

[621.771 - 52 ; 531.717.8] ; 621.771.23.04
2 : 519.87

MÉTODO DE CONTROLE DA PLANICIDADE ATRAVÉS DE MODELAMENTO
MATEMÁTICO NA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS⁽¹⁾

IB ~~IB~~.

Jackson Soares de Souza Reis⁽²⁾
José Herbert Dolabela da Silveira⁽³⁾
Antonio Augusto Gorni⁽⁴⁾
Celso Gomes Cavalcanti⁽⁵⁾
Anivaldo Semahia⁽⁶⁾

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi adequar um modelo matemático para o controle da planicidade na Laminação de Chapas Grossas da COSIPA. Isto foi conseguido a partir da construção de nomogramas que relacionam a coroa, espessura e largura do laminado entre um passe e outro, o que permitiu delimitar as faixas operacionais que levam ao aparecimento de boa planicidade. Verificou-se a partir deste modelo que a carga de laminação é um parâmetro fundamental na definição do aplainamento do esboço, particularmente nos últimos passes de acabamento. Constatou-se ainda que esboços mais largos e mais finos apresentam maior tendência a ter problemas de planicidade.

-
- (1) Trabalho a ser apresentado no 48º Congresso Anual da ABM, Rio de Janeiro, Julho 1993.
- (2) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, Equipe de Engenharia de Processo - Laminação.
- (3) Membro da A.B.M. Engenheiro Metalurgista, M.Sc., Equipe de Engenharia de Processo - Laminação.
- (4) Membro da A.B.M. Engenheiro de Materiais, M.Sc., Equipe de P&D, Metalurgia de Transformação, Divisão de Pesquisa e Tecnologia.
- (5) Membro da A.B.M. Técnico de Pesquisa, Equipe de P&D, Metalurgia de Transformação, Divisão de Pesquisa e Tecnologia.
- (6) Membro da A.B.M. Técnico Mecânico, Equipe de Engenharia de Processo - Laminação.

- INTRODUÇÃO

Dois parâmetros geométricos podem afetar significativamente o nível de qualidade de chapas grossas: seu perfil transversal - também conhecido como coroa - e sua planicidade [1].

Define-se coroa como sendo a diferença de espessura entre a borda e o centro de uma chapa. Ela é considerada positiva quando a espessura central for maior que a da borda e negativa quando ocorrer o contrário [2].

Já a planicidade caracteriza o formato das faces principais da chapa grossa. O ideal é que a chapa seja a mais plana possível, sem ondulações ao longo do comprimento.

Há uma relação bem definida entre coroa e o grau de planicidade de uma chapa grossa. De maneira geral, deve ser mantida a mesma razão entre a coroa e a espessura do esboço ao longo do esquema de passes [1-3]. Isto fará com que o alongamento na região da borda seja semelhante ao da região do centro do esboço, evitando problemas de planicidade [4].

Uma das preocupações atuais em termos do nível de qualidade das chapas grossas é o grau de planicidade cada vez mais rigoroso que vem sendo solicitado pelos clientes. Esse nível crescente de exigência torna fundamental conhecer melhor a influência dos parâmetros de processo nessa propriedade. Este, portanto, é o objetivo do presente trabalho.

- TÉCNICAS PARA CONTROLE DE PLANICIDADE

Sob condições ideais, a coroa da chapa grossa deveria ser igual a zero, maximizando-se assim o rendimento metálico do processo e garantindo-se a boa precisão dimensional do produto. Contudo, segundo alguns autores, ele deve apresentar uma coroa positiva mínima - da ordem de 0,08 mm - para que o esboço se mantenha centralizado na mesa durante a laminação [2,4].

Sob condições práticas, é muito difícil manter essa coroa mínima de forma consistente. Em primeiro lugar, o contorno dos cilindros de trabalho se altera ao longo da operação devido ao desgaste do cilindro e pela sua dilatação térmica não-uniforme. Além disso, a flexão que ocorre nestes cilindros durante a laminação não é constante devido a alterações na carga de laminação, passe a passe.

