

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DE LAMINADORES QUÁDRUOS COM *ROLL BENDING*¹

Yukio Shigaki²

Resumo

Este trabalho tem por objetivo realizar uma análise de sensibilidade quanto à coroa de chapas planas produzidas em laminadores quádruos com atuadores do tipo *roll bending*. Alguns parâmetros de operação e de equipamento foram variados e seu consequente efeito sobre a coroa dos produtos planos foi observado. Apresenta-se, também, um estudo a respeito da planicidade das tiras, pois esta característica está intimamente relacionada à variação da coroa em um passe. Para essa finalidade foi utilizado um simulador computacional validado com dados da literatura técnica, chamado MCI/Berger. Uma das vantagens de se utilizar um simulador deve-se à possibilidade de variar um parâmetro e manter todos os outros fixos. Com relação à influência da largura da chapa sobre a sua coroa relativa verificou-se que a coroa cresce com o aumento da largura até determinado ponto, quando começa a diminuir mesmo continuando a aumentar a largura. A influência da coroa usinada do cilindro de trabalho sobre a variação da coroa da tira é maior que a da coroa usinada do cilindro de apoio. Da análise feita a respeito do efeito do aumento do diâmetro do cilindro de trabalho, conclui-se que a taxa de variação da coroa depende da largura da tira. A influência do *roll bending* sobre a coroa da tira cresce com o aumento da largura da mesma. Verificou-se também que a coroa absoluta é bastante proporcional à carga de laminação resultante quando se trabalha com tiras de larguras menores que 80% do comprimento da mesa do cilindro.

Palavras-chave: Laminador quádruo; Coroa; Planicidade; Análise de sensibilidade.

SENSITIVITY ANALYSIS OF 4-HIGH ROLLING MILLS WITH ROLL BENDING

Abstract

The present paper applies a sensitivity analysis for 4-high rolling mills with roll benders in order to analyse the behavior of the crown of strips. Some operational and equipment parameters were varied and its result on the strip crown were observed. Also is presented a study on the strip flatness, as this is intimately related to the variation of the strip crown in a pass. A computational simulator validated with technical literature was applied, named MCI-Berger. One of the advantages on using a simulator is the possibility to variate one parameter, keeping steady all the others. The strip crown increases when the strip width is increased, but this behavior reverts after a certain width. The strip crown is more sensitive to the crown of the work roll than the crown of the backup roll. When the diameter of the roll is varied it is observed that it depends on the width of the strip. The larger the strip width, the bigger the influence of the roll bending force on the strip crown. It was concluded, also, that the absolute crown is proportional to the rolling load for strip widths up to 80% of the length of the rolls.

Key words: 4-high rolling mill; Strip crown; Flatness; Sensitivity analysis.

¹ Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP

² D. Sc., Professor do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG, Departamento de Engenharia Mecânica. Membro da ABM.

1 INTRODUÇÃO

A coroa e a planicidade são duas características principais relacionadas à elevada qualidade das chapas laminadas. A coroa representa a variação da espessura da chapa na direção transversal, e a planicidade representa a presença de ondulações, simplificada. Tolerâncias cada vez mais restritivas têm exigido das indústrias o desenvolvimento de alta tecnologia para poder atender a esses requisitos.

Dentre os exemplos de laminadores com sistemas de controle de coroa e planicidade desenvolvidos atualmente, podem ser mencionados aqueles com contraflatores externos, cilindros com deslocamento axial dos mesmos, perfis de cilindros usinados em forma de garrafa, com chanfros nos extremos, de encosto segmentados, com uma “camisa” externa flexível, infláveis e os de pares cruzados.

Apesar dessa grande diversidade de laminadores, o laminador quádruplo ainda é amplamente utilizado nas plantas de produção de chapas. Assim vários laminadores desse tipo foram reformados, recebendo atuadores que realizam a contraflexão dos cilindros para controlar a coroa das chapas.

Conjuntamente com a engenharia de equipamentos, desenvolveu-se o ramo dos simuladores computacionais desses mesmos equipamentos. Esses simuladores possuem diversas utilidades, dentre as quais é possível realizar um estudo da influência de um parâmetro de operação, mantendo fixos todos os demais parâmetros (análise de sensibilidade), pode ser utilizado para auxiliar na determinação de respostas a questões específicas e na solução de problemas e, pode-se ter uma maior compreensão de todo o processo, contribuindo para a utilização mais eficiente dos equipamentos, no processo de automatização e na seleção de equipamentos no caso de uma modernização da planta.

Tais simuladores são derivados de modelos matemático-numéricos do processo de laminação. Uma descrição sucinta desses métodos pode ser encontrado no trabalho de Shigaki.⁽¹⁾

A necessidade de se obter resultados precisos e em reduzido tempo fez com que o Método dos Coeficientes de Influência (MCI) ganhasse popularidade entre os simuladores de laminação.

Um maior conhecimento do equipamento (um laminador, no caso) é condição indispensável para se obter um bom rendimento na produção. Possuir um bom conhecimento do equipamento significa determinar, entre outras coisas, seus limites,⁽²⁾ potencial e flexibilidade, informações essas que podem ser obtidas por meio de uma análise de sensibilidade.

