

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DE AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO PARA A PRODUÇÃO DE BARRA  
NERVURADA PARA CONCRETO ARMADO COM CARACTERÍSTICA DE  
SOLDABILIDADE SEGUNDO NORMA ABNT NBR 8965:1985

**Mateus Daroit**

Dissertação para obtenção do Título de Mestre  
em Engenharia

Porto Alegre  
2012

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais

PPGE3M

ESTUDO DE AÇO MICROLIGADO AO VANÁDIO PARA A PRODUÇÃO DE BARRA  
NERVURADA PARA CONCRETO ARMADO COM CARACTERÍSTICA DE  
SOLDABILIDADE SEGUNDO NORMA ABNT NBR 8965:1985

MATEUS DAROIT  
Engenheiro Metalúrgico

Trabalho realizado no Departamento de Metalurgia da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais – PPGE3M, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre  
2012

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração em Ciência dos Materiais, e aprovada em sua forma final, pelo orientador e pela Banca Examinadora do Programa de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Afonso Reguly

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Ronaldo Froehlich  
Prof. Dr. Fabiano Dornelles Ramos  
Prof. Dr. Márcio Levi Kramer de Macedo

Prof. Dr. Telmo Roberto Strohaecker  
Coordenador do PPGE3M

Dedico esta dissertação à minha família

## AGRADECIMENTOS

A Deus que me deu força, saúde e iluminação para enfrentar os desafios e dificuldades inerentes à vida acadêmica.

A minha família, em especial aos meus pais, pela educação e carinho a mim dispensados.

Ao meu orientador Prof. Dr. Afonso Reguly pelo apoio e pelos esclarecimentos prestados durante a execução deste trabalho.

Aos demais professores pelos ensinamentos ministrados ao longo de todo o mestrado.

Aos colegas da Gerdau Riograndense, destacando os engenheiros Raphael Garcia da Silveira e Ricardo Adornes Rodrigues, pela ajuda na condução deste trabalho e Alexander Vilela e Elidiane de Souza Jaques, que me auxiliaram nos procedimentos experimentais.

A todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para a conclusão deste trabalho.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XI
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS .....	XII
RESUMO .....	XIII
ABSTRACT .....	XIV
1.0 INTRODUÇÃO.....	1
2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	3
2.1 Produção do Vergalhão.....	3
2.1.1 Produção do Aço .....	4
2.1.2 Processo de Laminação .....	6
2.2 Especificações do Vergalhão .....	10
2.3 Soldabilidade do Vergalhão.....	14
2.3.1 Composição Química .....	15
2.3.2 Emendas de Vergalhões.....	17
2.4 Mecanismos para Ganho de Resistência.....	18
2.4.1 Transformação Martensítica.....	18
2.4.2 Encruamento .....	22
2.4.3 Endurecimento por Solução Sólida .....	24
2.4.4 Endurecimento por Refino de Grão.....	26
2.4.5 Endurecimento por Precipitação.....	28
2.5 Aços Microligados para Vergalhões.....	29
3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	35
3.1 Produção do Vergalhão.....	35
3.2 Aço Microligado .....	36
3.3 Carbono Equivalente .....	36
3.4 Análise Química .....	37
3.5 Caracterização Microestrutural.....	37
3.6 Ensaio de Tração.....	38
3.7 Ensaio de Dobramento.....	39
4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	41
4.1 Composição Química.....	41
4.2 Carbono Equivalente .....	42
4.3 Caracterização Microestrutural.....	42
4.4 Propriedades Mecânicas .....	45
4.5 Ensaio de Dobramento.....	50
5.0 CONCLUSÕES .....	51
6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	53

7.0	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54
-----	----------------------------------	----

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1	Desenho esquemático da rota de produção do vergalhão em uma planta siderúrgica.....	4
Figura 2.2	Forno elétrico a arco utilizado para a fusão da carga metálica na produção de aço.....	5
Figura 2.3	Forno panela utilizado para o ajuste de composição química e de temperatura na produção de aço.....	5
Figura 2.4	Distribuidor repassando aço para a máquina de lingotamento contínuo realizar a solidificação do aço.....	6
Figura 2.5	Forno de reaquecimento de laminação para tarugos que utiliza como combustível gás natural.....	7
Figura 2.6	Desenho esquemático da conformação exercida pelos cilindros de laminação para reduzirem a seção de um material.....	8
Figura 2.7	Gaiola de laminação com cilindros de laminação com canais usinados com nervuras para a produção de vergalhões.....	8
Figura 2.8	Vergalhão de aço de superfície lisa que atende a categoria CA-25 da norma ABNT NBR 7480.....	11
Figura 2.9	Vergalhão de aço de superfície nervurada que atende a categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480.....	12
Figura 2.10	Vergalhão de aço de superfície nervurada que atende a categoria CA-60 da norma ABNT NBR 7480.....	12
Figura 2.11	Emenda por solda de topo por caldeamento.....	17
Figura 2.12	Emenda por solda de topo com eletrodo.....	17
Figura 2.13	Emenda por solda transpassada com eletrodo.....	17
Figura 2.14	Emenda por solda com barras justapostas com eletrodo.....	18
Figura 2.15	Gráfico da variação da dureza do material em função da distância até a extremidade temperada.....	19



Figura 2.16	Equipamento para realizar têmpera de vergalhões com água em funcionamento em uma laminação.....	21
Figura 2.17	Seção transversal de um vergalhão temperado com água pelo sistema Thermex.....	21
Figura 2.18	Efeito da redução em área no aumento da resistência à tração.....	22
Figura 2.19	Efeito da redução em área na redução do alongamento do aço.....	23
Figura 2.20	Efeito da adição de elementos de liga em curvas tensão-deformação.....	25
Figura 2.21	Ilustração do deslocamento de discordância e alteração do seu movimento ao encontrar um contorno de grão.....	27
Figura 2.22	Diagrama esquemático mostrando a resistência e dureza como função do logaritmo do tempo de envelhecimento a uma temperatura constante.....	29
Figura 2.23	Efeito da temperatura de reaquecimento na solubilidade do vanádio e do nióbio.....	32
Figura 2.24	Força de laminação necessária para conformação de aço microligado ao vanádio e ao nióbio.....	33
Figura 3.1	Máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões para dobramento de 180°.....	40
Figura 4.1	Microestrutura da seção longitudinal do vergalhão. Ataque: Nital 2%. Aumento: 200X.....	43
Figura 4.2	Microestrutura da seção longitudinal do vergalhão. Ataque: Nital 2%. Aumento: 1000X.....	43
Figura 4.3	Microestrutura da seção longitudinal de vergalhão com alto carbono e manganês. Ataque: Nital 2%. Aumento: 200X.....	45
Figura 4.4	Gráfico para comparação dos valores médios de limite de escoamento do vergalhão de aço microligado ao vanádio e do vergalhão de aço alto C e Mn.....	46
Figura 4.5	Gráfico correlacionando limite de escoamento e teor de vanádio para comparação do valor encontrado de limite de escoamento do vergalhão com o encontrado por outros autores.....	47
Figura 4.6	Gráfico para comparação dos valores médios da relação limite de resistência/limite de escoamento do vergalhão de aço microligado ao vanádio e do vergalhão de aço alto C e Mn.....	48

Figura 4.7	Gráfico correlacionando o alongamento e teor de vanádio para comparação do valor encontrado do alongamento do vergalhão com o encontrado por outros autores.....	49
Figura 4.8	Amostras do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio após o ensaio de dobramento.....	50

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Especificações de propriedades mecânicas dos vergalhões definidas na norma ABNT NBR 7480.....	13
Tabela 3.1	Especificação de composição química do aço carbono microligado ao vanádio (% em peso).....	36
Tabela 3.2	Especificação de composição química do aço carbono alto carbono e manganês (% em peso).....	39
Tabela 4.1	Composição química do aço carbono microligado ao vanádio (% em peso).....	41
Tabela 4.2	Comparativo entre valores de composição química do aço carbono microligado ao vanádio e os valores máximos determinados pela norma brasileira ABNT NBR 8965 (% em peso).....	41
Tabela 4.3	Resultado de carbono equivalente do aço microligado ao vanádio e especificação máxima de carbono equivalente determinado pela norma brasileira ABNT NBR 8965.....	42
Tabela 4.4	Resultado do limite de escoamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.....	46
Tabela 4.5	Resultado do limite de resistência do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.....	47
Tabela 4.6	Resultado da relação limite de resistência/limite de escoamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.....	48
Tabela 4.7	Resultado do alongamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.....	49
Tabela 4.8	Resultados das propriedades mecânicas do vergalhão microligado ao vanádio e especificações das mesmas propriedades segundo norma.....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

CE.....	Carbono Equivalente
CA.....	Concreto Armado
Ø.....	Diâmetro
Le.....	Limite de Escoamento
Lr.....	Limite de Resistência
Lr/Le.....	Relação Limite de Resistência/Limite de Escoamento

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um aço microligado ao vanádio para a produção de barras nervuradas para concreto armado (vergalhões) que atenda aos limites de composição química estabelecidos por normas brasileiras para ser considerado soldável. O aço é produzido via aciaria elétrica, dando origem aos tarugos que são laminados em um trem contínuo em diferentes passes de conformação e resfriados ao ar para obtenção do vergalhão. Este por sua vez, atende as propriedades mecânicas estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50. A composição química do aço microligado ao vanádio estabelecida para este vergalhão foi a responsável por garantir o atendimento às propriedades mecânicas e possui valores de elementos químicos abaixo do estabelecido pela norma brasileira ABNT NBR 8965 para que o vergalhão tenha boa soldabilidade. Foram realizadas análises químicas e microestruturais, bem como, ensaios de tração e dobramento. Os resultados obtidos mostraram que o aço microligado ao vanádio atendeu todas as especificações perante as quais foi confrontado, estando apto para a produção de vergalhões a serem utilizados em estruturas de concreto armado. O vanádio foi fundamental para garantir a resistência mecânica do vergalhão, através de mecanismos de endurecimento por precipitação e refino de grão.

## ABSTRACT

This paper presents a vanadium microalloyed steel for the production of reinforced bars (rebars) that meets the chemical composition limits established by Brazilian standards to be considered weldable. Steel is produced via electric furnace, giving rise to billets. It is hot rolled in a rolling mill and cooled in air to obtain the rebar that meets the mechanical properties established by the Brazilian standard ABNT NBR 7480, CA50 category. The chemical composition established of the vanadium microalloyed steel was responsible for ensuring compliance with the mechanical properties. The chemical composition has value below of that was established by the Brazilian standard ABNT NBR 8965 to the rebar have good weldability. Chemical and microstructural analyses were made as well as tensile and bending tests. The results showed that the vanadium microalloyed steel has met all the specifications against which he was confronted, being able to produce rebar to be used in reinforced concrete structures. Vanadium was essential to ensure the mechanical strength of the rebar through the mechanisms of precipitation and grain refinement hardening.

## 1.0 INTRODUÇÃO

A utilização de barras de aço para concreto armado, ou simplesmente vergalhões na indústria da construção civil é realizada há muitos anos e de extrema importância para garantir a resistência mecânica das estruturas de concreto. O uso combinado do vergalhão que garante boa resistência à tração e boa ductilidade e do concreto que garante excelente resistência à compressão é responsável pelo desenvolvimento das grandes construções e soluções de engenharia na indústria da construção civil.

A produção de vergalhões é realizada em sua grande maioria pelo processo de laminação à quente. Suas propriedades mecânicas são garantidas ou pela composição química ou por processos de tratamento térmico ou endurecimento por deformação. Quando a composição química é utilizada para garantir a resistência mecânica do produto, os elementos carbono e manganês são os mais empregados. Elevados teores de carbono e manganês acabam dificultando a soldabilidade do aço e por esta característica ser importante para um vergalhão, menores teores destes elementos são desejados. Inúmeras normas de diferentes países limitam os teores de alguns elementos químicos e, principalmente, limitam o valor de carbono equivalente para conferir a um aço a característica de soldabilidade.

Uma das formas encontradas para obedecer às limitações impostas por normas e garantir a resistência mecânica dos vergalhões é o emprego de elementos microligantes como o vanádio, nióbio e titânio que através dos mecanismos de endurecimento por precipitação e por refino de grão permitem a produção de vergalhões com alta resistência sem alterar sua soldabilidade.

Dentre os elementos microligantes comentados, o vanádio é o mais utilizado na produção de vergalhões, pois oferece a melhor combinação de alta resistência mecânica, boa ductilidade, fácil dobramento e soldagem. A alta solubilidade dos carbonetos e nitretos de vanádio na austenita minimizam o risco de formação de trincas durante o lingotamento contínuo e permite um processo de laminação à quente bastante simples e econômico quando

comparado com outros aços microligados. Além disto, vergalhões de aço microligados ao vanádio não requerem sofisticados sistemas de resfriamento e obtêm microestruturas e propriedades mecânicas desejadas diretamente durante resfriamento ao ar após a laminação. Outra vantagem do vanádio é que ele possui uma afinidade natural com o nitrogênio. Quando há nitrogênio disponível, ocorre a precipitação de nitretos de vanádio resultando na redução de nitrogênio livre em solução sólida que pode contribuir para a fragilização do aço.

O objetivo deste trabalho é apresentar um aço microligado ao vanádio que atenda os limites de composição química estabelecidos pela norma brasileira ABNT NBR 8965 para possuir boa soldabilidade e que atenda os limites de propriedades mecânicas dos vergalhões da categoria CA50 da norma brasileira ABNT NBR 7480.

Primeiramente é apresentada uma descrição do processo de produção do aço via aciaria elétrica e do processo de laminação à quente para a produção de vergalhões. As especificações dos vergalhões e dos limites de composição química para conferir a um aço a característica de soldabilidade por normas brasileiras também são comentadas. Após é apresentada a importância e utilização dos aços microligados e os mecanismos de endurecimento existentes para garantir a resistência mecânica dos vergalhões. A seguir é mostrada toda a metodologia empregada e feita uma discussão dos resultados obtidos, nos quais se pode verificar que o aço microligado ao vanádio estudado para a produção de vergalhões com característica de soldabilidade atendeu todas as especificações perante as quais foi confrontado. O vanádio foi fundamental para garantir a resistência mecânica do vergalhão, através de mecanismos de endurecimento por precipitação e refino de grão.



## 2.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Produção do Vergalhão

O uso combinado de concreto e aço estabeleceu uma nova etapa no desenvolvimento da construção civil. O concreto possui grande resistência a forças de compressão, podendo ser usado na construção de grandes estruturas, mas não resiste a cargas cisalhantes ou trativas. Já o aço é um material versátil que pode ser utilizado de formas diferentes e possui alta resistência à tração, boa ductilidade e tenacidade. A similaridade dos coeficientes de expansão térmica destes dois materiais, a versatilidade de conformação, montagem e baixo custo na construção garantiram o desenvolvimento das aplicações destes dois materiais ao longo da história (NUNES 2009).