Os problemas de planicidade em laminados surgem se as tensões longitudinais, introduzidas pela diferença de perfil entre o esboço que entra no arco de contato e a imposta pelos cilindros de trabalho, apresentam magnitude suficiente para provocar ondulação elástica ou plástica. O alongamento não-uniforme ocorre em consequência da deformação diferenciada ao longo da largura, e que já não pode ser compensada devido ao desprezível grau de alargamento do material, em função de sua pequena espessura.

Um modo de se preservar essa similaridade geométrica e promover melhoria no grau de planicidade do esboço consiste em se alterar a coroa imposta ao esboço pelos cilindros de laminação, de modo a manter uma relação específica com a espessura média de cada passe. É desse modo que a coroa e o grau de planicidade do esboço interagem entre si.

Os defeitos de planicidade podem ser classificados em dois tipos: ondulado central ou lateral. O primeiro ocorre quando a região central do esboço sofre maior grau de alongamento que as bordas. Isto resulta em tensões de compressão sobre esta porção do laminado que, se forem excessivas, resultarão em má planicidade no material. O ondulado lateral ocorre sob condições opostas, mas seu mecanismo de formação é similar. Eles podem ser vistos esquematicamente na figura 1.

Como se pode observar no parágrafo anterior, o laminado tolera um certo nível de tensões internas sem que ocorra degradação em sua planicidade. Em outras palavras, pode ser admitido um certo grau de desvio da similaridade geométrica nos perfis transversais do esboço a cada passe, sem que a planicidade seja afetada [2].

A rigor, esse nível máximo de tensões internas é função das seguintes variáveis: largura e espessura do esboço, temperatura e composição química do aço, grau de deformação aplicado no passe, velocidade de laminação e, em certos casos, graus de deformação impostos

ao esboço nos passes anteriores, bem como o instante em que foram aplicados [2].

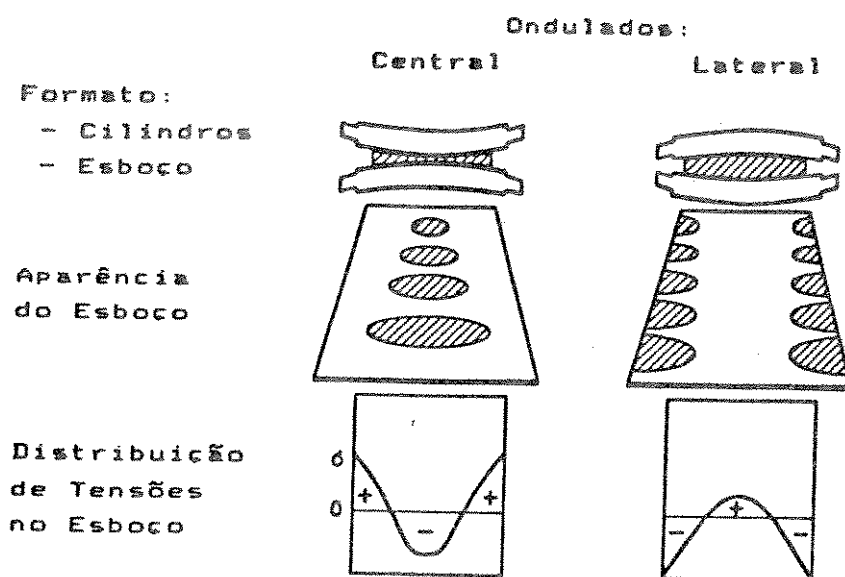


Figura 1: Representação esquemática dos defeitos ondulado central e lateral, incluindo suas respectivas causas [5].

Se o esboço não ficar plano após o passe, as tensões internas alterarão seu perfil transversal, que assumirá valor intermediário entre a coroa imposta pelos cilindros durante o passe e a coroa original do laminado. Caso contrário, a coroa do esboço tenderá a assumir o perfil imposto pelos cilindros na saída do arco de contato [2].

A partir destas constatações fica claro que o controle da coroa do laminado é fundamental para sua boa planicidade.

Uma das maneiras mais comuns de se controlar a evolução do corcamento dos cilindros de trabalho consiste em se programar uma sequência específica de placas conforme as larguras dos produtos a serem laminados, ou seja, organizar um cone de laminação. Tal procedimento permite que se compense a gradual alteração no corcamento dos cilindros de trabalho que ocorre pela ação conjunta do desgaste e da dilatação térmica deste componente. A minimização da coroa aplicada ao esboço, que se consegue através da adoção desta técnica, pode contribuir para a redução dos problemas de planicidade.

