



Processos de Conformação Mecânica: Laminação e Trefilação de Aços

Após a obtenção do aço sólido, geralmente através do processo de lingotamento contínuo, que, devido aos ganhos de produtividade proporcionados, suplantou o primitivo processo de lingotamento estacionário, o aço, já solidificado deve ser submetido aos processos de conformação mecânica, que tem por objetivo transformar o lingote, com microestrutura bruta resultante da solidificação, em produtos semi-elaborados, com microestrutura refinada por ciclos sucessivos de deformação plástica e recozimento para recristalização, e com dimensões mais próximas do produto final, como produtos planos (chapas, tiras e etc) e não planos (vergalhões, arames e etc), que depois serão vendidos pela usina siderúrgica a indústrias de menor porte, que com esses materiais ferrosos (denominados produtos semi-elaborados) fabricarão diversos produtos finais para o consumidor, como componentes automotivos, pregos e vários outros produtos [1-3].

Os processos mais utilizados na indústria para a fabricação desses produtos semi-elaborados são a laminação (que pode produzir tanto produtos planos quanto não planos) e a trefilação (que só pode produzir produtos não planos, geralmente com características distintas dos que são produzidos por laminação não plana). Estes dois processos serão descritos a seguir neste texto [1-3].

a) Laminação

Laminação pode ser definida como um processo de conformação de metais onde estes passam por entre dois rolos giratórios que os comprimem, e têm sua espessura diminuída e seu comprimento aumentado. É um processo que permite obter alta produtividade e boa precisão dimensional, além de

uma certa variedade de formas. Neste processo o material é submetido a altas tensões compressivas, resultante da ação direta dos rolos, e a tensões cisalhantes superficiais, resultantes do atrito entre os rolos e o material. Estas tensões de fricção também são responsáveis pelo tracionamento do material, assim puxado para fora do espaço entre os rolos (cilindros) de laminação [1-3].

A laminação pode ser realizada em temperatura relativamente alta, normalmente superior à temperatura de recristalização do material (metade da temperatura de fusão em K), sendo então conhecida como laminação a quente, ou à temperatura ambiente, sendo então conhecida como laminação a frio. Normalmente o processo inicial é a laminação a quente, que tem por objetivo desbastar (diminuir bastante a espessura) do lingote solidificado no lingotamento contínuo, destruindo a microestrutura bruta de fusão de grãos grosseiros, que é então substituída por uma microestrutura de grão mais refinados, resultantes da conformação mecânica. Geralmente o processo inicial é a laminação a quente, que reduz a espessura do material o suficiente para que este, já transformado de lingote em chapa grossa, possa ser submetido à laminação a frio, que permite melhor controle de espessura e resultado num produto semi-elaborado (chapa fina, tira ou folha com ótimas propriedades mecânicas, resultantes da microestrutura refinada obtida por laminação a frio). Este produto semi-elaborado é então vendido pelas usinas siderúrgicas aos fabricantes de vários tipos de produto, que o utilizam como matéria-prima para a fabricação desses produtos [1-3].

O laminador consiste de um conjunto de rolos, mancais, uma carcaça (“gaiola”, cuja função é envolver e suportar todo o conjunto) e um motor (cuja função é fornecer potência aos rolos e controlar a velocidade de rotação) [1-3].

O tipo mais simples de laminador é o duo, no qual dois rolos com o mesmo diâmetro giram no mesmo sentido. No laminador duo reversível o material pode passar para frente e para trás entre os rolos, que invertem o sentido de rotação. Existem também laminadores com mais de dois rolos, nos quais dois estão em contato com o material que está sendo laminado, funcionando os outros rolos como rolos de suporte ou sustentação. É o caso dos laminadores quádruplos (4 rolos) e os laminadores agrupados (vários rolos)[1-3].

