

1 Introdução

O uso combinado de concreto e aço estabeleceu uma nova etapa no desenvolvimento da construção civil. A facilidade em dar diferentes formas ao concreto, a sua resistência ao fogo e ao desgaste causado pelas intempéries, faz deste material um dos mais importantes na construção civil. O concreto tem grande resistência a forças de compressão, podendo ser usado na construção de grandes estruturas, mas não resiste a cargas cisalhantes ou trativas. O aço por sua vez, é um material versátil que pode ser usado em várias formas diferentes, com alta resistência à tração, tenacidade e ductilidade. [1]

A primeira vez que estes dois materiais foram combinados na forma de armaduras de fios de aço reforçando estruturas de cimento misturado com brita foi registrada por Frenchman Mornier em 1867, um jardineiro que observando a estrutura de plantas como os cactos criou vasos de plantas com esta combinação.[6]

A similaridade dos coeficientes de expansão térmica destes dois materiais, a versatilidade de conformação, montagem e baixo custo na construção, garantiu o desenvolvimento das aplicações destes dois materiais ao longo da história.

No início eram usados aços de baixo e médio carbono na forma de fios e barras, mas logo se observou o aparecimento de trincas no concreto, pois este não estava totalmente aderido ao aço. O escorregamento entre os dois materiais, quando submetidos a esforços de tração, causava trincas no concreto que não resiste a cargas trativas, então para aumentar a aderência do concreto às barras de aço, foram desenvolvidas barras quadradas torcidas (Foto 1). Como o trabalho de torcer as barras quadradas adicionava mais um custo ao processo de produção e poderia criar concentradores de tensão na superfície da barra devido ao esforço de torção, logo se criou barras nervuradas, onde as nervuras estavam impressas no canal acabador da laminação. As nervuras aumentam a aderência do concreto ao aço que quando submetido a esforços de tração, transfere a carga para as barras de aço, evitando a formação de trincas. Hoje ainda se produzem barras nervuradas de aço médio carbono com o principal objetivo de fazer ganchos para movimentação de peças de concreto armado pré-

moldadas, não sendo comum seu uso para reforço estrutural de peças de concreto.



Foto 1: Barras quadradas torcidas. Aplicada atualmente em decoração na produção de ornatos para portões, grades, etc. [11] [12]

Diversos tipos diferentes de aços eram usados na construção civil, por isso, grupos preocupados em garantir a segurança das construções criaram normas especificando limites de escoamento mínimos para os aços usados em estruturas de concreto armado.

Uma outra etapa no desenvolvimento de estruturas combinando concreto e aço foi o aumento da resistência do aço utilizado, para reduzir o custo, economizando material e reduzindo o peso da estrutura final. Para exemplificar: a aplicação de aços grau 60 substituindo aços grau 40 (número significa o limite mínimo de escoamento em ksi) reduz em aproximadamente 40% a quantidade em peso de aço para uma mesma resistência nominal da estrutura. [1]

Até 1957, era comum produzir as barras de aço para reforço de estruturas de concreto empregando corridas reclassificadas, que não poderiam seguir para qualquer outra aplicação. O limite mínimo de escoamento mais comum era de 40 ksi e as solicitações de tenacidade, alongamento e dobramento ainda não eram restritivas ou demandadas por normas ou pelo mercado. Mas a partir deste ano foi introduzido o uso de aços de alta resistência, primeiramente para aumentar a resistência das estruturas e reduzir custo e consumo de materiais e após para a aplicação em regiões suscetíveis a abalos sísmicos e fundações para usinas nucleares.

O uso de aços com composição de carbono e manganês mais alto se difundiu e passou a ser o processo mais comum de produção de vergalhões, combinado com os processos de deformação a frio.