Esta estrutura que soma o uso do concreto e do aço, na forma de barras nervuradas para melhorar a aderência delas ao concreto é denominada concreto armado.

O uso de concreto armado é um método de construção rápido e de custo eficaz, e neste tipo de estrutura, a inclusão de barras nervuradas fornece a resistência e estabilidade para o concreto (MILBOURN 2010).

As barras nervuradas para concreto armado são conhecidas comercialmente como vergalhões e são importantes produtos utilizados na construção civil. Sua produção é feita através de processos de conformação, sendo o mais empregado a laminação à quente.

Em escala industrial, a produção de vergalhões é realizada em plantas siderúrgicas, iniciando pelo processo de aciaria para obtenção do aço solidificado que, depois de reaquecido, será laminado para a obtenção das barras nervuradas. A figura 2.1 apresenta um desenho esquemático das etapas de produção do vergalhão em uma indústria siderúrgica.

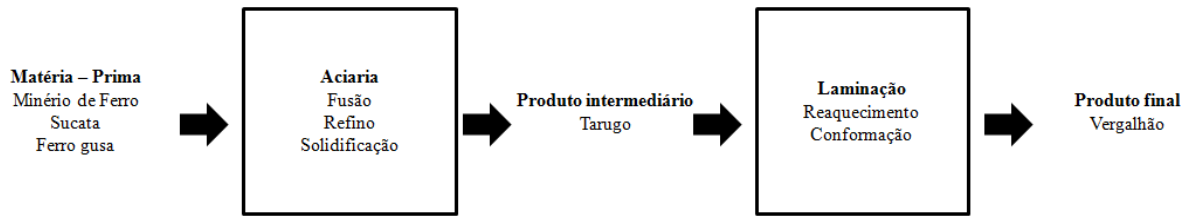


Figura 2.1 Desenho esquemático da rota de produção do vergalhão em uma planta siderúrgica (O AUTOR).

### 2.1.1 Produção do Aço

A produção do aço utilizado na produção de vergalhões é realizada na aciaria. As etapas consistem na fusão da matéria-prima, refino do aço e sua solidificação através do processo de lingotamento contínuo. O aço solidificado é a matéria-prima do processo de laminação e é denominado tarugo.

As plantas siderúrgicas que utilizam como matéria-prima o minério de ferro necessitam realizar a redução deste, normalmente utilizando alto-fornos, mas há diversos outros processos. O produto do alto-forno é o ferro gusa que segue em estado líquido para o refino em conversor a oxigênio no qual a composição química é ajustada. O processo de lingotamento finaliza a etapa de produção do aço. (NUNES 2009).

As plantas siderúrgicas que utilizam como matéria-prima o ferro gusa e a sucata metálica não possuem a etapa de redução do minério de ferro.

A rota de produção mais tradicional deste tipo de planta siderúrgica se inicia pela fusão da carga metálica (sucata e ferro gusa juntos) em forno elétrico a arco, no qual é totalmente fundida e a composição de alguns elementos químicos é corrigida. O aço então é vazado em uma panela e levado para um forno panela para o processo de refino e ajuste de composição química final. Após o forno panela o aço está pronto para o processo de lingotamento contínuo (NUNES 2009).

A figura 2.2 mostra um forno elétrico a arco em funcionamento para a produção de aço a partir de sucata metálica e ferro gusa sólido.



Figura 2.2 Forno elétrico a arco utilizado para a fusão da carga metálica na produção de aço (O AUTOR).

A figura 2.3 mostra um forno panela em operação durante a produção de aço. Nesta etapa do processo ocorre o ajuste da composição química final e acerto de temperatura para o posterior lingotamento do aço.

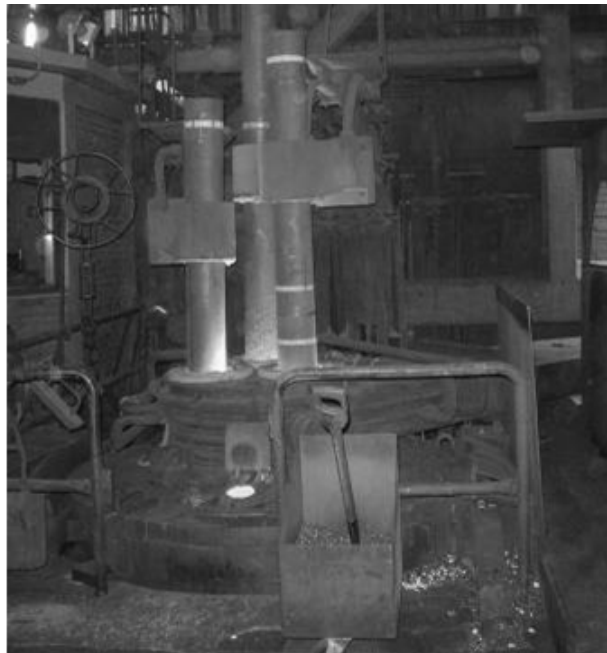


Figura 2.3 Forno panela utilizado para o ajuste de composição química e de temperatura na produção de aço (O AUTOR).

A etapa de solidificação do aço ocorre no equipamento de lingotamento contínuo que se constitui, resumidamente, em uma base para receber uma panela, um distribuidor de aço e de veios de lingotamento. Quando a panela é colocada na base, sua válvula inferior é aberta e o aço líquido é vazado diretamente no distribuidor. O distribuidor possui válvulas em sua parte inferior de acordo com o número de veios da máquina de lingotamento e estas válvulas fazem a distribuição do aço líquido para cada veio, com a vazão podendo ser controlada individualmente por veio. Os veios são constituídos de moldes de cobre refrigerados com água nos quais a solidificação do aço ocorre. Um sistema secundário de refrigeração garante a solidificação final e um equipamento de corte é utilizado para cortar os tarugos no comprimento desejado (NUNES 2009).

A figura 2.4 apresenta um distribuidor de aço repassando o aço líquido para a máquina de lingotamento contínuo. O forno panela está posicionado acima do distribuidor realizando a alimentação do aço para ele.



Figura 2.4 Distribuidor repassando aço para a máquina de lingotamento contínuo realizar a solidificação do aço (O AUTOR).

### 2.1.2 Processo de Laminação

A laminação é um processo de conformação mecânica que tem como objetivo a produção de chapas, barras e perfis existindo como característica uma alta velocidade de operação produzindo grandes volumes com boas tolerâncias dimensionais dos produtos e

melhoria de suas propriedades como ductilidade, resistência mecânica e estrutura superficial (SHAEFFER 2004).

O processo de laminação se inicia no reaquecimento dos tarugos, pois é necessário garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de todo o tarugo pra cada tipo de aço laminado. A figura 2.5 apresenta um modelo de forno de reaquecimento que utiliza como combustível gás natural para realizar o aquecimento de tarugos.



Figura 2.5 Forno de reaquecimento de laminação para tarugos que utiliza como combustível gás natural (O AUTOR).

O processo consiste na conformação mecânica do tarugo através da passagem em sequência entre dois cilindros que giram em sentidos opostos com canais usinados, sendo a distância entre os cilindros menor que a seção transversal da peça em processo. O material é submetido a tensões compressivas resultante da prensagem entre os dois cilindros e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito com a superfície dos canais usinados nos cilindros (NUNES 2009).

A figura 2.6 apresenta um desenho esquemático no qual pode ser vista a conformação realizada pelos cilindros de laminação no material. Percebe-se que a seção do material laminado diminui ao passar pelos cilindros.

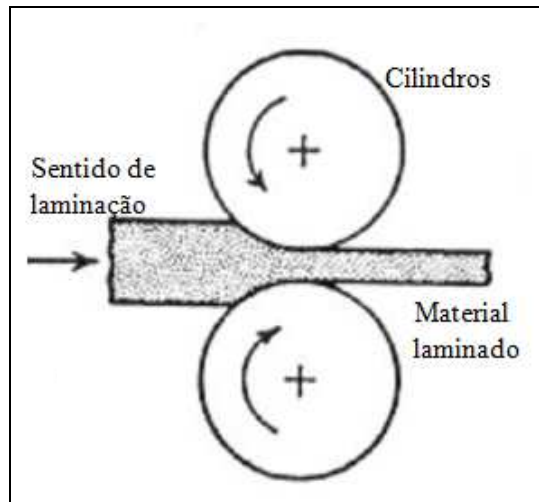


Figura 2.6 Desenho esquemático da conformação exercida pelos cilindros de laminação para reduzirem a seção de um material (O AUTOR).

Na laminação específica de vergalhões, o último passe de laminação possui canais usinados com ranhuras para marcação nas barras das nervuras que auxiliarão a aderência do produto ao concreto. A figura 2.7 apresenta uma gaiola de laminação com dois cilindros com canais nervurados para a produção de vergalhões.

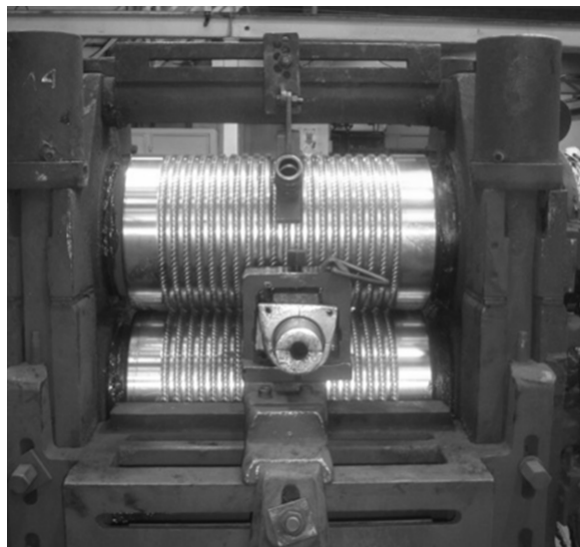


Figura 2.7 Gaiola de laminação com cilindros de laminação com canais usinados com nervuras para a produção de vergalhões (O AUTOR).

O processo de laminação é todo realizado a quente e ao final o produto passa por um processo controlado de resfriamento, de acordo com as características especificadas, tais como: propriedades mecânicas, tamanho de grão e ductilidade (NUNES 2009).

O produto final desejado deve ser homogêneo em sua microestrutura, contendo grãos de pequeno tamanho e com dimensões geométricas as mais precisas possíveis. Para se conseguir este produto final com especificações de homogeneidade e tolerância é necessário um importante controle de todo o processo de fabricação, onde devem ser observadas as deformações que devem ser as maiores possíveis em cada passe de laminação, as temperaturas que devem ser as menores possíveis e a composição química da matéria-prima. Para se conseguir estas condições impostas, alguns limites devem ser respeitados como o atendimento das limitações do equipamento disponível, manutenção e controle da qualidade durante todas as etapas do processo e atendimento a segurança pessoal (ROCHA 2010).

O vergalhão pode ser produzido em barras retas ou em rolo. O processo de produção do vergalhão em barras retas conta com uma tesoura no final do trem de laminação que corta as barras no comprimento múltiplo especificado. Após isto, as barras seguem para o leito de resfriamento para depois serem cortadas a frio no comprimento correto. O processo de produção do vergalhão em rolo conta com um formador de espiras após o último passe de laminação, onde o produto já está em sua forma final. O formador de espiras impõe uma curvatura à barra do vergalhão em alta velocidade, formando espiras que serão coletadas pelo coletor de espiras, criando assim, um rolo de vergalhão laminado à quente (NUNES 2009).

Para o uso em estruturas de concreto armado, o vergalhão em rolo é endireitado em equipamentos que podem usar vários mecanismos diferentes. O mais comum atualmente é o mecanismo de endireitamento por roletes, no qual o rolo é desbobinado no sentido tangencial e a barra é tracionada passando por um conjunto de roletes que realiza pequenos dobramentos em dois sentidos diferentes. Após o endireitamento, o vergalhão pode ser aplicado como barra reta ou pode passar por processo de corte e dobra. Este processo produz várias formas diferentes automaticamente, com alta produtividade, podendo ser combinado com máquinas automáticas de montagem de colunas, estacas, postes, vigas, etc. As máquinas mais atuais de montagem automática usam o processo de soldagem para unir as diversas peças que compõem a estrutura (NUNES 2009).

## 2.2 Especificações do Vergalhão

Os vergalhões produzidos ou comercializados no Brasil devem atender compulsoriamente a todas as características especificadas pela norma brasileira ABNT NBR 7480 de 2007. Esta norma regula todas as características geométricas, de massa linear, comprimento, propriedades mecânicas e de soldabilidade que os vergalhões devem possuir para serem utilizados na construção civil. Como se trata de um elemento estrutural amplamente utilizado, a obrigatoriedade no atendimento às normas é uma garantia para o consumidor que não possui total conhecimento para diferenciar um produto de baixa qualidade e um que atenda as suas necessidades no momento da compra. Esta avaliação somente é possível em laboratórios especializados e normalmente via ensaios destrutivos (NUNES 2009).

A norma brasileira ABNT NBR 7480 estabelece que um vergalhão pode ser produzido em barras ou em fios de aço. Geralmente, as barras de aço possuem diâmetro nominal igual ou superior a 6,30 mm, produzidas exclusivamente pelo processo de laminação à quente sem nenhum outro tipo de deformação mecânica posterior para obter a resistência mecânica especificada. Os fios de aço geralmente possuem diâmetro igual ou inferior a 10 mm, produzidos por processos de conformação mecânica a frio como a trefilação ou laminação de fio-máquina (NUNES 2009).

A norma também diferencia os vergalhões em três categorias distintas em função do seu valor mínimo de limite de escoamento, sendo elas:

- CA-25: Barras de aço lisas com limite de escoamento mínimo de 250 MPa;
- CA-50: Barras de aço nervuradas com limite de escoamento mínimo de 500 MPa;
- CA-60: Fios de aço lisos ou nervurados com limite de escoamento mínimo de 600 MPa;

A sigla CA são as iniciais de concreto armado. A figura 2.8 mostra vergalhões da categoria CA-25. Como pode ser visto, são barras redondas de aço sem nenhum tipo de nervuras.





Figura 2.8 Vergalhão de aço de superfície lisa que atende a categoria CA-25 da norma ABNT NBR 7480 (O AUTOR).

