

2 Revisão Bibliográfica

2.1. O Concreto Armado

O concreto armado tem sua origem registrada no século XIX, mas desde a Grécia antiga a combinação de peças de ferro com rochas, mármore e cimentos é conhecida.

Nas construções monumentais gregas de 800 anos antes de Cristo grampos e tarugos de ferro eram usados para manter juntos os grandes blocos de pedra.

Em uma construção de 437 a.C., a combinação de barras de ferro com colunas de pedra sustenta uma cobertura de mármore onde as barras de ferro são submetidas a esforços de tração transferindo o peso para as colunas de pedra. Esta é uma das primeiras construções onde se percebe a combinação de material dúctil com material frágil com o aproveitamento das suas características de ductilidade empregando-o sob esforços de tração.

Ao longo do tempo o desenvolvimento do uso de material moldável que poderia adquirir a forma desejada antes de desenvolver um processo de endurecimento foi se modernizando até a idéia de imergir uma armadura de metal em um molde de cimento com o objetivo de reforçar a estrutura final.

Hoje o concreto é um material cerâmico constituído de basicamente de:

- agregados graúdos: pedras britadas, seixos rolados;
- agregados miúdos: areia, pedregulhos;
- aglomerantes: cimento ou cal;
- água;
- aditivos: corantes, aceleradores, fibras.

O concreto, combinado com armaduras de aço, é o principal material usado na construção civil no mundo.

As armaduras são construídas de barras de aço que normalmente têm nervuras que aumentam a aderência com o concreto, transferindo melhor os esforços submetidos à estrutura. As barras de aço são conhecidas popularmente como “vergalhão”

O vergalhão é uma barra de aço de seção circular que é aplicado como reforço na construção civil em estruturas de concreto armado.

Na aplicação em construção civil, o concreto resiste aos esforços de compressão e o vergalhão aos esforços de tração, mas como as barras de aço são dispostas em vários sentidos, estas também resistem a esforços de torção e flexão.



Foto 2: Armaduras de vergalhão e estruturas em concreto armado.

2.2. O Vergalhão e Suas Especificações



Foto 3: Barras nervuradas (vergalhão) para reforço de estruturas de concreto.

O vergalhão é produzido no Brasil atendendo à norma NBR7480 de forma compulsória, isto é, todo vergalhão empregado no país deve ser certificado por órgãos certificadores e deve atender às especificações da norma passando por

auditorias periódicas tanto do produto quanto do processo de produção. Como se trata de um elemento estrutural amplamente utilizado no Brasil, a obrigatoriedade no atendimento à norma é uma garantia para o consumidor que não tem como fazer a diferenciação entre um produto de baixa qualidade e um vergalhão que atenda às suas necessidades no momento da compra. Esta avaliação somente é possível em laboratórios especializados e normalmente via ensaios destrutivos, por isso a auditoria do processo produtivo também é importante para garantir que todas as barras atendam às especificações da norma.

A norma NBR7480 estabelece os requisitos para encomenda, fabricação e fornecimento de barras e fios de aço destinados a armaduras para estruturas de concreto armado. O vergalhão pode ser então produzido em barras de aço ou em fios de aço. São consideradas barras de aço, os vergalhões com diâmetro nominal de 6,3 mm ou superior, produzido exclusivamente por laminação a quente sem processo posterior de deformação mecânica. Os fios de aço são produtos com diâmetro nominal inferior a 10 mm obtidos a partir dos processos de trefilação ou laminação a frio do fio máquina.

A norma define três tipos de vergalhões, separados pelo valor característico de resistência ao escoamento. São estes:

- CA25: barras de aço lisas (sem nervuras) com escoamento mínimo nominal de 25 kgf/mm²;
- CA50: barras de aço nervuradas com escoamento mínimo nominal de 50 kgf/mm²;
- CA60: fios de aço lisos, nervurados ou entalhados com escoamento mínimo nominal de 60kgf/mm².

Outra característica importante é a relação entre limite de resistência (LR) e limite de escoamento (LE), uma forma usada para garantir um percentual de deformação da estrutura antes do colapso e que indiretamente mede a capacidade da estrutura em sofrer deformação plástica homogênea antes do início do processo de fratura. Normalmente são exigidos valores mínimos de 1,08 a 1,10 para LR/LE, mas algumas normas que especificam vergalhões empregados em construções em áreas com alto risco a terremotos, exigem valores mínimos de 1,25.

O alongamento da barra no ensaio de tração também é uma medida muito usada para especificar vergalhões, e é mais exigente de acordo com o tipo de estrutura e também o risco de terremotos na área onde será empregado.

A norma brasileira também define a geometria das barras nervuradas CA-50 considerando 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 oblíquas não estejam dispostas de uma forma a impedir a rotação da barra na estrutura de concreto armado;
- o espaçamento entre nervuras;
- a abrangência da projeção das nervuras sobre o perímetro nominal da seção da barra.

A norma também define características geométricas para as barras de CA-25 que devem ser obrigatoriamente lisas e fios de CA60, que podem ser lisos, entalhados ou também nervurados. [2]

Outras características vêm ganhando importância e também são requeridas, tais como, a capacidade de soldar as barras de CA-50 sem pré-aquecimento, a capacidade de deformação em dobramentos, a resistência à fadiga e outras mais dependendo da aplicação.