Laminação a quente

Executada no início do processo de laminação, a primeira operação de laminação a quente é realizada no laminador primário de desbaste, que recebe o lingote solidificado e o transforma numa chapa ainda bastante grossa. Este tipo de laminador apresenta geralmente configuração de dois reversíveis. Geralmente a laminação a quente de aços começa com temperaturas entre 1.100 e 1.300°C e termina entre temperaturas da ordem de 700 a 900°C, porém geralmente acima da temperatura crítica, com o objetivo de produzir grãos de ferrita uniformemente equiaxiais [1-3].

Laminação a frio

A laminação a frio é uma operação de conformação complementar, que sucede à laminação a quente e tem por objetivo a produção de chapas, tiras e folhas de aço com melhores tolerâncias dimensionais e microestrutura mais refinada, permitindo a obtenção de propriedades mecânicas adequadas às aplicações desses produtos siderúrgicos. Geralmente, a laminação a frio é intercalada com tratamentos térmicos de recozimento, que restauram a ductilidade do material (normalmente por recristalização), que é sensivelmente diminuída pelo encruamento associado à deformação plástica introduzida no processo de conformação mecânica, como laminação ou trefilação. Para remover a camada de óxido que se forma sobre a superfície do aço laminado e recozido, como decorrência do aquecimento realizado no recozimento, geralmente o material é mergulhado em tanques contendo soluções ácidas que dissolvem essa camada de óxido. Este processo de remoção da camada de óxido por soluções ácidas é conhecido como decapagem. Mediante a realização desses tratamentos térmicos de recozimento intercalados com laminações sucessivas, é possível reduzir a espessura das chapas laminadas entre 50 e 90 % [1-3].

No caso de determinados aços, que apresentam limite de escoamento descontínuo, associado à formação das chamadas bandas de Lüder, a prática usual consiste em realizar uma pequena redução final a frio no aço recozido, denominada passe de encruamento superficial, ou passe de acabamento superficial, que permite eliminar a elongação do limite de escoamento descontínuo. Além disso, esse passe de acabamento também proporciona a melhora do acabamento da superfície do material e melhor controle da espessura (bitola). Outros métodos utilizados com essa finalidade de melhorar o controle da bitola são o aplainamento por rolos e o

desempeno por tração. Uma máquina de aplainamento por rolos consiste de dois grupos de rolos de pequeno diâmetro, dispostos de tal modo que a fileira superior e a fileira inferior estejam deslocadas entre si. Quando a placa passa no aplainador é fletida para cima e para baixo, saindo retificada dos rolos. O desempenador por tração consiste em duas garras que prendem as extremidades das folhas e a esticam, através da aplicação de uma tensão de tração pura [1-3].

Laminação Não Plana (de Barras e Perfis)

Barras de aço com seção transversal circular e hexagonal, bem como perfis estruturais (vigas em I, calhas e trilhos), podem ser produzidos em larga escala por laminação a quente, através do uso de laminadores com rolos ranhurados. Estes também são usados para desbastar o lingote na laminação a quente inicial [1-3].

Ao contrário do que ocorre na laminação plana (de chapas, tiras e folhas), na laminação não plana a seção transversal do material é reduzida em duas direções. Contudo, em cada passe o material é comprimido numa única direção, sendo girado a 90° no passe subsequente [1-3].

Os produtos não planos são fabricados com o uso de laminadores específicos e diferentes dos que são utilizados na laminação plana. É o caso do laminador de barras e do laminador de perfis comerciais. Os laminadores de barras podem ser duos e são equipados com guias para conduzir o material para as ranhuras, como também dispõem de repetidores, que invertem a direção da barra e a conduzem para o passe seguinte. Consistem de um grupo formado por uma cadeira de desbaste, uma cadeira formadora e uma cadeira de acabamento, podendo formar o chamado “trem de laminação”, que consistem de vários laminadores situados próximos uns aos outros, lado a lado, e os laminadores numa cadeira são acionados por uma conexão, que os liga à cadeira adjacente [1-3].

Parâmetros de Laminação

Os principais parâmetros de laminação são: o diâmetro do rolo, a resistência à deformação do material que está sendo laminado (tensão de escoamento), a carga (força) de laminação, a temperatura, a taxa de deformação, o atrito entre os rolos e o material e a presença da tração avante ou a ré no plano da placa [1-3].