A figura 2.9 apresenta vergalhões da categoria CA-50. São vergalhões nervurados para melhorar a aderência ao concreto e esta categoria é a mais importante e mais utilizada pelo mercado brasileiro da construção civil. Para esta categoria, a norma define que as barras devem ser obrigatoriamente providas de nervuras transversais oblíquas e especifica o ângulo destas nervuras, a altura média das nervuras, a obrigatoriedade de nervuras longitudinais, diametralmente opostas ao longo de toda a barra, caso as nervuras transversais não estejam dispostas de uma forma a impedir o giro da barra na estrutura de concreto armado, o espaçamento entre as nervuras e a abrangência da projeção das nervuras sobre o perímetro nominal da seção da barra.



Figura 2.9 Vergalhão de aço de superfície nervurada que atende a categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480 (O AUTOR).

A figura 2.10 mostra vergalhões da categoria CA-60. São vergalhões de diâmetros nominais menores quando comparados às outras categorias e geralmente produzidos por processo de conformação mecânica a frio. Podem possuir superfície lisa ou nervurada para melhorar a aderência ao concreto.

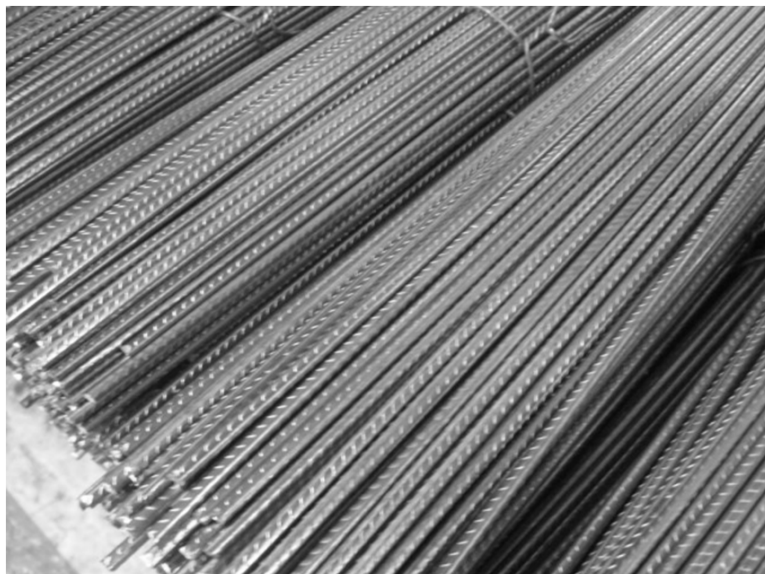


Figura 2.10 Vergalhão de aço de superfície nervurada que atende a categoria CA-60 da norma ABNT NBR 7480 (O AUTOR).

As propriedades mecânicas estabelecidas pela norma ABNT NBR 7480 são limite de escoamento que determina a tensão mínima para iniciar a deformação plástica do material, limite de resistência que determina a tensão mínima para o material sofrer fratura, alongamento, relação limite de resistência/limite de escoamento que mede a capacidade do material sofrer deformação plástica antes de sofrer fratura e ensaio de dobramento. A tabela 2.1 apresenta os valores de propriedades mecânicas estabelecidos para as diferentes categorias de vergalhões definidas pela norma ABNT NBR 7480.

Tabela 2.1 Especificações de propriedades mecânicas dos vergalhões definidas na norma ABNT NBR 7480 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 2007).

Categoria	Valores mínimos			Ensaio de Dobramento a 180°	
	Limite de Escoamento (Le) MPa	Limite de Resistência (Lr) Mpa	Alongamento (%)	Diâmetro do pino (mm)	
				$\varnothing < 20$	$\varnothing \geq 20$
CA-25	250	1,20 x Le	18	2 x $\varnothing$	4 x $\varnothing$
CA-50	500	1,08 x Le	8	3 x $\varnothing$	6 x $\varnothing$
CA-60	600	1,05 x Le	5	5 x $\varnothing$	-

Os atuais métodos utilizados para a produção de vergalhões podem ser classificados em três formas distintas (NIKOLAOU 2004). Estas formas de produção são responsáveis pelo atendimento das propriedades mecânicas estabelecidas por normas.

A primeira consiste em produzir vergalhões resfriados ao ar após o processo de laminação à quente. Para este tipo de vergalhões, modificar sua composição química pode elevar suas propriedades mecânicas, entretanto, para permitir a soldagem, os níveis de carbono e manganês devem ser mantidos baixos e isto necessariamente resulta em baixa resistência. Como alternativa, pequenas adições de fortes formadores de carbonetos como o nióbio (Nb) ou vanádio (V) podem aumentar a resistência sem afetar a soldabilidade (NIKOLAOU 2004).

A segunda consiste em submeter às barras de vergalhões a processos de endurecimento termomecânicos que possuem nomes comerciais como Tempcore ou Thermex. Estes processos consistem em temperar a camada superficial das barras conferindo resistência

e promovendo leve revenimento desta superfície com o calor do centro da própria barra (NIKOLAOU 2004). A camada temperada ao formar martensita é responsável pela resistência mecânica do produto e o núcleo confere a ductilidade necessária para os processos de dobramento e conformação dos vergalhões.

A terceira e última categoria consiste em elevar a resistência dos vergalhões por encruamento resultante de um processo de conformação a frio. Para estas barras, o aumento da deformação resulta no aumento da resistência mecânica. Entretanto, isto reduz muito a ductilidade do material (NIKOLAOU 2004).

No Brasil, o processo de deformação a frio somente é utilizado para a produção de vergalhões da categoria CA-60. O encruamento do material é responsável pelo aumento de resistência. Os outros dois métodos são utilizados na produção de vergalhões da categoria CA-50. O que determina qual dos dois métodos será usado é a presença de equipamentos para tratamento térmico das barras após a laminação à quente. Apesar do método com tratamento térmico empregar composições químicas mais baratas, pois os teores de elementos químicos são mais baixos, o custo da aquisição ou falta de espaço físico impede que muitos laminadores possuam estes equipamentos. Assim, resta a alternativa para atender as propriedades mecânicas solicitadas, de adicionar no aço quantidades importantes de carbono e manganês ou de elementos formadores de carbonetos elevando a resistência mecânica por mecanismos de endurecimento por solução sólida, por precipitação ou refino de grão (NUNES 2009).

### 2.3 Soldabilidade do Vergalhão

Limitações de fabricação e transporte impossibilitam o fornecimento de barras de vergalhões em grandes comprimentos. Em geral, as barras são oferecidas com comprimentos entre 12 e 18 m. Por essa razão, muitos usuários de vergalhões necessitam unir barras e um dos métodos para isto é a solda. A união apropriada de vergalhões é crucial pra a integridade das estruturas de concreto armado (ISSA 2006).

### 2.3.1 Composição Química

Quando o assunto sobre soldagem de vergalhões é discutido, o termo soldabilidade geralmente é mencionado. A soldabilidade é definida em termos da composição química do aço e sua medida principal é o carbono equivalente (ISSA 2006).

As normas de diferentes países restringem os máximos valores de composição química que um aço pode ter para considerá-lo soldável. As restrições estão associadas aos elementos carbono, manganês e silício, por exemplo (NUNES 2009).

A norma brasileira ABNT NBR 7480 ao mencionar as especificações sobre soldabilidade de vergalhões comercializados no Brasil, diz que quando a soldabilidade dos vergalhões é requerida, deve atender às especificações descritas na norma ABNT NBR 6118 de 2004. Esta norma, por sua vez, afirma que para um aço ser considerado soldável, sua composição química deve atender aos limites estabelecidos na ABNT NBR 8965 de 1985. Além disto, explica que as emendas realizadas devem ser ensaiadas por tração e a carga de ruptura mínima deve atender ao estabelecido pela norma ABNT NBR 7480 e o alongamento deve ser tal que não comprometa a ductilidade da armadura.

Os requisitos de composição química estabelecidos pela norma ABNT NBR 8965 para considerar o aço, empregado na produção de vergalhão soldável, estabelecem os seguintes teores máximos de elementos químicos:

- Carbono – 0,35%;
- Manganês – 1,50%;
- Fósforo – 0,05%;
- Enxofre – 0,05%;
- Silício – 0,50%.

A norma também diz que quando for necessária a adição de outros elementos, além dos indicados para atender aos requisitos de propriedades mecânicas, fica a critério do produtor a escolha destes elementos. Os elementos normalmente utilizados são vanádio, nióbio, titânio, cobre, níquel, cromo e molibdênio (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1985).

Além destas limitações de composição química, deve ser atendido o valor máximo de carbono equivalente (CE) que é de 0,55% e é calculado segundo a seguinte equação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1985):

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\% \text{ em peso})$$

O carbono equivalente é uma medida que avalia a composição química de uma liga, de acordo com a influência de cada elemento sobre uma característica que se deseja avaliar, tais como, soldabilidade ou temperabilidade (NUNES 2009).

Para os aços, a soldabilidade é inversamente proporcional a temperabilidade do material, e é uma medida que avalia a susceptibilidade de formação de martensita e ocorrências de trincas a frio em zonas termicamente afetadas (ZTA) devido ao processo de soldagem. Aços que podem ser aquecidos a temperaturas de fusão a partir da temperatura ambiente e serem resfriados ao ar com baixa susceptibilidade a formas trincas são denominados comercialmente como aços soldáveis. Há diversos artigos e normas que apresentam formas de estabelecer a soldabilidade dos aços, mas a mais comum é definindo restrições à composição química. Normalmente são usadas equações que definem o carbono equivalente, onde um valor máximo é especificado para atender os requisitos de soldabilidade em determinada aplicação ou liga (NUNES 2009).

O carbono é extremamente efetivo para aumentar a resistência dos aços, mas ele degrada a soldabilidade. O manganês também é efetivo ao aumentar a resistência dos aços pelo mecanismo de endurecimento por solução sólida, mas degrada a soldabilidade local do material. Por isso, a quantidade de manganês deve ser menor que 2,0% em peso para que esta degradação seja suprimida (YI 2006).

Milbourn (2010) em seu trabalho sobre os benefícios do vanádio na produção de vergalhões de alta resistência sísmica descreve que a soldagem pode levar ao amolecimento da camada de martensita temperada de vergalhões endurecidos por tratamento térmico, mesmo em temperaturas relativamente baixas ( $> 450^{\circ}\text{C}$ ), causando uma redução da resistência e, portanto, só deve ser realizada se os efeitos forem totalmente compreendidos e compensados. Já os vergalhões produzidos com aços microligados com quantidades de elementos como vanádio, nióbio ou titânio adicionadas possuem uma microestrutura homogênea em sua seção transversal (não havendo diferença microestrutural entre núcleo e

superfície), permitindo que estes aços sejam soldados sem perda de resistência e possuam maior resistência ao fogo que os vergalhões temperados.

### 2.3.2 Emendas de Vergalhões

A norma brasileira ABNT NBR 8548 de 1984 define alguns tipos de emendas que podem ser feitas para unir vergalhões através do processo de solda. A figura 2.11 apresenta o primeiro tipo de emenda que é a emenda por solda de topo por caldeamento.



Figura 2.11 Emenda por solda de topo por caldeamento (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1984).

A figura 2.12 mostra o segundo tipo de emenda que é a emenda por solda de topo com eletrodo.



Figura 2.12 Emenda por solda de topo com eletrodo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1984).

A figura 2.13 mostra o terceiro tipo de emenda que é a emenda por solda transpassada com eletrodo.

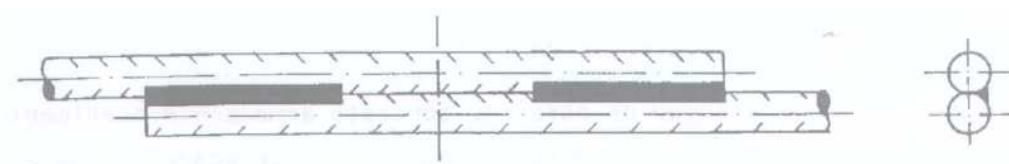


Figura 2.13 Emenda por solda transpassada com eletrodo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1984).

A figura 2.14 mostra o quarto tipo de emenda que é a emenda por solda com barras justapostas com eletrodo.

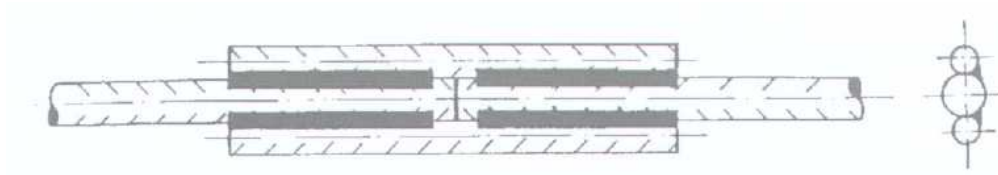


Figura 2.14 Emenda por solda com barras justapostas com eletrodo (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS 1984).

## 2.4 Mecanismos para Ganho de Resistência

O aumento das propriedades de resistência e de escoamento dos aços pode ser obtido de várias formas, entre elas podem-se destacar as transformações martensíticas e os mecanismos de endurecimento por deformação plástica a frio (encruamento), solução sólida, refino de grão e precipitação (endurecimento por partículas de segunda fase).

### 2.4.1 Transformação Martensítica

O tratamento térmico de transformação martensítica (têmpera) consiste em elevar a temperatura de barras de aço carbono acima da temperatura de austenitização, resfriando rapidamente para formação da fase martensita.

Os procedimentos convencionais de tratamento térmico para a produção de aços martensíticos envolvem normalmente o resfriamento rápido e contínuo de uma amostra austenitizada em algum tipo de meio de resfriamento, tal como a água, o óleo ou o ar. As propriedades ótimas de um aço que foi submetido a um processo de têmpera e depois de revenimento podem ser obtidas somente se durante o tratamento térmico por têmpera a amostra conter um elevado teor de martensita. Durante o tratamento de têmpera, é impossível resfriar o material a uma taxa uniforme ao longo de toda a sua extensão. A superfície irá sempre resfriar mais rapidamente do que as regiões no interior. Portanto, a austenita irá se transformar ao longo de uma faixa de temperaturas, produzindo uma possível variação nas microestruturas e propriedades em função da posição no interior de uma amostra (CALLISTER 2002).



O sucesso de um tratamento térmico de aços para produzir uma estrutura predominantemente martensítica ao longo de toda a seção do material depende principalmente de três fatores, que são a temperabilidade de um aço (CALLISTER 2002):

- Composição química;
- Tipo e natureza do meio de resfriamento;
- Tamanho e da forma da amostra.

