

## **3 Métodos Experimentais**

### **3.1. Processo de Produção dos Lotes Experimentais**

#### **3.1.1. Aciaria**

O material empregado nos lotes de teste deste trabalho foi produzido em uma usina siderúrgica através da redução de minério de ferro em alto-forno produzindo ferro gusa. O processo de refino do aço foi realizado em conversor LD. Devido à adição de elementos microligantes, o ajuste final da composição química foi realizado em forno panela.

#### **3.1.2. Lingotamento Contínuo**

Após o forno panela, o aço líquido foi vazado em um lingotamento contínuo de três veios produzindo tarugos de 14 m de comprimento e seção quadrada com 130 mm de lado. O distribuidor, com capacidade de aproximadamente 10 toneladas de produto em processo, permitiu a produção de peças de sequenciamento como apresentado no item 3.1.3 deste trabalho. Amostras de aço líquido foram retiradas do distribuidor durante o lingotamento de cada corrida para análise de composição química, para verificar a homogeneidade dos lotes experimentais ao longo do processo de lingotamento.

#### **3.1.3. Sequenciamento de Corridas**

O distribuidor, com capacidade de aproximadamente 10 t de aço líquido, permite que a troca da panela em processo seja realizada sem a interrupção do lingotamento, o que garante a continuidade do processo. Este procedimento é conhecido como sequenciamento de corridas. Quando a panela seguinte é vazada, há a mistura das duas corridas em processo dentro do distribuidor, que caso sejam do mesmo aço, não se trata de um problema, pois as duas corridas atendem à mesma especificação de composição química. Mas quando as corridas são de aços diferentes, o fabricante tem duas alternativas:

- Não realizar o sequenciamento, interrompendo o processo de lingotamento contínuo e garantindo a composição química das duas corridas de aços diferentes. A interrupção do processo de lingotamento gera o sucateamento das peças de final e início de campanha que normalmente têm problemas de qualidade superficial, rechupe e incrustação de escória, além de perder tempo com o processo de parada e partida do lingotamento contínuo.
- Realizar o sequenciamento das corridas de aços diferentes, fazendo o controle da composição química dos tarugos lingotados separando aqueles que têm misturados os dois aços em processo.

A presente pesquisa optou por realizar sequenciamentos que produzissem aços com composições continuamente variáveis entre as duas corridas empregadas. Este procedimento é possível porque a mistura dos aços das duas corridas ocorre de maneira contínua ao longo de um intervalo de tempo suficiente para gerar vários metros de tarugo por veio de lingotamento contínuo. A composição destes tarugos foi avaliada posteriormente identificando cada um e retirando amostras das duas extremidades. Como o processo de mistura é contínua e ocorre em apenas uma direção, a composição química de cada tarugo está entre as composições das amostras retiradas de cada extremidade destes.

#### **3.1.4. Forno de Reaquecimento**

Os tarugos seguiram para a laminação de vergalhão em rolo e foram reaquecidos até a temperatura nominal de 1200°C. De fato a temperatura na zona de encharque varia entre 1105°C a 1200°C que é a temperatura padrão ajustada para o forno do laminador utilizado. Na saída do forno logo após o primeiro passe de laminação, onde é o primeiro ponto de medição da temperatura da barra, esta se encontra em torno de 1000°C e se mantém variando entre 960°C a 1040°C durante todo o processo de laminação.

O forno de reaquecimento tem capacidade de 110 t/hora em regime contínuo de trabalho e cada tarugo necessita de aproximadamente 2 horas para atingir a temperatura de laminação homogênea em todo seu comprimento. O forno é do tipo soleira móvel com três zonas de aquecimento para região de encharque, podendo ajustar individualmente a temperatura das extremidades do tarugo em relação ao meio da peça.

