

DESENVOLVIMENTO DAS SEQUÊNCIAS DE PASSES PARA A LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS DE AÇO INOXIDÁVEL⁽¹⁾

Ronaldo Claret Ribeiro da Silva⁽²⁾
Lenine Guilherme Dietrich⁽³⁾

É apresentado o modelo de cálculo das sequências de passes para a laminação a quente de chapas grossas, desenvolvido para o laminador desbastador da laminação de tiras a quente da Acesita.

A aplicação deste modelo tem permitido a produção de chapas grossas de aço inoxidável ABNT 304(L) e 316(L) sem desvios da espessura programada, viabilizando uma importante linha de produtos.

A model to calculate the passes schedule for hot rolling heavy plates is presented, meant for the Acesita Rougher Mill.

The application of this model has allowed the production of ABNT 304(L) and 316(L) stainless steel plates without deviation from the aimed thickness, causing on important product line to come true.

-
- 1) Contribuição Técnica ao Iº Seminário Brasileiro sobre os aços inoxidáveis.
 - 2) Membro da ABM, Engº Mecânico, M.Sc., Pesquisador Senior da Divisão de Metalurgia da Acesita.
 - 3) Membro da ABM, Engº Metalúrgico, Chefe da Seção de Controle de Processo da Laminação a Frio de Aços Inoxidáveis da Acesita.

1. INTRODUÇÃO

Na laminação de tiras a quente da Acesita, chapas com espessura superior a 14mm são produzidas pelo laminador desbastador, figura 1. Este equipamento, ao contrário do laminador Steckel, não está equipado com AGC, o que dificulta o atendimento às espessuras programadas.

Foi necessário o desenvolvimento de um modelo de cálculo das sequências de passes para a laminação de chapas grossas, diferente do modelo usado na operação de desbaste normal, de modo a garantir que as espessuras das chapas de aço inoxidável ABNT 304(L) e 316(L) fossem obtidas dentro das tolerâncias exigidas.

2. DESENVOLVIMENTO

A espessura de qualquer material obtida após um passe de laminação (h_1) é sempre maior que a abertura inicial dos cilindros (h_0), devido à deformação elástica do laminador submetido à força de laminação (F), figura 2. Supondo-se uma relação linear entre força e deformação da cadeira, define-se o módulo de rigidez do laminador (M) como:

$$M = \frac{F}{h_1 - h_0} \quad (1)$$

O módulo de rigidez de um laminador depende da resistência mecânica da cadeira, das dimensões dos cilindros, das folgas nos mancais e da largura do material. Um valor obtido para o laminador desbastador da ACESITA é 450 t/mm, número adotado neste trabalho.

Conhecendo-se o módulo de rigidez e a força de laminação prevista para o passe, pode-se calcular a abertura inicial dos cilindros utilizando-se a equação 1, de modo a se obter a espessura final desejada. Nos laminadores equipados com AGC (controle automático de espessura), este cálculo é realizado automaticamente por circuitos eletro-eletrônicos, além de corrigir desvios durante o passe, através de sinais provenientes de células de carga, transdutores de posição, e medidores de espessura por raios-X.

O Cálculo da Sequência de Passes

No início da produção de chapas grossas, eram adotadas sequências de passes semelhantes às utilizadas na laminação de desbaste, ou seja, utilizando-se ao máximo os recursos do laminador. Isto levava à forças de laminação elevadas nos últimos passes, da ordem de 2000 a 3000t, que provocavam deformações elásticas no laminador de até 6mm. Nesta situação, qualquer erro na previsão da força de laminação, somada às incertezas quanto ao valor do módulo de rigidez, provocava um desbitolamento da chapa, pois a deformação da cadeira era 2 a 3 vezes o valor da tolerância dimensional.

Desenvolveu-se, então, um novo modelo no qual, nos 2 últimos passes, é feita uma "laminação de acabamento". Neste processo, no último passe é dada uma redução pequena (10 a 15%) de modo a se ter uma força de laminação baixa e, conseqüentemente uma deformação da cadeira de, no máximo, 1,5 vezes o valor da tolerância dimensional. Assim, mesmo ocorrendo erros nos cálculos da deformação da cadeira, a produção das chapas com a espessura dentro das faixas objetivadas estaria garantida.

No penúltimo passe é dada uma redução intermediária (-25%), servindo como transição entre as altas reduções dos demais passes e o último, além de se ter uma espessura mais próxima da objetivada após este passe, aumentando-se as chances do último passe ocorrer dentro das condições previstas teoricamente.

Nos demais passes, a laminação não difere do desbaste normal, ou seja, são repetidas as reduções máximas para se permitir a "mordida" nos primeiros passes, e é aproveitada a potência disponível para se realizar a operação o mais rápido possível.