A figura 2.15 apresenta uma curva esquemática na qual é possível correlacionar a dureza do material após um processo de têmpera e a distância a partir da superfície do material. A extremidade do material temperado é resfriada mais rapidamente e exibe a maior dureza. Para a maioria dos aços, o produto nesta posição é 100% martensita. A taxa de resfriamento diminui em função do aumento da distância da extremidade e a dureza também diminui. Com a diminuição da taxa de resfriamento, mais tempo fica disponível para a difusão do carbono e a formação de uma maior proporção de perlita, mais mole, que pode estar misturada com martensita, bainita e até mesmo ferrita.

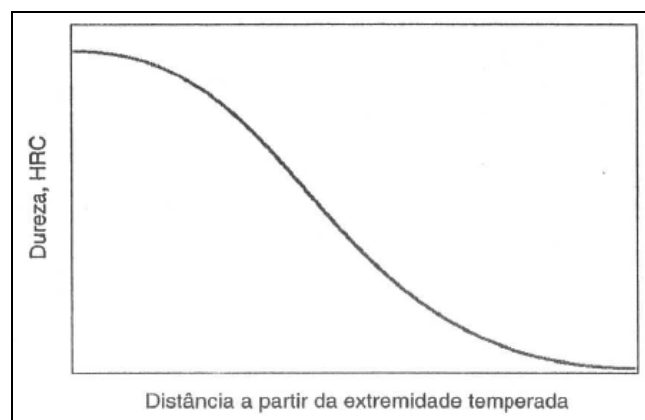


Figura 2.15 Gráfico da variação da dureza do material em função da distância até a extremidade temperada (CALLISTER 2002).

A influência da composição química sobre a habilidade de uma liga de aço em se transformar em martensita em um tratamento térmico específico está relacionada a um parâmetro que é conhecido por temperabilidade. Para cada liga de aço diferente existe uma relação específica entre as propriedades mecânicas e a taxa de resfriamento. Temperabilidade

é um termo usado para descrever a habilidade de uma liga de aço ser endurecida pela formação de martensita como resultado de um tratamento térmico (CALLISTER 2002).

Um procedimento padrão amplamente utilizado para determinar a temperabilidade consiste no ensaio Jominy. Com esse procedimento, à exceção da composição química do aço, todos os demais fatores que podem influenciar a profundidade até a qual uma peça endurece (isto é, o tamanho e a forma da amostra, e o tratamento de têmpera) são mantidos constantes. Um corpo de prova cilíndrico com 24,5 mm de diâmetro e 100 mm de comprimento é austenitizado a uma temperatura predeterminada durante um período de tempo predeterminado. Após a remoção do forno, ele é rapidamente montado sobre um suporte. A extremidade inferior é resfriada rapidamente mediante a ação de um jato de água com vazão e temperaturas específicas. Dessa forma, a taxa de resfriamento assume um valor máximo na extremidade que está sendo temperada, diminuindo em função da posição desde esse ponto e ao longo do comprimento do corpo de prova. Após a peça ter resfriado até a temperatura ambiente, chanfros achatados com 0,4 mm de profundidade são cortados ao longo do comprimento do corpo de prova e são realizadas medidas de dureza nos primeiros 50 mm ao longo de cada chanfro. Uma curva de temperabilidade é produzida quando a dureza é plotada como função da posição a partir da extremidade temperada, como pôde ser vista na figura 2.15 (CALLISTER 2002).

O tratamento térmico de transformação martensítica é utilizado geralmente na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480. Para isto, são utilizados equipamentos instalados após o último passe de laminação que realizam a têmpera do produto com água. Estes equipamentos são conhecidos como Tempcore ou Thermex. A figura 2.16 apresenta um exemplo de equipamento para têmpera de vergalhões em funcionamento.



Figura 2.16 Equipamento para realizar têmpera de vergalhões com água em funcionamento em uma laminação (O AUTOR).

A figura 2.17 apresenta a seção transversal de um vergalhão temperado. Percebem-se as diferentes camadas que correspondem a diferentes fases, sendo a mais externa a martensita e a interna variando entre bainita e perlita até se chegar ao núcleo na qual se encontra ferrita. Isto ocorre, pois o processo é ajustado para que somente ocorra uma têmpera superficial.

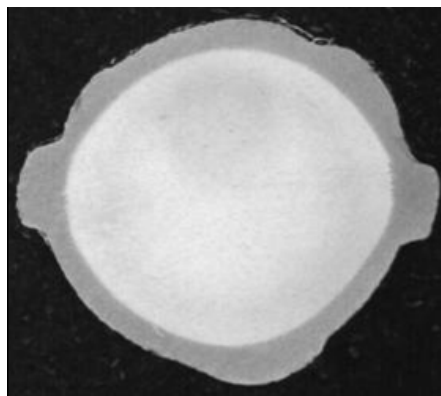


Figura 2.17 Seção transversal de um vergalhão temperado com água pelo sistema Thermex (O AUTOR).

A martensita da superfície do vergalhão é responsável pelo aumento de resistência mecânica enquanto a ductilidade do vergalhão é garantida pelo núcleo que contém perlita e

ferrita. O próprio calor do núcleo do material realiza o revenimento da martensita da superfície.

#### 2.4.2 Encruamento

O encruamento é o fenômeno pelo qual um metal dúctil se torna mais duro e mais resistente quando ele é submetido a uma deformação plástica. Pelo fato de a temperatura em que a deformação é realizada ser abaixo da temperatura de recristalização, também é chamado de trabalho a frio. A maioria dos aços encrua à temperatura ambiente (CALLISTER 2002).

O limite de escoamento e o limite de resistência dos aços aumentam com o trabalho a frio. Entretanto, esse aumento de resistência está ligado a uma diminuição da ductilidade do metal.

A figura 2.18 mostra como a resistência do aço aumenta em função do aumento da deformação a frio do material, representada pela redução em área. Também é possível notar que quanto maior for o teor de carbono, maior será o ganho de resistência.

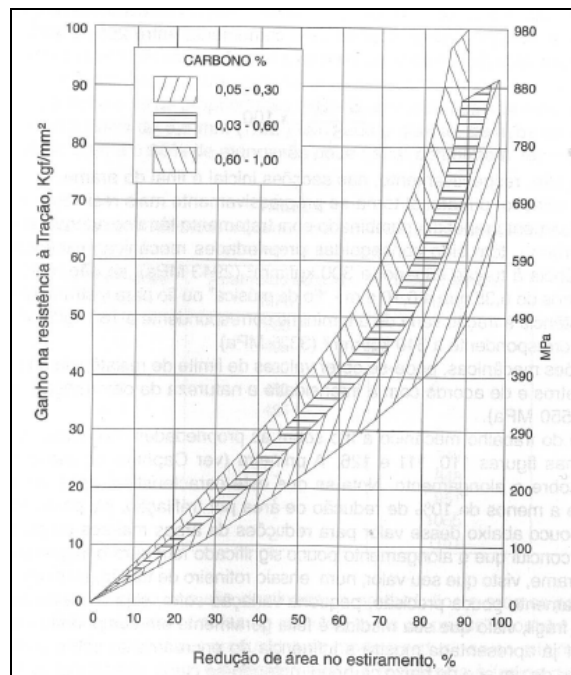


Figura 2.18 Efeito da redução em área no aumento da resistência à tração (CHIAVERINI 2005).

A figura 2.19 mostra como o alongamento do aço reduz com o aumento da deformação a frio do material, representada pela redução em área.

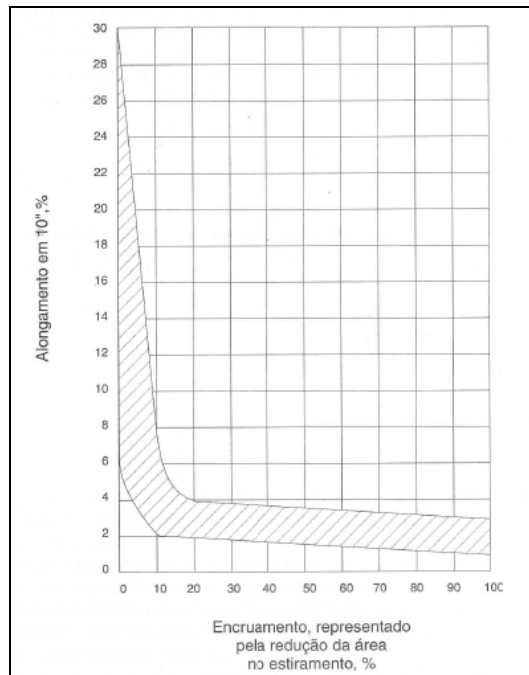


Figura 2.19 Efeito da redução em área na redução do alongamento do aço (CHIAVERINI 2005).

O fenômeno do encruamento pode ser explicado com base em interações entre campos de deformação de discordâncias. A densidade de discordâncias em um metal aumenta com a deformação ou com o encruamento, devido à multiplicação das discordâncias ou à formação de novas discordâncias. Conseqüentemente, a distância média de separação entre as discordâncias diminui, elas são posicionadas mais próximas uma das outras. Na média, as interações de deformação discordância-discordância são repulsivas. O resultado global é tal que o movimento de uma discordância é dificultado pela presença de outras. À medida que a densidade de discordâncias aumenta, essa resistência ao movimento se torna mais pronunciada. Dessa forma, a tensão imposta, necessária para deformar um metal, aumenta com o trabalho a frio (CALLISTER 2002).

Além de modificar as características mecânicas do metal, o encruamento também produz alterações microestruturais. A modificação que mais se destaca é a morfologia dos grãos, que são deformados e alongados na direção da deformação plástica.

Essas propriedades e estruturas podem reverter novamente aos seus estados anteriores ao trabalho a frio mediante um tratamento térmico apropriado. Essa restauração resulta de

dois processos diferentes que ocorrem em temperaturas elevadas, quais sejam: recuperação e recristalização, que podem ser seguidos por um crescimento de grão (CALLISTER 2002).

Durante a recuperação, uma parte da energia interna de deformação armazenada é liberada em virtude do movimento das discordâncias como resultado de uma melhor difusão atômica a temperatura mais elevada. Mesmo após o processo de recuperação estar completo, os grãos ainda se apresentam em um estado de energia de deformação relativamente elevado. A recristalização é o processo de formação de um novo conjunto de grãos livres de deformação e que são equiaxiais, com baixa densidade de discordâncias, e que são característicos das condições que existem antes do processo de trabalho a frio. A força motriz para produzir essa nova estrutura de grão é a diferença que existe entre as energias internas do material submetido à deformação e do material sem deformação. Os novos grãos se constituem na forma de núcleos muito pequenos e crescem até que substituam completamente o seu material de origem, consistindo em processos que envolvem difusão em pequena escala. A recristalização é um processo cuja extensão depende tanto do tempo quanto da temperatura (CALLISTER 2002).

O encruamento é utilizado geralmente na produção de vergalhões da categoria CA-60 da norma ABNT NBR 7480. Estes vergalhões são produzidos por processos de conformação mecânica a frio como a trefilação ou laminação a frio de fio-máquina utilizando cassetes laminadores.

### 2.4.3 Endurecimento por Solução Sólida

O mecanismo de endurecimento por solução sólida aumenta a resistência mecânica dos materiais pela adição de elementos de liga. Os átomos do elemento de liga que são o soluto na solução sólida podem elevar a resistência por serem átomos substitucionais ou intersticiais à matriz do solvente.

Se os átomos do soluto e do solvente forem de tamanhos mais ou menos semelhantes, ou seja, até 15% de diferença no raio atômico, os átomos do soluto irão ocupar posições dos átomos do solvente na rede cristalina. Isto se chama solução sólida substitucional. Se os átomos de soluto forem muito menores que os átomos do solvente, eles ocuparão posições intersticiais na rede do solvente. Carbono, nitrogênio, oxigênio, hidrogênio e boro são elementos que geralmente formam soluções sólidas intersticiais (DIETER 1988).

Os metais com alta pureza são quase sempre mais macios e mais fracos do que as ligas compostas do mesmo metal base. O aumento da concentração de átomos de soluto resulta em um consequente aumento no limite de resistência à tração e no limite de escoamento.

As ligas são mais resistentes que os metais puros, pois os átomos do elemento soluto que entram em solução sólida impõem geralmente deformações da rede cristalina sobre os átomos hospedeiros vizinhos. Interações do campo de deformação da rede cristalina entre as discordâncias e esses átomos de soluto resultam do processo, e, conseqüentemente, o movimento das discordâncias é restringido (CALLISTER 2002).

A resistência ao escorregamento é maior quando os átomos de soluto estão presentes, pois a deformação global da rede deve aumentar para afastar uma discordância destas regiões de interação. Adicionalmente, as mesmas interações de deformação na rede irão existir entre os átomos de soluto e as discordâncias que estão em movimento durante a deformação plástica. Dessa forma, a aplicação de uma maior tensão é necessária para primeiro iniciar e depois dar continuidade à deformação plástica para ligas com solução sólida, de maneira diferente do que ocorre com os metais puros, o que fica evidenciado pelo aumento de resistência e da dureza (CALLISTER 2002).

A figura 2.20 mostra que o resultado da adição de elementos de liga é o aumento da resistência do material em curvas tensão-deformação. Quanto maior for adição do elemento de liga, maior será o aumento dos limites de escoamento e resistência.

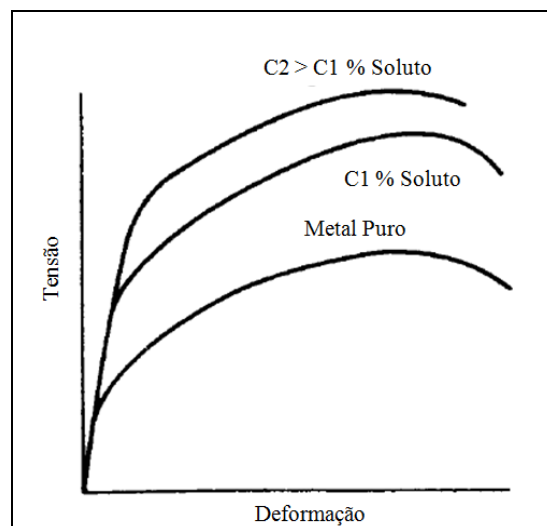


Figura 2.20 Efeito da adição de elementos de liga em curvas tensão-deformação (DIETER 1988).

O mecanismo de encruamento por solução sólida é utilizado geralmente na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, principalmente em linhas de produção que não possuam equipamento para realizar tratamento térmico. Altos teores de carbono, manganês e alguns outros elementos de liga são utilizados para garantir o atendimento às especificações de propriedades mecânicas.

