

DESENVOLVIMENTO DO MODELO MATEMÁTICO PARA PREVISÃO DO ESQUEMA DE
PASSES NA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS DA COSIPA. (1)

Nilton Tuneshi Sugahara (2)
José Herbert Dolabela da Silveira (3)
Marcos Antonio Stuart (4)
Jackson Soares de Souza Reis (5)
Antonio Augusto Gorni (6)

RESUMO

Avaliou-se uma sistemática para determinação do comportamento do processo de laminação de chapas grossas da COSIPA baseado no cálculo do esquema de passe. As equações que melhor se adaptaram à metodologia foram: a) Sims para o modelamento da carga de laminação, e b) Misaka para o modelamento da resistência à deformação a quente do laminado. Como resultado das formulações é mostrado um fluxograma básico para testes do modelo matemático para posicionamento do parafuso do laminador.

-
- (1) - Contribuição técnica a ser apresentada na I Semana sobre
Conformação Mecânica - Joinville, Santa Catarina, 1993.
(2) - Membro da ABM, Engenheiro Mecânico, Seção de Engenharia
de Processo de Laminação da COSIPA.
(3) - Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Seção de
Engenharia de Processo de Laminação da COSIPA.
(4) - Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Seção de Engenharia
de Processo de Laminação da COSIPA.
(5) - Membro da ABM, Engenheiro Metalurgista, Seção de Engenharia
de Processo de Laminação da COSIPA.
(6) - Membro da ABM, Engenheiro de Materiais, M.Sc., Seção de
Pesquisa de Laminação da COSIPA.

1 - INTRODUÇÃO

Na laminação de chapas grossas, a obtenção da espessura do laminado depende de uma complexa conjugação de variáveis de processo. As principais variáveis são:

- a) redução por passe,
- b) largura do esboço,
- c) carga de laminação,
- d) raio dos cilindros,
- e) velocidade de deformação,
- f) temperatura no passe,
- g) resistência à deformação a quente e
- h) módulo de rigidez do laminador.

Muitos pesquisadores desenvolveram métodos de cálculo, utilizando uma equação básica para a determinação da carga de laminação. Na maioria dos casos, os métodos forneceram resultados satisfatórios que se aproximam da realidade. Eles representam a carga de laminação utilizando o conceito da resistência do material à deformação de laminação multiplicado pela projeção horizontal da área de contato do laminado com os cilindros de trabalho, corrigido por um fator Q_p , denominado de função de laminação. Esta equação é:

$$P = b * l_d * K * Q_p \quad (1)$$

sendo:

- P --> carga de laminação
- b --> largura do esboço
- K --> resistência à deformação a quente
- l_d --> arco de contato = $(R * (H_e - H_s)) ** 0,5$

onde:

- R --> raio do cilindro de trabalho
- H_e --> espessura de entrada do esboço
- H_s --> espessura de saída do esboço

Baseado em resultados experimentais, os pesquisadores Ekelund, Tselikov, Orowan-Pascoe e Sims propuseram determina-

ções diferentes para o fator Q_p [1].

Para a determinação da resistência à deformação a quente, os pesquisadores Tegart, Rossard, Misaka, Ekelund e Shida propuseram modelos experimentais correlacionando redução, velocidade de deformação, temperatura e composição química [1].

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para cálculo do esquema de passes na laminação de chapas grossas baseada na adaptação dos diversos modelos de carga de laminação e de resistência à deformação a quente. Esta metodologia vai fazer parte do modelo de posicionamento do parafuso do laminador.

2 - DESENVOLVIMENTO

2.1 - EQUACIONAMENTO DA CARGA DE LAMINAÇÃO

Os valores de Q_p utilizados na equação (1) são os descritos abaixo para os diversos autores:

a) Método de Ekelund.

$$Q_p = \left[1 + \frac{1.6u \sqrt{R \Delta h - 1.2 \Delta h}}{H_e + H_s} \right] \quad (2)$$

onde : $\Delta h = H_e - H_s$

sendo:

u --> coeficiente de atrito

b) Método de Tselikov.

$$Q_p = \frac{2-red}{red * \delta} \left[\left(\frac{1}{1-red} \right)^{\frac{\delta}{2}} - 1 \right] \quad (3)$$

onde : $\delta = u \sqrt{\frac{2d}{\Delta h}}$

sendo:

d --> diâmetro do cilindro de trabalho

red --> redução = $(H_e - H_s) / H_s$

c) Método de Orwan-Pascoe.