Todos esses parâmetros devem ser controlados, para que possam ser fabricados produtos laminados sem problemas e defeitos [1-3].

Problemas e Defeitos em Produtos Laminados

Uma grande variedade de problemas na laminação, acarretando defeitos específicos, pode ocorrer, dependendo da interação entre o material que está sendo deformado plasticamente e os rolos de laminação deformados, elasticamente, e o laminador. Quando as forças de laminação são muito elevadas, os rolos se achatam e se envergam, distorcendo elasticamente o rolo ou até mesmo todo o laminador. A abertura entre os rolos deve permanecer perfeitamente paralela, pois caso contrário uma aresta da chapa laminada sofrerá menor redução de espessura do que a outra. Como o volume do material permanece constante, isso acarreta diferença também no comprimento, ou seja, uma aresta da placa se alonga mais do que a outra, provocando curvamento na chapa laminada. Isso prejudica tanto a uniformidade da espessura da chapa quanto a sua planicidade. A planicidade e a uniformidade da espessura também podem ser prejudicadas quando os rolos de laminação se distorcem ao ponto de se curvarem. Nesse caso as arestas da chapa se alongam mais no sentido longitudinal do que o centro da chapa, que permanece mais curto, também devido à constância do volume da chapa, que impõe essa restrição à deformação. Assim, enquanto as arestas da chapa ficam tensionadas em compressão, o centro da mesma é tensionado em tração. Como resultado a chapa fica “enrugada”. Para evitar esse problema, decorrente da condição de formato côncavo que os rolos assumem durante a laminação (muitas vezes devido à temperatura), os rolos devem possuir uma curvatura ligeiramente convexa (“bombê”), de modo a compensar este fenômeno. Quando o problema de forma é pequeno, pode ser corrigido por desempenho em tração, ou com o uso de uma desempenadora de rolos (flexão). Estes problemas de forma e planicidade dão material são introduzidos por heterogeneidades na deformação na direção de laminação da placa (forma resultante da laminação inicial do lingote e anterior à laminação que resulta na chapa grossa) [1-3].

Outras formas de heterogeneidades na deformação podem acarretar problemas com trincamento. À medida que o material passa através dos rolos de laminação, todos os elementos ao longo da espessura apresentam alguma tendência a se expandir lateralmente (na direção transversal da

placa). As forças de atrito transversais se opõem á tendência ao espalhamento lateral, porém devido á sua distribuição natural, são muito mais intensas no centro do que nas extremidades laterais da placa. Como consequência, o espalhamento é muito mais intenso nas laterais do que no centro da placa. Assim, com a redução da espessura no centro do material, todos os elementos deformados contribuem para o aumento do comprimento, enquanto parte da contribuição das arestas vai é “perdida” para efetuar o espalhamento lateral. Como consequência disso, a folha laminada pode apresentar um pequeno abaulamento nas suas extremidades laterais. Porém, devido à continuidade entre as bordas e o centro do material, as extremidades deste ficam tensionadas em tração, o que favorece a formação de trincas na aresta. Em condições extremas pode se formar uma fenda longitudinal no centro do material, em decorrência do tracionamento lateral [1-3].

Além disso, o surgimento de trincas nas arestas também pode ser causado por heterogeneidades na direção da espessura. Quando a laminação é realizada em condições nas quais somente a superfície da peça é deformada, como no caso de pequenas reduções de espessura, a seção transversal da folha fica deformada de modo que as arestas ficam mais comprimidas do que o centro do material. Nos passes subseqüentes de laminação, através dos rolos o material saliente não é comprimido diretamente, e sim forçado a se alongar pelo material vizinho mais perto do centro. Essa situação acarreta o surgimento de altas tensões trativas secundárias, que provocam o aparecimento de trincas nas arestas. Normalmente este tipo de trinca surge na redução inicial do lingote na laminação a quente, basicamente quando a espessura é superior ao dobro da largura [1-3].