#### 2.4.4 Endurecimento por Refino de Grão

O tamanho dos grãos, ou diâmetro médio do grão, em um metal policristalino influencia as suas propriedades mecânicas. Grãos adjacentes possuem normalmente orientações cristalográficas diferentes e, obviamente, um contorno de grão comum. Durante a deformação plástica, o escorregamento ou movimento de discordâncias deve ter lugar através deste contorno comum e ele atua como uma barreira ao movimento das discordâncias por duas razões (CALLISTER 2002):

- Uma vez que os dois grãos possuem orientações diferentes, uma discordância que atravessa para um grão vizinho terá que alterar sua direção de movimento. Isso se torna mais difícil à medida que a diferença na orientação cristalográfica aumenta.
- A desordenação atômica no interior de uma região de contorno de grão irá resultar em uma descontinuidade de planos de escorregamento de um grão para dentro de outro.

A figura 2.21 ilustra como ocorre o movimento das discordâncias (plano de escorregamento) à medida que elas encontram um contorno de grão e como este se torna e atua como uma barreira à continuação do seu movimento.



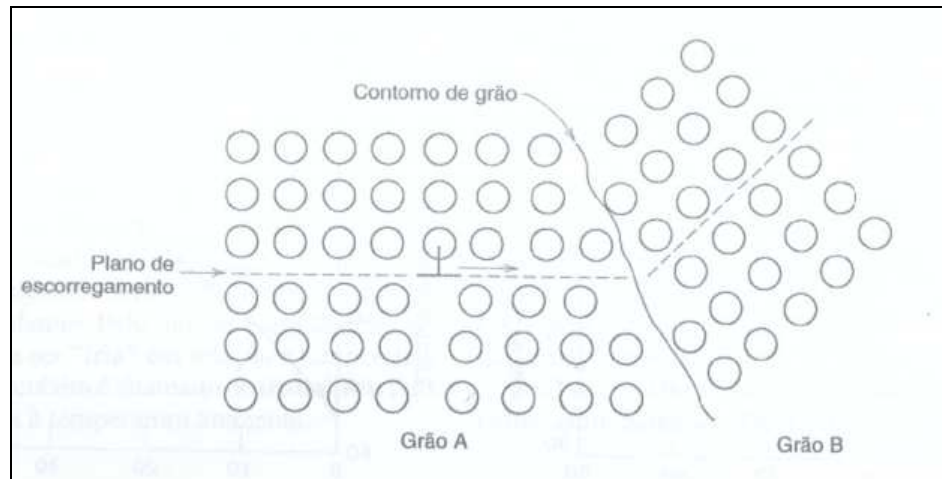


Figura 2.21 Ilustração do deslocamento de discordância e alteração do seu movimento ao encontrar um contorno de grão (CALLISTER 2002).

Um material com granulação fina é mais duro e mais resistente do que um material que possui uma granulação grosseira, uma vez que o primeiro possui uma maior área total de contornos de grãos para dificultar o movimento das discordâncias. Também deve-se mencionar que a redução no tamanho de grão aumenta não somente a resistência, mas também a tenacidade de muitas ligas (CALLISTER 2002).

O limite de escoamento ( $Le$ ) varia de acordo com o tamanho de grão conforme a seguinte equação:

$$Le = \sigma_0 + k_e d^{-1/2}$$

Nessa expressão, conhecida como Equação de *Hall-Petch*,  $d$  representa o diâmetro médio do grão, enquanto  $k_e$  e  $\sigma_0$  são constantes para cada material específico. O tamanho de grão pode ser regulado mediante o ajuste da taxa de solidificação a partir da fase líquida e também por deformação plástica seguida por um tratamento térmico apropriado (CALLISTER 2002).

Gallego (2005) apresenta um estudo no qual determina um modelo empírico para determinar qual mecanismo de endurecimento é o mais significativo para o aumento do limite de escoamento de aços microligados. O autor considera que o mecanismo de endurecimento por refino de grão pode ser considerado o mais importante para o aumento do limite de escoamento e mostra que o refino de grão ferrítico é favorecido pela precipitação de carbonetos e nitretos durante o processamento termomecânico industrial.

O mecanismo de encruamento por refino de grão é utilizado na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, em linhas de produção que não possuam equipamento para realizar tratamento térmico. Além de altos teores de carbono e manganês, elementos refinadores de grão como o nióbio são adicionados para que os vergalhões atendam as propriedades mecânicas especificadas.

#### 2.4.5 Endurecimento por Precipitação

A resistência e a dureza de algumas ligas metálicas podem ser melhoradas pela formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase no interior da fase original. Este processo é conhecido por endurecimento por precipitação. O termo endurecimento por envelhecimento também é usado para designar esse procedimento, pois a resistência se desenvolve ao longo do tempo ou à medida que a liga envelhece (CALLISTER 2002).

O endurecimento por precipitação é produzido por tratamento térmico de uma liga na qual a segunda fase está em solução sólida em elevadas temperaturas, mas que precipita ao ser resfriada ou envelhecida em baixas temperaturas (DIETER 1988).

As partículas de segunda fase acabam restringindo o movimento das discordâncias e assim, elevam a resistência mecânica dos materiais. Quanto mais finas e dispersas, maior será o efeito. No caso dos aços, elementos formadores de segunda fase ligados ao carbono, nitrogênio e oxigênio são geralmente empregados. Estes elementos podem ser o boro, vanádio, titânio ou nióbio, por exemplo.

O comportamento típico de uma liga endurecível por precipitação está representado na figura 2.22. Com o aumento do tempo, a resistência ou a dureza do material aumenta, atinge um valor máximo e finalmente diminui. Essa redução na resistência e na dureza que ocorre após longos períodos de tempo é conhecida por superenvelhecimento (CALLISTER 2002).

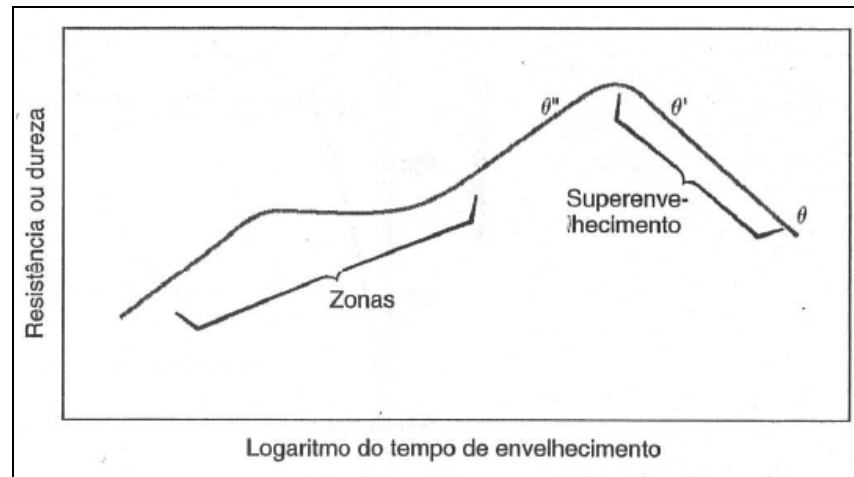


Figura 2.22 Diagrama esquemático mostrando a resistência e dureza como função do logaritmo do tempo de envelhecimento a uma temperatura constante (CALLISTER 2002).

O mecanismo de endurecimento por precipitação também é utilizado na produção de vergalhões da categoria CA-50 da norma ABNT NBR 7480, em linhas de produção que não possuam equipamento para realizar tratamento térmico. Os elementos mais usados para isto são o vanádio, nióbio e titânio.

## 2.5 Aços Microligados para Vergalhões

A adição de elementos microligantes nos aços tem ganho importância nos últimos anos e é muitas vezes uma característica dos aços modernos. O uso de microligantes deve aumentar com o desenvolvimento de novos aços.

O termo microligado significa que a quantidade do elemento químico em questão é bastante baixa e geralmente abaixo de 0,1% em peso. Os elementos microligantes são adicionados intencionalmente para melhorar as propriedades mecânicas dos aços. Além das óbvias diferenças de quantidade adicionada em uma liga entre elementos ligantes e microligantes, também sua diferença em efeitos metalúrgicos é importante. Enquanto elementos ligantes predominantemente afetam a matriz do aço, os elementos microligantes quase sempre influenciam a microestrutura pela precipitação de uma segunda fase (HULKA 2005).

Estas partículas de segunda fase geralmente são carbonetos e nitretos formados pela presença dos elementos microligantes. O uso de carbonetos e nitretos, sozinhos ou combinados, têm influenciado de forma muito forte o desenvolvimento de aços desde a década de 1960 (HULKA 2005).

Neste papel de elementos microligantes três elementos possuem destaque, sendo eles o nióbio, o vanádio e o titânio. O trabalho em conjunto destes três elementos podem produzir aços de alta resistência para as mais diversas aplicações. No estudo desenvolvido por Yi (2009) um aço carbono com limite de escoamento acima de 700 MPa e com um alongamento de aproximadamente 20% foi obtido com a adição de nióbio, titânio e vanádio. Ao variar as temperaturas finais de laminação foi possível obter um aço com 720 MPa de limite de escoamento. Os mecanismos de endurecimento por refino de grão e por precipitação foram responsáveis pelos resultados.

O uso de elementos microligantes em produtos de aços longos como os vergalhões tem sido limitado e grandes oportunidades existem para o desenvolvimento de novos aços adaptados para aplicações específicas e planejados para reduzir os custos de produção e obter equilíbrio entre as propriedades e desempenho do produto (MATLOCK 2009).

Também para aços longos, os elementos microligantes de maior interesse são aqueles fortes formadores de carbonetos e nitretos, como o nióbio, vanádio e titânio. Carbonetos e nitretos contribuem para o ganho de resistência ao serem eles mesmos restrições ao movimento das discordâncias ou ao aumentar a quantidade de interfaces que também restringem o movimento das discordâncias, ou seja, ao serem responsáveis pela ocorrência dos mecanismos de endurecimento por precipitação ou por refino de grão. Ambos os mecanismos são melhorados por tamanhos de grãos pequenos, por isso, a implantação de elementos microligantes em aços longos envolve adaptações na composição e no processo produtivo (MATLOCK 2009).

Grandes avanços na produção de vergalhões têm sido realizados pelo uso de elementos microligantes em seus aços. A solicitação para que os vergalhões possuam soldabilidade, resistência à abalos sísmico e à corrosão forçam este desenvolvimento.

Vergalhões produzidos com aços microligados são desenvolvidos para serem produzidos sem sistemas de resfriamento forçado após a laminação e ainda assim apresentar propriedades uniformes. Para manter uma adequada tenacidade, os vergalhões produzidos

com aços microligados possuem teores de carbono baixos, em torno de 0,3% em peso e podem ser obtidos por diferentes rotas de produção, dependendo das temperaturas de laminação e as tecnologias de resfriamento disponíveis (MATLOCK 2009).

Conforme apresentado por Milbourn (2010) o vanádio é o elemento mais comumente usado da produção de vergalhões, pois oferece a melhor combinação de alta resistência mecânica, boa ductilidade, fácil dobramento e soldagem. O vanádio não requer sofisticados sistemas de resfriamento após a laminação, a microestrutura e as propriedades mecânicas são conseguidas diretamente durante o resfriamento ao ar após a laminação.

Segundo Glodowski (2005) o vanádio é o elemento microligante preferido pela razão da alta solubilidade de seus carbonetos e nitretos quando comparados a outros elementos. Isto permite que o vanádio esteja em solução em temperaturas normais de reaquecimento no processo de laminação e somente precipite durante o resfriamento.

O vanádio eleva as propriedades mecânicas através da precipitação de carbonitretos na ferrita e pelo refinamento de grão. Limites de escoamento mínimos de 400 e 500 MPa são rotineiramente conseguidos e até limites de escoamento superiores a 700 MPa em vergalhões produzidos com aços microligados ao vanádio já foram produzidos com sucesso (MILBOURN 2010).

A importância das propriedades metalúrgicas do vanádio pode ser agrupada em três categorias principais. A primeira consiste na alta solubilidade dos carbonitretos de vanádio na austenita. A segunda, o baixo coeficiente de arraste de soluto do vanádio e por terceiro, a interação positiva do vanádio com o nitrogênio, a qual promove um efetivo uso para o nitrogênio residual no aço (GLODOWSKI 2005). Estas propriedades metalúrgicas serão mais discutidas a seguir.

A solubilidade do carboneto de vanádio é muito alta, sendo facilmente dissolvido na austenita, e somente precipitando no resfriamento do aço, após a ferrita ser formada. O teor de carbono não afeta a solubilidade do vanádio durante o reaquecimento para posterior laminação.

Há benefícios na produção do aço na aciaria em função da alta solubilidade dos carbonitretos de vanádio. Como não há precipitação de carbonitretos nos contornos de grão, ocorre uma minimização das trincas do tarugo durante seu lingotamento (solidificação). O

vanádio também permite que os tarugos possam ser endireitados em temperaturas mais altas após o lingotamento sem que surjam trincas transversais.

A alta solubilidade também permite que sejam aplicadas temperaturas mais baixas de reaquecimento antes da laminação quando se usa aço microligado ao vanádio. Isto é importante, pois reduz custos e tempo do processo de laminação. A figura 2.23 apresenta temperaturas de reaquecimento necessárias para solubilizar várias quantidades diferentes de vanádio e nióbio. Pode-se verificar que grandes quantidades de vanádio são solubilizadas em temperaturas mais baixas quando comparadas com as mesmas quantidades de nióbio.

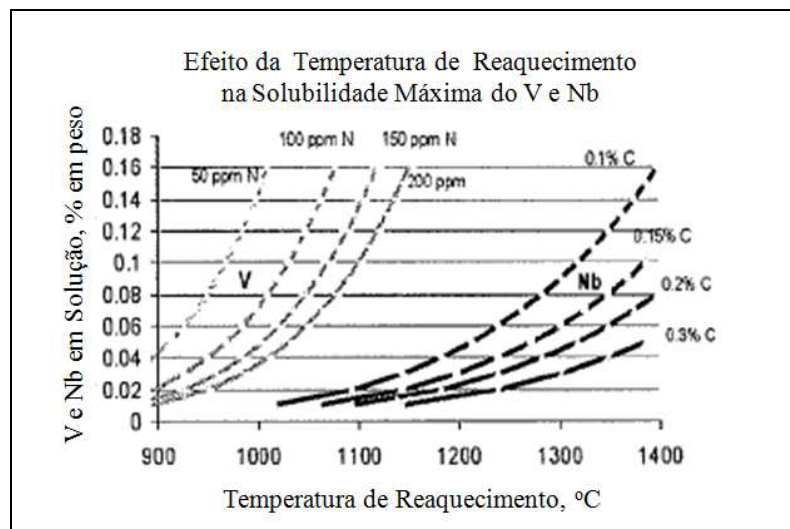


Figura 2.23 Efeito da temperatura de reaquecimento na solubilidade do vanádio e do nióbio (GLODOWSKI 2005).