O roteiro de cálculos desenvolvido neste modelo é apresentado no fluxograma mostrado na figura 3.

O cálculo da evolução da temperatura da chapa durante o processo, e da força de laminação em cada passe, é realizado utilizando-se modelos apresentados neste trabalho. O cálculo do posicionamento dos cilindros a cada passe é feito através da equação 1.

Duração do Passe de Laminação ⁽¹⁾

A duração de um determinado passe (t) é estimada a partir das espessuras de entrada ($h_{(i-1)}$) e saída (h_i) do passe, da velocidade dos cilindros (v), e do comprimento (C) e espessura (H) iniciais da placa. A partir da constância de volume durante o processo, e da suposição de que, em um ponto do arco de contato, correspondente a uma espessura média, a velocidade dos cilindros é igual à velocidade do material sendo deformado, deduz-se a equação 4 abaixo:

$$t = \frac{2 C H}{v (h_{(i-1)} + h_i)} \quad (4)$$

Determinação da Temperatura de Laminação ⁽¹⁾

Na laminação a quente de produtos planos, é demonstrado que a perda de calor por condução para os cilindros e para a água que cai sobre a chapa (descarepação e refrigeração dos cilindros) é compensada pelo ganho de temperatura devido ao trabalho de deformação. A principal perda de calor se dá, então, por radiação para o ambiente.

A partir da equação de Stefan-Boltzmann para troca de calor por radiação, desenvolveu-se a seguinte expressão para a evolução de temperatura durante o processo:

$$T = \frac{T_0}{\left(1 + \left(\frac{k T_0^3 t}{h}\right)^{1/3}\right)} \quad (5)$$

onde T_0 e T são as temperaturas inicial e final (K), após transcorrido o tempo t(s), h é a espessura da chapa (mm) e k é uma constante que depende do material e ajusta a equação 5, de modo a compensar as perdas convectivas e outras.

A Tensão de Fluxo ^(1,2)

Para o caso da laminação em estado plano de deformações, uma das equações utilizadas para calcular a tensão de fluxo média (kgf/mm^2)

em um passe qualquer é a seguinte:

$$\sigma = 1,15 \left(A + \frac{B}{T} + C (\ln(\epsilon) - 1) + D \ln(\lambda) \right) \quad (6)$$

onde T é a temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ϵ é a deformação real (%), e λ é a velocidade de deformação (s^{-1}). As constantes A, B, C e D dependem do material, e são obtidas por métodos numéricos a partir de curvas tensão x deformação para várias temperaturas e velocidade de deformação.

A velocidade de deformação é dada por:

$$\lambda = \frac{v}{L} \quad (7)$$

onde v é a velocidade dos cilindros (mm/s), L é o arco de contato (mm), e ϵ é a deformação real do passe.

Os valores dos coeficientes da equação 6, obtidos por regressão múltipla a partir de curvas existentes na literatura, para o aço 304 são:

$$A = -43,2 ; B = 50693,5 ; C = 3,06 ; D = 1,33.$$

Para o aço 316 considerou-se a tensão de fluxo como sendo 20% superior à do 304.

Cálculo da Força de Laminação ^(1,2)

Foi adotado o modelo de Sims para o cálculo da força de laminação. Ele se resume na equação abaixo:

$$F = Q \sigma W L \quad (8)$$

F é a força de laminação (kgf), σ a tensão de fluxo média do passe (kgf/mm^2), W a largura da chapa (mm), e L o comprimento do arco de contato (mm). O fator Q depende da geometria do passe e pode ser determinado por âbacos, figura 4, ou através de equações, disponíveis na literatura.

3. RESULTADOS OBTIDOS

Na figura 5 é apresentado um exemplo do perfil de espessuras ao longo do comprimento de uma chapa grossa. Nota-se a influência da temperatura ao observar-se que os pontos onde a espessura se eleva correspondem às regiões da placa que, durante o aquecimento no forno de vigas caminhanes, ficaram em contato com os skids fixos do forno, sendo mais frias que o restante da placa.

Foi adotada a força máxima de laminação igual a 3500t. O teste dos limites do laminador foi feito através da força, mas poderia ter sido feito também pela potência, apesar da experiência com este laminador demonstrar que isto não é necessário. Todas as equações apresentadas neste trabalho são consagradas na literatura e já foram testados no laminador desbastador em outras ocasiões⁽¹⁾. Nos últimos passes da laminação de desbaste ou da laminação de chapas grossas a relação entre o raio dos cilindros de trabalho e espessura é especialmente favorável à aplicação da fórmula de Sims para calcular a força de laminação.