O presente trabalho limitou-se ao estudo de laminadores quádruplos, com controle de ondulações centrais e de bordas feito através de sistemas de contraflexão dos cilindros. As formas mais complexas de defeitos de planicidade que as mencionadas dificilmente podem ser corrigidas nesses quádruplos, havendo necessidade de se controlar a expansão térmica localizada dos cilindros de laminação,⁽³⁾ ou de uma modificação mais eficiente da coroa mecânica do cilindro, através de laminadores com mais recursos.

São apresentados, a seguir, uma breve descrição do programa MCI Berger, a descrição dos parâmetros de coroa e planicidade das chapas, o critério de planicidade do chamado “cone de forma”, a análise de sensibilidade, os resultados e as conclusões.

2 O MÉTODO DOS COEFICIENTES DE INFLUÊNCIA

Para se determinar o perfil da tira emergente, é necessário calcular o perfil deformado do cilindro de trabalho, que por sua vez depende do carregamento imposto aos cilindros. Shohet e Townsend⁽⁴⁾ desenvolveram um método que calcula a deflexão elástica dos cilindros devido à flexão e ao cisalhamento através dos coeficientes de influência, discretizando a chapa e os cilindros em fatias longitudinais.

Uma vez determinados tais coeficientes, reúnem-se as equações de cálculo da deflexão para cada cilindro, superpondo os deslocamentos por flexão, cisalhamento e achatamento localizado (os autores assumem linearidade no achatamento em função da carga, para a faixa de operação normal) e aplicando a carga de laminação assumindo-se um estado plano de deformação em cada faixa. Por meio das equações de equilíbrio de cada cilindro e de compatibilidade nas interfaces cilindro/cilindro e cilindro/tira, determinam-se as cargas distribuídas e o perfil deformado da tira, de uma maneira iterativa.

O MCI tem demonstrado ser um método de comprovada precisão, sendo bastante poderoso na solução de problemas de distribuição transversal da espessura de chapas.

O MCI melhorado apresentado por Pawelski e Teutsch⁽⁵⁾ foi implementado com algumas modificações, e programado em linguagem do MATLAB. O programa denominado MCI/Berger, em reconhecimento a Berger, autor do modelo de achatamento de cilindros em contato utilizado no programa,⁽⁶⁾ foi testado e validado,⁽¹⁾ e será utilizado para se realizar a análise de sensibilidade em laminadores quádruplos.

3 Parâmetros geométricos

A “coroa absoluta” (C_j) pode ser definida como a diferença entre a espessura no centro da chapa e a espessura média medida a uma certa distância j das duas bordas (usualmente de 25 mm a 40 mm), como pode ser observado na Figura 1 e definida pela equação (1).

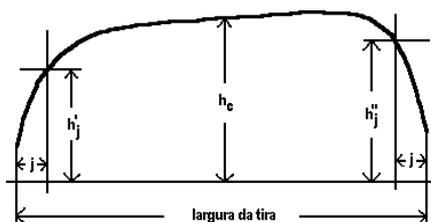


Figura 1 – Descrição das variáveis que definem as coroas.

$$C_j = h_c - \frac{(h'_j + h''_j)}{2} \quad (1)$$

A coroa é um parâmetro que caracteriza de uma forma simples o perfil da tira, i.e., a distribuição de espessuras ao longo da largura da chapa. Valores usuais de coroas absolutas variam de 0 a 40 μm .⁽⁷⁾

Na prática procura-se conservar um mínimo de coroa positiva para facilitar a manutenção da tira no centro do laminador, evitando que esta deslize para os lados e cause acidentes.⁽⁴⁾

À relação entre coroa absoluta e a espessura no centro da tira chama-se “coroa relativa” (Cr_j), definida pela equação (2).

$$C_{ij} = \frac{C_j}{h_c} \quad (2)$$

“Planicidade” ou “forma” de uma tira é sua capacidade de manter-se isenta de qualquer tipo de ondulação quando colocada em um plano horizontal, sem tensões externas e independentemente de como a mesma seja cortada.⁽⁸⁾

A falta de planicidade surge geralmente na forma de ondulações, que podem ou não ser simétricas em relação à linha de centro da tira. As formas mais comuns de falta de planicidade são as ondulações centrais e as ondulações nas bordas, conforme mostrado na Figura 2.

Há diversos modos para quantificar a falta de planicidade, sendo o mais utilizado o chamado “*l-unit*” definido pela variável U^1 , conforme a expressão (3):⁽⁴⁾

$$U = \frac{l'-l}{l} \cdot 10^5 \quad (3)$$

Sendo:

l' : comprimento da tira acompanhando a ondulação;

l : comprimento da projeção da tira no plano;

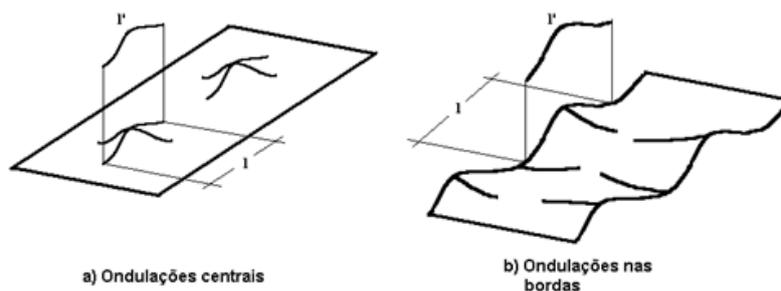


Figura 2 – Representação dos comprimentos envolvidos na definição de *l-unit*.