Por exemplo, para garantir que uma barra possa ser trabalhada sem apresentar fissuras ou atingir seu limite na deformação plástica, testes de dobramento e desdobramento são comumente aplicados. Os testes de dobramento são exigidos em várias normas, incluindo a brasileira. [1]

Grau	Limite de escoamento min. (MPa)	Carbono máximo % em peso.	Dobramento 180° em torno de d diâmetros
260S	260	0,15	D
400	400	0,40	5 x d
400S	400	0,22	3 x d
400SE	400	0,15	2 x d
600	600	0,40	6 x d
600S	600	0,22	4 x d

Tabela 1: Algumas propriedades de vergalhões comercializados na Europa. [1]

Grau	Limite de escoamento min. (MPa)	Carbono máximo % em peso.	Dobramento 180° em torno de d diâmetros
CA50	500	Não especificado	4 x d
CA50S	500	0,35	4 x d

Tabela 2: Vergalhões laminados a quente comercializados no Brasil. [2,3]

2.3. Processo de produção do vergalhão

As plantas siderúrgicas são divididas em dois tipos de acordo com seu produto final: Usinas de Aços Planos e Usinas de Aços Longos.

As Usinas de Aços Planos tem seus produtos em forma de chapas laminadas a quente ou a frio e fornecem aço principalmente para indústrias, tais como, por exemplo: indústria automobilística para produção de carrocerias de automóveis; indústria de eletrodomésticos para produção do corpo de geladeiras, fogões, microondas, etc.; indústria de embalagens para produção de latas.

As Usinas de Aços Longos tem seus produtos laminados em canais desenhados nos cilindros de laminação que podem ter formas diferentes. Produzem tanto para a indústria, construtoras e pode chegar a distribuidoras com produtos prontos para venda ao consumidor. Alguns exemplos de produtos são barras redondas para indústria automobilística, perfis estruturais para construtoras, pregos, arames galvanizados e farpados para distribuidoras e os vergalhões para construção civil.

Os vergalhões de barras de aço nervuradas para reforço de estrutura de concreto armado produzidos em plantas siderúrgicas passam por processos tradicionais de produção de aço-carbono como o apresentado na Ilustração 1.

As etapas são basicamente fusão e refino do aço, lingotamento de tarugos e laminação. Alguns vergalhões são trabalhados a frio em etapa posterior à laminação.



Ilustração 1: Etapas de processo típico de produção de aços longos. [8]

2.3.1. Fusão e Refino do Aço

De acordo com o processo inicial, que inclui também o tipo de matéria-prima, as usinas siderúrgicas podem ser classificadas como Usinas Integradas e Usinas Semi-Integradas.

As Usinas Integradas iniciam seu processo na redução do minério de ferro normalmente realizado em 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 LD onde a composição química do aço é ajustada. O processo de lingotamento finaliza a etapa de produção do aço.

As Usinas Semi-integradas não têm a etapa de redução do minério de ferro e sua matéria-prima é ferro gusa sólido, oriundo de Usinas Integradas, e sucata ferrosa, como: aparas de chapas das indústrias automobilísticas, cavacos de usinagem, carros sucata, sucata de obsolescência em geral. A rota de processo mais tradicional se inicia na fusão da carga metálica (sucata junto com o ferro gusa) em forno elétrico a arco de fusão, onde é totalmente fundido e a composição de alguns elementos, por exemplo, fósforo, corrigida. O aço é então vazado em uma panela e levado para o 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.

2.3.2. Lingotamento

O equipamento de lingotamento contínuo se constitui, resumidamente, em uma base para receber uma panela, um distribuidor 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 essas 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 a água onde a solidificação do aço ocorre. Um sistema secundário de refrigeração garante a solidificação final e um sistema de corte forma os tarugos no comprimento desejado.

2.3.3. Laminação

O processo de laminação se inicia no reaquecimento dos tarugos lingotados, pois é necessário garantir uma temperatura específica e homogênea ao longo de toda a peça para cada tipo de aço.

O processo consiste na conformação mecânica do tarugo através da passagem em sequência entre dois cilindros com canais usinados sendo a área 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 o a superfície dos canais usinados nos cilindros. (Ilustração 2)

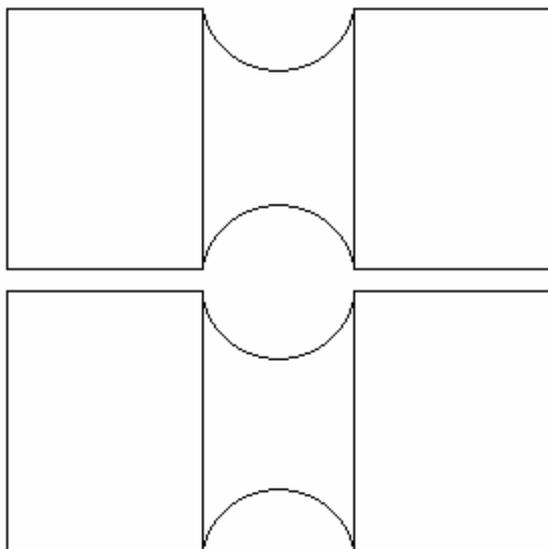


Ilustração 2: Cilindros de laminação com canal usinado para produção de barra redonda.

Este processo 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.