No processo de laminação, a limitada precipitação de carbonitretos de vanádio na austenita minimiza os esforços necessários para conformação do material, contribuindo para reduzir as forças de laminação e consequente desgaste de motores e equipamentos. A figura 2.24 mostra um comparativo de forças de laminação aplicadas em aços microligados ao vanádio e ao nióbio para idênticas reduções e temperaturas por passe. As forças de laminação necessárias para laminar o aço microligado ao vanádio sempre são mais baixas que aquelas necessárias para laminar o aço microligado ao nióbio, em todos os passes de laminação. Aparentemente, a rápida recristalização da austenita e a ausência de precipitados resultam em uma menor força necessária para conformar o aço microligado ao vanádio.

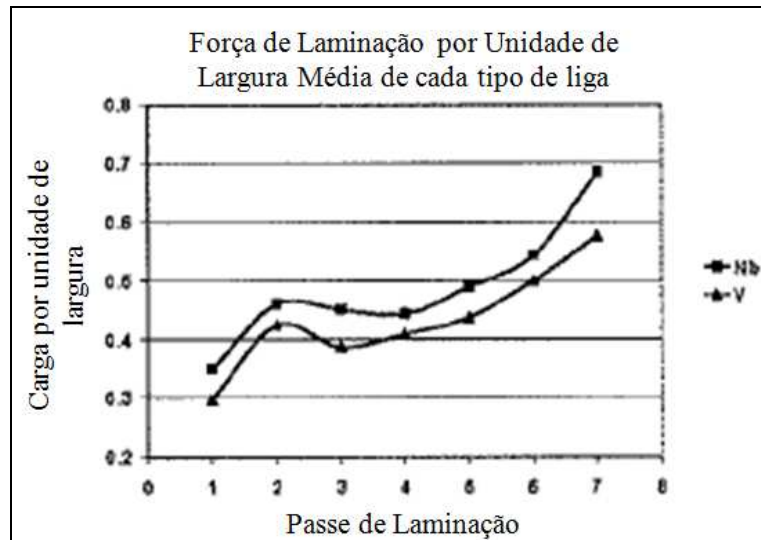


Figura 2.24 Força de laminação necessária para conformação de aço microligado ao vanádio e ao nióbio (GLODOWSKI 2005).

O vanádio possui um relativo baixo coeficiente de arraste de soluto quando comparado com outros elementos microligantes. Este arraste de soluto retarda o mecanismo de recuperação e recristalização da austenita durante os processos termomecânicos.

Um dos benefícios do baixo coeficiente de arraste de soluto do vanádio é permitir o uso do processo de laminação de recristalização controlada para refinamento do grão da austenita. O refinamento do grão da austenita em um aço com vanádio é ativado pela repetida recristalização que ocorre após cada passe de laminação. Isto também promove uma uniformidade do tamanho de grão da superfície ao núcleo do material.

O vanádio possui uma afinidade natural com o nitrogênio. Quando há nitrogênio disponível, ocorre a precipitação de nitretos de vanádio resultando na redução de nitrogênio livre em solução sólida que pode contribuir para a fragilização do aço. A transformação do nitrogênio de um elemento residual não desejado para parte integrante do sistema de ligas promove uma efetiva utilização deste nitrogênio que normalmente existe nos aços. Em particular, os altos níveis de nitrogênio geralmente associados com operações de forno elétrico a arco não são mais um problema, mas se tornam uma vantagem para o aumento de resistência do aço.

Yang (2008) apresenta um estudo sobre vergalhões de alta resistência produzidos com aços microligados ao vanádio e nitrogênio para serem aplicados em construções na China.

Neste trabalho o autor demonstra que o uso combinado de vanádio e nitrogênio foi responsável por ganhos no limite de escoamento dos vergalhões através do mecanismo de endurecimento por precipitação. O vergalhão obtido possui alta ductilidade, exibe uma alta resistência, baixa suscetibilidade ao envelhecimento e boas características de soldabilidade. O aço utilizado possui carbono entre 0,18 e 0,24 % em peso, manganês entre 1,25 e 1,45 % em peso e vanádio entre 0,05 e 0,09 % em peso quando o nitrogênio é residual e vanádio entre 0,02 e 0,04 % em peso quando foi adicionado entre 20 e 40 ppm de nitrogênio a mais que o residual.

Nikolaou (2004) apresenta um comparativo de propriedades mecânicas e microestruturais de vergalhões soldáveis com limite de escoamento mínimo de 500 MPa produzidos por têmpera após a laminação, aço microligado ao vanádio e por encruamento. As propriedades destes vergalhões foram comparadas enquanto aquecidos. Em suas conclusões o autor afirma que o aço microligado ao vanádio ao ser aquecido sofre o coalescimento de seus precipitados, principalmente nos contornos de grãos da ferrita. Isto eleva o limite de escoamento do aço entre as temperaturas de 100 a 400 °C. Entretanto, ocorre uma redução na resistência ao impacto entre as temperaturas de 200 a 600 °C. Também afirma que o aço microligado ao vanádio fornece elevação na resistência do núcleo do vergalhão, algo não possível em vergalhões temperados. O aço utilizado possui carbono de 0,25 % em peso, manganês de 1,22 % em peso e vanádio de 0,075 % em peso, totalizando em um carbono equivalente de 0,53 %.



### 3.0 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

A produção do aço, laminação do vergalhão, coleta de amostras e ensaios foram realizadas em uma planta siderúrgica, em escala industrial. Um lote de aço microligado ao vanádio foi laminado em um trem contínuo com bloco acabador e formador de espiras, originando um vergalhão em rolo de diâmetro nominal de 8 mm. As amostras de vergalhão coletadas foram analisadas em laboratório através de ensaios de composição química, microestrutural, tração e dobramento. Toda a metodologia empregada neste trabalho será descrita a seguir:

#### 3.1 Produção do Vergalhão

O aço empregado neste trabalho teve origem em uma aciaria de forno elétrico a arco, utilizando sucata metálica como matéria-prima principal. O acerto de composição química e adição do elemento microligante ocorreram em um forno panela. Após o forno panela, o aço líquido foi vazado em um lingotamento contínuo produzindo tarugos de seção quadrada com 120 mm de lado. Estes são a matéria-prima empregada para a laminação dos vergalhões.

Os tarugos foram encaminhados para a laminação do vergalhão e reaquecidos em um forno que utiliza gás natural como combustível até a temperatura próxima de 1150 °C. Depois de aquecido, o tarugo foi encaminhado para um trem de laminação com 22 passes de laminação, sendo os últimos 8 passes realizados em um bloco acabador. Este trem de laminação é composto por gaiolas horizontais e verticais que através dos cilindros e canais de laminação conformam o tarugo até obtenção do formato e dimensional requerido para o vergalhão.

Após o bloco acabador e último passe de laminação, o vergalhão já apresenta sua forma final. Neste momento passou por uma zona de resfriamento que utiliza uma caixa de água sobre pressão que tem a capacidade de reduzir a temperatura da barra em processo para uma faixa de temperaturas entre 950°C a 1000°C. O principal objetivo desta zona de

resfriamento é garantir que o vergalhão esteja em uma temperatura adequada para uma boa formação das espiras, pois seguindo esta zona de resfriamento, o vergalhão passa pelo formador de espiras.

O formador de espiras é um equipamento formado por um tubo curvo, pelo qual, a barra de vergalhão passa e adquire o formato de espiras, forma na qual é embalado, transportado e empregado nas diversas aplicações.

O vergalhão, em formato de espiras, cai sobre uma esteira no qual continua resfriando de forma natural, somente sob ao ar, sem nenhum tipo de resfriamento forçado ou controlado.

Após a esteira, o vergalhão segue para o coletor de espiras, sendo posteriormente prensado, amarrado, pesado e identificado.

### 3.2 Aço Microligado

O aço utilizado para a produção do vergalhão é um aço carbono microligado ao vanádio. Sua especificação de composição química pode ser visualizada na tabela 3.1. São apresentados os valores máximos de composição química dos elementos especificados pela norma brasileira ABNT NBR 8965. Estes valores máximos foram utilizados como orientações para a aciaria durante o processo produtivo do aço e estão com valores um pouco abaixo dos valores máximos estipulados pela referida norma. Também é apresentado o valor máximo de vanádio para permitir que este aço seja considerado microligado.

Tabela 3.1 Especificação de composição química do aço carbono microligado ao vanádio (% em peso).

	C	Mn	Si	S	P	V
Máximo	0,30	1,30	0,35	0,035	0,04	0,10

### 3.3 Carbono Equivalente

O carbono equivalente (CE) é parâmetro fundamental para determinar que o aço para a produção de vergalhão possui característica de soldabilidade. Conforme a norma brasileira ABNT NBR 8965, o carbono equivalente deve ser calculado como apresentado na equação 1.

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} \quad (\% \text{ em peso}) \quad \text{Equação 1}$$

O carbono equivalente do aço estudado foi calculado utilizando os valores dos elementos químicos obtidos no ensaio de composição química.

### 3.4 Análise Química

As amostras para análise de composição química foram retiradas em diversos pontos durante a fabricação do aço na aciaria. As medições foram realizadas no forno elétrico, durante a fusão da matéria-prima, no forno panela, antes e após a adição das diferentes ligas metálicas e por fim, medições no distribuidor, que constituem nos valores de aprovação final do aço antes de sua solidificação.

Os resultados de composição química apresentados neste trabalho foram obtidos diretamente de amostras de vergalhões. Foi obtida uma média simples de três análises realizadas através de espectroscopia de emissão óptica.

### 3.5 Caracterização Microestrutural

Para a caracterização microestrutural do vergalhão, amostras do produto final laminado foram coletadas, cortadas em pequenos pedaços e embutidas para análise da seção longitudinal. Depois de embutidas, as amostras foram lixadas e polidas em feltro com pasta de diamante.

Para a revelação da microestrutura foi realizado ataque na superfície polida com reagente Nital 2%. A aquisição de imagens das microestruturas foi feita com auxílio de um microscópio óptico OLYMPUS BX60 acoplado a uma câmera digital e um sistema de aquisição por imagens por computador.

A baixa ampliação possível com microscópio óptico não permite a visualização dos precipitados de vanádio responsáveis pelo endurecimento, sendo necessária a utilização de um microscópio eletrônico de transmissão para visualização de tais precipitados. Entretanto, foi possível comparar o refinamento da estrutura do vergalhão microligado ao vanádio com a estrutura de um vergalhão com alto carbono e manganês produzido nas mesmas condições e

que não é microligado ao vanádio. A especificação de composição química deste aço alto carbono e alto manganês é apresentada na tabela 3.2 no item 3.6 deste trabalho. Através desta comparação foi possível perceber que, além dos precipitados de vanádio, o refinamento de grão por ele proporcionado foi importante para o atendimento às propriedades mecânicas demandadas a um vergalhão.

O tamanho de grão do vergalhão foi determinado nas amostras polidas e atacadas com Nital 2% e com o uso de um software comercial analisador de imagens LEICA, através da técnica de cálculo de área dos grãos seguindo a norma ASTM E112 – 95 (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS 1995).

### 3.6 Ensaio de Tração

Os ensaios de tração foram conduzidos à temperatura ambiente em uma máquina de ensaios EMIC-DL 10.000 com capacidade de aplicação de carga de 10 t. Amostras foram retiradas das espiras de vergalhão após a finalização do processo de laminação e resfriamento do produto. Ao todo, foram ensaiados 30 corpos de prova do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

Por ser um produto em rolo, as amostras passaram por um processo de endireitamento realizado de forma manual, no qual é submetida a menor deformação plástica possível para evitar alterações nos resultados de propriedades mecânicas por encruamento do material.

Após o endireitamento, as amostras foram cortadas em um comprimento de 500 mm e marcadas a cada 80 mm para determinar o alongamento após a ruptura. A temperatura e umidade relativa do ar do laboratório de ensaios são monitoradas e mantidas dentro de limites especificados para não comprometerem os resultados.

Através do ensaio de tração foram obtidos resultados de limite de escoamento, limite de resistência, alongamento após ruptura e relação limite de resistência/escoamento. Os resultados foram comparados às especificações estabelecidas pela norma brasileira ABNT NBR 7480.

Os resultados médios de limite de escoamento e relação limite de resistência/escoamento do vergalhão microligado ao vanádio foram comparados com os resultados médios de 30 amostras destas propriedades de vergalhões de aço alto carbono e

manganês normalmente produzidos nas mesmas condições e de mesmo diâmetro nominal que o vergalhão deste trabalho. A especificação de composição química deste aço alto carbono e manganês e que não é microligado ao vanádio pode ser visualizada na tabela 3.2.

Tabela 3.2 Especificação de composição química do aço carbono alto carbono e manganês (% em peso).

	C	Mn	Si	S	P
Máximo	0,40	1,20	0,15	0,065	0,065
Mínimo	0,45	1,35	0,30	-	-

O vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio pode ser um substituo a este vergalhão produzido com aço alto carbono e manganês, que é um produto já consolidado no mercado, e os usuários não devem sentir diferenças significativas ao trabalhar com este novo produto microligado ao vanádio.

Por último, os resultados de limite de escoamento e alongamento também foram comparados com resultados apresentados por Milbourn (2010). Em seu trabalho sobre os benefícios do vanádio na produção de vergalhões de alta resistência sísmica, o autor apresenta gráficos com valores de limite de escoamento e alongamento confrontados com teores de vanádio em aços desenvolvidos por vários outros trabalhos.

### 3.7 Ensaio de Dobramento

Os ensaios de dobramento foram realizados em amostras do vergalhão em uma máquina de dobramento elétrica. Aplicou-se dobramento no material com suas extremidades livres e se utilizou um pino de diâmetro igual a duas vezes o diâmetro nominal do vergalhão. Após o dobramento de 180°, a região que sofreu deformação trativa foi observada a olho nu, sem auxílio de qualquer tipo de lentes ou lupas de aumento e não poderia apresentar qualquer tipo de fissuras, trincas ou defeitos superficiais. Ao todo, foram ensaiadas 15 amostras do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

A figura 3.1 apresenta uma modelo de máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões prontas para serem ensaiadas. A máquina utilizada nos ensaios deste trabalho é bastante semelhante a esta apresentada.