Valores aceitáveis para a planicidade de tiras laminadas a frio estão entre 10 *l-units* e 20 *l-units*. Nas tiras laminadas a quente, estes valores sobem para 16 *l-units* a 40 *l-units*.⁽⁷⁾

Como a forma da ondulação da tira pode variar ao longo da largura, costuma-se utilizar a diferença entre o U médio obtido para ambas as bordas e o U do centro da tira para representar a sua planicidade total.⁽⁹⁾

A seqüência de formação dos defeitos de forma é explicada a seguir. Uma redução não uniforme causa uma mudança no perfil de espessuras relativas (definido como a razão entre a espessura inicial e a final, ponto a ponto ao longo da largura), que é transformado em perfil de comprimentos relativos à saída, se o fluxo transversal de massa puder ser desprezado. O perfil de comprimentos resultante é proporcional à redução do perfil de espessuras. O “acomodamento” das tiras com diferentes comprimentos geram as tensões residuais na direção longitudinal da tira. Geralmente surgem ondulações nas regiões com tensão de compressão, quando se excede o limite crítico de flambagem.⁽¹⁰⁾

Assim, uma variação negativa no valor da coroa relativa da tira (i.é., a coroa relativa de saída é menor que a coroa relativa de entrada) significa que a coroa relativa diminuiu no passe e, portanto, houve uma redução maior no centro da tira,

¹ Como a relação $(l'-l)/l$ produz números muito pequenos, costuma-se multiplicá-la por 10^5 .

gerando tensões de compressão nessa região, favorecendo o surgimento de ondulações centrais. Quando a variação é positiva, favorece-se a formação de ondas nas bordas.

A Figura 3(a) mostra a situação em que se tem abarrilamento (também chamado de coroa do cilindro ou *camber*) insuficiente dos cilindros. Nessa situação podem surgir tensões de tração nas bordas e tensões de compressão no centro (b). Disso podem ocorrer trincas (c), empenamentos (d) ou ondulações nas bordas (e).

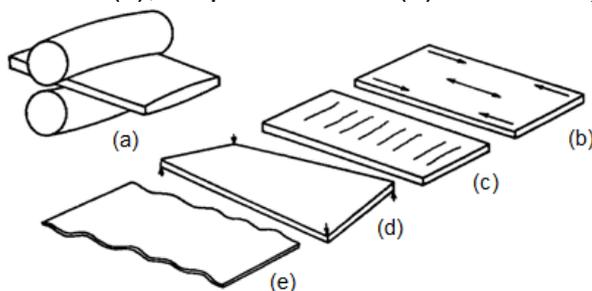


Figura 3 - Possíveis efeitos quando laminado com coroa *insuficiente* nos Cilindros.⁽¹¹⁾

Na Figura 4(a) observa-se a situação inversa à anterior, isto é, excesso de coroa nos cilindros. As tensões residuais são de compressão no centro e tração nas bordas (b), podendo causar trincas nas bordas (c), rasgamento longitudinal (d) e ondulações centrais (e).

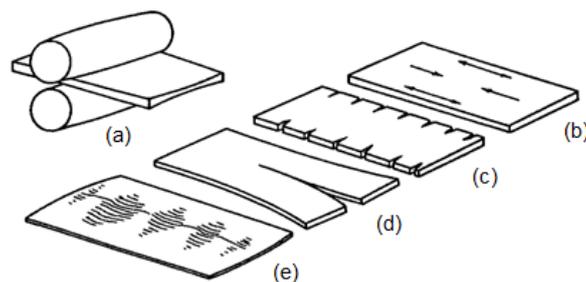


Figura 4 - Possíveis efeitos quando laminado com coroa *excessiva* nos cilindros.⁽¹¹⁾

Em algumas situações podem surgir ondulações localizadas nas tiras. Estas só podem ser evitadas mediante o resfriamento seletivo dos rolos⁽³⁾.

4 CONE DE FORMA

Shohet e Townsend⁽¹²⁾ desenvolveram um método semi-empírico simples e de rápida aplicação na determinação dos limites para ocorrência de defeito de planicidade para ondas centrais e nas bordas, sendo ainda hoje bastante aplicado na indústria para a laminação a quente,⁽¹⁰⁾ batizado de cone de forma (*shape cone*) por possuir duas curvas que se aproximam uma da outra ao longo dos passes. Tal critério afirma que a forma da tira será satisfatória caso a variação da coroa relativa em cada passe estiver dentro dos limites correspondentes determinados por um limite superior e um limite inferior. Os valores desses limites dependem da espessura, largura e da resistência do material da tira, conforme a equação (4).

$$- A1(h_o/W)^2 < \Delta Cr < A2(h_o/W)^2 \quad (4)$$

onde,

h_o : Espessura de saída do presente passe;

W: Largura da tira;
 ΔCr : (Coroa relativa de saída) – (Coroa relativa na entrada);
 A1, A2: Coeficientes obtidos experimentalmente e que dependem da distribuição de tensões ao longo da largura da tira. Para aço baixo carbono, tem-se:⁽¹³⁾

$$- 40(h_o/W)^{1,86} < \Delta Cr < 80(h_o/W)^{1,86} \quad (5)$$

Caso a coroa relativa tenha uma variação em um passe para mais ou para menos, porém dentro da faixa de tolerância, então não deverá haver problemas com a planicidade. Um exemplo do cone de forma pode ser visto na Figura 5.