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 em comprimento múltiplo do especificado que seguem para o leito de resfriamento para depois serem cortados 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 de vergalhão em alta

velocidade, formando espiras que serão coletadas pelo Coletor de Espiras criando assim um rolo de vergalhão laminado a quente.

2.3.4. Processo de Corte e Dobra

Para produção de armaduras para 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, onde o rolo é desbobinado no sentido radial e a barra é tracionada passando por um conjunto de roletes realizando pequenos dobramentos em dois sentidos diferentes (Foto 4).



Foto 4: Endireitamento por roletes.

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 armadura.



Foto 5: Alimentação de máquina de corte e dobra. [13]



Foto 6: Máquina de montagem de corte e dobra e montagem de coluna por processo de soldagem.

2.4. Barras de Vergalhão com Alta Resistência

Os vergalhões produzidos no Brasil e consumidos na maioria dos países devem atender a normas que normalmente exigem pelo menos 420 MPa de limite mínimo de escoamento, sendo no Brasil 500 MPa. Os processos mais comuns aplicados atualmente para atender de forma economicamente viável estas solicitações são:

- Encruamento;
- Aumento da resistência por tratamento térmico (resfriamento rápido);
- Aumento da resistência por endurecimento através da redução no tamanho de grão;
- Aumento da resistência por endurecimento por solução sólida;
- Aumento da resistência por endurecimento por precipitação.

2.4.1. Encruamento

O encruamento é um fenômeno segundo o qual um material se torna mais duro e mais resistente quando deformado plasticamente. Este fenômeno também é conhecido como endurecimento por trabalho a frio, pois a temperatura em que ocorre é “fria” se comparada com a temperatura de fusão do material. No caso do aço, este fenômeno ocorre à temperatura ambiente, pois esta é muito menor que a temperatura de fusão absoluta dos aços.

Para quantificar o quanto de encruamento uma barra de aço foi submetida, é comum usar a relação entre a área da seção antes e após o trabalho a frio em termos percentuais. Muitas vezes é conveniente expressar o grau de conformação a frio para alguns tipos de aplicação.

$$\%TF = \left(\frac{A_0 - A_d}{A_0} \right) \times 100$$

Equação 1: Grau de trabalho a frio onde A_0 é a área transversal da barra original, isto é, antes do processo de conformação plástica, e A_d é a área após o processo. [7]

O gráficos (Gráfico 1) e (

Gráfico 2) apresentam a relação do percentual de trabalho a frio com os limites de escoamento e resistência obtidas através de ensaio de tração. Graus de conformação até 20 % resultam em um grande aumento no limite de escoamento e o limite de resistência continua crescendo até graus de deformação em torno de 50 %. Mas como apresenta o (Gráfico 3), o alongamento é influenciado negativamente pelo processo de conformação a frio para as mesmas ligas, impondo limites quando o objetivo é aumentar a resistência e manter a ductilidade do material.

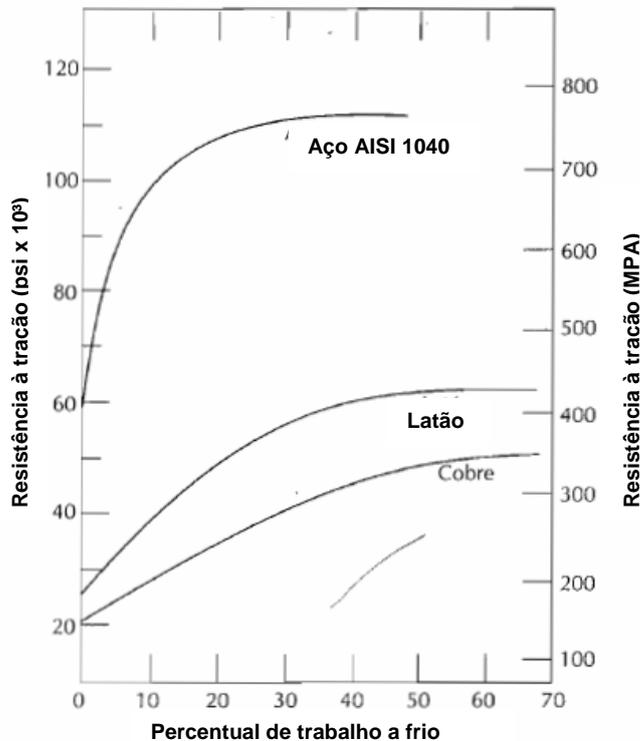


Gráfico 1: Gráfico apresentando a relação do aumento de limite de escoamento e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]

