

## 2

### O processo de produção de tiras a quente em uma usina siderúrgica integrada a coque.

Uma usina siderúrgica integrada a coque produz ‘ferro gusa líquido’ em um ‘alto-forno’ que, em seguida, é transformado em ‘aço líquido’ na ‘aciaria’. Este aço líquido sofrerá conformação mecânica adquirindo a forma sólida de ‘placas de aço’ que, na seqüência, entrarão no laminador de tiras a quente (LTQ) onde serão transformadas em bobinas de aço laminadas a quente (BQs).

O aço é uma liga ferro carbono que contém, no máximo, 2% de carbono. O ferro não é obtido puro na natureza, normalmente se encontra combinado ao oxigênio e a sílica, formando o ‘minério de ferro’. Em uma usina siderúrgica integrada a coque o carbono é obtido do carvão mineral tipo metalúrgico, ao qual se obtém o coque. Existem siderúrgicas que retiram o carbono do carvão vegetal. O carvão exerce papel importante na siderurgia, agindo como agente duplo, gerando calor e o gás redutor (CO).

#### 2.1

##### Etapas do processo

Resumidamente, o processo de produção de aço em uma siderúrgica integrada a coque pode ser dividido em quatro abrangentes etapas sequenciais. São elas:

1. Preparação do minério e do carvão;
2. Redução do minério de ferro;
3. Refino;
4. Conformação mecânica.

Estas etapas serão discutidas com mais detalhes na seqüência abaixo. A Figura 2.1 mostra um fluxograma básico de uma usina siderúrgica integrada a coque com LTQ.

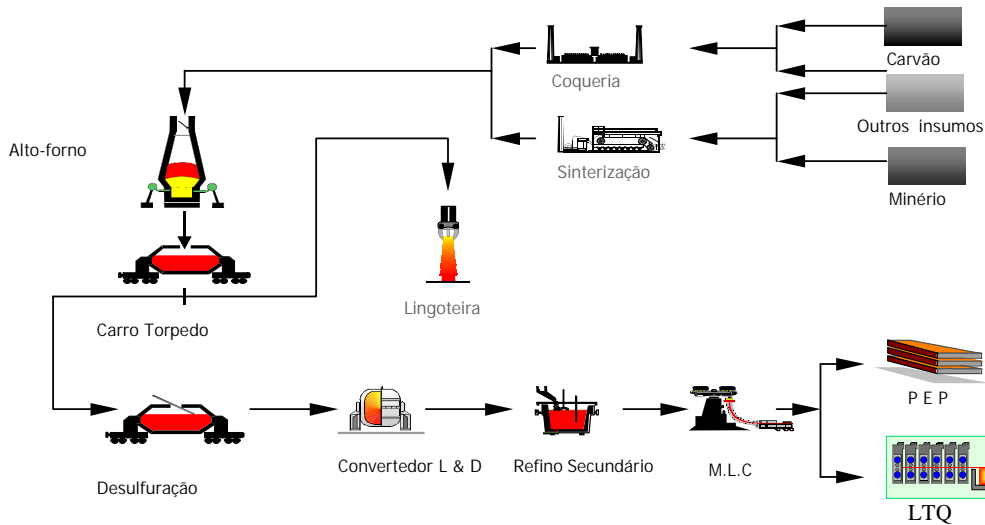


Figura 2.1 – Fluxograma básico de usina integrada a coque

## Preparação do minério e do carvão

A primeira etapa, a preparação do minério e do carvão, é constituída por dois processos: a ‘coqueificação’ e a ‘sinterização’, que preparam o carvão e a maior parte do minério de ferro para, juntamente com minério de ferro em pelotas e outros materiais, alimentarem os equipamentos de produção de ferro líquido (ferro-gusa) que são os altos-fornos.

A ‘coqueificação’ é um processo realizado na ‘coqueria’. O coque é um importante elemento siderúrgico constituído a base de mistura de vários tipos de carvão mineral metalúrgico. Ele é o elemento energético na mistura coque, sinter, pelotas e outros para a obtenção do ferro-gusa líquido.