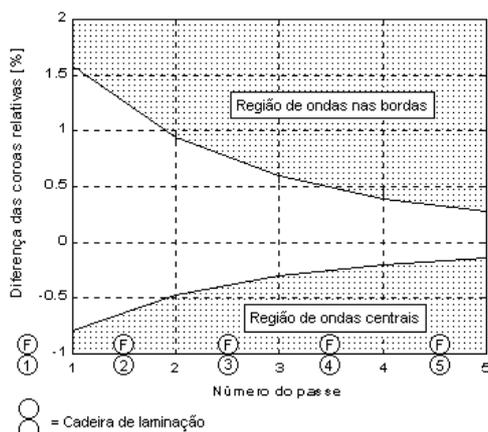


Figura 5 – Exemplo do cone de forma.

O sistema representado na Figura 5 possui 5 cadeiras em *tandem*. As duas circunferências entre as numerações dos passes representam cada cadeira em sua “posição física” (cadeiras nomeadas tradicionalmente de F1, F2,...). Esse modo de visualizar o cone facilita a sua compreensão. Por exemplo, os dois pontos do cone que interceptam o eixo das ordenadas correspondem aos limites de variação da coroa relativa da tira à saída da cadeira F1. Caso a variação da coroa relativa resulte em um valor maior que 1,6% ou menor que -0,8%, então haverá defeito de planicidade do tipo de ondas nas bordas ou do tipo de centrais, respectivamente.

5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

Chama-se análise de sensibilidade ao estudo do comportamento de determinado parâmetro de resposta frente à variação de outro parâmetro operacional e/ou de equipamento, mantendo fixos os valores de todos os demais parâmetros. Geralmente tal estudo é feito por meio de um simulador ou um modelo matemático do equipamento, uma vez que a premissa de conservar constantes os demais parâmetros enquanto se varia um em particular dificilmente pode ser conseguido por um laminador real, mesmo sendo de laboratório.

Uma variável que quantifica esse comportamento é a chamada “taxa de efeito” (*rate effect*), definida a seguir pela equação (6).

A chamada “taxa de efeito” é definida por:

$$k_{[R],[I]} = \frac{\Delta R}{\Delta I} = \left(\frac{R - R_o}{I - I_o} \right) \quad (6)$$

onde,

ΔI : mudança no parâmetro de influência I que produz a mudança ΔR no parâmetro de resposta R;

R , R_0 : respostas correspondentes aos parâmetros de influência I e I_0 respectivamente.⁽⁶⁾

Quanto maior o valor em módulo da taxa de efeito, maior é a sensibilidade do parâmetro R de resposta escolhido à variação do parâmetro de influência I .

Por exemplo, pode-se tomar como o parâmetro de resposta a coroa relativa C_r , e como parâmetro de influência a força de contraflexão FW . A Figura 6 mostra a variação de C_r em função do aumento de FW (a Figura 7 mostra os sentidos positivos das forças de contraflexão). A inclinação do segmento mostrado é a taxa de efeito desejada nesse caso, conforme a equação (7).

$$k_{[C_r],[FW]} = \frac{\Delta C_r}{\Delta FW} \quad (7)$$

sendo,

ΔFW : Variação da carga de contraflexão (variável de influência);

ΔC_r : Variação correspondente da coroa relativa (variável de resposta).

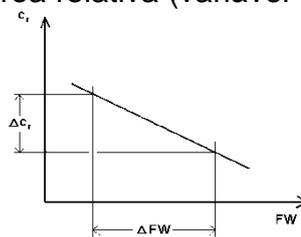


Figura 6 – Visualização do cálculo da taxa de efeito.

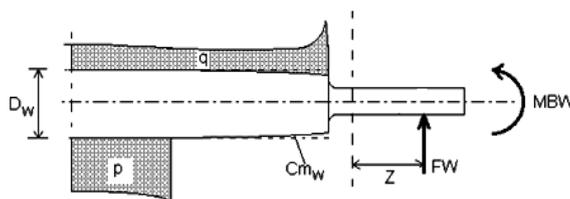


Figura 7- Sentidos positivos das forças de contraflexão.

Foi realizada uma análise de sensibilidade da coroa da tira (e o conseqüente efeito sobre a sua planicidade), analisando a influência da variação de diversos parâmetros, tais como força de contraflexão, coroas usinadas do cilindro, diâmetros dos cilindros, largura da tira, etc. em uma seqüência de passes, laminando-se um aço médio carbono. Além disso, estudou-se também a variação da coroa da tira quando, dentro de um mesmo passe, se variou a sua espessura final.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Influência da Largura da Tira sobre a Coroa Relativa da Mesma

A Figura 8 apresenta os valores de coroa relativa para diferentes larguras e passes. Observa-se que a coroa aumenta de valor em todos os passes à medida em que a largura aumenta, até cerca de 1.350 mm, a partir do qual começa a diminuir.