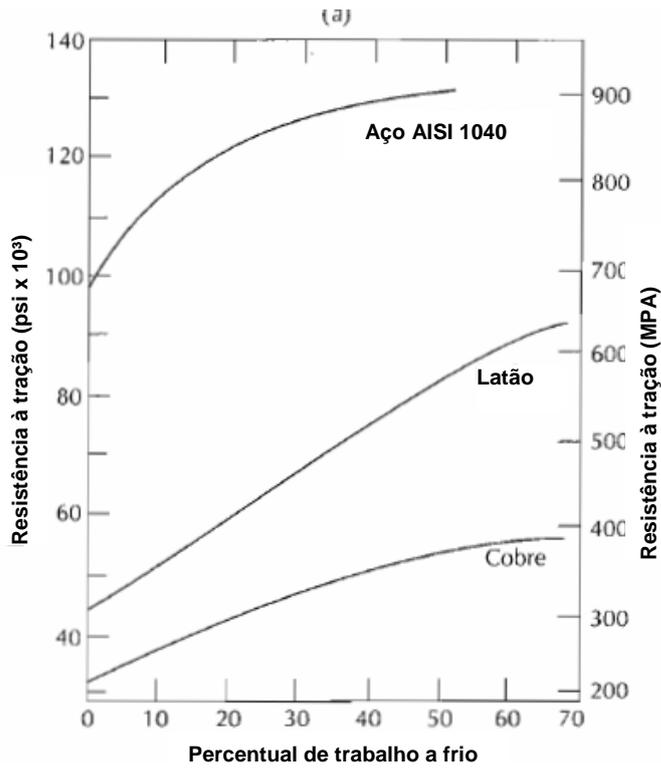


Gráfico 2: Gráfico apresentando a relação do aumento de limite de resistência e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]

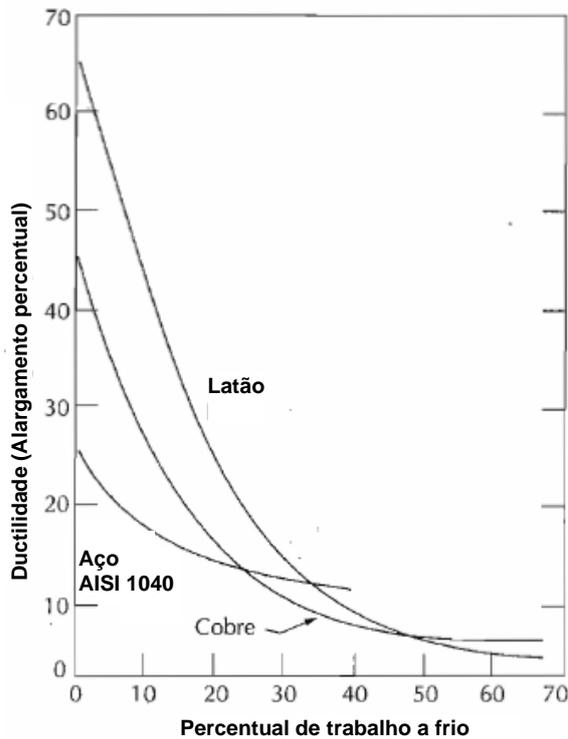


Gráfico 3: Gráfico apresentando a relação do alongamento e grau de conformação a frio para aço, latão e cobre. [7]

O fenômeno de endurecimento por encruamento está relacionado com o número de discordâncias e o campo de deformação que estas têm para se movimentar. As conformações plásticas se baseiam na movimentação de

discordâncias que se multiplicam e novas são criadas durante a interação entre discordâncias em deslocamento. A multiplicação das discordâncias causa um aumento na densidade das mesmas, reduzindo o espaço para deslocamentos, dificultando então a conformação plástica o que se traduz no aumento na tensão necessária para movimentar as discordâncias, o limite de escoamento. Como cada vez mais discordâncias são criadas, o espaço de deslocamento possível se reduz com o aumento do trabalho a frio, resultando na relação direta que há entre aumento de resistência com maior conformação de um material.

2.4.2. Tratamento Térmico (Resfriamento Rápido)

O processo de resfriamento rápido de uma barra de aço-carbono levada a uma temperatura de austenitização com o objetivo de formar a fase de martensita no produto final é conhecido como têmpera. Barras de aço com microestrutura formada por martensita têm propriedades mecânicas superiores a microestruturas formadas por ferrita-perlita. Por outro lado, a ductilidade da martensita é inferior a ferrita-perlita, então para fabricação de barras de vergalhão para construção civil, a têmpera não é total e o processo é ajustado de forma tal que haja apenas uma têmpera superficial, isto é, a formação de uma camada superficial de martensita envolvendo o núcleo da barra de grãos pequenos de ferrita e perlita.

2.4.3. Endurecimento por solução sólida na austenita

O mecanismo consiste na interação do campo de deformação da rede cristalina causada por átomos de soluto com as discordâncias. Os átomos podem ocupar posições substitucionais ou intersticiais. Nas duas situações, a deformação causada na rede dificulta a movimentação de discordâncias naquela região, que fica evidenciado no aumentando da resistência e da dureza de ligas com solução sólida quando comparadas com metal puro e no caso de produtos de aço laminados a quente, em temperaturas acima da austenitização, elementos de liga como Mn e Cr, estabilizam a fase austenita, causando o retardamento da formação de ferrita no resfriamento. Este retardamento favorece a formação de perlita, aumentando a resistência do produto final.

O efeito que se apresenta é de endurecimento por favorecimento da formação de perlita, e não de endurecimento por solução sólida.

2.4.4. Endurecimento por Precipitação

O mecanismo consiste na formação de partículas extremamente pequenas e uniformemente dispersas de uma segunda fase durante o processamento térmico do aço.

As partículas são oriundas da transformação de uma segunda fase dentro da fase original que ocorre durante a aplicação de tratamentos térmicos específicos. As partículas são denominadas de precipitados, então o processo é conhecido por precipitação. [7]

No caso do aço carbono, elementos formadores de fases ligadas ao carbono e nitrogênio e oxigênio são normalmente empregados. Estes elementos podem ser o boro, vanádio, titânio ou nióbio que durante o resfriamento da liga da temperatura de austenitização, formam os precipitados. O processo pode se assemelhar em alguns casos ao processo de têmpera, mas têm objetivos diferentes. O objetivo da formação de partículas de segunda fase é a de dificultar a movimentação das discordâncias quando o material está sob influência de deformação, tornando-o o material mais resistente e mais duro.