### **3.1.5. Laminação**

O trem de laminação é contínuo com dois veios e 25 passes cada veio, sendo os 10 últimos realizados em Bloco Morgan onde não há a torção do produto em processo, como ocorre no trem de laminação. Dependendo do diâmetro do vergalhão, são usados mais ou menos passes. Por exemplo: o vergalhão 6,30 mm é produzido em 25 passes de laminação a uma velocidade no passe acabador de aproximadamente 75 m/s, já o vergalhão 12,5 mm utiliza 19 passes de laminação com velocidade no passe acabador de aproximadamente 20 m/s.

### **3.1.6. Resfriamento**

Após o último passe de laminação o vergalhão com aproximadamente 1000°C já com sua forma final, passa por um tubo de aproximadamente 30 m de comprimento com duas zonas de resfriamento. Estas zonas utilizam caixas de água sobre pressão que têm a capacidade de reduzir a temperatura da barra em processo para temperaturas na faixa de 800°C a 900°C antes do formador de espiras. As zonas de resfriamento são usadas para proporcionar um resfriamento controlado e permitir algum controle da microestrutura além de permitir uma boa formação das espiras. O laminador utilizado para produzir os vergalhões em rolo não estava dimensionado a atender um processo de resfriamento rápido com temperatura superficial quando os lotes de teste foram produzidos.

### **3.1.7. Formador de Espiras**

O formador de espiras é um equipamento formado por um tubo curvo montado em um volante que gira em alta velocidade. A barra depois de passar pela zona de resfriamento é levada para dentro deste tubo formando então as espiras, que irão compor o rolo de vergalhão ao final do processo de resfriamento. A relação da velocidade da barra em processo, com o volante do formador de espiras é que determina o tamanho das espiras formadas, definindo assim o diâmetro do rolo e sentido de desbobinamento.

### 3.1.8. Stelmor

Após o formador de espiras o produto é transportado por correntes sobre uma plataforma com ventiladores em sequência. Este equipamento é conhecido como Stelmor. São 5 ventiladores ao todo, que podem ser ajustados para controlar a taxa de resfriamento, ao longo dos 70 segundos que o material leva para passar sobre os ventiladores. Para os vergalhões de diâmetro mais fino, é possível perceber a formação de regiões de martensita e bainita caso o processo de resfriamento seja muito intenso. Nos experimentos apresentados neste trabalho a ventilação máxima foi utilizada combinada com uma velocidade da corrente transportadora de 0,6 m/s.

### 3.1.9. Acabamento e Embalagem

Após o Stelmor o material segue para o coletor de espiras onde o rolo é formado a uma temperatura que varia entre 200°C e 450°C dependendo do diâmetro do material em processo.

O rolo é transportado por um sistema de ganchos ou palitos como a (Ilustração 3) apresenta e é prensado e amarrado.

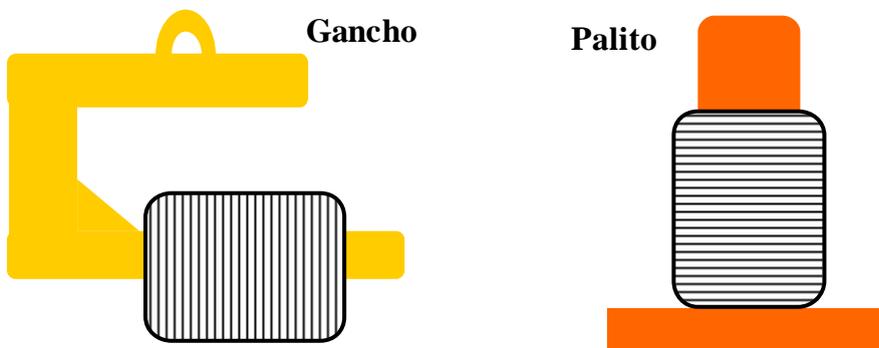


Ilustração 3: Tipos mais comuns de transportadores de rolos de vergalhão logo após o processo de laminação.