As curvas com ponto máximo foram encontradas também por Guo,⁽¹⁴⁾ que verificou o início da queda da coroa quando a largura da tira atinge cerca de 80% do comprimento da face do cilindro de trabalho.

Uma possível explicação para o comportamento de crescimento da coroa com o crescimento da largura da tira é o fato de haver maior concentração de carga na

região central dos cilindros, quando se trata de tira com pequena largura (w_1), o que faz com que os cilindros flexionem mais do que quando se laminam tiras mais largas (w_2), conforme o esquema da Figura 9. Nesta figura podem-se observar as cargas distribuídas q_1 de contato entre cilindros e as cargas distribuídas p_1 de laminação. Ambos os cilindros estão em equilíbrio de forças. Pode-se observar uma deflexão menor por parte do cilindro com carga p_2 , pois esta abrange um comprimento maior do cilindro de trabalho juntamente com q_2 .

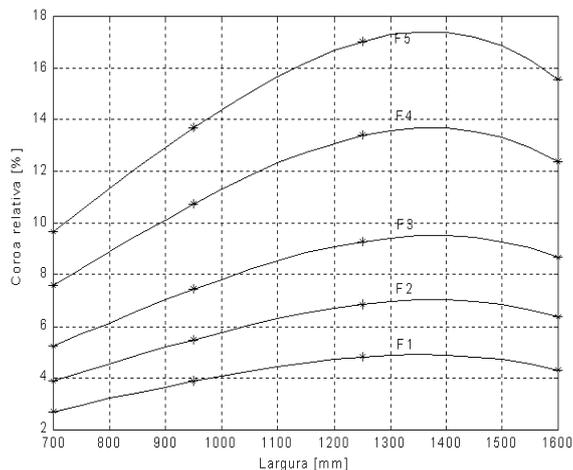


Figura 8 – Coroa relativa em função da largura da tira para uma mesma sequência de reduções para as cadeiras F1 a F5 e larguras de tira entre 700 mm e 1.600 mm.

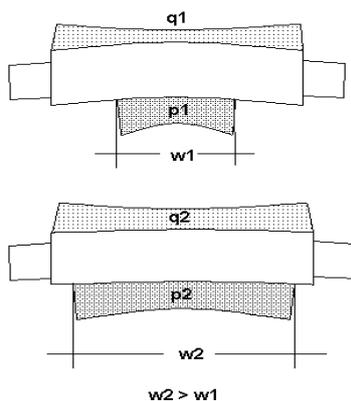


Figura 9 – Distribuição das pressões em cilindros de trabalho laminando duas tiras de larguras diferentes.

6.2 Influência da Coroa Usinada do Cilindro de Trabalho sobre a Coroa da Tira

Foi estudado o comportamento da coroa da tira à medida em que se modificavam as coroas usinadas dos cilindros de trabalho. Os resultados estão mostrados na Figura 10, onde se observa pelos valores negativos de $k_{[cr].[cmw]}$, uma diminuição da coroa relativa da tira quando se aumenta o valor da coroa usinada do cilindro de trabalho (sendo que a coroa usinada está representada pelo parâmetro cmw). Esse fenômeno se explica pelas deflexões dos cilindros que são compensadas pelas coroas dos mesmos. Também se observa que a inclinação da taxa de efeito aumenta para larguras maiores, indicando que quanto maior a largura da tira, maior será a diminuição da coroa relativa para uma mesma variação no valor da coroa usinada do cilindro de trabalho.

Esse comportamento da taxa de efeito pode ser explicado pelo fato da abertura entre os cilindros de trabalho ser crescente do centro até os extremos dos cilindros, quando não estão sob carga.

6.3 Influência da Coroa Usinada do Cilindro De Apoio Sobre A Coroa Relativa Da Tira

Pela Figura 11 constata-se que, semelhantemente à Figura 10, a coroa da tira diminui com o aumento da coroa usinada do cilindro de apoio (coroa que é representada pela variável cmb). Observa-se, porém, uma menor influência do que no caso da variação da coroa do cilindro de trabalho, devido ao fato de ser apenas a parte inferior do cilindro de apoio que afeta a tira, enquanto que na coroa usinada do cilindro de trabalho, também a parte superior contribui para diminuir a coroa da tira.

6.4 Influência do Diâmetro do Cilindro de Trabalho sobre a Coroa Relativa da Tira

Os efeitos da variação do diâmetro do cilindro de trabalho sobre a variação da coroa da tira estão representados na Figura 12. Observa-se que a coroa resultante da tira diminui com o aumento do diâmetro dos cilindros de trabalho devido ao aumento da resistência à flexão dos mesmos. É interessante notar, porém, que a taxa de diminuição da coroa relativa possui um ponto de extremo para larguras na faixa de 1250 a 1350 mm. Isso significa a existência de um limite ao aumento do diâmetro do cilindro de trabalho a partir do qual já não se consegue aumentar a taxa de redução da coroa da tira.