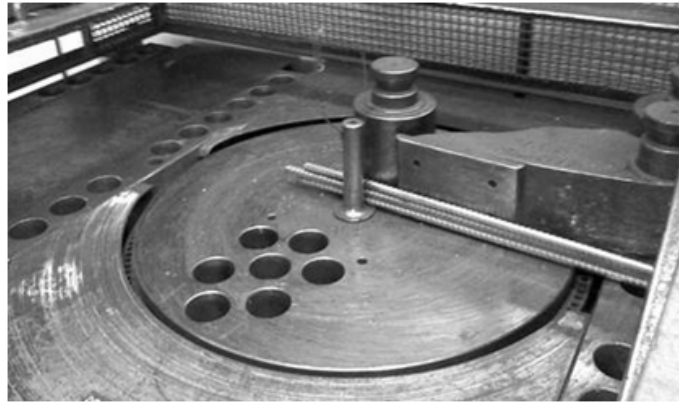


Figura 3.1 Máquina de dobramento elétrica com amostras de vergalhões para dobramento de  $180^\circ$ .

## 4.0 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados e discutidos os resultados obtidos em todos os ensaios realizados nos vergalhões produzidos com o aço microligado ao vanádio.

### 4.1 Composição Química

O aço utilizado neste trabalho foi um aço carbono microligado ao vanádio, cuja composição química média é apresentada na tabela 4.1. São mostrados os resultados dos elementos especificados pela norma brasileira ABNT NBR 8965, além do elemento vanádio e ferro.

Tabela 4.1 Composição química do aço carbono microligado ao vanádio (% em peso).

C	Mn	Si	S	P	V	Fe
0,27	1,20	0,20	0,021	0,012	0,091	97,7

Para que este aço seja considerado passível de ser soldado pela norma brasileira ABNT NBR 8965, é preciso que os elementos carbono (C), manganês (Mn), silício (Si), enxofre (S), fósforo (P) apresentem valores abaixo do especificado. Na tabela 4.2 pode ser visualizado o comparativo entre os valores especificados pela norma e os valores dos mesmos elementos no aço deste trabalho.

Tabela 4.2 Comparativo entre valores de composição química do aço carbono microligado ao vanádio e os valores máximos determinados pela norma brasileira ABNT NBR 8965 (% em peso).

	C	Mn	Si	S	P
Valor máximo da norma	0,35	1,50	0,50	0,050	0,050
Valor do aço utilizado	0,27	1,20	0,20	0,021	0,012

Todos os elementos do aço utilizado estão abaixo dos limites máximos especificados pela norma. Este é o primeiro critério atendido para considerá-lo passível de ser soldado pela norma brasileira.

Também cabe ressaltar que o valor de vanádio do aço de 0,091% em peso está abaixo de 0,1%, portanto, o aço pode ser considerado microligado ao vanádio.

#### 4.2 Carbono Equivalente

O carbono equivalente do aço microligado ao vanádio foi calculado utilizando a equação apresentada no item 3.3. Este valor calculado foi comparado com o valor máximo de carbono equivalente determinado pela norma brasileira ABNT NBR 8965. Esta comparação pode ser visualizada na tabela 4.3.

Tabela 4.3 Resultado de carbono equivalente do aço microligado ao vanádio e especificação máxima de carbono equivalente determinado pela norma brasileira ABNT NBR 8965.

Carbono equivalente do aço microligado ao vanádio (%)	Carbono equivalente máximo determinado por norma (%)
0,52	0,55

Pode-se verificar que o valor de carbono equivalente do aço está abaixo do máximo especificado por norma. Este é o segundo critério atendido para considerá-lo passível de ser soldado pela norma brasileira.

Ao término da análise da composição química e carbono equivalente já é possível verificar que o aço carbono microligado ao vanádio atende aos requisitos estabelecidos por norma para produção de vergalhões soldáveis.

#### 4.3 Caracterização Microestrutural

A seguir são apresentadas microestruturas de seções longitudinais do vergalhão produzido com o aço ao carbono microligado ao vanádio após o processo de laminação.



A figura 4.1 mostra a microestrutura longitudinal do vergalhão com uma ampliação de 200X em microscópio óptico. É possível visualizar que a estrutura é constituída por grãos de ferrita e colônias de perlita extremamente refinada com tamanho de grão da ordem de 11,2 a 66,7  $\mu\text{m}^2$  ou ASTM superior a 10.

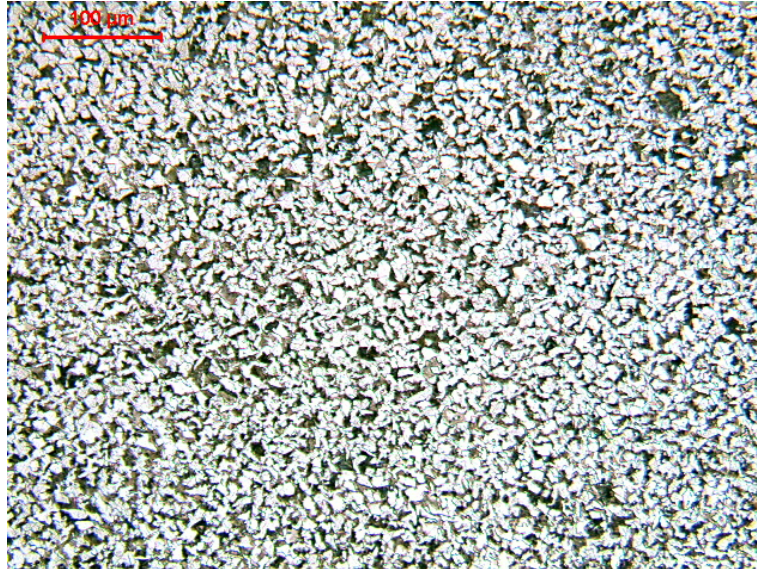


Figura 4.1 Microestrutura da seção longitudinal do vergalhão. Ataque: Nital 2%.

A figura 4.2 apresenta a mesma microestrutura, mas com uma ampliação maior de 1000X em microscópio óptico.

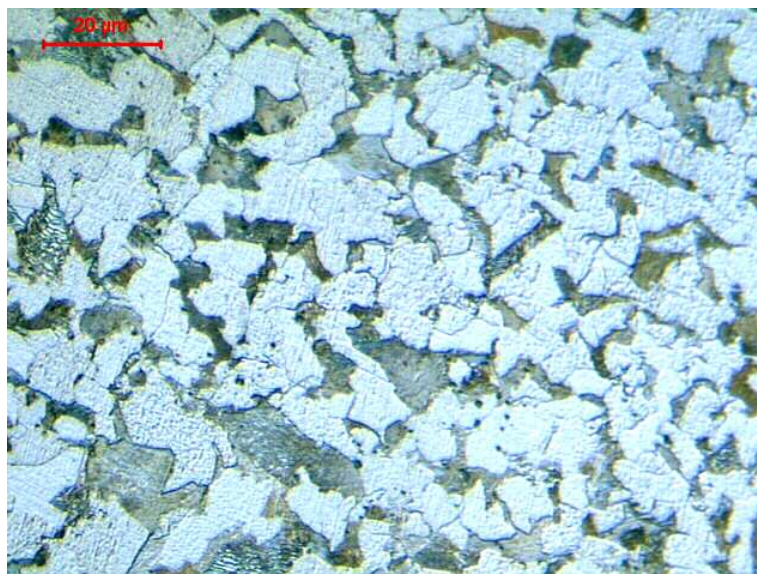


Figura 4.2 Microestrutura da seção longitudinal do vergalhão. Ataque: Nital 2%.

A baixa ampliação máxima do microscópio óptico impede a visualização dos precipitados de vanádio. As microestruturas apresentadas nas figuras 4.1 e 4.2 representam a característica de toda a seção do vergalhão, tanto núcleo como superfície. Esta homogeneidade microestrutural é responsável, também, por uma homogeneidade das propriedades mecânicas do produto.

A alta solubilidade do vanádio na austenita faz com que estes precipitados que são carbonetos e nitretos de vanádio se formem durante o resfriamento do produto, no momento da transformação da austenita para ferrita. Estes precipitados, ao agirem como barreiras físicas para o movimento de discordâncias elevam as propriedades mecânicas do material, sendo este o mecanismo de endurecimento por precipitação. Quanto mais finos e dispersos estes precipitados, mais elevado será o ganho de resistência. Os carbonetos e nitretos de vanádio apresentam estrutura cristalina cúbica de face centrada.

Outro mecanismo de endurecimento responsável pela resistência mecânica do vergalhão e que também está associada à presença do vanádio na composição química do aço é o refino de grão. Apesar de não ser o principal mecanismo de endurecimento que o vanádio proporciona, ele também auxilia no ganho de propriedades mecânicas. O vanádio não retarda o processo de recuperação e recristalização da austenita em cada passe de laminação pela sua alta solubilidade, permitindo o refinamento da austenita durante o processo produtivo do vergalhão e a precipitação do vanádio em carbonetos e nitretos durante a laminação favorece o refino de grão ferrítico.

A figura 4.3 apresenta a microestrutura de um vergalhão produzido nas mesmas condições e mesmo laminador que o vergalhão produzido com o aço carbono microligado ao vanádio. A única diferença entre os dois é a composição química. Este vergalhão da figura 4.3 possui composição química que atende a especificação apresentada na tabela 3.2, não sendo microligado ao vanádio. Ao comparar esta microestrutura com a apresentada na figura 4.1 do vergalhão microligado ao vanádio, pode-se perceber que possui tamanho de grão maior, ASTM 7 a 9, ou seja, tamanho de grão entre 208 e 913  $\mu\text{m}^2$ . Assim, foi verificado que o vanádio também agiu como um refinador de grão. Também é possível perceber que a quantidade de perlita é maior devido ao mais elevado teor de carbono e carbono equivalente de 0,66%.

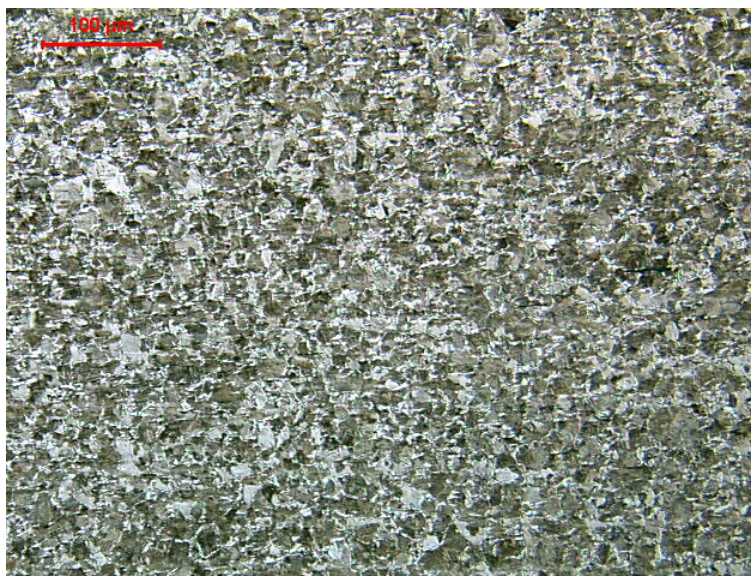


Figura 4.3 Microestrutura da seção longitudinal de vergalhão com alto carbono e manganês. Ataque: Nital 2%.

Por fim, vale destacar que toda a microestrutura do vergalhão de aço microligado ao vanádio foi obtida sem nenhum tipo ou sistema de resfriamento forçado após a laminação. Isto mostra que o vanádio fornece a resistência necessária ao produto diretamente durante o resfriamento ao ar após a laminação.

#### 4.4 Propriedades Mecânicas

O limite de escoamento é a propriedade que determina a máxima resistência que um vergalhão pode sofrer em serviço. O vergalhão em uma estrutura de concreto deve possuir resistência adequada para suportar as cargas as quais será submetido.

A tabela 4.4 apresenta o valor médio de limite de escoamento ( $L_e$ ) encontrado e seu desvio padrão. Comparando o valor médio encontrado com a especificação mínima da norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50 para esta propriedade que é de 500 MPa, percebe-se que o vergalhão produzido com o aço carbono microligado ao vanádio atendeu a especificação.

Tabela 4.4 Resultado do limite de escoamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

Limite de escoamento médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
544	+/- 10,9

A figura 4.4 apresenta o gráfico que compara os valores médios de limite de escoamento do vergalhão produzido com o aço microligado ao vanádio e dos vergalhões produzido com aço alto carbono e manganês normalmente produzidos no mesmo laminador dos testes. Ambos os valores médios estão acima da especificação da norma brasileira e apresentam valores próximos, não sendo perceptíveis alterações durante a aplicação do vergalhão com aço microligado por usuários do vergalhão de aço alto carbono e manganês.

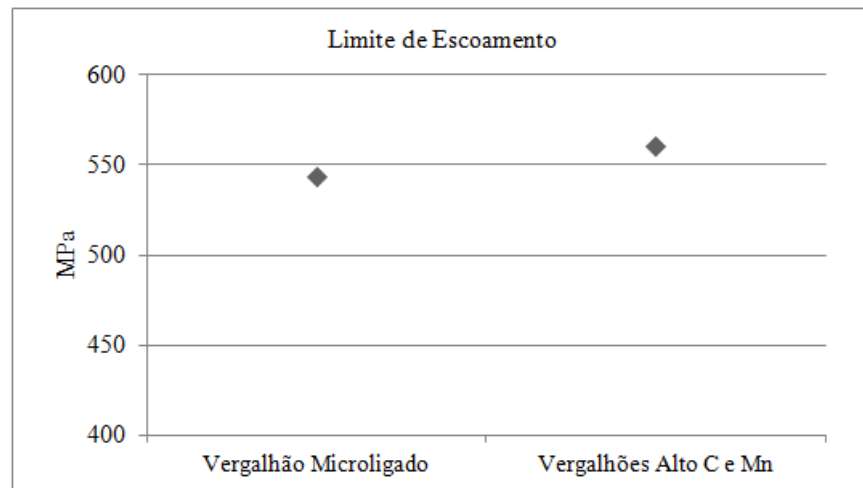


Figura 4.4 Gráfico para comparação dos valores médios de limite de escoamento do vergalhão de aço microligado ao vanádio e do vergalhão de aço alto C e Mn.

A figura 4.5 apresenta o gráfico encontrado em Milbourn (2010) acrescido do ponto de limite de escoamento do vergalhão produzido com aço microligado deste trabalho (ponto redondo preto). O gráfico correlaciona valores de limite de escoamento de vergalhões produzidos com aço microligado ao vanádio de diferentes autores em função do teor de vanádio. É possível perceber que o valor de limite de escoamento médio encontrado é muito próximo ao encontrado por outros autores.