### 3.2.

#### **Amostragem de Composição Química**

Amostras para composição química são retiradas do conversor, do forno panela e do distribuidor ao longo do processo de cada lote, para que o ajuste de composição química seja realizado com maior precisão e rendimento. Normalmente são retiradas duas amostras do distribuidor ao longo do lingotamento de cada corrida e a média dos resultados é definida como a composição química da corrida.

As amostras têm formato cilíndrico e são rapidamente resfriadas, tendo uma de suas faces circulares lixadas e analisadas em um espectrômetro ótico devidamente aferido e controlado.

Os resultados de composição química apresentados nos dados experimentais desta pesquisa foram obtidos diretamente do produto acabado e das amostras para ensaio de tração, de maneira a garantir a comparação dos resultados de propriedades mecânicas com a composição de cada peça ensaiada, bem como a homogeneidade da composição ao longo das mesmas. O mesmo equipamento, espectrômetro ótico, foi utilizado para analisar a composição química das amostras de vergalhão. Os resultados foram comparados com as análises realizadas durante a produção das corridas para certificar a composição química das amostras e a sua origem.

### 3.3.

#### **Amostragem para Ensaio de Tração e Dobramento**

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados nas amostras em tamanho natural (full size) de acordo com a norma NBR-7480 e procedimentos da NBR: ISO-9001:2008 de acordo com plano de ensaio da planta industrial. As amostras do produto acabado foram retiradas ainda nos ganchos, das extremidades dos rolos e antes da prensa onde as amarras são colocadas. Esta é a posição padrão de retirada das amostras para ensaio de liberação de produtos da usina.

Foram realizados 4 ensaios por rolo e no caso de peças de sequenciamento, foram realizados 4 ensaios em cada lado do rolo, sempre após o desponte de pelo menos dez espiras.

### **3.4. Ensaio de Tração e Dobramento**

Os ensaios de tração e dobramento foram realizados em máquina hidráulica com célula de carga de 20 t. Por se tratar de um produto em rolo, as amostras passaram por um processo de endireitamento realizado manualmente, onde se procura aplicar a menor deformação plástica possível para evitar o endurecimento por encruamento. Após o endireitamento as amostras foram cortadas em 400 mm e marcadas a cada 20 mm para a avaliação do alongamento. A temperatura na sala de ensaio, bem como a umidade relativa do ar são monitoradas pelo operador de controle da qualidade a cada turno.

Os ensaios de dobramento foram realizados em máquina elétrica para dobrar vergalhão, seguindo os procedimentos da norma NBR-6153, aplicando dobramento com as extremidades livres e usando um pino de duas vezes o diâmetro da amostra em ensaio. Após o dobramento de 180°, a região tratada do dobramento é observada a olho nu sem o auxílio de lentes ou lupas, e não deve apresentar nenhuma trinca visível.

### **3.5. Avaliação de Soldabilidade**

Para este trabalho foi escolhida a referência do ASM Handbook [9], que é largamente aplicada no mercado internacional, que especifica requisitos de composição química para avaliar a soldabilidade de um aço (Gráfico 7).

Para garantir a soldagem das peças produzidas neste trabalho, foram usados limites mais exigentes do que os especificados na norma brasileira NBR 6118, pois a norma mais usada pelos traders internacionais é a BS 4449/460, que define limites mais restritos. Então limitou-se o carbono equivalente a 0,50% máximo e o carbono objetivado a 0,20 % de acordo com a indicação em vermelho no Gráfico 7.

Amostras dos pontos de solda realizados na produção de armaduras soldadas para vigas e colunas trabalho, foram cortadas no sentido transversal buscando-se o meio da zona termicamente afetada (ZTA). A avaliação foi realizada ao microscópio ótico e com microdurímetro.

Como na construção de armaduras para concreto a junção por solda visa substituir a amarração com arame recozido, não há a necessidade de ensaios mecânicos quantitativos. O ponto de solda deve resistir à mesma carga exigida a uma amarração realizada com arame recozido, então um teste prático usado pela operação da indústria, onde a produção ocorre, que consiste do uso de uma

ferramenta específica para forçar o ponto de solda, também foi realizado pelos operadores. Este teste não é descrito em maiores detalhes, mas seu resultado será considerado, pois abrange a experiência e percepção dos operadores em relação à qualidade do produto final.