6.5 Influência da Carga de Contraflexão do Cilindro de Trabalho (*Work Roll Bending*) sobre a Coroa da Tira

Foi mostrado anteriormente o modo de obtenção de $k_{[cr],[FW]}$. A Figura 13 reúne os resultados obtidos para a variação da coroa em função da variação da carga de contraflexão. Cada ponto da curva representa a taxa de efeito para contraflexão, i.e., a variação da coroa relativa por unidade de variação de força de contraflexão aplicado para largura e cadeia determinadas. O valor negativo de $k_{[cr],[FW]}$ mostra que a coroa da tira diminui quando se aumenta a carga de contraflexão. Tal comportamento é coerente, pois, uma carga de contraflexão positiva tende a criar um estado de tensão de tração da face inferior do cilindro de trabalho do conjunto superior de cilindros do laminador, fazendo diminuir o arco formado pela deflexão elástica e, portanto, diminuindo a coroa da tira.

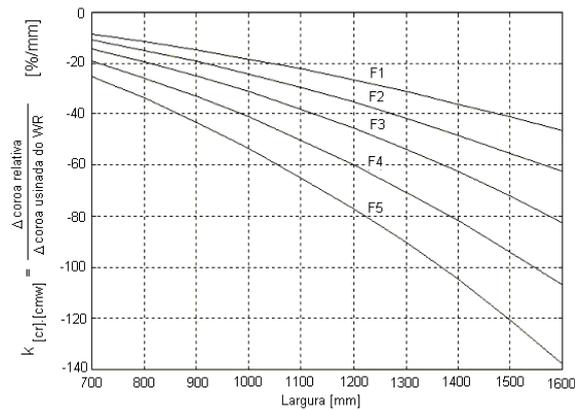


Figura 10 – Taxa de efeito para coroa usinada do cilindro de trabalho, para as cadeiras F1 a F5 e larguras de tira entre 700 mm e 1.600 mm.

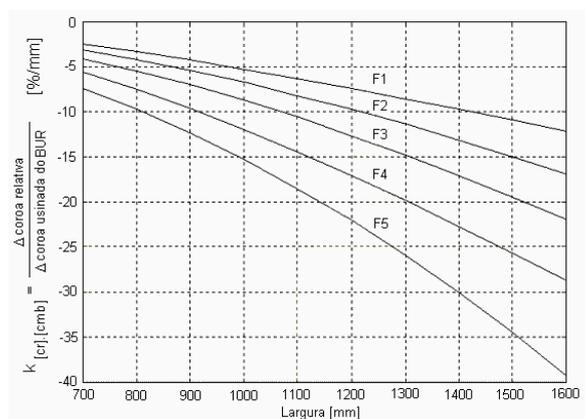


Figura 11 – Taxa de efeito para coroa usinada (BUR) para as cadeiras F1 a F5 e larguras de tira entre 700 mm e 1.600 mm.

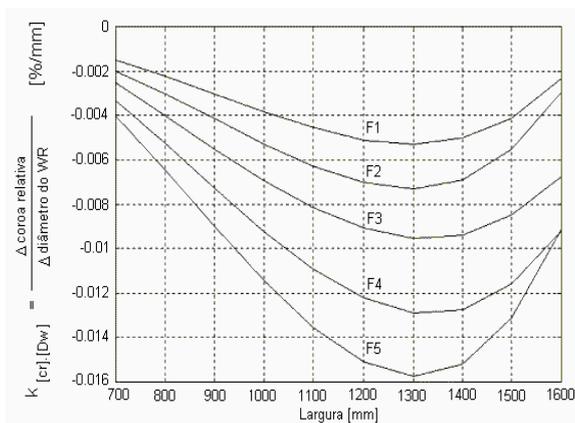


Figura 12 – Taxa de variação para diâmetro do cilindro de trabalho para as cadeiras F1 a F5 e larguras de tira entre 700 mm e 1.600 mm.

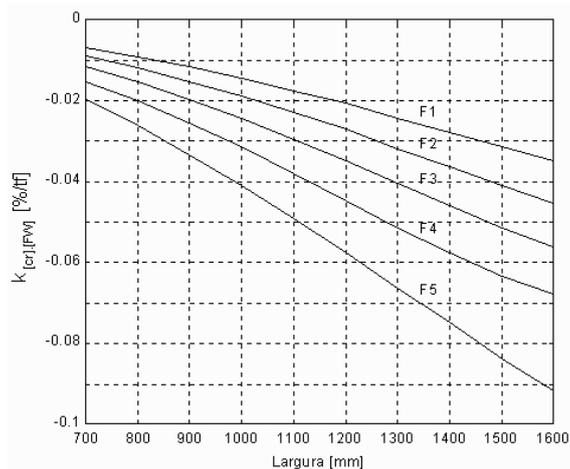


Figura 13 – Taxa de efeito da contraflexão dos cilindros de trabalho para tiras com larguras entre 700 mm e 1.600 mm, cadeiras F1 a F5.

Observa-se que em larguras menores a taxa de efeito da contraflexão (em valores absolutos) diminui. Portanto, é necessário aplicar uma carga maior de contraflexão para se obter uma mesma variação de coroa em uma tira de maior largura. Assim, é mais fácil modificar a coroa relativa em tiras com maiores larguras. Esse resultado é razoável, uma vez que a carga de contraflexão se torna mais efetiva nas situações em que a distribuição de cargas de contato e de laminação agem ao longo de comprimentos próximos do cilindro de trabalho, que é o que ocorre nas situações de tiras largas.