A ‘sinterização’ é um processo realizado à alta temperatura no ‘forno de sinterização’, onde é feita a mistura de minérios de ferro de granulometria fina (pó) com aglomerantes de finos (ou fundentes), protetores de refratários e formadores de escória (conferem basicidade à escória) e elementos protetores de ‘lança do convertedor’ (soprador de oxigênio). Alguns destes elementos misturados ao minério são: calcário, cal fina, dolomita, dunito, manganês, óxido de titânio, coque fino, antracito, alcatrão, etc. O produto gerado neste processo recebe o nome de *sinter*, que é um material sólido, amorfo, com tamanho bem definido e poroso, com o intuito de facilitar a troca e o fluxo de calor e de gases

dentro de um alto-forno, facilitando o processo de redução, ou seja, a retirada de oxigênio.

### **Redução do minério de ferro**

A ‘redução do minério de ferro’ é a retirada do oxigênio existente no óxido de ferro, por isto o uso do termo ‘redução’, fazendo uma alusão ao termo redução de oxigênio, muito conhecido no meio químico. Esse processo é realizado em um ‘alto-forno’. É no alto-forno que são misturados o coque com o sinter e outras cargas metálicas (minério de ferro, por exemplo). Como resultado deste processo tem-se o ferro-gusa líquido, que é uma liga ferro carbono com alto teor de carbono (mais de 2%) e de impurezas, portanto, ainda não se trata de aço.

O ferro-gusa líquido é vazado em um vagão de transporte chamado carro torpedo, onde este gusa sofre um pré-refino que é o processo de ‘dessulfuração’. Após isto, o carro torpedo transporta este material até a aciaria, onde será iniciado o ‘refino’.

### **Refino**

O carro torpedo vaza o ferro-gusa já ‘dessulfurado’ em uma ‘panela de gusa’, que o vazará em um convertedor L&D (*Linz e Donawitz*) na aciaria, onde será iniciado o ‘refino’, ou seja, conversão de ferro gusa em aço (menos de 2% de carbono). Nos convertedores L&D é feito o ‘refino primário’, ou seja, o ferro gusa líquido é submetido a inclusões de elementos de liga e outros que ajudam na precipitação de escória (ex: cal) e, principalmente, também é submetido a um sopro de oxigênio que tem a finalidade de queimar o excesso de carbono e silício (altamente nocivo aos aços), expulsando-os do composto metálico líquido na forma de gases. Nas siderúrgicas em geral, é a capacidade de um convertedor L&D (geralmente medida em toneladas) que define a dimensão de um ‘lote de produção’ em cada ciclo de tratamento de aços da aciaria. Os equipamentos de apoio na aciaria (painéis de gusa, de aço e distribuidores) também são dimensionados segundo a capacidade dos convertedores.

Após ser tratado no refino primário, o aço líquido é vazado do convertedor L&D para uma ‘panela de aço’, que o conduzirá para um equipamento de ‘refino secundário’ (existente em algumas siderúrgicas, dependendo do tipo, do grau de controle de temperatura e pureza dos aços por elas produzidos), ou para a próxima etapa do processo siderúrgico, que é a conformação mecânica.

## **Conformação mecânica**

O processo de conformação mecânica é composto de duas etapas. A primeira etapa consiste na solidificação do aço líquido, transformando-o em ‘placas grossas’ de aço (alguns centímetros de espessuras) e com poucos metros de comprimento, através do processo conhecido como ‘lingotamento’, que pode ser o ‘convencional’, ou então o ‘contínuo’ em uma máquina de lingotamento contínuo (MLC). A segunda etapa consiste em transformar essas chapas grossas de aço em bobinas de tiras de aço laminadas a quente com pequenas espessuras (alguns milímetros) e centenas de metros de comprimento, através do processo de laminação a quente em um equipamento denominado: laminador de tiras a quente (LTQ).

## **O lingotamento contínuo (LC)**

Apesar de existirem dois tipos de processos de lingotamento (convencional e contínuo), será descrito aqui apenas o lingotamento contínuo, por ser este o processo utilizado na planta em questão, além de ser o mais moderno e que promove maior produtividade e economia de energia. O processo convencional está cada vez mais em desuso.