Na década de 80 uma nova demanda surgiu no mercado. Com o desenvolvimento da montagem de armaduras, a produção de vergalhões em rolo empregados em máquinas de endireitamento, corte e dobra de vergalhões e a

aplicação de processos de soldagem para unir as barras de vergalhão solicitaram o emprego de aços com características de soldabilidade específicas. As normas que especificam o fornecimento e a produção de barras de aço nervuradas com características de soldabilidade destinadas a armaduras de concreto armado especificam limitações de composição química, como percentuais de carbono e carbono equivalente [5], definindo então o produto conhecido comercialmente como vergalhão soldável [5]. Por exemplo, a produção e fornecimento de barras de aço nervuradas, comercialmente consideradas como vergalhões soldáveis [5], devem atender à norma BS 4449/460 para serem comercializadas em países como a Inglaterra.

Como as barras de vergalhão para reforço de estruturas de concreto são obtidas por processo de laminação de aço carbono, com as novas restrições para C e Mn, este processo simplesmente deixou de atender as características de soldabilidade quando combinadas com a solicitação de limite de escoamento mínimo de 60 ksi (415 MPa), sendo comum especificações de 500 MPa como no mercado brasileiro. Então a necessidade de se desenvolver um novo produto viável tecnicamente e economicamente se tornou iminente para os produtores interessados em atender ao mercado regido por estas novas normas.

Três alternativas foram exploradas:

- Processo de trabalho a frio, encruando o material e aumentando o limite de escoamento;
- Implantação de resfriamento acelerado no processo de laminação, com o objetivo de formar fases com maior resistência, como a martensita;
- Emprego de aços microligados a elementos como V, Nb ou Cr, com o objetivo de aumentar a resistência do produto final através do endurecimento por tratamento térmico ou por precipitação de fase.

[5]

Cada alternativa é adotada pelos fabricantes de vergalhão de acordo com as normas que devem atender, disponibilidade e custo para aquisição de novos equipamentos e ligas no mercado em que se encontram.

No Brasil como em outros países, a alternativa de se trabalhar o aço a frio para atender limites de escoamento mais altos, só pode ser adotada na produção de fios de aço ou arames CA-60. CA são as iniciais para concreto armado e o número define o atendimento à especificação da norma de limite mínimo de escoamento que neste caso é de 600 MPa, aproximadamente 60 kgf/mm². Para produzir barras nervuradas de CA-50 não é permitido o uso de

processos com conformação a frio, e as barras devem atender às especificações de norma logo após o processo de laminação a quente.

Desta forma os processos onde o fabricante utiliza o trabalho a frio, têm a vantagem de empregar aços de baixo a médio carbono, evitando o emprego de ligas como Mn, V, Cr e Nb, atendendo as características de soldabilidade que definem “vergalhões soldáveis” e atingindo limites de escoamento acima dos 600 MPa (87 ksi).

Na Europa há alguns fabricantes que realizam trabalho a frio depois do vergalhão pronto. A deformação é realizada através do tracionamento do material à temperatura ambiente que é embalado no formato de rolos de vergalhão. O processo tem como principal objetivo reduzir o emprego de elementos microligantes, mas não de substituí-los. É comum ser usado em diâmetros nominais maiores de 20 mm e para produtos comercializados em rolo.

As desvantagens estão no custo do processamento posterior de trabalho a frio e nas restrições impostas por algumas normas que não permitem o emprego de materiais trabalhados a frio em barras nervuradas, como é o caso da norma vigente no Brasil. Muitas vezes a relação entre o limite máximo de resistência e o limite de escoamento fica comprometida devido à razão de conformação a frio que se aplica ao material para atingir as propriedades especificadas.