Pode ser conseguida melhoria adicional na planicidade do esboço controlando-se a redução nos últimos passes, objetivando-se valores de carga adequados para provocar níveis de flexão nos cilindros de trabalho que sejam favoráveis para a obtenção de um laminado plano. Para que esse procedimento seja corretamente executado, é fundamental verificar quantitativamente o quanto a coroa do esboço pode variar, desde o valor relativo à placa até o da chapa grossa, sem que a planicidade seja afetada.

No caso específico da laminação a quente de aços, essa relação quantitativa é de difícil determinação, uma vez que processos de restauração que atuam entre os passes podem relaxar as tensões residuais, concorrendo para a boa planicidade do laminado. O grau dessa relaxação pode ser total (recristalização plena no intervalo), parcial (recuperação total/parcial ou recristalização parcial) ou nula (supressão da recuperação e recristalização). O primeiro caso é similar à laminação a quente de aços ao carbono, o segundo à laminação controlada de aços microligados e o último corresponde ao caso do estágio de acabamento da laminação controlada ou da laminação a frio. Devido à grande variação e incerteza acerca das condições quantitativas que controlam os processos de restauração, a melhor estratégia ao se desenvolver um modelo para controle de planicidade é admitir que possa ocorrer qualquer uma das situações aqui descritas ao longo da laminação [3].

SHOHET & TOWNSEND [2] deduziram uma expressão para delimitar as condições de laminação que levam a um laminado com boa planicidade, assumindo-se a supressão de restauração estática após o último passe:

$$D_e \left(\frac{h_c}{L} \right)^2 < \left(\frac{C_j}{h_j} - \frac{C_c}{h_c} \right) < D_m \left(\frac{h_c}{L} \right)^2 \quad (1)$$

onde:

- . D_e, D_m = parâmetros de planicidade (constantes);
- . h_c = espessura da chapa grossa (produto final) na região da borda;
- . L = largura do produto;
- . h_j = espessura do esboço após o j° passe, na região da borda;
- . C_j = coroa do esboço após o j° passe;
- . C_c = coroa da chapa grossa (produto final).

Pode-se admitir que o termo central desta equação expressa o grau de dissimilaridade das deformações impostas nos passes de laminação, parâmetro designado a partir de agora como GD. Os termos nos extremos são fatores dimensionais do laminado, designados como FD. Os chamados parâmetros de planicidade D_e e D_m dependem da distribuição de tensões elasto-plásticas ao longo do esboço. Eles podem ser considerados constantes, o que torna a equação (1) independente das propriedades do material ou de sua temperatura. Contudo, seu cálculo teórico é difícil devido às complexas condições de distribuição das tensões elasto-plásticas ao longo da chapa grossa. Assim, seus valores devem ser determinados experimentalmente, sob condições laboratoriais ou industriais [2].

No caso específico da laminação de chapas grossas com fase de alargamento, deve-se levar em conta que os passes transversais iniciais diminuem a coroa do esboço sem introduzir qualquer tensão na direção longitudinal.

Esta estratégia para controle de planicidade foi aplicada em diversas usinas [5-8]. De fato, a partir da coroa do esboço, medida durante a laminação a quente, pode-se controlar o esquema de passes de modo a enquadrá-lo dentro da região de planicidade ótima definida pela equação (1). Como se pode observar na figura 2, os fatores limitantes que definem o esquema de passes a medida que o esboço vai tendo sua espessura reduzida são: torque máximo, carga máxima e, finalmente, a

planicidade do esboço. Em particular, os três últimos passes do esquema são os mais importantes para a definição das características de planicidade do esboço: a relação coroa/espessura do esboço tem de ser mantida o mais constante possível para esses passes [5].

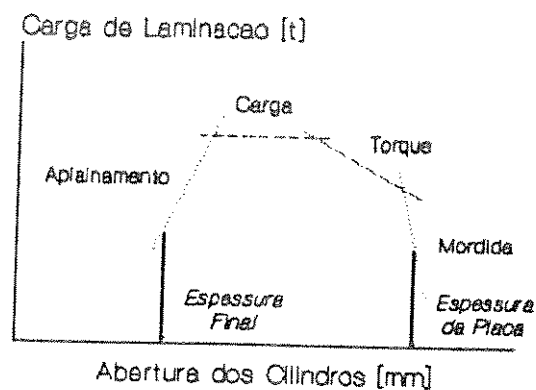


Figura 2: Filosofia para determinação do esquema de passes: fatores limitantes para o cálculo ao longo da espessura [5].