Outro tipo de defeito aparece quando são realizadas grandes reduções de espessura, de tal modo que a deformação se estende através da espessura da placa, de tal modo que o material das superfícies externas se alonga menos do que o material do interior, que se expande mais, produzindo arestas com formas abauladas em forma de barril, como corre na compressão de um cilindro. As tensões de tração secundárias, associadas a este “embarrilamento”, causam trincas nas arestas, enquanto interior do material fica comprimido. Caso exista algum fator metalúrgico que cause fragilização no interior do material, com a presença dessas tensões ao longo do comprimento da chapa/placa, a mesma poderá apresentar fratura

em forma de “boca de jacaré”, também conhecida como “rabo de peixe”. O desalinhamento dos rolos de laminação pode agravar esse tipo de defeito [1-3].

O surgimento de trincas em arestas de chapas ou placas de aço é minimizado na laminação com o uso de rolos verticais, que mantêm as arestas retas e assim evitam o acúmulo de tensões secundárias associadas ao “embarrilamento” das arestas. Caso não estejam disponíveis rolos verticais no laminador, pode-se aparar as arestas para evitar a ocorrência desse problema de surgimento de trincas nas arestas do material. Outra alternativa seria o uso de barras de restrição para as arestas, fabricadas com material com tensão limite de escoamento semelhante à do material que será laminado [1-3].

Defeitos oriundos do lingote solidificado, como porosidade, rechupes, inclusões não metálicas de diversos tipos e outros tipos de descontinuidades, geradas durante a solidificação, também podem originar trincas durante o processo de laminação subsequente [1-3].

b) Trefilação

O processo de trefilação consiste basicamente em tracionar o material através de uma matriz cônica (denominada “fieira), por meio da aplicação da tensão de tração a uma extremidade do material (geralmente “apontada” por usinagem) na saída dessa fieira. Deste modo, reduz-se o diâmetro do material, aumentando simultaneamente o seu comprimento. A maior parte do escoamento plástico é causada pelos esforços de compressão resultantes da reação do material com a matriz [1-3].

Em geral a seção transversal do aço trefilado apresenta simetria circular, embora isso não seja um requisito obrigatório. Com a redução sucessiva de diâmetro obtida mediante a trefilação, podem ser fabricados diferentes produtos, como barras, vergalhões e arames, dependendo do produto semielaborado resultante do processo de trefilação, que também pode ser realizada em tubos ocos, podendo utilizar, ou não, um mandril, com o objetivo de obter melhor controle de espessura final [1-3].

Em geral a trefilação é realizada á temperatura ambiente, porém como os graus de deformação envolvidos neste processo atingem níveis elevados,

naturalmente ocorre considerável aumento de temperatura durante a trefilação, associado à deformação e ao atrito [1-3].

Trefilação de Produtos Não Ocos: Barras, Vergalhões e Arames

A trefilação de barras, vergalhões e arames apresentam semelhanças entre si, considerando que são produtos cuja seção transversal não é oca, embora possa haver alguma variação entre os equipamentos usados, acarretada basicamente pela diferença de dimensões dos produtos [1-3].

As barras, e os vergalhões de maior espessura, que não podem ser bobinados, são fabricados numa bancada de trefilação, na qual o material entra por uma matriz fixa, e sai da mesma, tracionado por um cabeçote de tração, preso à extremidade do material por garras. A barra é apontada por torneamento ou martelamento rotativo e inserida através da matriz e presa por garras (tenazes), ao cabeçote de tração, que se movimenta por um mecanismo hidráulico ou de transmissão de corrente. As velocidades de trefilação na bancada variam de 10 a 100 m/min e a capacidade de força de arraste pode atingir 135.000 kgf e saída de 30 m [1-3].

A matriz de trefilação é cônica, com ângulo de entrada com abertura suficiente para permitir a entrada do lubrificante, que adere às superfícies internas da matriz. O chamado ângulo de aproximação corresponde à região onde ocorre efetivamente a redução do diâmetro do material que está sendo trefilado. A superfície de apoio tem como função guiar a barra ou vergalhão, à medida que este material sai pela cavidade interna da matriz. Outra característica importante da matriz de trefilação é o seu semiângulo de inclinação (α). A maioria das matrizes é fabricada com carbeto de tungstênio, material que lhes confere longa durabilidade em serviço [1-3].