2.5. Aços Microligados

2.5.1. Condicionantes Microestruturais e Composicionais

A metalurgia dos aços microligados é regida pela precipitação e solubilidade de carbonetos e nitretos. Nas barras de vergalhão, o vanádio e o nióbio são usados para aumentar a resistência do material. O Gráfico 4 apresenta a solubilidade dos carbonetos e nitretos destes elementos nas temperaturas típicas de laminação a quente. Em uma liga de aço médio carbono, contendo um percentual típico de nitrogênio, o vanádio se apresenta, em sua maioria, dissolvido na austenita, mas o nióbio necessita de temperaturas mais altas para ter alguma quantidade dissolvida em solução sólida.

Desta forma o grande emprego de vanádio em processos de laminação a quente é facilmente explicável, já que este se encontra em solução sólida na austenita nas temperaturas típicas de laminação e, no final do processo, se precipita na ferrita na forma de nitretos de vanádio aumentando a resistência do material por endurecimento por precipitação. A adição de vanádio apresenta um aumento na resistência quase linear para vergalhões de diversos carbonos diferentes. Uma solução prática para garantir a resistência de uma barra de

“vergalhão soldável” grau 60 é a adição de 0,10% de vanádio junto com um aumento do percentual de nitrogênio.

Já o emprego de nióbio como microliga em aços ao carbono é muito mais complexo. Pelo Gráfico 4 por exemplo, uma liga de aço com 0,30% de carbono na temperatura de 1250 °C apresenta apenas 0,03% de nióbio em solução. Mas nos aços baixo carbono, uma maior quantidade de nióbio se apresenta em solução sólida. No processo de reaquecimento dos tarugos, no forno antes da laminação, o nióbio tende a formar precipitados grosseiros de carbonitretos de nióbio de aproximadamente 200 nm. Essas partículas retardam o crescimento de grão austenítico durante o encharque dos tarugos no final do processo de reaquecimento. Então aços microligados ao nióbio apresentam um menor tamanho de grão austenítico no início do processo de laminação resultando em um grão recristalizado mais fino quando a laminação ocorre a temperaturas acima de 1000°C. Em temperaturas mais baixas, ocorre o retardamento da recristalização da austenita pelo nióbio causando o alongamento dos grãos de austenita durante a laminação, gerando uma ferrita e perlita mais finas devido ao maior número de sítios para nucleação durante a transformação. Então além do aumento da resistência do material, é percebido também um aumento na ductilidade.

O nióbio que não se precipita na austenita irá retardar a transformação austenita/ferrita promovendo a transformação parcial na região da bainita. E ainda pequenos precipitados de carbonetos de nióbio de aproximadamente 2 nm vão se formar durante e depois da transformação austenita-ferrita aumentando então a resistência através de endurecimento por precipitação. A resistência aumenta com a adição de nióbio e redução do tamanho das partículas de seus precipitados e o efeito dos precipitados de nióbio é maior do que o de nitretos de vanádio devido a diferença no parâmetro de rede [$Nb(C,N)=0,447$ nm; $VN=0,415$ nm], que causa uma maior tensão na estrutura da ferrita.

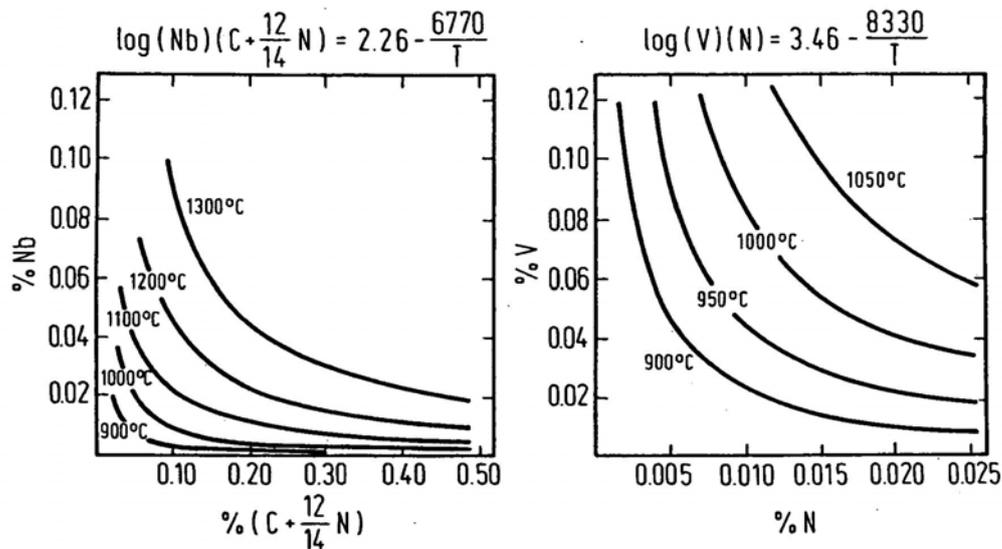


Gráfico 4: Isotermas de solubilidade do carbonitreto de Nb e nitreto de V.