A crescente melhoria nas características de planicidade das chapas grossas exigida pelos clientes levou ao desenvolvimento de uma série de equipamentos periféricos, que atuam de alguma maneira em sua coroa. São eles: contra-flexão de cilindros ("roll bending") [2,5-7], deslocamento transversal de cilindros intermediários ou de trabalho [9,10,11], cruzamento de cilindros [11], coroamento expansível dos cilindros [11], e outros.

Além disso, é possível corrigir as distorções na planicidade dos esboços, mesmo após sua laminação, através de seu processamento em desempenadeiras a quente em linha, enquanto o material ainda se encontra aquecido. Em casos mais severos, esse equipamento não consegue eliminar de forma eficaz a ondulação do produto. A solução é o

uso de desempenadeira a frio, localizada em paralelo à linha de produção, que processa os produtos nos quais a ação da desempenadeira a quente não foi suficiente. Sua utilização, contudo, deve ser minimizada, pois ela implica num retrabalho que introduz custo adicional à chapa e ainda prolonga seu tempo de fabricação.

- PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo sobre a influência dos parâmetros de laminação sobre a planicidade dos esboços requereu um acompanhamento de aproximadamente 100 esboços processados no Laminador de Chapas Grossas da COSIPA. Os produtos estudados apresentaram espessuras entre 6,00 e 40,00 mm e largura entre 1600 e 3500 mm. Foram acompanhados aços ao carbono na faixa entre 0,15 e 0,30% desse elemento, procurando-se analisar um lote de produtos representativo estatisticamente.

O processamento do material estudado se fez na forma usual: aquecimento da placa até 1050-1150°C em fornos "walking-beam", descamação, laminação, desempenho a quente, resfriamento no leito e, opcionalmente, desempenho a frio. A linha de chapas grossas da COSIPA dispõe de uma desempenadeira a quente que processa todos os esboços logo após sua laminação. Ela pode desempenar chapas com espessuras variando de 6,00 a 80,00 mm e larguras de 1000 a 4050 mm, sob temperaturas entre 680 a 720°C. Dispõe-se ainda de uma desempenadeira a frio, que pode processar chapas com espessuras variando de 6,00 a 20,00 mm e larguras de 1000 a 4050 mm, sob temperatura ambiente.

Para cada placa laminada foram registrados os seguintes parâmetros:

- a) Tipo de aço;
- b) Carbono equivalente;
- c) Espessura final do esboço;
- d) Largura final do esboço;
- e) Esquema de passes (abertura nominal entre os cilindros);

- f) Temperatura de cada passe;
- g) Carga de laminação de cada passe;
- h) Coroa calculada do esboço passe a passe;
- i) Quantidade de material laminado pelo par de cilindros de trabalho, expressa em toneladas de laminados;
- j) "Pass-line" (diferença de altura entre a mesa de rolos e o cilindro de trabalho inferior);
- l) Identificação do tipo de ondulação, quando existente (central ou lateral);
- m) Grau de intensidade da ondulação;
- n) Coroa final do esboço;
- o) Flecha do esboço.

O grau de intensidade de ondulação foi avaliado de acordo com uma escala arbitrária variando de 0 até 5. A atribuição desse valor foi feita por apenas um técnico de qualidade posicionado na cabine do laminador, com o intuito de se reduzir ao máximo as imprecisões decorrentes do julgamento subjetivo do grau de planicidade.

Já foi visto anteriormente que há uma relação entre o grau de planicidade do laminado e sua coroa, passe a passe. Um dos objetivos deste trabalho é quantificar esta relação para, a partir daí, estabelecer as condições de laminação que garantam um laminado plano.

Nas condições atuais de operação da linha de chapas grossas, não se dispõe de instrumentos que permitam medição simultânea das espessuras no centro e na borda do esboço, o que permitiria o cálculo da coroa do laminado ao longo do esquema de passes. Logo, tornou-se necessário o cálculo dessas coroas.