Para atender tolerâncias de espessuras mais rigorosas a redução no último passe não é pré-estabelecida, e sim determinada iterativamente, de modo que a força de laminação neste passe não ultrapasse, por exemplo, 1200t (linha tracejada no fluxograma apresentado na figura 3). Com a exclusão da limitação de redução nos dois últimos passes, o modelo se transforma na laminação de desbaste normal. Na aplicação feita com o micro-computador, esta opção foi colocada, tornando o modelo mais completo, cobrindo as duas modalidades de operação existentes.

Anteriormente à aplicação deste modelo, o desbitolamento das chapas grossas, espessura fora da tolerância, havia chegado a 50% da produção (1984). A partir de sua implantação, em janeiro de 1985, este problema foi resolvido. Menos de 1,5%, de uma produção mensal superior a 200t de chapas grossas de inox, tem apresentado problemas de espessura.

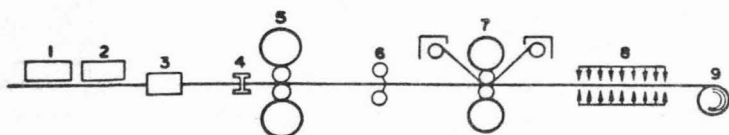
4. CONCLUSÕES

O desenvolvimento e a aplicação deste modelo no cálculo das sequências de passes tem permitido a produção de chapas grossas de aço inoxidável ABNT 304 (L) e 316 (L) sem desvios da espessura programada viabilizando uma importante linha de produtos para a Acesita.

A laminação de tiras a quente da Acesita passou a dispor de um modelo que pode ser aplicado na laminação de chapas grossas, e no desbaste normal de qualquer tipo de material.

BIBLIOGRAFIA

1. SILVA, R.C.R. Determinação da Sequência de Passes na Laminação a Quente de Placas de Aço. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1981 - Tese de Mestrado.
2. SILVA, A.M.S. Análise do Processo de Laminação a Quente. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 1978. Tese de Mestrado.



- | | |
|--------------------------------|---------------------------|
| 1 - FORNO DE VIGAS CAMINHANTES | 6 - TESOURA ROTATIVA |
| 2 - FORNO EMPURRADOR | 7 - LAMINADOR STECKEL |
| 3 - DESCAREPADOR À ÁGUA | 8 - ZONAS DE RESFRIAMENTO |
| 4 - LAMINADOR DE BORDAS | 9 - BOBINADEIRA FINAL |
| 5 - LAMINADOR DESBASTADOR | |

Figura 1 - A laminação de tiras a quente da ACESITA.

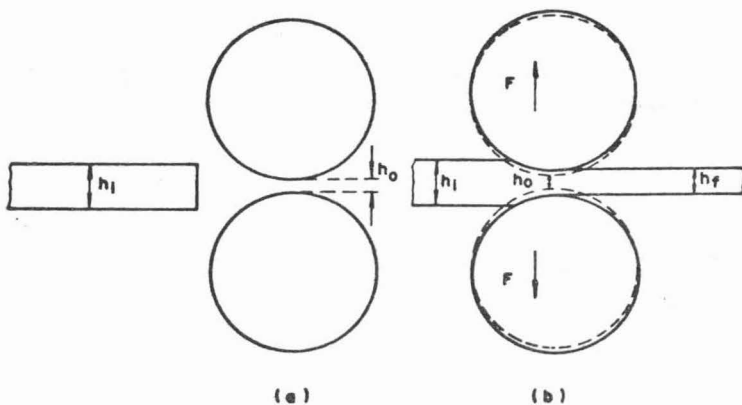


Figura 2 - Deformação elástica do laminador. (a) a abertura dos cilindros antes do passe é h_0 ; (b) durante o passe o laminador se deforma devido à força de laminação F , a espessura final da chapa é $h_f > h_0$.