No processo de lingotamento contínuo o aço líquido já totalmente tratado contido em uma panela de aço, proveniente do refino (primário ou secundário, dependendo do tipo do aço), é vazado em um ‘distribuidor’. Este equipamento tem a finalidade de, como o próprio nome já sugere, distribuir uniformemente o aço líquido nos ‘veios’ de uma MLC. O distribuidor é recoberto com tijolos refratários, que são materiais de alto custo e que possuem vida útil muito restrita,

por isto, requerem atenção especial por parte dos programadores para o seu melhor aproveitamento.

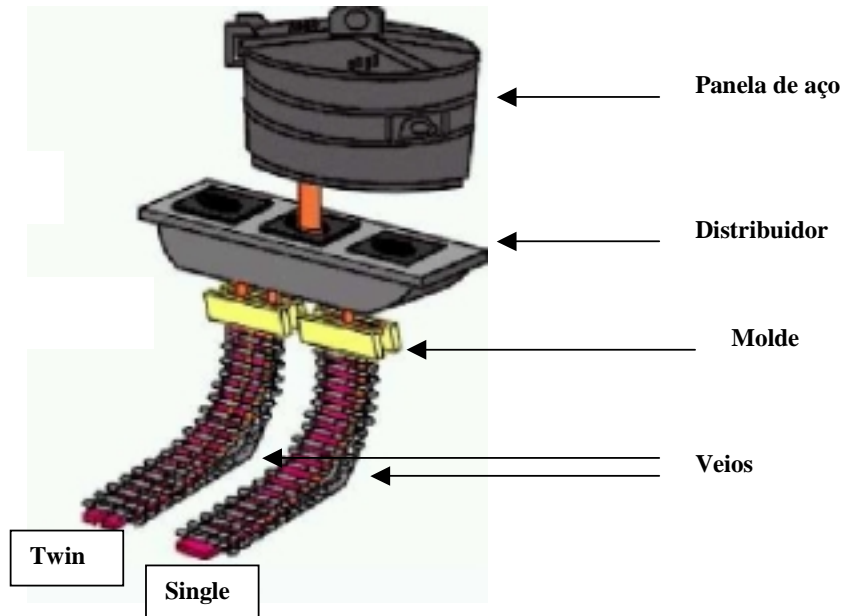


Figura 2.2 – Ilustração do vazamento do aço na MLC  
Fonte: CST

A Figura 2.2 acima ilustra mais detalhadamente como é o vazamento do aço líquido tratado da panela de aço para o distribuidor durante o processo de lingotamento contínuo. Vê-se que o distribuidor distribui uniformemente o aço líquido nos dois veios de lingotamento. A atual tecnologia de MLCs permite que os veios sejam simples (*single*) ou duplicados (*twin*), ou seja, em um único veio se produz duas fileiras de placas simultaneamente. Isto também é demonstrado na Figura 2.2 acima.

### O laminador de tiras a quente (LTQ)

Como visto, um LTQ tem a finalidade de transformar placas de aço grossas em bobinas de aço com pequenas espessuras. Ele é composto por duas áreas: a ‘área de reaquecimento’ de placas ou ‘área de calor’, e a ‘área de laminação’ propriamente dita. Um LTQ é composto também por vários

equipamentos, dentre eles, os três principais neste estudo são, na área de reaquecimento: o forno de reaquecimento de placas (FR), e na área de laminação: o laminador de desbaste (LD) e o trem acabador (TA). Estes três são mais importantes porque têm influência direta no seqüenciamento.

O processo de laminação de tiras a quente consiste tipicamente em primeiro passar com as placas pela área de reaquecimento, ou seja, enfiar as placas de aço no FR, e logo após processar (laminar) estas placas na área de laminação.