$$Q_p = 0,25 \left(3,1415 + \sqrt{\frac{R \Delta h}{H_s H_e}} \right) \quad (4)$$

d) Método de Sims.

$$Q_p = \frac{3,1415}{2} \left[\sqrt{\frac{(1-red)}{red}} \right] * \arctan \left[\sqrt{\frac{1}{(1-red)}} \right] \quad (5)$$

$$\frac{3,1415}{4} - \sqrt{\frac{(1-red)}{red}} * \sqrt{\frac{R}{H_s}} * \ln(Z) +$$

$$0,5 \sqrt{\frac{(1-red)}{red}} * \sqrt{\frac{R}{H_s}} * \ln \left[\frac{1}{(1-red)} \right]$$

onde :

$$x = 0,5 \left[\arctan \left(\sqrt{\frac{red}{(1-red)}} \right) + \frac{3,1415}{4} \sqrt{\frac{H_s}{R}} * \ln(1-red) \right]$$

$$Z = 1 + \tan^2 x$$

2.2 - EQUACIONAMENTO DA RESISTÊNCIA À DEFORMAÇÃO A QUENTE

Para determinação da resistência à deformação a quente do esboço durante o processo de laminação, os modelos utilizados neste trabalho foram:

a) Método de Tegart.

$$\sigma_{Lam} = 0,12 red^{0,2} \left[516,6 + 21,3 \ln \epsilon - \frac{357,2T}{1000} \right] \quad (6)$$

sendo:

T → temperatura

b) Método de Rossard.

$$\sigma_{Lam} = 0,340,276 E' \left(\ln \frac{H_e}{H_s} \right)^{0,23} \left[\text{Exp} \left(\frac{5000}{T+273} \right) \right] \quad (7)$$

c) Método de Misaka.

$$\sigma_{Lam} = 1,15 \text{Exp} \left[0,126 - 1,75C - 0,594C^2 + \frac{(2851 + 2968C - 1120C^2)}{(T + 273)} \right] E'^{0,21} E'^{0,13} \quad (8)$$

sendo:

C ---> teor de carbono

d) Método de Ekelund.

$$\sigma_{Lam} = 1,15(14 - 0,01T)(1,4 + C + Mn + 0,3Cr) \quad (9)$$

sendo:

Mn ---> teor de manganês

Cr ---> teor de cromo

e) Método de Shida.

$$\sigma_{Lam} = 1,15 * f * f * \left(\frac{E'}{10} \right)^n \quad (10)$$

onde:

$$f = 1,3 \left(\frac{E}{0,2} \right)^n - 0,3 \left(\frac{E}{0,2} \right)$$

$$n = 0,41 - 0,07C$$

$$T_k = \frac{(T + 273)}{1000}$$

$$T_d = \frac{0,95(C + 0,41)}{(C + 0,32)}$$

para $T_k > T_d$

$$\sigma f = 0,28 \text{ Exp} \left[\frac{5}{T_k} - \frac{0,01}{(C+0,05)} \right]$$

$$m = (-0,019C + 0,126)T_k + (0,075C - 0,05)$$

para $T_k \leq T_d$

$$\sigma f = 0,28Q \left[\frac{5}{T_k} - \frac{0,01}{(C+0,05)} \right]$$

$$Q = 30(C+0,9) \left[T_k - \frac{0,95(C+0,49)}{(C+0,42)} \right]^2 + \frac{(C+0,06)}{(C+0,09)}$$

$$m = (0,081C - 0,154)T_k + (0,207 - 0,019C) + \frac{0,027}{(C+0,32)}$$

2.3 - EQUACIONAMENTO DA DEFORMAÇÃO ELÁSTICA DO LAMINADOR

Durante um determinado passe, o laminador de chapas grossas sofre uma deformação elástica em seu conjunto mecânico que promove um aumento na abertura do vão entre os cilindros, tornando a espessura de saída do esboço maior que aquela objetivada no passe. Este fenômeno é conhecido como cedagem e está correlacionado com o módulo de rigidez do laminador.

