após aplicação dos ciclos térmicos com resfriamento ao ar ($1,5^{\circ}\text{C/s}$), ao óleo (30°C/s) e a água (115°C/s). 100

Lista de tabelas

Tabela 1. Composição química (% em peso) de 4 aços ARBL microligados para avaliação de fatores microestruturais [20].	29
Tabela 2. Composição química dos aços X70 estudados no trabalho de Hwang et al. [22].	32
Tabela 3. Exemplos de composições químicas para geração de curvas CCT por modelamento matemático [23].	35
Tabela 4. Composição química dos aços API5LX80 (% em peso).	41
Tabela 5. Especificação de composição química para os aços X80 dado pela norma API5L (% em peso) [29].	42
Tabela 6. Propriedades mecânicas dos aços API5LX80 estudados nesse trabalho.	44
Tabela 7. Especificação para chapas e tubos de aços API5LX80 pela norma API5L [29].	45
Tabela 8. Dureza Rockwell (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminação	66
Tabela 9. Microdureza Vickers (HV_{100}) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminação	67
Tabela 10. Tamanho de grão dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V pós-laminado	67
Tabela 11. Média das taxas de resfriamento obtidas para os ensaios realizados nas amostras de aço APIX80 em três meios diferentes: ar, óleo e água.	69
Tabela 12. Dureza Rockwell B (HR_B) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V aplicação dos ciclos térmicos.	89
Tabela 13 - Microdureza Vickers dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V aplicação dos ciclos térmicos.	91
Tabela 14. Tamanho de grão (μm) dos aços Nb-Cr, Nb-Cr-Mo e Nb-Cr-Mo-V após aplicação dos ciclos térmicos	92