Como se sabe, a coroa imposta ao laminado é função da flexão do cilindro provocada pela carga de laminação, da coroa térmica do cilindro, do desgaste que ele sofre e, naturalmente, da coroa imposta ao cilindro durante sua retífica para compensar as três componentes anteriores. A coroa real que o laminado apresentará dependerá ainda da relaxação de tensões que ele sofrerá imediatamente após a laminação a quente [3]. No caso específico deste estudo foram feitas algumas simplificações, considerando-se:

a) Coroa positiva total do cilindro (coroa imposta por retífica mais a coroa térmica) compensada pelo desgaste que ele sofre, uma vez que são tendências antagônicas. Esta abordagem foi adotada por alguns autores no desenvolvimento de um modelo de planicidade na laminação de chapas grossas [8];

b) Nível de relaxação de tensões no laminado constante ou desprezível.

Logo, assumiu-se aqui que a coroa do laminado é descrita fundamentalmente pela chamada coroa mecânica, ou seja, a flexão dos cilindros provocada pela carga de laminação. Adotou-se o procedimento de EMICKE & LUCAS [12] para o cálculo desta coroa, conforme as equações expostas abaixo:

. Flexão do Cilindro na Borda da Chapa:

$$\begin{aligned}
 FB = & \frac{4 F}{3 (E_1 D_1^4 + E_2 D_2^4)} \left[L^3 + W^3 - 2 L W^2 + 8 N^3 \frac{E_1 D_1^4 + E_2 D_2^4}{E_1 D^4} - 1 \right] + \\
 & \frac{F}{(G_1 D_1^4 + G_2 D_2^2)} \left[L - W + 2 N \frac{G_1 D_1^2 + G_2 D_2^2}{G_1 D^2} \right] \quad (2)
 \end{aligned}$$

. Flexão do Cilindro no Centro da Chapa:

$$\begin{aligned}
 FC = & \frac{F}{6 (E_1 D_1^4 + E_2 D_2^4)} \left[8 L^3 - 4 L W^2 + W^3 + 64 N^3 \frac{E_1 D_1^4 + E_2 D_2^4}{E_1 D^4} - 1 \right] + \\
 & \frac{F}{(G_1 D_1^4 + G_2 D_2^2)} \left[L - \frac{W}{2} + 2 N \frac{G_1 D_1^2 + G_2 D_2^2}{G_1 D^2} - 1 \right] \quad (3)
 \end{aligned}$$

onde:

- . FB = Flexão no ponto B [mm];
- . FC = Flexão no ponto C [mm];
- . B = Distância entre o apoio do cilindro (mancal) e a borda da chapa [mm];
- . C = Distância entre o apoio do cilindro (mancal) e o centro da chapa [mm];
- . F = Carga aplicada no laminador [kgf];
- . L = Distância entre os apoios do cilindro [mm];
- . W = Largura do esboço [mm];
- . N = Semi-comprimento do pescoço do cilindro de trabalho [mm];
- . E₁, G₁ = Módulos de elasticidade e cisalhamento do cilindro de encosto [kgf/mm²];
- . E₂, G₂ = Módulos de elasticidade e cisalhamento do cilindro de trabalho [kgf/mm²];
- . D₁ = Diâmetro do cilindro de encosto [mm];
- . D₂ = Diâmetro do cilindro de trabalho [mm];
- . D = Diâmetro do pescoço do cilindro de encosto [mm].

A coroa mecânica CM decorrente das flexões dos cilindros é dada por:

$$CM = 2 (FC - FB) \quad (4)$$

Além da coroa foram calculados, para cada passe, alguns adimensionais selecionados de laminação. São eles:

- . Razão coroa/espessura do esboço no passe [2,3,8]:

$$CH = \frac{CM}{h_2} \quad (5)$$

- . Grau de penetração da deformação [13]:

$$m = \frac{3\sqrt{R \Delta h}}{(h_1 + 2 h_2)} \quad (6)$$

. Redução percentual:

$$RED = \frac{(h_1 - h_2)}{h_1} \times 100 \quad (7)$$

onde:

- . h_1 = Espessura inicial do esboço [mm];
- . h_2 = Espessura final do esboço [mm];
- . Δh = $h_1 - h_2$ [mm];
- . R = Raio do cilindro de trabalho [mm].