A deformação elástica total (YTOT) no passe de redução é a somatória das deformações individuais de cada componente do conjunto do laminador [1 e 2]:

$$YTOT = A + B*YCOL + C*YP + D*YTS + E*YTI + F*YC + G*YCT + H*YTE + I*YCM + J*YMAN \quad (11)$$

onde:

- YCOL ----> deformação elástica da coluna
- YP -----> deformação elástica do parafuso
- YTS -----> deformação elástica do travessão superior
- YTI -----> deformação elástica do travessão inferior
- YC -----> deformação elástica do cilindro de encosto
- YCT -----> deformação elástica do cilindro de trabalho
- YTE -----> achatamento entre os cilindros de trabalho e os ci-

lindros de encosto

YCM ----> achatamento entre os cilindros de trabalho e o material laminado

YMAN ----> deformação elástica dos mancais

2.4 - MODELO DE POSICIONAMENTO DO PARAFUSO DO LAMINADOR

A estratégia utilizada para a definição do modelo de posicionamento do parafuso do laminador consiste em maximizar as reduções em cada passe, otimizando o número de passes no processo de laminação de chapas grossas. O esquema de redução divide-se em quatro etapas distintas, conforme é mostrado na figura (1).

Em cada etapa, existe uma característica que determina a maneira como é executado o cálculo do esquema de redução:

1) Etapa M

corresponde a região onde o principal fator limitante é a mordida no início de cada passe. Neste instante, as variáveis que predominam são: raio do cilindro, altura do "pass-line" e atrito entre os cilindros de trabalho e o material laminado.

2) Etapa T

região determinada pela capacidade de torque máximo do laminador, que é determinado pelo arco de contato criado no passe de redução entre os cilindros de trabalho e o material laminado.

3) Etapa C

nesta região é que ocorrem os maiores valores de carga de laminação. Uma vez que todas as variáveis de processo neste instante influenciam no valor da carga, o modelo de previsão da carga torna-se a principal ferramenta para determinação do esquema de passes.

4) Etapa F

nesta última região, o fator limitante é a obtenção da espessura e da forma final do laminado. Neste caso, as principais variáveis que influenciam no esquema de pas-

se são: carga de laminação, flexionamento dos cilindros e coroamento do esboço laminado.

A partir do conhecimento dos fatores limitantes em cada etapa do processo de laminação e do domínio da influência das variáveis no processo, define-se o modelo de posicionamento do parafuso baseado nas condições operacionais do laminador. O fluxograma da figura (2) mostra esquematicamente como funciona o modelo de posicionamento do parafuso.

O modelo inicia-se adquirindo dados como as dimensões da placa a ser laminada, as dimensões do produto final, as espessuras de ajuste de forma, de alargamento e de início de cada etapa na laminação. Em seguida, é feito o balizamento das reduções de referência para cada etapa do esquema de passe, levando-se em consideração as condições operacionais, o torque máximo e a carga de laminação máxima nos passes.

Para o posicionamento do parafuso em cada passe é calculada a cedagem do laminador prevendo-se a carga de laminação em função da resistência à deformação a quente do laminado.

3 - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL E RESULTADOS

A metodologia para determinação do esquema de passe no posicionamento do parafuso na laminação foi feita no Laminador de Chapas Grossas da COSIPA. O laminador é do tipo quádruplo reversível e suas características principais estão mostradas na tabela (1).

Os experimentos para definição do modelamento matemático foram realizados com placas de aço C-Mn da classe de 40 Kgf/mm² de limite de resistência oriundas do lingotamento contínuo. Os laminados tinham espessuras variando de 8,00 à 40,00 mm e larguras entre 2.000 e 3.000 mm. As condições térmicas de aquecimento e a temperatura de início de laminação, sempre em torno de 1.100 °C, foram mantidas inalteradas durante a avaliação dos esquemas de passe.

As variáveis de processo foram monitoradas em 43 passes de laminação. Com estes dados, foram calculadas as cargas

de laminação e as resistências à deformação a quente, combinando-se os vários métodos de determinação e posteriormente comparando-se os valores de carga de laminação obtidos em cada passe de redução.

A melhor combinação desses métodos, após a adaptação das equações originais, que apresentou menor desvio padrão da diferença entre a carga de laminação calculada e a carga medida, foi escolhida para constituir o modelo de posicionamento do parafuso.

