

Leonardo Miranda Nunes

**Desenvolvimento de Aço Microligado para
a Produção de Vergalhões Nervurados**

Dissertação de Mestrado

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

Orientador: Roberto Ribeiro de Avillez

Rio de Janeiro, outubro de 2009

Leonardo Miranda Nunes

Desenvolvimento de Aço Micoligado para a Produção de Vergalhões Nervurados

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

Dr. Roberto Ribeiro de Avillez

Orientador

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Dr. Maurício de Jesus Monteiro

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Dr. Marcus Venícius Soares Pereira

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Dr. André Luiz Vasconcellos da Costa e Silva

Universidade Federal Fluminense - UFF

Profº José Eugênio Leal

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

Rio de Janeiro, 08 de abril de 2009

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

Leonardo Miranda Nunes

Graduou-se em Engenharia Metalúrgica na PUC-Rio em agosto de 2000. Trabalha desde setembro de 2000 na GERDAU Aços Longos S.A. na área da qualidade atuando como engenheiro de processos em aciaria e laminação.

Ficha Catalográfica

Nunes, Leonardo Miranda

Desenvolvimento de aço microligado para a produção de vergalhões nervurados / Leonardo Miranda Nunes ; orientador: Roberto Ribeiro de Avillez. – 2009.

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

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

Inclui bibliografia

1. Engenharia de materiais – Teses. 2. Vergalhão. 3. Laminação. 4. Aço microligado. 5. Construção civil. I. Avillez, Roberto Ribeiro de. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia de Materiais. III. Título.

CDD: 620.11

Para minha esposa Dayana, meus colegas e amigos Mauricio Scal, Rafaella Ribeiro e Ricardo Marra, meus professores Roberto Avillez e Ivani Bott, meu amigo e professor Sidnei Paciornik e para meus pais, Lerenó e Cleide, que me incentivaram a estudar por toda vida sem nunca parar e sempre me deram muito mais do que precisei.

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus pela graça de poder realizar o mestrado e ainda por colocar as melhores pessoas ao longo destes dois anos de estudo, tanto professores quanto colegas.

Agradeço a minha esposa Dayana, pelo amor, dedicação e paciência ao longo dos últimos dois anos.

Agradeço a meu amigo e colega de trabalho Mauricio Scal pela dedicação nas diversas revisões, cobranças, orientações e horas de trabalho na obtenção dos resultados. Sem ele seria impossível ter realizado todos os experimentos e análises apresentadas.

Agradeço a minha amiga e colega Rafaella Ribeiro, pelo incentivo e apoio a todo o momento.

Agradeço aos professores Sidnei Paciornik e Ivani Bott pela excelente preparação das aulas, didática, apoio e ajuda mesmo fora dos horários de aula.

Agradeço ao meu orientador e professor Roberto Avillez, que sem dúvida foi um dos grandes responsáveis pela conclusão deste trabalho e de todo o mestrado, sempre com as orientações certas, bom humor e disponibilidade.

Agradeço a Gerdau Aços Longos S.A..

Agradeço muito aos meus pais Lereno e Cleide, que sempre me incentivaram e apoiaram em todos os desafios.

Resumo

Nunes, Leonardo Miranda; Avillez, Roberto Ribeiro. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a produção de vergalhões nervurados**. Rio de Janeiro, 2009. 74p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

O desenvolvimento de um aço microligado para a produção de vergalhões nervurados, busca atender a modernização das estruturas de concreto armado e a industrialização na construção civil que solicitam novos desenvolvimentos nas técnicas de construção e nos materiais aplicados. As barras de aço nervuradas são um dos principais produtos empregados na produção de peças e estruturas de concreto armado sendo usadas largamente por todo o mundo. A otimização da aplicação final, a necessidade de manter baixos custos de produção e atender a combinação de alta resistência com grande ductilidade em um material com características de soldabilidade destinados a armaduras de concreto armado, se tornou um grande desafio para os produtores de vergalhões para a construção civil. Aplicando a tecnologia desenvolvida ao longo dos últimos 50 anos, este trabalho oferece a alternativa de se empregar aços microligados ao vanádio e nióbio para a produção em laminadores de alta produção de rolos de vergalhões capazes de atender a indústria da construção civil nos mais rigorosos atributos solicitados. Os experimentos foram realizados em escala industrial testando aços com faixa de 0,14% a 0,20% de vanádio e até 0,04% de nióbio. Os resultados atendem as normas mais exigentes no mercado mundial.

Palavras-chave

Engenharia de Materiais; Vergalhão; Laminação; Aço Microligado; Construção Civil

Abstract

Nunes, Leonardo Miranda; Avillez, Roberto Ribeiro (Advisor). **Development of Microalloyed Steel for the Production of Rebar**. Rio de Janeiro, 2009. 74p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia de Materiais, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The development of microalloyed steel for the production of reinforcement bars (rebar) seeks to achieve the modernization of reinforced concrete structures and streamline industrialization in civil construction that demands new developments in techniques and applied materials. Rebar is one of the main products used in the production of reinforced concrete all over the world. The optimization of the final application and the necessity to keep production low costs while attempting to combine high resistance with great ductility in a material with weldability characteristics, became a great challenge for the producers of rebars. Applying the technology developed throughout the last 50 years, this work offers the alternative of using vanadium and niobium microalloyed steel to produce large quantities of rebars in rolling mills. Upon completion these rebar are used in coils capable of meeting the most rigorous demands of the civil construction industry. The experiments made in an industrial environment, applied steels with 0.14% to 0.20% of vanadium and up to 0.04% of niobium. The results met the most demanding standards in the world-wide market.