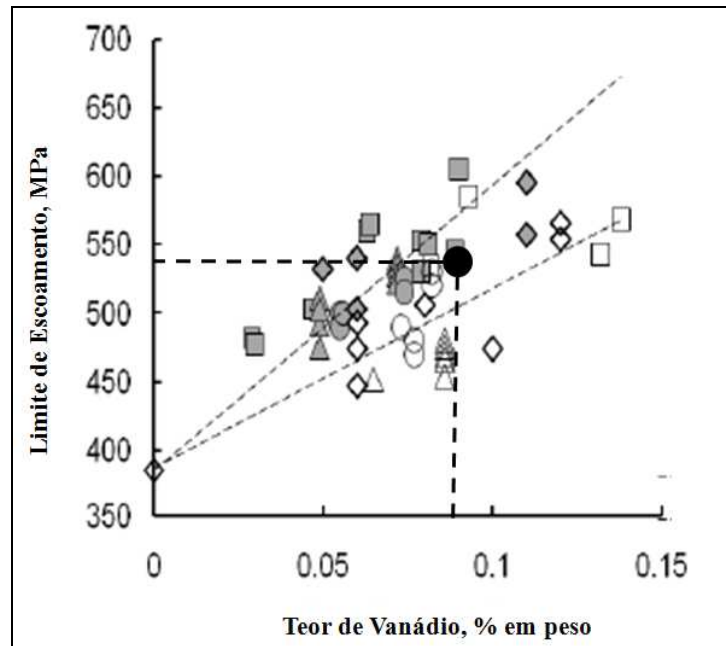


Figura 4.5 Gráfico correlacionando limite de escoamento e teor de vanádio para comparação do valor encontrado de limite de escoamento do vergalhão com o encontrado por outros autores.

A tabela 4.5 apresenta o valor médio de limite de resistência ( $L_r$ ) encontrado e seu desvio padrão. Comparando o valor médio encontrado com a especificação mínima da norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50 para esta propriedade que é de 540 MPa, percebe-se que o vergalhão produzido com o aço carbono microligado ao vanádio atendeu a especificação.

Tabela 4.5 Resultado do limite de resistência do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

Limite de resistência médio (MPa)	Desvio padrão (MPa)
753	+/- 15,3

A relação limite de resistência/limite de escoamento ( $L_r/L_e$ ) do vergalhão é uma medida da capacidade do material em suportar cargas antes de sofrer deformações plásticas e um valor elevado desta propriedade significa uma maior capacidade de absorção de energia antes da falha.

A tabela 4.6 apresenta o valor médio da relação limite de resistência/limite de escoamento ( $L_r/L_e$ ) encontrado e seu desvio padrão. Comparando o valor médio encontrado com a especificação mínima da norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50 para esta propriedade que é de 1,08, percebe-se que o vergalhão produzido com o aço carbono microligado ao vanádio atendeu a especificação.

Tabela 4.6 Resultado da relação limite de resistência/limite de escoamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

Limite de resistência/limite de escoamento médio	Desvio padrão
1,38	+/- 0,03

A figura 4.6 apresenta o gráfico que compara os valores médios da relação limite de resistência/escoamento do vergalhão produzido com o aço microligado ao vanádio e dos vergalhões produzido com aço alto carbono e manganês normalmente produzidos no mesmo laminador dos testes. Ambos os valores médios estão acima da especificação da norma brasileira e bastante elevados, mostrando que a alteração do tipo de aço do vergalhão para um aço microligado continuará fornecendo segurança ao usuário ao absorver grandes cargas antes da ruptura.

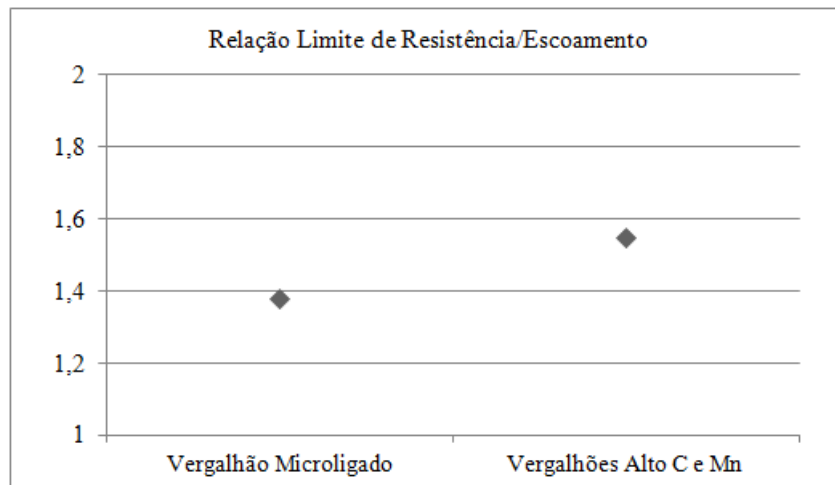


Figura 4.6 Gráfico para comparação dos valores médios da relação limite de resistência/limite de escoamento do vergalhão de aço microligado ao vanádio e do vergalhão de aço alto C e Mn.

O alongamento também é uma medida da capacidade de suportar deformação antes da ruptura. O alongamento está diretamente ligado à ductilidade do material e em geral, há uma relação inversa entre resistência e ductilidade.

A tabela 4.7 apresenta o valor médio do alongamento do material antes da ruptura encontrado e seu desvio padrão. Comparando o valor médio encontrado com a especificação mínima da norma brasileira ABNT NBR 7480, categoria CA50 para esta propriedade que é de 8%, percebe-se que o vergalhão produzido com o aço carbono microligado ao vanádio atendeu a especificação.

Tabela 4.7 Resultado do alongamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio.

Alongamento médio (%)	Desvio padrão (%)
18,1	+/- 1,1

A figura 4.7 apresenta o gráfico encontrado em Milbourn (2010) acrescido do ponto do alongamento do vergalhão produzido com aço microligado deste trabalho (ponto redondo preto). O gráfico correlaciona valores de alongamento de vergalhões produzidos com aço microligado ao vanádio de diferentes autores em função do teor de vanádio. É possível perceber que o valor de alongamento encontrado é superior ao encontrado por outros autores.

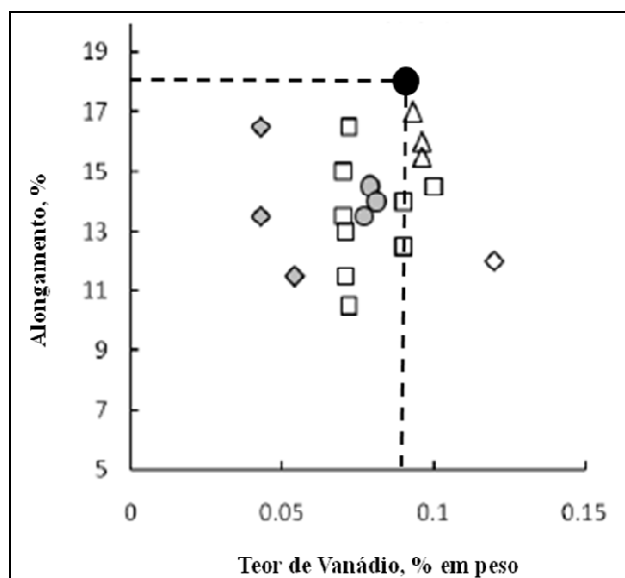


Figura 4.7 Gráfico correlacionando o alongamento e teor de vanádio para comparação do valor encontrado do alongamento do vergalhão com o encontrado por outros autores.

A tabela 4.8 apresenta todos os valores médios de propriedades mecânicas do vergalhão em comparação com o especificado pela norma ABNT NBR 7480, categoria CA50. Como já visto anteriormente, todas as propriedades mecânicas atenderam as especificações mínimas definidas pela norma. Cabe ressaltar o alto valor médio da relação limite resistência/limite de escoamento ( $L_r/L_e$ ) (27,7% acima do mínimo especificado por norma) por ser a característica que traduz o bom desempenho e segurança da estrutura que utilizará o vergalhão.

Tabela 4.8 Resultados das propriedades mecânicas do vergalhão microligado ao vanádio e especificações das mesmas propriedades segundo norma.

	Valores médios do vergalhão estudado	Especificação ABNT NBR 7480, categoria CA50
Le (MPa)	544	500 (mínimo)
Lr (MPa)	753	540 (mínimo)
Alongamento (%)	18,1	8,0 (mínimo)
Lr/Le	1,38	1,08 (mínimo)

#### 4.5 Ensaio de Dobramento

A figura 4.8 apresenta o resultado dos ensaios de dobramento de 180° realizados em amostras do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio. As 15 amostras ensaiadas não apresentaram qualquer tipo de fissura, trinca ou quebra em sua superfície após dobramento na região tracionada quando observadas a olho nu. Este resultado, em conjunto com os outros já apresentados, comprova a aprovação do vergalhão para utilização em estruturas de concreto armado.



Figura 4.8 Amostras do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio após o ensaio de dobramento.



## 5.0 CONCLUSÕES

Tendo como base a metodologia e os resultados obtidos neste trabalho para a produção de vergalhões com aço carbono microligado ao vanádio com característica de soldabilidade, podem-se tomar as seguintes conclusões:

- O aço microligado ao vanádio utilizado na produção do vergalhão estudado possui valor de carbono equivalente abaixo do valor máximo especificado pela norma brasileira ABNT NBR 8965 para ser considerado soldável;
- O elemento vanádio nos teores especificados neste trabalho foi eficaz na garantia da resistência mecânica do vergalhão. Não foi necessário qualquer tipo de resfriamento controlado após a laminação para obter as propriedades mecânicas desejados no vergalhão;
- Todos os valores de propriedades mecânicas como limite de escoamento, limite de resistência, relação limite de resistência/limite de escoamento e alongamento atenderam os valores mínimos especificados pela norma brasileira ABNT NBR 7480;
- Os valores médios de limite de escoamento e relação limite de resistência/escoamento do vergalhão produzido com aço microligado ao vanádio são semelhantes aos valores médios das mesmas características de vergalhões de aço alto C e Mn produzidos nas mesmas condições e laminador do teste e já consolidados no mercado. Isto garante que para o usuário, a alteração do aço do vergalhão não apresentará diferenças significativas;
- O alto valor médio da relação limite resistência/limite de escoamento ( $L_r/L_e$ ) traduz o bom desempenho e segurança da estrutura que utilizará o vergalhão por assegurar que o mesmo suportará grandes cargas antes de romper;
- O vergalhão não apresentou qualquer tipo de fissura ou quebra na região tracionada durante os ensaios de dobramento.

Todas as conclusões apresentadas acima mostram que o aço carbono microligado ao vanádio utilizado para a produção de vergalhões com característica de soldabilidade segundo a norma ABNT NBR 8965 atendeu todas as especificações perante as quais foi confrontado.

## 6.0 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho pode ser complementado através das seguintes sugestões de trabalhos futuros:

- Realizar diferentes tipos de soldagem de vergalhões produzidos com o aço microligado ao vanádio estudado e avaliar seu comportamento e desempenho.
- Avaliar qual processo de soldagem é o melhor para unir vergalhões produzidos com aços microligados ao vanádio.
- Testar diferentes teores de vanádio no aço, buscando desenvolver um material com custos mais baixos de produção, mas mantendo seu atendimento às propriedades mecânicas.
- Variar o teor de nitrogênio no aço microligado ao vanádio e avaliar o ganho de resistência possível sem fragilizar os vergalhões. Com isto, pode-se comprovar a afinidade do vanádio com o nitrogênio e a formação de nitretos de vanádio que elevam a resistência mecânica dos vergalhões.
- Realizar análises no aço microligado ao vanádio para verificar qual mecanismo de endurecimento é o mais importante para garantir a resistência mecânica do aço.
- Avaliar através de métodos de microscopia eficientes as quantidades de carbonetos e de nitretos de vanádio formados e qual deles é mais importante para garantir a resistência mecânica dos vergalhões.

## 7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM E112**: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7480**: Aço destinado a armaduras para estruturas de concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8965**: Barras de aço CA 42 S com características de soldabilidade destinadas a armaduras para concreto armado – Especificação. Rio de Janeiro, 1985.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8548**: Barras de aço destinadas a armaduras para concreto armado com emenda mecânica ou por solda – Determinação da resistência à tração. Rio de Janeiro, 1984.

CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2002.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

DIETER, G.E. **Mechanical Metallurgy**. SI Metric Edition. McGraw-Hill Book Company, 1988

GALLEGO, J.; KESTENBACH, H. J.; **Estudo Quantitativo dos Mecanismos de Endurecimento em Aços Comerciais Microligados com Vanádio.** Revista Matéria v. 10, n. 3, p. 381-391, 2005.

GLODOWSKI, R.J. **A Review of Vanadium Microalloying in Hot Rolled Steel Sheet Products.** International Seminar 2005 on Application Technologies of Vanadium in Flat-Rolled Steels, 2005

HULKA, K. **Characteristic Features of Titanium, Vanadium and Niobium as Microalloy Additions to Steel.** CBMM, 2005.

ISSA, C.A.; NASR, A. **An Experimental Study of Welded Splices of Reinforcing Bars.** Building and Environment 41, p. 1394-1405, 2006.

MATLOCK, D.K.; SPEER, J.G. **Microalloying Concepts and Application in Long Products.** Materials Science and Technology v. 25, n. 9, p. 1118-1125, 2009.

MILBOURN, D.; YU, L. **Metallurgical Benefits of Vanadium Microalloying in Producing High Strength Seismic Grade Rebar.** Proceedings of International Seminar on Production and Application of High Strength Seismic Grade Rebar Containing Vanadium, 2010.

NIKOLAOU, J.; PAPADIMITRIOU, G.D. **Microstructures and Mechanical Properties after Heating of Reinforcing 500 MPa class Weldable Steels Produced by Various Process (Tempcore, Microalloyed with Vanadium and Work-Hardened).** Construction and Building Materials 18, p. 243-254, 2004.

NUNES, Leonardo Miranda. **Desenvolvimento de Aço Microligado para a Produção de Vergalhão Nervurado.** Dissertação. PUC-RJ, 2009.

ROCHA, A. **Notas de Aula Laminação.** Programa de Mestrado, PPGE3M UFRGS, 2010.

SCHAEFFER, L. **Conformação Mecânica.** 2. ed. Porto Alegre: Imprensa Livre, 2004.

YANG, C.; WANG, Q. **Research, Development and Production of V-N Microalloyed High Strength Rebars for Building in China.** Journal of Iron and Steel Research International 15, p. 81-86, 2008.

YI, H.; DU, L.; WANG, G.; LIU, X. **Development of Nb-V-Ti Hot Rolled High Strength Steel with Fine Ferrite and Precipitation Strengthening.** Journal of Iron and Steel Research International 16, p. 72-77, 2009.

YI, H.; DU, L.; WANG, G.; LIU, X. **Development of a Hot-Rolled Low Carbon Steel with High Yield Strength.** ISIJ International 46, p. 754-758, 2006.