6.6 Possível Defeito de Planicidade na Tira apesar da Atuação da Contraflexão

A Figura 14 contém os resultados da laminação de uma tira de 1.600 mm de largura, aço baixo carbono, que sofreu redução de 6,0 mm para 5,4 mm, sob 40 tf de contraflexão. O laminador é do tipo quádruplo, com 1900 mm de comprimento de face dos cilindros, 450 mm de diâmetro para o cilindro de trabalho e 1300 mm para o de apoio. A linha pontilhada representa o perfil ideal, ou seja, aquele em que a redução é a mesma em todos os pontos ao longo da largura da tira. A linha contínua representa o perfil emergente real. Segundo o cone de forma, para uma coroa definida para 25 mm da borda e com as condições de operação citadas, a tira não apresentará problemas de planicidade. Porém, a região da semi-largura compreendida entre 500 mm e 600 mm sofreu uma deformação maior, podendo vir a ser motivo de instabilidade da tira nessa região.

6.7 Influência da Redução e da Carga de Laminação sobre a Coroa da Tira

Pode-se observar na Figura 15 uma razoável linearidade existente entre a carga de laminação e a coroa absoluta em cada passe, i.é., coroa absoluta final e a carga de laminação situam-se sobre uma mesma reta para as diversas reduções a partir da espessura inicial de 6,0 mm.

O conhecimento prévio do comportamento da coroa absoluta em função da carga total de laminação (através de gráficos como o da Figura 15) possibilita conhecer de antemão a coroa emergente da tira que está sendo laminada através da simples leitura do valor da carga de laminação.

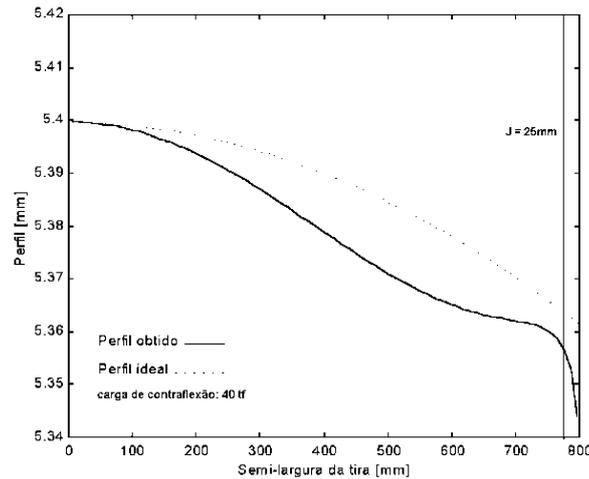


Figura 14 – Perfil emergente e perfil ideal.

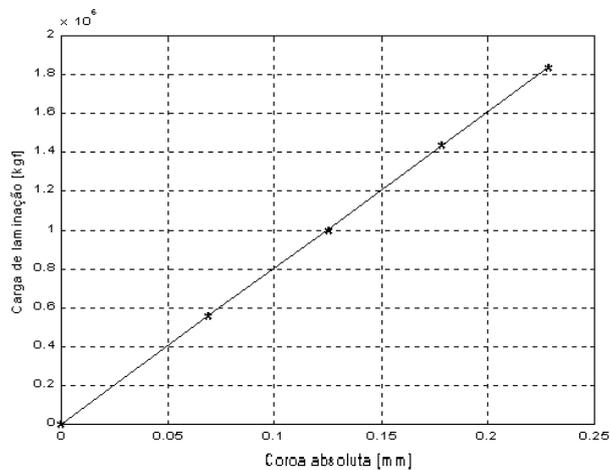


Figura 15 – Carga de laminação x coroa absoluta (Largura da tira: 1.700 mm; espessura inicial: 6,0 mm (1º passe, laminador 2)).

Caso haja algum distúrbio (como por exemplo, a passagem de um trecho da tira com resistência maior que a desejada), a “nova” coroa da tira será conhecida, e se poderá fazer um rápido ajuste da flexão dos cilindros a fim de manter a coroa desejada da tira.

7 CONCLUSÕES

Por meio da análise de sensibilidade da coroa da tira laminada plana em função dos diversos parâmetros, pôde-se ter uma maior compreensão do comportamento de um laminador com relação à coroa da chapa produzida, quando se variaram alguns parâmetros de operação e do equipamento, além de se produzirem resultados (as chamadas “taxas de efeito”) bastante úteis no controle *online*. Estes resultados mostram-se, também, bastante úteis para avaliar a capacidade de um laminador quádruo e pode servir de grande auxílio no seu projeto.

Observou-se que, com relação à aplicação da carga de contraflexão, a sua influência sobre a coroa da tira cresce com o aumento da largura da mesma. Além disso, o efeito da contraflexão sobre a coroa da tira em uma seqüência de passes vai aumentando de cadeira para cadeira, à medida que se avança na laminação.

Foi mencionado que uma das formas de diminuir a coroa da tira é a de usinar os cilindros com forma levemente abarrilhada. Os resultados da análise de sensibilidade mostraram-se semelhantes aos obtidos para a contraflexão. Notou-se, além disso, que a influência da coroa usinada do cilindro de trabalho sobre a variação da coroa da tira é maior que a da coroa usinada do cilindro de apoio. Isso se deve, provavelmente, ao fato do cilindro de trabalho possuir um diâmetro menor do que o cilindro de apoio, sendo portanto, mais flexível, além de que no cilindro de trabalho ambas as partes superior e inferior do perfil usinado contribuem para formar a coroa da tira, enquanto que no cilindro de apoio, apenas a parte inferior contribui para isso.