Considerou-se, na realidade, h_2 como sendo a abertura objetivada entre os cilindros e h_1 como sendo esse mesmo parâmetro, mas para o passe imediatamente anterior ao considerado.

Os dados coletados e os parâmetros calculados conforme as fórmulas acima foram analisados estatisticamente através da determinação de regressões lineares múltiplas, "stepwise" e cálculo da matriz de Pearson, para que se pudessem ser estabelecidas relações quantitativas entre elas e o grau de planicidade do esboço.

- RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

A análise estatística dos dados e parâmetros calculados comprovou que o nível de planicidade do material é função da quantidade de material laminada pelos cilindros de trabalho, da coroa mecânica dos cilindros, espessura do esboço e da redução percentual nos últimos passes. É interessante notar que a quantidade de material laminada pe-

los cilindros de trabalho introduz o efeito da coroa térmica e do desgaste na fórmula, enquanto que as demais estão relacionadas com a carga de laminação.

Foram desenvolvidas várias equações estatísticas para previsão do grau de planicidade, as quais apresentaram coeficiente de correlação igual ou superior a 0,9. Uma delas é mostrada a seguir:

$$GR_u = a m_u + b m_p + c RED_u - d RED_p - e CAR_u - f CAR_p - g CH_u + \\ + h CH_p - i TON + j m_u m_p RED_u RED_p \quad (8)$$

onde:

- . GR = Grau de aplainamento, definido por uma escala arbitrária de 0 a 5;
- . CAR = Carga de laminação [t];
- . TON = Quantidade de material laminada pelo par de cilindros de trabalho [t];
- . a, b, c, d, e, f, g, h, i, j = Constantes determinadas estatisticamente.

Nesta equação o subscrito "u" se refere ao último passe do esquema, enquanto que o subscrito "p" se refere ao penúltimo passe.

O coeficiente de correlação obtido na equação (8) foi 0,981, o que atesta a sua grande representatividade dentro da população de dados registrada e que lhe deu origem.

Contudo, essa abordagem não foi totalmente satisfatória para os objetivos deste trabalho. O que se tinha em vista era chegar a uma relação que permitisse uma atuação prática, imediata e flexível sobre os parâmetros de laminação de tal forma a se obter boa planicidade. Infelizmente a equação (8), bem como todas as outras equações estatísticas desenvolvidas, não atendeu a esse objetivo. Em primeiro lugar, esta fórmula teria de ser rearranjada para permitir o cálculo das aberturas entre os cilindros (ou seja, o esquema de passes) a partir de um grau de planicidade constante e admissível. Esse rearranjo é

praticamente impossível, dada a grande complexidade desta equação. Isso obriga à sua resolução por métodos numéricos, que demandam tempo. Outro aspecto negativo é que sua resolução atribuiria valores específicos de abertura de cilindros, a princípio sem nenhuma possibilidade de variação, o que pode ser problemático num processo tão dinâmico como a laminação a quente.

Partiu-se então para uma segunda abordagem do problema, adotando-se o diagrama de SHOHET & TOWNSEND [2], para se tentar estabelecer as faixas de parâmetros de laminação que promovam planicidade adequada. Para tanto, foram plotados os valores dos parâmetros GD e FD, calculados conforme a equação (1). Assumiu-se PAS_J e PAS_C como sendo a abertura objetivada dos cilindros para o penúltimo e último passe, respectivamente; do mesmo modo, CH_J e CH_C são a coroa mecânica calculada do penúltimo e último passe, respectivamente. Foi explicitado no gráfico assim obtido quais pontos apresentaram boa planicidade, ondulado lateral e ondulado central. O resultado pode ser visto na figura 3.

Este gráfico mostra claramente três regiões bem distintas: a superior, onde se localizam os pontos correspondentes à ocorrência de ondulado central no esboço; a inferior, onde ocorreu ondulado lateral; e a intermediária, onde o produto apresentou-se plano, ou seja, com flecha igual a zero após seu processamento na desempenadeira a quente.