### **O processo de enfiamento de placas de aço**

O processo de enfiamento de placas engloba a retirada das placas de aço de uma MLC e o carregá-las em um FR. A temperatura na qual as placas de aço serão introduzidas no FR é denominada ‘temperatura de carregamento’ e a temperatura na qual elas serão retiradas é denominada ‘temperatura de saída’ do FR. A temperatura de saída varia de acordo com características materiais/químicas e dimensionais das placas e do produto final. Ela também pode ser chamada de ‘temperatura de processamento’, pois é a temperatura necessária para que uma placa seja processada na área de laminação. A temperatura de carregamento, juntamente com a temperatura de saída e a espessura da placa, determinam o tempo de processamento de cada placa em um FR, denominado ‘tempo de residência’ (*residence time*). É o tempo de residência que determina a velocidade de deslocamento de uma placa de aço dentro de um FR. Existem diferentes processos de enfiamento que serão detalhados abaixo.

O processo de enfiamento ‘tradicional’ é o ‘enfiamento a frio’ das placas de aço em um forno de reaquecimento. Nesse processo as placas de aço recém saídas de uma MLC não vão diretamente para o FR, elas são conduzidas até a um pátio de estocagem de placas (PEP) onde ficam temporariamente estocadas antes de serem processadas no FR, e com isto suas temperaturas caem de forma que não há o benéfico aproveitamento de sua energia calorífica. Como se trata de um processo entre uma MLC e um FR, este processo é conhecido e denominado na bibliografia *continuous casting - cold charge rolling* (CC-CCR). É dito que o processo de enfiamento é CC-CCR quando a temperatura de carregamento das placas no FR é inferior a 400°C, mas é muito freqüente que esta temperatura seja a

temperatura ambiente. O CC-CCR será o processo típico no caso em estudo. Abaixo serão descritos os outros processos de enformamento:

- ‘Enformamento a quente’ (CC-HCR- *Continuous casting - hot charge rolling*), onde as placas de aço saem da MLC e vão para ‘fossas’ no PEP ou para qualquer outro meio de isolamento térmico e, somente após algum tempo, elas são enformadas no FR. Costuma-se dizer que através deste método de enformamento as placas entram ‘mornas’ no FR. Geralmente as temperaturas carregamento estão entre 400°C e 800°C;
- ‘Enformamento a quente direto’ (CC-DHCR- *Continuous casting - direct hot charge rolling*), onde as placas de aço saem da MLC e vão direto para o FR sem passar antes pelo PEP. Geralmente as temperaturas de carregamento estão entre 700°C e 1000°C;
- ‘Laminação direta a quente’ (CC-HDR- *Continuous casting - hot direct rolling*), onde as placas vão diretamente ao LTQ, sem antes passarem pelo FR. Para este processo ser possível, as placas devem sair da MLC com temperaturas acima de 1100°C.

É importante ressaltar que quanto mais direta a ligação entre uma MLC e a área de laminação, menor será o consumo de energia devido ao aproveitamento da energia calorífica da própria placa de aço, porém, mais difícil será o sincronismo (programação e o seqüenciamento) entre os equipamentos envolvidos, ‘podendo’ causar a subtilização de algum deles, pois os critérios de programação e seqüenciamento, por exemplo, de uma MLC e de um LTQ são muito diferentes a ponto de ser bem difícil conseguir um fluxo contínuo de produção.

### **O processo de laminação de placas de aço**

Após sair do FR (área de reaquecimento), a placa de aço aquecida já a uma temperatura ideal para sofrer o processo de laminação (temperatura de processamento) irá para a área de laminação propriamente dita. Apesar de ser composta por vários equipamentos, em termos de programação de produção pode-se considerar que a área de laminação é dividida em duas seções (equipamentos) principais: o LD e o TA. O LD, geralmente composto por uma única ‘cadeira de cilindros de laminação’, faz a redução da espessura da placa de aço aquecida,

recém saída do FR, de alguns centímetros (entre 200 e 250 mm é a média que está sendo praticada em grande parte das usinas siderúrgicas pelo mundo) para valores entre 20 e 40 mm (também são números típicos de siderúrgicas no mundo), transformando-a em uma ‘chapa grossa’ aquecida. O TA, formado por algumas cadeiras de cilindros de laminação (entre 5 e 7 são valores típicos), reduzirá gradualmente a espessura da chapa grossa até a espessura final exigida para a BQ, que é de alguns milímetros.