2.5.2.

Propriedades Mecânicas de Vergalhões Microligados

Os vergalhões são produtos que devem atender a especificações rigorosas em relação à resistência, alongamento, dobramento e características específicas de soldabilidade.

Quando não é necessário atender à característica de soldabilidade, a forma mais econômica de se aumentar a resistência de um aço é aumentar a quantidade de perlita em sua composição através do aumento dos percentuais de carbono. Por exemplo, substituir um processo de endurecimento por tratamento térmico de um aço 1020, que demanda grande consumo de água na produção de vergalhões, pelo emprego de um aço 1045.

Porém o aumento de carbono reduz o alongamento e capacidade de dobramento de barras de vergalhão. A influência negativa da perlita no aço se torna drástica em níveis de carbono acima de 0,35% em peso. Então quando a necessidade de atender às características de alongamento e dobramento é importante, é comum a adição de elementos como nióbio e vanádio na ordem de 0,03 % em peso para se manter os níveis de carbono abaixo dos 0,35 %.

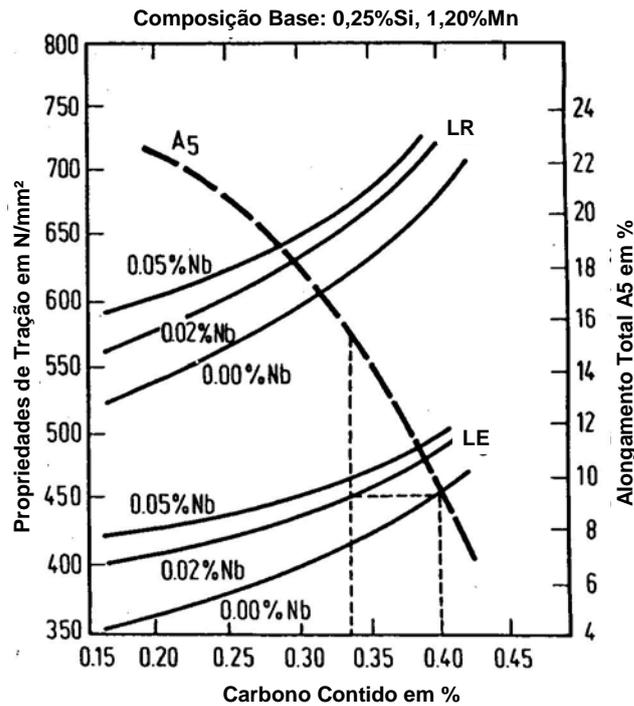


Gráfico 5: Propriedades mecânicas de barra de vergalhão com 40 mm de diâmetro. [1]

O Gráfico 5 apresenta os resultados de propriedades mecânicas de vergalhões com 40 mm de diâmetro e produzidos com aços diferentes. Observando o limite de escoamento (LE) obtido para um aço com 0,40 % de carbono e sem níbio, verifica-se que um aço microligado com 0,02% de níbio necessita de menos de 0,35% de carbono para obter o mesmo resultado de limite de escoamento. É importante observar que o alongamento (A5) para o aço microligado é quase o dobro para o aço com 0,40% de carbono.

Como já apresentado no item 2.5.1, o aumento da resistência atribuído aos aços microligados ao vanádio e níbio é inversamente proporcional ao tamanho dos precipitados de carbonitreto presentes no produto final. E o tamanho dos carbonitreto está relacionado com a quantidade de elemento microligante em solução sólida no processo de encharque dos tarugos e durante a laminação que depende da temperatura em cada etapa.

O vanádio leva vantagem devido a maior quantidade em solução sólida nas temperaturas típicas de laminação. Em processos onde é possível atingir temperaturas de encharque em torno de 1300°C combinadas com altas temperaturas nos passes acabadores da laminação (acima de 1000°C) o níbio passa a ser uma opção. A quantidade em solução sólida deste elemento cresce, precipitando carbonitreto mais finos, aumentando então o efeito de endurecimento por precipitação e aumentando o limite de escoamento.

Como a redução no percentual de carbono aumenta a quantidade de nióbio em solução sólida, a redução na resistência devido à redução de perlita na microestrutura é parcialmente compensada pela maior eficiência do endurecimento por precipitação.

O vanádio e o nióbio combinados com o nitrogênio podem ser aplicados no aumento da resistência de barras de aço sem tratamentos posteriores a laminação e empregados em “vergalhões soldáveis”.

O Gráfico 6 apresenta os limites de escoamento de chapas laminadas com microestrutura ferrítica-perlítica e adição de vanádio ou nióbio. Analisando o gráfico percebe-se que um aço com 0,05% de nióbio, tem o mesmo efeito no limite de escoamento que um aço com 0,10% de vanádio, implicando em uma economia de metade da quantidade de elementos microligantes adicionados quando se emprega nióbio. Esta diferença pode ser explicada pelo maior parâmetro de rede dos carbonitreto de nióbio comparados com os de vanádio, que causam uma maior distorção na rede de ferrita, como já apresentado no item 2.5.1.