### **3.6. Metalografia e Microscopia**

As amostras de solda foram preparadas de acordo com o procedimento padrão para metalografia. Foram cortadas em máquina de corte a frio com disco de diamante para garantir a ZTA original e garantir também o corte o mais próximo possível do centro da ZTA. Após o corte as amostras foram lixadas e polidas com pasta de polir de diamante, com granulometria de 1 $\mu$ m, e atacadas com uma solução de ácido nítrico a 2% em álcool por 10 segundos.

As amostras foram observadas no microscópio ótico em magnificação de 50, 100, 200 e 500 vezes, onde foram observadas a microestrutura e principalmente a ZTA formada nos testes de avaliação das soldas. A avaliação do tamanho de grão não foi objetivo neste trabalho, então será incluído como proposta para a continuação deste estudo.

### **3.7. Primeiro Experimento**

O primeiro experimento teve o objetivo de produzir um aço que atendesse as especificações de propriedades mecânicas da norma NBR-7480 para o CA50 (min 500 MPa de limite de escoamento) e as exigências para soldabilidade do item 3.5 deste trabalho.

O aço foi denominado de 10V20, microligado ao vanádio (0,2%). Observando o Gráfico 6, decidiu-se utilizar um aço com 0,2%V mínimo para buscar o atendimento aos 500 MPa de limite de escoamento exigidos na norma brasileira.

Seis lingotes deste lote foram laminados em três diâmetros nominais distintos: 6,30 mm, 8 mm e 10 mm de acordo com a disponibilidade de produção da laminação, dois tarugos em cada diâmetro nominal, produzindo aproximadamente 3,6 t de vergalhão em rolo para cada diâmetro nominal.

Foram empregadas as mesmas condições de laminação para vergalhão de aço C-Mn, normalmente empregado para atender à norma.

As análises de composição química foram realizadas nas amostras de vergalhão em cada diâmetro nominal laminado, para garantir a composição química em cada amostra ensaiada.

### 3.8. Segundo Experimento

O primeiro experimento comprovou que adições de vanádio na ordem de 0,2% na produção de vergalhões de aço com 0,2%C atinge propriedades mecânicas próximas a aços com carbono e manganês mais altos (0,45%C e 1,2%Mn). Continuando a linha de pesquisa, para desenvolver aços para produção de vergalhão soldável<sup>[16]</sup> CA50 com carbono equivalente máximo de 0,50%, buscou-se uma alternativa com custo mais baixo, reduzindo então a quantidade de vanádio e adicionando nióbio.

Foram produzidas 3 corridas piloto para este experimento:

- Corrida de aço denominado C20V14N04 com a especificação de 0,035% de Nb e 0,14% de V.
- Corrida de aço denominado C20V15 com a especificação de 0,15% de V e nenhum nióbio.
- Corrida de aço denominado C20V18 com a especificação de 0,18% de V e nenhum nióbio.

Como os lotes foram lingotados em seqüência em processo contínuo, as peças do sequenciamento foram separadas para a avaliação do efeito do Nb e V em composições diferentes das conseguidas nas corridas.

Os rolos de vergalhão foram amostrados para análise de composição química e ensaio de propriedades mecânicas. É importante observar que as peças de seqüência foram amostradas nas duas extremidades para se avaliar as composições químicas intermediárias entre os lotes e obter seus resultados de propriedades mecânicas.

Durante o processo de endireitamento foi possível obter amostras intermediárias ao longo do rolo, que foram retiradas a cada 1/5 de rolo endireitado. As amostras foram identificadas com o número do rolo seguindo as inscrições 1/5, 2/5, 3/5, 4/5 e 5/5.

Este procedimento de amostragem foi desenvolvido durante a realização deste trabalho.