Da análise feita a respeito do efeito do aumento do diâmetro do cilindro de trabalho, conclui-se que a taxa de variação da coroa depende da largura da tira. À medida que se aumenta a largura da tira, a taxa de redução da coroa relativa cresce com o aumento do diâmetro até um ponto de extremo na taxa de redução. A partir de então a taxa de redução da coroa começa a decair.

Com relação à influência da largura da tira sobre a sua coroa relativa verificou-se que a coroa cresce com o aumento da largura até determinado ponto, quando começa a diminuir mesmo continuando a aumentar a largura da tira. Esse ponto de máxima coroa parece ser de aproximadamente 80% do comprimento da mesa do cilindro.

Verificou-se também que a coroa absoluta é bastante proporcional à carga de laminação resultante quando se trabalha com tiras de larguras menores que 80% do comprimento da mesa do cilindro. Isso pôde ser verificado para dois laminadores quádruplos de diferentes dimensões. Esse resultado pode ser aplicado em um sistema de controle *online*, relacionando-se a coroa absoluta diretamente com o valor da leitura da carga de laminação.

Observou-se um fenômeno interessante a respeito da planicidade de uma tira, resultante da ação da contraflexão do cilindro de trabalho. Apesar de se aplicar a carga suficiente de contraflexão para satisfazer o critério de Shohet e Townsend, verificou-se pela observação do perfil da tira laminada que estava ocorrendo uma redução maior em um ponto mais interior de onde é medida a coroa. Provavelmente ocorreria o surgimento de ondas do tipo "M" (*quarter buckles*), não previsíveis pelo método simples de Shohet.

Agradecimentos

O autor gostaria de agradecer ao CEFET-MG, à CAPES e à FAPEMIG pelo financiamento do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- 1 SHIGAKI, Y. **Um estudo da laminação de tiras e chapas planas através de um modelo matemático-numérico de um laminador quádruplo**, 2001. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais.
- 2 SHIGAKI, Y. Estudo da variação da carga de contato entre os laminadores quádruplos em função de sua coroa, chanfro e desgaste. **Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração**, São Paulo, v.8, n.1, p. 1-6, janeiro/março, 2011.
- 3 LÜLING, L.; HOLLMANN, F. W. *Thermal flatness control during cold rolling*. **4th International Steel Rolling Conference**, França, v. 2, pp. E.16.1-E.16.5, junho, 1987.

- 4 SHOJET, K. N.; TOWNSEND, N. A. *Roll bending methods of crown control in four-high plate mills.* **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 206, n. 11, p. 1088-1098, novembro, 1968.
- 5 PAWELSKI, O.; TEUTSCH, H. *A mathematical model for computing the distribution of loads and thickness in the width direction of a strip rolled in four-high cold-rolling mills.* **Engineering Fracture Mechanics**, Germany, v. 21, n.4, p. 853-859, 1985.
- 6 BERGER, B.; PAWELSKI, O; FUNKE, P. *Die beeinflussung des dickenprofils von bändern und Blechen durch walzenbiegeeinrichtungen.* **Stahl und Eisen**, v. 96, n. 8, p. 377-381, 1976.
- 7 GINZBURG, B. V.; AZZAM, M. *Selection of optimum strip profile and flatness technology for rolling mills.* **Journal of the Iron and Steel Engineer**, Pittsburgh, v. 74, n. 7, p. 30-38, julho 1997.
- 8 WILMS, W.; VOGTMANN, L.; KLÖCKNER, J.; BEISEMANN, G.; ROHDE, W. *Profile and flatness control in hot strip mills.* **Metallurgical Plant and Technology**, v. 8, n. 6, p. 74-90, junho, 1985.
- 9 GUO, R.-M. *Optimal profile and shape control of flat sheet metal using multiple control devices.* **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 32, n. 2, p. 449-457, março/abril 1996.
- 10 FINSTERMANN, G.; ZEMAN, K. *Profile and flatness in hot strip mills.* **VAI Rolling Mill Info**, Technical Report, Version 2, Ver. 1.2, 1996.
- 11 HOSFORD, W. F.; CADDELL, R. M. **Metal Forming: Mechanics and Metallurgy**, New York: Cambridge University Press, 2007.
- 12 SHOJET, K. N.; TOWNSEND, N. A. *Flatness control in plate rolling.* **Journal of the Iron and Steel Institute**, v. 209, Pt. 10, p. 769-775, outubro, 1971.
- 13 SOMERS, R. R.; PALLONE, G. T.; MCDERMOTT, J. F.; HARRIS, W. H. *Verifications and applications of a model for predicting hot strip profile, crown and flatness.* **Journal of the Iron and Steel Engineer**, v. 61, n. 9, p. 35-44, setembro, 1984.
- 14 GUO, R.-M. *Computer model simulation of strip crown and shape control.* **Journal of the Iron and Steel Engineer**, v. 63, n. 11, pp. 35-42, novembro, 1986.