Essas regiões de boa planicidade podem ser delimitadas de forma bem restrita por duas retas partindo da interseção dos eixos cartesianos. O cálculo de sua inclinação permite determinar as constantes D_e e D_m da equação (1) específicas para o processo de laminação de chapas grossas da COSIPA. Consegue-se assim chegar-se à seguinte equação:

$$-640 \left(\frac{PAS_C}{L} \right)^2 < \left(\frac{CH_J}{PAS_J} - \frac{CH_C}{PAS_C} \right) < 440 \left(\frac{PAS_C}{L} \right)^2 \quad (9)$$

O gráfico da figura 3 mostra ainda que ao se aumentar a largura e/ou se reduzir a espessura do produto passa-se a trabalhar

com menor tolerância no grau de dissimilaridade das deformações nos passes de laminação, ou seja:

$$\frac{CH_j}{PAS_j} \approx \frac{CH_c}{PAS_c} \quad (10)$$

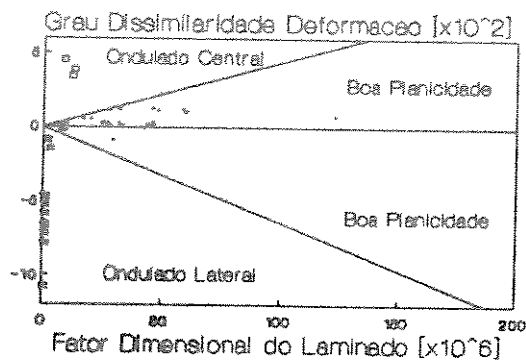


Figura 3: Relação entre o grau de dissimilaridade das deformações nos passes de laminação e o fator dimensional do laminado, relativos à última redução, e o grau de planicidade obtido no esboço final. Note-se a determinação de uma "zona morta" central onde se consegue boa planicidade no laminado.

Isto implica numa maior probabilidade de ocorrer problemas de planicidade no produto final.

Para se verificar o efeito de passes anteriores sobre a planicidade do produto, repetiu-se a abordagem acima considerando-se agora a abertura de cilindros objetivada e a coroa mecânica calculada para o antepenúltimo passe. O resultado obtido está na figura 4. Os resultados obtidos foram similares ao da última redução, sendo obtida

a seguinte relação:

$$-680 \left(\frac{PAS_c}{L} \right)^2 < \left(\frac{CM_j}{PAS_j} - \frac{CM_c}{PAS_c} \right) < 1060 \left(\frac{PAS_c}{L} \right)^2 \quad (11)$$

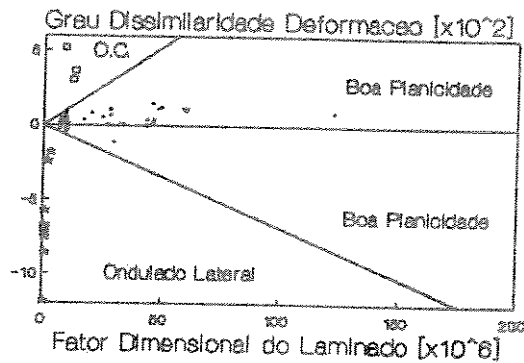


Figura 4: Relação entre o grau de dissimilaridade das deformações nos passes de laminação e o fator dimensional do laminado, relativos à penúltima redução, e o grau de planicidade obtido no esboço final.

Nota-se que os valores de D_m e D_e neste caso são maiores em módulo que no caso anterior, ou seja, o gráfico levantado para o antepenúltimo passe mostra que a "zona morta" onde o laminado apresenta boa planicidade é maior do que a obtida para o penúltimo passe. Ou seja, em termos de planicidade, os últimos passes são mais críticos e devem ser controlados com maior rigidez, enquanto que os demais praticamente não exercem influência [5].

Esta constatação pode ser justificada pela maior espessura do esboço, pois neste caso ocorre maior relaxação nas tensões do mate-

rial devido à maior possibilidade de alargamento (escoamento transversal do material) e pela maior atuação dos processos de restauração devido a temperatura mais alta [2,5].

As equações (1), (2) e (3) deixam em evidência que a carga de laminação é o principal parâmetro que o operador dispõe para controlar a planicidade do produto. Contudo, para tornar viável a aplicação do modelo de planicidade ora desenvolvido, torna-se necessário associá-lo a um modelo de cálculo do esquema de passes que leve em conta a carga de laminação, para que sejam realizados ajustes nas reduções de acabamento de modo a permitir a obtenção de um laminado plano.