O Gráfico 6 também apresenta que concentrações de nióbio acima de 0,05% não têm mais efeito no limite de escoamento, e este comportamento se deve ao limite de solubilidade do nióbio nas temperaturas típicas de laminação a quente de chapas de aço. Desta forma a combinação de vanádio e nióbio para aplicações em “vergalhões soldáveis” com limite de escoamento maior que 450 MPa parece ser a alternativa mais econômica. É importante lembrar que, para muitas companhias siderúrgicas, o controle de composição química não é trivial devido ao alto emprego de sucatas com composição química desconhecida e de difícil controle em seus processos. E ainda as temperaturas durante a laminação só são controladas pela temperatura de encharque no forno de reaquecimento, então temperaturas na ordem de 1100°C são muito utilizadas por ser uma solução prática para este problema. Como a solubilidade do nióbio, a esta temperatura, está em torno de 0,02% a aplicação deste elemento microligante pode não garantir o efeito esperado.

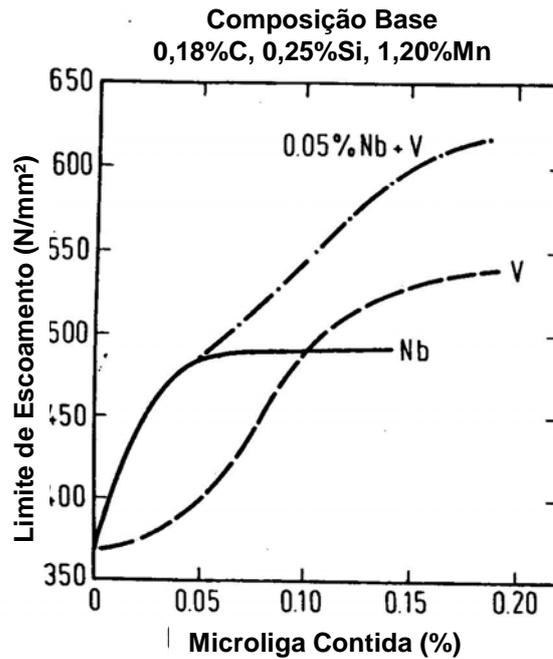


Gráfico 6: Limite de escoamento em chapas de aço com adição de vanádio e nióbio.[1]

Utilizando processos de resfriamento rápido, na sequência do processo de laminação, produz-se uma camada temperada na superfície da barra e uma microestrutura de grãos finos de ferrita e perlita no centro. Desta forma, menos ligas e elementos microligantes são necessários para produzir “vergalhões soldáveis” de alta resistência. Usando este processo é possível garantir em barras de até 25mm de diâmetro, limites de escoamento acima de 500 MPa, empregando aços com 0,20% de carbono e 0,80% de manganês. Em barras mais grossas é comum o emprego de 0,02% de nióbio para garantir um limite mínimo de escoamento de 500 MPa.

Normalmente, todo vergalhão em rolo é produzido com aço microligado com vanádio ou nióbio. Uma empresa alemã produz vergalhões em rolo de até 12 mm de diâmetro nominal, através do emprego de aço com 0,18% de carbono, 0,45% de silício, 1,40% de manganês, microligado ao nióbio e laminado a quente com processo de resfriamento acelerado (têmpera superficial) logo após a laminação. [1]

Para aplicações em baixas temperaturas, a otimização de emprego de aços microligados ao nióbio é conseguida através de laminação controlada. O objetivo é aplicar certa conformação na austenita na região de temperatura onde não há mais a recristalização desta fase. Os grãos de austenita sofrem alongamento e após a transformação da austenita para ferrita, há a formação de grãos de ferrita extra finos aumentando a resistência e a tenacidade do material.

Aplicando esta técnica em vergalhões originalmente produzidos em rolo e endireitados a frio, é possível produzir barras para empregar em ambientes de baixa temperatura. Exemplos típicos são:

- Construções em regiões de baixa temperatura, em torno de -40°C , como o norte do Canadá e Rússia;
- Construção de parede de concreto para estocagem subterrânea de tanques de gás natural liquefeito com temperatura de serviço na faixa de -100°C a -120°C .

O desenvolvimento de aços com baixo carbono, manganês e nióbio é realizado na Europa e no Japão. Um exemplo de aço produzido com temperatura final de laminação na região metaestável da austenita, em torno de 750°C , é o aço:

- Composição química: 0,09% de carbono; 0,50 % de silício; 1,7% de manganês; 0,008% de enxofre; 0,06% de alumínio e 0,03% de nióbio;
- Propriedades mecânicas em temperatura ambiente: 450 MPa de limite de escoamento, 530 MPa de limite de resistência, alongamento de 32% e redução de área de 83%.
- Propriedades mecânicas a -196°C : 880 MPa de limite de escoamento, 920 MPa de limite de resistência, alongamento de 30% e redução de área de 76%.
- Apresentando fratura 50% fibrosa em ensaio de Charpy-V-test a temperaturas abaixo de -135°C com tamanho de grão entre 11 e 12 ASTM.

Este material atende a todas as especificações para a aplicação em barras de vergalhão em estruturas de concreto armado para estocagem de tanques de gás natural liquefeito (LNG).

2.6. Soldabilidade

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 ocorrência 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 formar 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.

O carbono equivalente (Ceq) 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. As equações^[10] que determinam o carbono equivalente, realizam uma soma ponderada de acordo com a intensidade que cada elemento da liga influencia a característica avaliada.

O Gráfico 7 apresenta o efeito da composição química na ocorrência de trincas em aços de alta resistência e baixa liga.