Apesar de haver grande variação nas condições ideais de operação dos equipamentos de laminação a quente, quando se compara uma companhia siderúrgica com outra, algumas das mais frequentes e que ocorrem no caso em estudo, serão descritas a seguir.

### **O problema geral de seqüenciamento de um LTQ**

Em geral, as duas grandes preocupações referentes ao seqüenciamento de um LTQ se referem à: qualidade superficial do produto acabado (BQ) e produtividade dos equipamentos, principalmente dos cilindros de laminação, que possuem um dos mais altos custos na siderurgia. Estes dois objetivos são conflitantes. Outros fatores também são desejados no seqüenciamento de um LTQ, tais como homogeneidade dimensional e de composição química (grau) das placas que alimentarão o FR, visando à economia de energia do sistema.

Em linhas gerais, as características gerais e maiores dificuldades no seqüenciamento serão descritas abaixo.

Os cilindros do LD e do TA sofrem desgaste devido a: esforço de compressão, atrito e temperatura. As BQs deixam marcas nos cilindros, causadas principalmente pelas ‘bordas’ ou ‘quinas’, que são regiões mais duras e críticas de laminar devido ao resfriamento mais rápido. Devido a isto, os cilindros devem ser trocados de tempos em tempos para que as marcas causadas pelo desgaste não passem para as BQs, garantindo assim a qualidade superficial das mesmas, conseqüentemente, um maior valor do produto.

A seqüência de placas de aço que será laminada e transformada em BQs entre duas trocas consecutivas de ‘cilindros de trabalho’ das cadeiras de laminação do TA é chamada por alguns autores de ‘caixão de laminação’ ou *product block* (PB). Este nome se deve à semelhança do típico perfil de larguras que a seqüência



de placas que compõem um caixão de laminação deve ter com o de um caixão (*coffin*). Este perfil visa o melhor aproveitamento do cilindro (Figura 2.3) que, como dito anteriormente, fica marcado pelas bordas das tiras laminadas.

O grupo de placas processadas entre duas trocas consecutivas dos cilindros do LD é denominado por alguns autores como ‘ciclo de desbaste’ ou ‘*line-up*’ (LU). Em geral, os cilindros de trabalho do TA necessitam ser substituídos em períodos curtos, de horas, ou seja, estes cilindros laminam tonelagens não muito grandes de aço (geralmente menos de 3.000,00) e já necessitam ser trocados, caso contrário comprometem a qualidade superficial das BQs. Já os cilindros do LD possuem uma vida útil maior que os do TA (no mínimo três vezes maior), podendo chegar a alguns dias de produção sem que seja necessário trocá-los, ou seja, em cada ciclo de desbaste, normalmente estão incluídos vários caixões de laminação. Esta quantidade depende de alguns fatores peculiares a cada laminador, tais como: características do equipamento, tipo de aço a ser laminado, espessura de entrada da placa de aço *versus* espessura de saída do ‘esboço’ (chapa grossa) no LD, material dos cilindros de desbaste.

Percebe-se que os cilindros do TA são mais críticos do que os do LD, além de possuírem preços elevados (da ordem de US\$ 20.000,00) devido às suas grandes exigências matéricas e de acabamento superficial (retificado), pois são eles que conferem a qualidade superficial à BQ, portanto necessitam de cuidado todo especial no momento do seqüenciamento.

Geralmente, os fatores restritivos do seqüenciamento da produção de BQs são: especificações de qualidade superficial do produto e datas prometidas de entrega. Cada placa de aço tem características importantes: largura, espessura, grau (composição química), temperatura de carregamento no FR, temperatura de saída, dureza, e dimensões finais requeridas para a BQ que será produzida. É importante ressaltar que cada placa será transformada em uma única BQ.

Uma boa seqüência de placas em um LTQ requer trocas suaves de: largura das BQs, espessura das BQs, dureza e tempo de residência no FR. Isto é necessário para o bom rendimento de um LTQ (FRs, LD e TA) como um todo.