A figura (3) mostra a comparação feita entre a carga de laminação real e a carga de laminação corrigida teórica obtida pelas equações de Sims e de Misaka.

As figuras (4) e (5) mostram os resultados obtidos com o modelo de posicionamento do parafuso em relação aos objetivados para a espessura e largura finais dos esboços no esquema de passe, respectivamente.

4 - DISCUSSÃO

A melhor combinação entre as equações de cálculo da resistência à deformação a quente e da carga de laminação foi a obtida pelos modelos de Misaka e de Sims. Esta combinação apresentou o menor desvio padrão da diferença entre a carga de laminação real e a carga corrigida teórica entre todas as outras combinações. Análise estatística mostra que a diferença média entre essas cargas foi de 43 +/- 13 ton para um grau de confiança de 95 % e com a amplitude máxima da diferença de 211 ton. Estes resultados podem ser considerados muito bons para efeito do modelamento matemático.

Desta maneira, foram escolhidos as equações de Sims e de Misaka no modelo de posicionamento do parafuso do laminador de chapas grossas, que utilizado em escala industrial para 16 laminações, mostrou-se bastante confiável no desempenho para obtenção da largura e da espessura objetivadas, conforme mostram as figuras (4) e (5). A diferença média para obtenção da largura foi de 24 +/- 5 mm com amplitude máxima de 40 mm e a dife-

rença média para a espessura foi de $0,08 \pm 0,03$ mm com amplitude máxima de $0,19$ mm, com grau de confiança de 95 %. Esses valores são típicos nas condições operacionais atuais na laminação de chapas grossas da COSIPA.

5 - CONCLUSÃO

O método desenvolvido para determinação do esquema de passe na laminação de chapas grossas mostrou-se muito adequado na obtenção das dimensões dos esboços laminados. Os valores encontrados entre as diferenças médias das espessuras e das larguras calculadas pelo modelo de posicionamento do parafuso do laminador e as espessuras e larguras reais foram de $0,08 \pm 0,03$ e de 24 ± 5 mm, respectivamente. O desvio máximo obtido na espessura foi de $0,19$ mm e na largura de 40 mm. Este desempenho atende plenamente às necessidades atuais de operação na laminação.

6 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] - SUGAHARA, NILTON T., "Metodologia para Cálculo do Esquema de Passes na Laminação de Chapas Grossas da Cosipa", trabalho não publicado.
- [2] - SUGAHARA, NILTON T. e SILVEIRA, J.HERBERT D., "Determinação da Deformação Elástica Durante o Passe de Redução em um Laminador de Chapas Grossas", XVI_Seminário Intecop_de_Laminação_da_COSIPA, março, 1993.

TIPO		QUÁDRUGO REVERSÍVEL
FABRICANTE		M.H.I.
POTÊNCIA		2 X 6000 HP, D.C.
CARGA MÁXIMA		8000 Ton
ESPESSURA DE LAMINAÇÃO		6,00 à 150,00 mm
MESA		4100 mm
A.G.C.		ELÉTRICO
MEDIDOR ESPESSURA		RAIO GAMA
VELOCIDADE		40 à 100 RPM
CILINDRO DE TRABALHO	MATERIAL	AÇO FUNDIDO
	DIÂMETRO	970 à 1070 mm
CILINDRO DE ENCOSTO	MATERIAL	AÇO FORJADO
	DIÂMETRO	1800 à 2000 mm
MÓDULO DE RIGIDEZ		700 Ton/mm