O presente modelo foi ajustado a partir de dados coletados para aços ao carbono, de baixa, média e alta resistência. Ele não foi testado na laminação controlada de aços microligados, onde a fase de acabamento - a mais crítica em termos de planicidade - se processa sob supressão total da recristalização do material. Contudo, uma vez que esta estratégia se baseia no modelo desenvolvido por SHOHET & TOWNSEND [2], que assume supressão total da restauração estática no último passe, é muito provável que ele também seja válido sob essas condições, ainda que com pequenos ajustes.

- CONCLUSÕES

Os parâmetros de laminação que exercem maior efeito sobre a planicidade do esboço na laminação de chapas grossas são: a quantidade de material laminada pelos cilindros de trabalho, a coroa mecânica dos cilindros, a espessura do esboço e a redução percentual nos últimos passes. Contudo, as equações estatísticas que envolvem estas variáveis não se revelaram adequadas para estabelecer uma estratégia para controle de aplainamento, apesar de seu alto coeficiente de correlação.

Por outro lado, a adoção de nomogramas envolvendo a variação da relação coroa/espessura e as dimensões do laminado entre os passes, conforme estabelecido na equação (1), permitiu definir, com

boa precisão, as condições de operação que proporcionam boa planicidade ao esboço.

Esses gráficos permitiram verificar ainda que o aumento de largura e/ou a redução da espessura do esboço aumenta a probabilidade da ocorrência de problemas de planicidade. Constatou-se ainda que os últimos passes exercem influência decisiva sobre essa propriedade.

A coroa mecânica foi identificada como um parâmetro fundamental na determinação do aplainamento do laminado. Uma vez que ela é função direta da carga de laminação, esta passa a ser o principal recurso que se dispõe para controlar a planicidade. Logo, para que a estratégia de controle de planicidade aqui desenvolvida atue no processo de forma eficiente, ela deve ser incorporada a um modelo para cálculo do esquema de passes que leve em conta a carga de laminação.

- AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar seu agradecimento à EQUIPE DE METALURGIA E QUALIDADE DA LAMINAÇÃO DE CHAPAS GROSSAS pelo seu decisivo apoio na coleta e processamento dos dados na área industrial.

- BIBLIOGRAFIA

1. ROBERTS, W.R. Hot Rolling of Steel. Marcel Dekker Inc., New York, 1963. 1033 p.
2. SHOHET, K.N. & TOWNSEND, N.A. Journal of the Iron and Steel Institute, October 1971, 769-775
3. FRITSCH, G. e outros. Revue de Metallurgie, Juin 1973, 461-473.
4. SCHULTZ, R.G. & SMITH, A.W. Iron and Steel Engineer, May 1965, 127-33.

5. MANTYLA, P. e outros. Iron and Steel Engineer, November 1989, 48-54.
6. MASUDA, S. e outros. Tetsu-to-Hagane, Dezembro 1981, 177-186.
7. MAGGI, G. e outros. Bollettino Tecnico Finsider, Maggio-Agosto 1983, 121-126.
8. ANDRADE, H.L. e outros. In: 4th INTERNATIONAL CONFERENCE ON STEEL ROLLING. Proceedings. IRSID, Saint-Germain-en-Laye, 1987, p. C.7.1 - C.7.7.
9. NAKANISHI, T. e outros. Hitachi Review, August 1985, 153-60.
10. WILMS, W. e outros. Stahl und Eisen, 1985, 1181-90.
11. ZANICOTTI, L. e outros. La Metalurgia Italiana, Luglio-Agosto 1985, 509-523.
12. EMICKE, O. & LUCAS, K.H. Neue Huette, Maerz 1956, 257-274.
13. POLUKHIN, P.I. e outros. Steel in the USSR, July 1975, 75-78.

ABSTRACT

This paper describes the fitting of a mathematical model for flatness control according to the specific conditions of the COSIPA's plate mill. This model allowed the drawing of nomograms that related crown, thickness and width of the rolling stock between passes with its flatness characteristics. These graphics provide the information needed to plan an optimized pass schedule keeping the good flatness of the product.