Keywords

Materials Engineering; Reinforcement Bar; Rolling Mill; Microalloyed Steel; Civil Construction

Sumário

Sumário	8
Lista de Fotos	10
Lista de Gráficos	11
Lista de Ilustrações	13
Lista de Tabelas	14
1 Introdução	15
2 Revisão Bibliográfica	21
2.1. O Concreto Armado	21
2.2. O Vergalhão e Suas Especificações	22
2.3. Processo de produção do vergalhão	25
2.4. Barras de Vergalhão com Alta Resistência	29
2.5. Aços Microligados	33
2.6. Soldabilidade	39
2.7. Custo de ligas	41
3 Métodos Experimentais	43
3.1. Processo de Produção dos Lotes Experimentais	43
3.2. Amostragem de Composição Química	47
3.3. Amostragem para Ensaio de Tração e Dobramento	47
3.4. Ensaio de Tração e Dobramento	48
3.5. Avaliação de Soldabilidade	48
3.6. Metalografia e Microscopia	49
3.7. Primeiro Experimento	49
3.8. Segundo Experimento	50
4 Resultados	51
4.1. Primeiro Experimento	51

4.2. Segundo Experimento	53
5 Discussão	58
5.1. Precipitação do V e Nb	58
5.2. Primeiro Experimento	60
5.3. Segundo experimento	62
5.4. Comparação com resultados históricos	63
6 Conclusão	69
7 Referência Bibliográfica	70
Anexo	72

Lista de Fotos

Foto 1: Barras quadradas torcidas. Aplicada atualmente em decoração na produção de ornatos para portões, grades, etc. [11] [12]	16
Foto 2: Armaduras de vergalhão e estruturas em concreto armado.	22
Foto 3: Barras nervuradas (vergalhão) para reforço de estruturas de concreto.	22
Foto 4: Endireitamento por roletes.	28
Foto 5: Alimentação de máquina de corte e dobra. [13]	28
Foto 6: Máquina de montagem de corte e dobra e montagem de coluna por processo de soldagem.	29
Foto 7: Seção transversal de vergalhão de aço microligado ao vanádio. Ataque Nital 2%	54
Foto 8: Detalhe da solda de um fio de 4,2 mm com aço 0,10%C em uma barra de 8 mm com aço 0,23 %C e 0,22 %V.	61
Foto 9: Região da solda no diâmetro nominal de 8,00 mm, mostrando a variação microestrutural e respectivas microdurezas.	62
Foto 10: Seção transversal de vergalhão 10 mm com têmpera superficial. Ataque com Nital 2%.	64

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Gráfico apresentando a relação do aumento de limite de escoamento e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]	30
Gráfico 2: Gráfico apresentando a relação do aumento de limite de resistência e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]	31
Gráfico 3: Gráfico apresentando a relação do alongamento e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]	31
Gráfico 4: Isotermas de solubilidade do carbonitreto de Nb e nitreto de V.	35
Gráfico 5: Propriedades mecânicas de barra de vergalhão com 40 mm de diâmetro. [1]	36
Gráfico 6: Limite de escoamento em chapas de aço com adição de vanádio e nióbio.[1]	38
Gráfico 7: Efeito da composição química do aço na susceptibilidade à trinca a frio da ZTA de aços de alta resistência e baixa liga. (HSLA).	40
Gráfico 8: Preço relativo de FeV / FeNb ao longo dos últimos anos.	42
Gráfico 9: Limite de escoamento por diâmetro nominal produzido com o aço 10V20.	52
Gráfico 10: Comparação dos resultados de barras de aço com vanádio e barras de aço sem vanádio.	53
Gráfico 11: Variação do %V das amostras retiradas das extremidades dos rolos.	54
Gráfico 12: Resultados das amostras endireitadas.	55
Gráfico 13: Relação entre limite de escoamento e %Nb.	56
Gráfico 14: Relação entre limite de escoamento e % V.	56
Gráfico 15: Relação entre limite de escoamento e % V das amostras obtidas do vergalhão endireitado.	57
Gráfico 16: Curvas de precipitação da fase contendo Nb e V.	58
Gráfico 17: Perfil de temperatura logo após o último conjunto de cilindros de laminação.	59

Gráfico 18: Curva de formação dos precipitados da fase contendo carbonitreto de vanádio e nióbio em relação a fração de massa da fase.	59
Gráfico 19: Gráfico apresentando a comparação entre %Nb + %V.	63
Gráfico 20: Comparação entre LE e LR de barras laminadas a quente no processo de resfriamento convencional e com têmpera superficial.	65
Gráfico 21: Comparação entre alongamento de barras laminadas a quente no processo de resfriamento convencional e com têmpera superficial.	65
Gráfico 22: Influência do manganês em aço para vergalhão.	66
Gráfico 23: Comparativo do limite de escoamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.	67
Gráfico 24: Comparativo da razão entre limite de resistência sobre limite de escoamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.	67
Gráfico 25: Comparativo do alongamento entre o histórico de produção e resultados da corrida com 0,14%V e 0,035%Nb.	68

Lista de Ilustrações

Ilustração 1: Etapas de processo típico de produção de aços longos. [8]	25
Ilustração 2: Cilindros de laminação com canal usinado para produção de barra redonda.	27
Ilustração 3: Tipos mais comuns de transportadores de rolos de vergalhão logo após o processo de laminação.	46

Lista de Tabelas

Tabela 1: Algumas propriedades de vergalhões comercializados na Europa. [1]	24
Tabela 2: Vergalhões laminados a quente comercializados no Brasil. [2,3]	24
Tabela 3: Composição química das amostras retiradas das bobinas de vergalhão.	51
Tabela 4: Composição química dos lotes produzidos com adição de Nb e V.	53