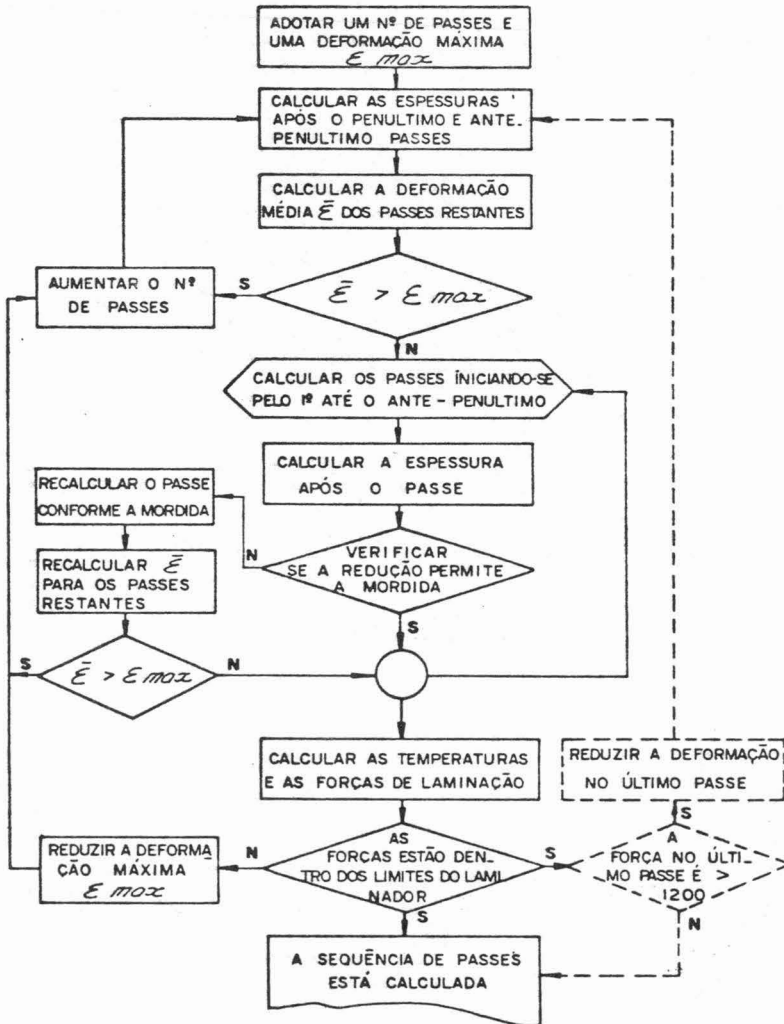


Figura 3 - Fluxograma do cálculo da sequência de passes para laminação de chapas grossas. A linha tracejada é uma sugestão de melhoria do modelo para garantir tolerâncias mais estreitas.

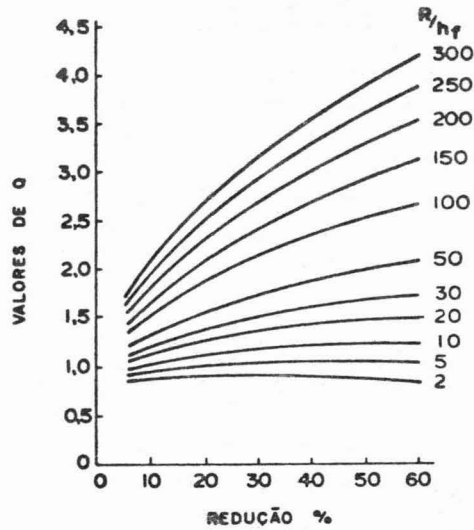


Figura 4 - Valores de Q para uso na fórmula de Sims.

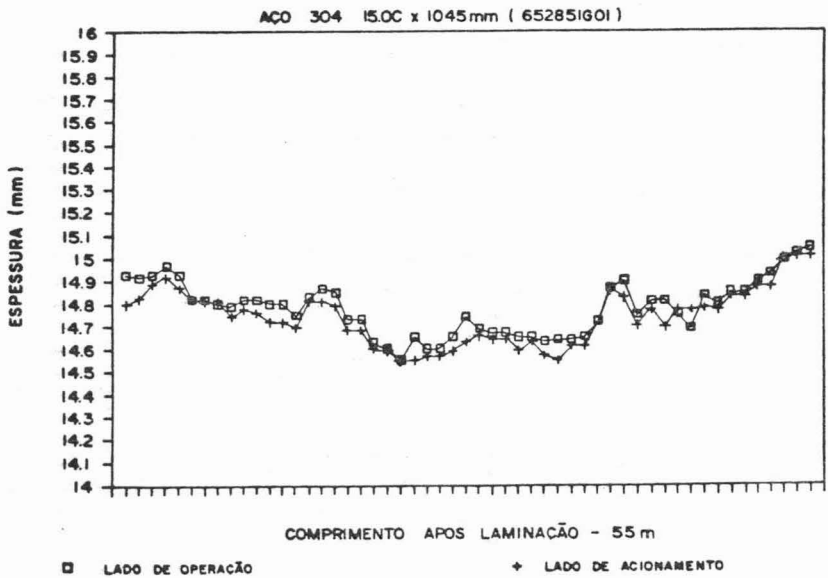


Figura 5 - Variação de espessura ao longo do comprimento de uma chapa grossa.