Tabela (1) - Características principais do laminador de chapas grossas da COSIPA

Carga de Laminação

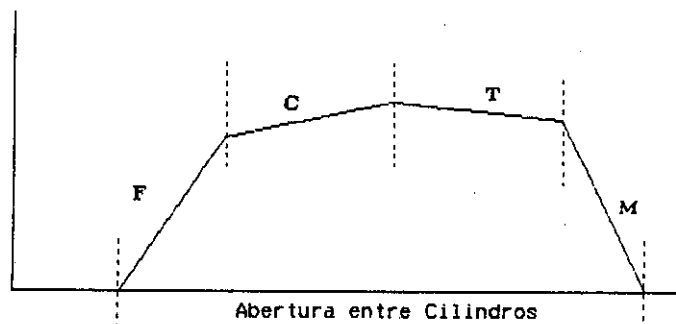


Figura (1) - Etapas de redução na laminação de chapas grossas

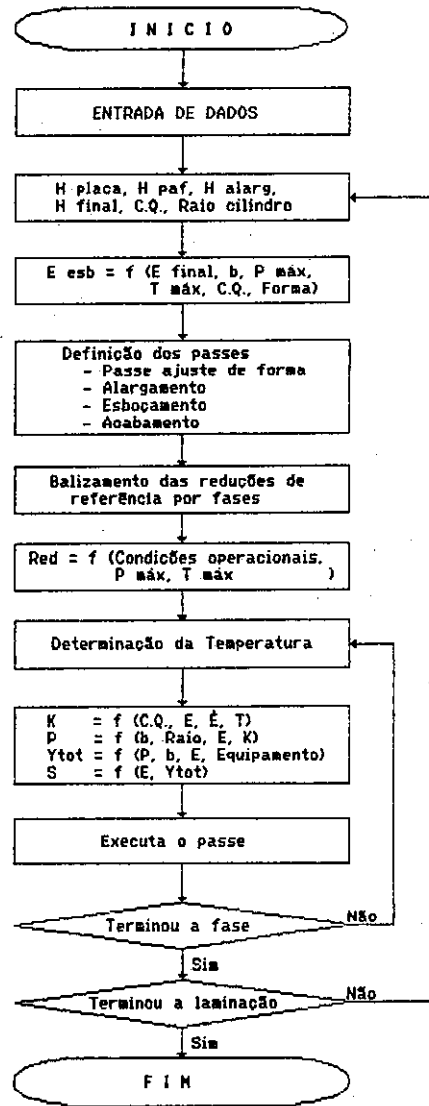


Figura (2) - Fluxograma esquemático do cálculo do esquema de passes

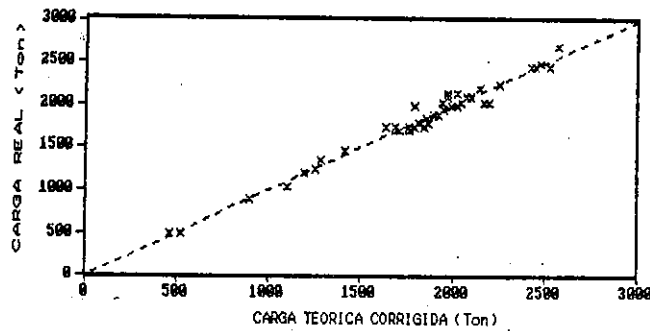


Figura (3) - Valores de carga real versus carga calculada através do modelo matemático usando as equações de Sims / Misaka

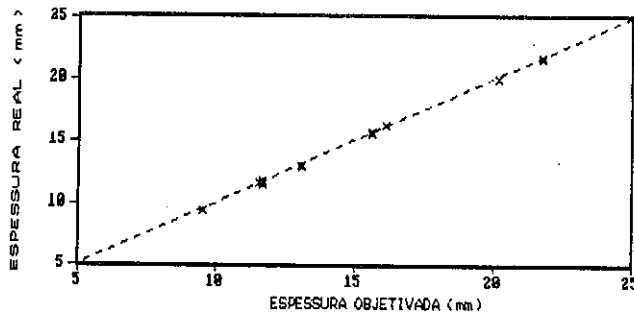


Figura (4) - Comparação entre as espessuras reais obtidas na laminação através do modelo matemático de posicionamento do parafuso e as espessuras objetivadas.

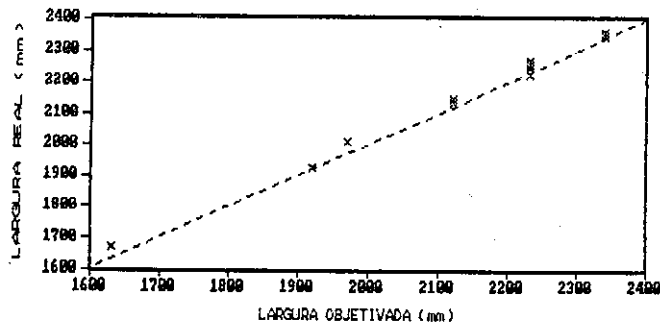


Figura (5) - Comparação entre as larguras reais obtidas na laminação através do modelo matemático de posicionamento do parafuso e as larguras objetivadas.