A trefilação do arame começa após a decapagem (com solução ácida), da barra, vergalhão ou arame, produzidos por lingotamento ou por lingotamento e laminação não plana a quente, com o objetivo de remover óxidos (também conhecidos como “carepa”) resultantes desses processos de fabricação, minimizando ou até mesmo eliminando a possibilidade de ocorrência de defeitos superficiais no produto trefilado, ou de desgaste excessivo na matriz [1-3].

No caso da produção de arames de aço a próxima etapa do processo consiste em revestir o vergalhão com cal, ou eletrodepositar sobre a sua

superfície uma fina camada de cobre ou de estanho. A cal é utilizada como um meio de absorção e transporte do lubrificante durante a chamada trefilação por via seca, na qual o verdadeiro lubrificante é a graxa ou o sabão em pó. Por outro lado, na trefilação por via úmida toda a matriz fica imersa num fluido lubrificante [1-3].

No caso da fabricação de arames (diâmetro, também conhecido como bitola, inferior a 12,5 mm) por trefilação, utiliza-se o chamado sarilho, que é uma peça, de formato cilíndrico, sobre a qual bobina-se o arame. No caso de arame grosso somente um sarilho é utilizado, mas no caso de arames finos (fios metálicos), o arame passa por uma séria de fieiras numa operação contínua até que a sua bitola atinja o valor final, então vários sarilhos são usados. No caso de arames grossos a redução de espessura por passe fica entre 20 e 50 %, enquanto no caso de arames finos, varia de 15 a 25 %. A velocidade de trefilação pode atingir 1.500 m/min [1-3].

No caso da trefilação de aços baixo carbono é possível obter produtos com diferentes níveis de dureza, mediante controle adequado dos ciclos (principalmente tempo e temperatura) de recozimento, geralmente intercalado com os passes de trefilação. Quando o teor de carbono supera 0,25 %, é realizado um tratamento térmico especial denominado patenteamento. Este tratamento é realizado com o aquecimento do material acima da temperatura crítica superior, seguido pelo resfriamento, com taxa controlada, ou um tratamento com banho de chumbo a 300°C, para formar perlita fina, resultando na melhor combinação de resistência mecânica e ductilidade, além de favorecer o processo de trefilação de arames de aço de alto carbono usados na fabricação de molas e de cordas de instrumentos musicais [1-3].

Os defeitos nos produtos trefilados podem resultar de defeitos oriundos da barra original (fissuras, lascas e vazios), ou do processo de trefilação propriamente dito. O tipo de defeito mais comum em trefilados de aço é a fenda interna no centro da barra, também conhecida como trincamento estriado, conhecido no idioma inglês como "cupping". Pode ser minimizado mediante controle da combinação entre semiângulo da matriz e grau de redução, garantindo menor energia de deformação para minimizar a ocorrência desta descontinuidade no centro da barra. Menores ângulos de inclinação e menores graus de redução favorecem a ocorrência deste tipo de defeito, mas quando o ângulo aumenta, também aumenta a redução

crítica para a ocorrência deste tipo de defeito. Para um dado grau de redução de espessura e um dado ângulo de matriz, a redução crítica para evitar a fratura aumenta com o atrito [1-3].

Trefilação de Produtos Ocos: Tubos

No processo de trefilação de tubos, realizado com a introdução de um mandril (plugue), a maior parte da deformação ocorre como redução de espessura da parede do material que está sendo trefilado como tubo. Geralmente o material é trefilado após um processo inicial de laminação não plana com mandril, sendo o processo de trefilação responsável pelo acabamento do material, tanto no que se refere a dimensões quanto à microestrutura, permitindo a produção de tubos com menores diâmetros e paredes mais finas [1-3].