Outro mecanismo de aumento de resistência nos aços é o processo de aceleração do resfriamento. Este processo ocorre logo após a laminação a quente e é largamente usado por vários fabricantes do mundo. Este processo permite o emprego de aços médio carbono atendendo às solicitações para “vergalhão soldável” e não necessita de aços microligados. O processo mais comum se resume em canhões de resfriamento que utilizam água em grandes vazões e que ficam posicionados no final da linha de laminação. As barras ainda rubras são submetidas a um rápido resfriamento superficial, formando uma camada de aço temperado e um núcleo normalizado. Esta camada temperada garante o atendimento à alta resistência do material e o núcleo de aço normalizado garante boa ductilidade e alongamento no ensaio de tração. As desvantagens deste processo estão no alto consumo de água e alto custo do equipamento. Nos laminadores mais modernos e de alta velocidade, manter a camada temperada adequada ainda é um processo instável, havendo a necessidade do emprego de aços microligados ou de uma etapa posterior de trabalho a frio para garantir o atendimento aos limites mínimos de escoamento especificados.

A alternativa de se empregar aços ao carbono e manganês usando o mecanismo de endurecimento por solução sólida para atender às solicitações de alta resistência e aos ensaios de dobramento é muito utilizada. O problema em se aumentar estes elementos está no não atendimento às exigências de soldabilidade e no custo da adição de manganês. O emprego de manganês em aços com 0,45%C é muito comum em laminadores de alta velocidade, tais como, os laminadores de vergalhão em rolo, onde o custo de se aplicar um processo de resfriamento rápido é muito alto e nem sempre eficaz para toda a linha de diâmetros. Além disso, continua-se com o problema do produto final não atender as exigências de requisitos de soldabilidade para “vergalhão soldável” sem tratamento térmico.

O emprego de aços microligados ao titânio, vanádio ou nióbio com baixo carbono e manganês ainda é pouco empregado no Brasil. Na Europa, fabricantes que atendem normas semelhantes à brasileira, empregam este tipo de solução muitas vezes combinando o emprego de aços microligados com processos de resfriamento rápido ou de posterior conformação a frio. A necessidade do maior cuidado no controle de temperatura no processo de laminação, e do alto custo de ligas como vanádio e nióbio, são as grandes desvantagens para o emprego dos aços microligados.

Este trabalho visa criar alternativas para produção de barras de vergalhão de alta resistência atendendo às normas brasileiras para CA-50 e à normas internacionais de que especificam requisitos para soldabilidade mais exigentes que a brasileira.

No Brasil não é compulsório o atendimento às exigências para soldabilidade, mas é interessante aos fabricantes atender a esta característica em função da existência de demanda do mercado.

Os experimentos foram executados em escala industrial em uma unidade siderúrgica.

O emprego de aços microligados ao vanádio e nióbio foi a alternativa para o desenvolvimento de “vergalhões soldáveis” abordada neste trabalho.

O laminador de vergalhão em rolos foi escolhido para fazer os testes devido aos seguintes pontos:

- Não possui equipamento para resfriamento rápido, pois devido a sua alta velocidade de laminação, este depende de grande investimento, o que viabiliza o estudo da alternativa para emprego de aço microligado;

- Para instalação de equipamento para têmpera superficial, o aumento considerável do consumo de água no laminador devido a grande velocidade na laminação, desfavorece esta alternativa, favorecendo então o emprego de elementos microligantes na composição química do aço;
- Produz vergalhão em rolo que atende diretamente ao mercado de endireitamento, corte e dobra de vergalhões, que está crescendo em demanda para “vergalhões soldáveis”;
- Menor custo por tonelada produzida, havendo maior possibilidade de viabilizar economicamente o emprego de aço microligado ao vanádio e nióbio.

Para o desenvolvimento de um aço microligado para o atendimento às propriedades mecânicas e aos requisitos para soldabilidade, foi decidido fazer experimentos em escala industrial baseados nos dados históricos do aço que atende as características de soldabilidade já empregado, buscando substituir o processo de tratamento térmico ou o emprego de aços com C e Mn mais altos, pelo o emprego de elementos microligantes, no caso de V e Nb.

Os experimentos consistem em produzir lotes de aço na rota: aciaria elétrica, lingotamento contínuo. E o vergalhão na rota: forno de reaquecimento e laminação a quente de rolos, que seguirão para o processo de corte e dobra para produção de armaduras soldadas.