A troca suave de largura das BQs se deve aos fatores que determinam que o melhor perfil de larguras de uma seqüência de laminação (PB) tenha a forma de um ‘caixão’.

No início da laminação, existe a necessidade de alinhamento, balanceamento e início de aquecimento dos cilindros recém substituídos. Para tanto, é necessário seqüenciar apenas algumas BQs estreitas nesta zona inicial de um caixão, que é denominada por alguns autores como ‘acerto’ ou ‘*break-in*’, a menor de toda a seqüência. As placas ali seqüenciadas devem possuir as menores exigências dimensionais e de qualidade possíveis, pois é uma zona de ajustes iniciais. Após esta zona, é necessário que as larguras cresçam, ou seja, que as placas sejam seqüenciadas da mais estreita para a mais larga. Esta nova zona de larguras crescentes, denominada por alguns autores como ‘abertura’ ou ‘*wide-out*’, ainda tem a finalidade de melhor ajustar os cilindros do TA e também deve conter BQs seqüenciadas, porém em uma quantidade pouco maior do que na zona de acerto. Tais BQs ainda não devem possuir grandes exigências de qualidade e tolerância dimensional. Ao final da abertura é alcançada a maior largura da seqüência, começa então a zona denominada ‘corpo’ ou ‘*comming-down*’, onde os cilindros estão devidamente alinhados, balanceados e aquecidos, ou seja, em plenas condições de receberem as BQs com as maiores exigências dimensionais e de qualidade da seqüência programada. Nesta zona as BQs devem ser seqüenciadas da maior largura para a menor (decrementemente), isto porque os cilindros começam a sofrer um desgaste maior nas áreas das quinas das placas, que, mais duras, causam uma concentração de tensões e são mais difíceis de laminar. Este desgaste tende a marcar os cilindros e estas marcas passariam para as BQs que seriam laminadas posteriormente na seqüência. O decréscimo de larguras das BQs se deve justamente para que as marcas deixadas pelas quinas nos cilindros pela BQ anterior (mais larga) não passem para a BQ seguinte (mais estreita), causando perda de perda da qualidade da BQ.

A Figura 2.3 ilustra as zonas de um *Product Block*.

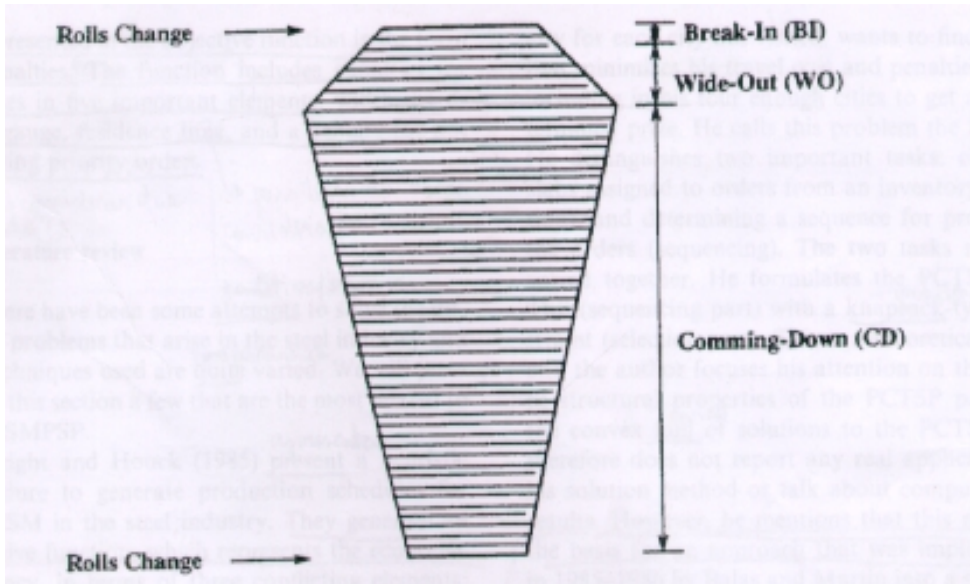


Figura 2.3 – Perfil do caixão de laminação (*product block*)  
Fonte: Lopez, Carter e Gendreau (1998)