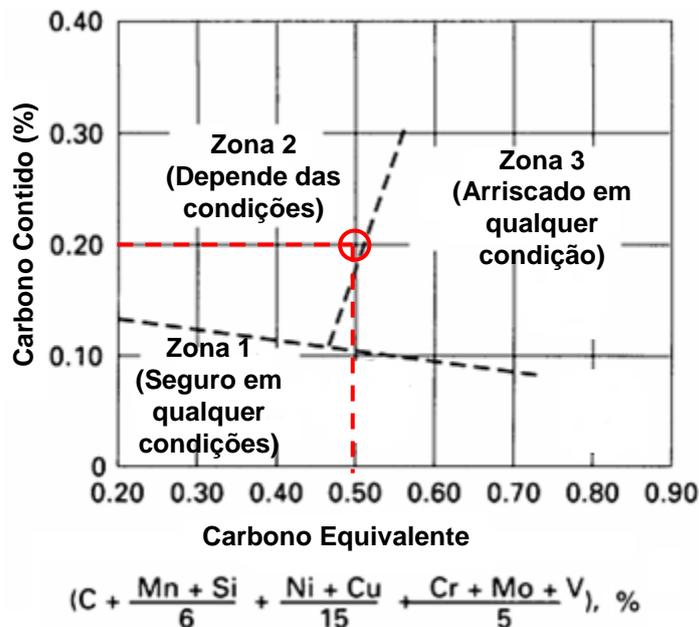


Gráfico 7: Efeito da composição química do aço na susceptibilidade à trinca a frio da ZTA de aços de alta resistência e baixa liga. (HSLA).

Neste trabalho, foi incluído na equação para cálculo do carbono equivalente o nióbio somando no mesmo numerador do vanádio, pois este elemento tem influência sobre a soldabilidade e será usado como elemento microligante nas ligas experimentais para produção de vergalhões (Equação 2). [10]

A norma brasileira NBR 6118 [3] define que para um vergalhão ser considerado soldável, deve atender a:

% C – 0,35 máximo

%Mn – 1,50 máximo

%P – 0,050 máximo

%S – 0,050 máximo

%Si – 0,50 máximo

Ceq – 0,55% máximo

$$Ceq = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15}$$

Equação 2: Equação de carbono equivalente para avaliação de susceptibilidade a trincar a frio na ZTA de acordo com NBR 6118 [3].

2.7.

Custo de ligas

A utilização de aços microligados ao vanádio e nióbio na produção de vergalhões garante características como tenacidade e aos requisitos para soldabilidade, mas adiciona ao valor do produto final o custo das ligas adicionadas. A liga comercial de FeV contém 75% de vanádio e a liga de FeNb contém 65% de nióbio. [valores informados pela usina]

Além do custo mais alto a variação do preço no mercado internacional e do câmbio não permite uma projeção de resultados precisa e pode inviabilizar a produção no caso de grandes aumentos no preço ou variações no câmbio, como já ocorrido em período recente para a liga de FeV (Gráfico 8) que chegou a variar mais de 100%. A liga de FeNb mantém um preço mais estável ao longo dos últimos 4 anos com uma alta progressiva ao longo do tempo de aproximadamente 60%, e seu maior problema é de fato o custo que irá adicionar no produto final e a necessidade de ser processada em temperaturas mais altas, que na maioria dos casos significa um maior custo de energéticos, como energia elétrica ou gás natural.

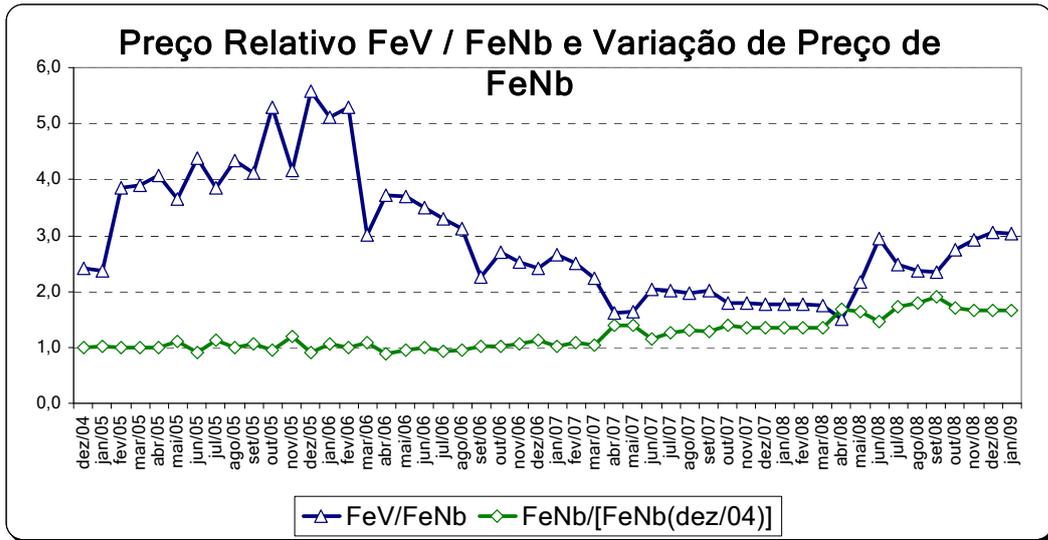


Gráfico 8: Preço relativo de FeV / FeNb ao longo dos últimos anos.