Há três tipos básicos de trefilação de tubos: com mandril, com plugue e em matriz (sem que o tubo esteja suportado). Na trefilação de tubo em matriz tanto o cisalhamento quanto a deformação redundante ocorrem em graus elevados, sendo a deformação limite menor do que no caso dos demais tipos de processo de trefilação de tubos. O plugue é uma peça com comprimento muito menor do que o mandril, podendo ser cilíndrico ou cônico quanto ao formato e podendo ser fixo ou flutuante. O plugue controla o tamanho a forma do diâmetro interno, proporcionando melhor precisão dimensional do que a trefilação em matriz. Como o atrito que surge entre o plugue e o material (que está sendo trefilado) é crescente, a redução de área proporcionada por este processo raramente supera o nível de 30 por cento. Entretanto, os plugues flutuantes, quando adequadamente projetados, podem permitir redução de área da ordem de 45 por cento e com este mesmo nível de redução, proporcionam a possibilidade de menores cargas de trefilação, além de permitir a produção e bobinamento de tubos longos. Entretanto, fatores consideravelmente críticos neste processo são a lubrificação e o projeto (desenho) das ferramentas [1-3].

Os problemas relacionados com atrito na trefilação de tubos podem ser minimizados com a utilização de um mandril passante, longo o suficiente para abranger uma distância que vai de certo trecho anterior à matriz até um trecho bem posterior à saída da matriz. O mandril se constitui numa barra longa e dura que se estende ao longo de todo o comprimento do tubo, sendo tracionado, conjuntamente com este, pela tenaz através da matriz. Na interface entre o mandril e o tubo surge um arraste produzido pelo atrito,

o qual cancela o arraste produzido no sentido contrário pelo atrito entre a matriz fixa e o tubo. Após a realização do processo de trefilação o mandril é removido do tubo por retificação, processo de usinagem que aumenta ligeiramente o diâmetro do tubo, alterando as tolerâncias dimensionais. Entretanto, tudo isso pode ser calculado e previsto anteriormente [1-3].

Tensões Residuais na trefilação de Barras, Arames e Tubos

Em função do grau de redução de bitola podem surgir dois tipos diferentes de tensões residuais nos vergalhões e arames trefilados à temperatura ambiente. Quando a redução por passe é inferior a 1 %, as tensões residuais longitudinais são compressivas nas superfícies e trativas no centro, ao passo que as tensões são trativas no centro e se reduzem a zero nas superfícies do material. Entretanto, para graus de redução de espessura mais elevados, mais importantes do ponto de vista das aplicações industriais, a distribuição de tensões residuais apresenta comportamento exatamente inverso ao caso anterior dos pequenos graus de redução de espessura na trefilação. Assim, no caso de maiores graus de redução de espessura, as tensões residuais longitudinais são trativas nas superfícies e compressivas no centro do vergalhão, enquanto as tensões residuais radiais são compressivas no centro, ao passo que as tensões circunferenciais apresentam o mesmo comportamento das tensões longitudinais [1-3].

Na trefilação, para um determinado grau de deformação, as tensões residuais longitudinais aumentam com o aumento do ângulo de inclinação da fieira. Os mais altos valores de tensões residuais são atingidos para reduções de espessura da ordem de 15 a 35 por cento [1-3].

No caso de tubos trefilados sem suporte do diâmetro interno, em condições de deformação relativamente uniforme através da parede do tubo, as tensões residuais longitudinais são trativas nas superfícies externas e compressivas na superfície interna do tubo. As tensões residuais circunferenciais apresentam comportamento idêntico, ao passo que as tensões residuais radiais podem ser negligenciadas [1-3].

Por outro lado, as tensões circunferenciais atuantes na superfície do tubo trefilado sem suporte interno aumentam com a redução do diâmetro na mesma proporção em que a tensão de escoamento cresce com o trabalho a frio. No caso de tubos trefilados com mandril e plugue a distribuição de

tensões residuais é igual ao caso de trefilação sem suporte interno. Um aspecto importante é a diminuição considerável do nível de tensões residuais, obtida através da trefilação em série, na qual é realizada uma redução de espessura (cerca de 2 %) subsequente e imediata à redução principal 1-3].