

ANÁLISE DE COMPORTAMENTO DA FORÇA DE *BENDING* COM AS VARIÁVEIS DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO¹

Cesar Henrique Maciel Ribeiro²

Jorge Oscar Carrara³

Esteban Kemerej⁴

Rubén Antonio Solé⁵

Ricardo Pinheiro Domingues⁶

Resumo

Este trabalho consistiu na análise de correlação entre a força de curvatura dos cilindros de trabalho (tecnicamente denominada *bending*) e as variáveis de laminação a frio na empresa Ternium Siderar, planta General Sávio, na cidade de San Nicolás de los Arroyos, Argentina. Primeiramente, foi realizado um estudo sobre as variáveis de processo e sobre como o sistema de automação do trem contínuo de laminação as maneja. Depois, foi feito um estudo de como o modelo matemático CORUM® atua para calcular os valores de referência do processo de laminação. Uma vez conhecidos esses fatores, passou-se a observar a ocorrência, ou não, da ondulação de bordas a partir da alteração dos valores de *bending* indicados pelo operador numa das cadeiras do trem contínuo, pois com a ação do *bending* pode-se uniformizar a distribuição de forças ou, então, concentrar a força em uma parte específica da chapa. A partir da observação deste efeito e de gráficos que reúnem todas as informações das variáveis do processo em função do tempo, foi possível coletar dados de forma da chapa laminada a frio, com os quais se estabeleceu uma correlação entre o *bending* e outras variáveis de processo. Isso permitiu sugerir melhorias na automação e no controle do processo de laminação a frio da empresa, as quais propiciarão aumento da qualidade do seu produto.

Palavras-chave: Análise de correlação; *Bending*; Variáveis de laminação.

ANALYSIS OF BENDING FORCE BEHAVIOR WITH COLD ROLLING PROCESS VARIABLES

Abstract

This work consists in an analysis of the correlation between the bending force and the rolling variables at General Sávio plant in Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina. Firstly, it was realized a study about the process variables and how the automation system of a continuous rolling train works with them. After this, it was done a study on how CORUM® model operates in calculating the rolling process reference values. Once these factors become known, the author started monitoring the occurrence, or not, of wavy edges caused by changes in bending force values indicated by the operators from one of tandem stands. It was possible to do this, because the action of bending force can either equalize the distribution of the forces or concentrate the forces in a specific part of the strip. From the observation of this effect and viewing the graphics that gather all information of process variables versus time, it was possible collecting form data of the cold rolled strip. With this information it was possible establishing correlations between bending force and other process variables. This allowed suggesting improvements in the control and automation of the cold rolling process at that company and, with this, permitting to improve the product quality.

Keywords: Analysis of the correlation; Bending force; Rolling variables.

¹ Contribuição técnica ao 49º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 22 a 25 de outubro de 2012, Vila Velha, ES, Brasil.

² Membro da ABM, Graduando em Eng.de Controle e Automação na Escola de Minas, UFOP, Ouro Preto, MG.

³ Engenheiro Eletricista, Setor de Laminação a Frio, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina

⁴ Engenheiro de Automação, Setor de Laminação a Frio, Ternium Siderar, San Nicolás, Argentina

⁵ Membro da ABM, Engenheiro Químico, M.Sc., D.Sc., Transferência de Tecnologia, Fundação Gorceix / DEPEC, Ouro Preto, MG.

⁶ Membro da ABM, Eng. Metalurgista, M.Sc., D.Sc., Professor Adjunto IV na Escola de Minas da UFOP - Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Ouro Preto, MG. rpdemet@em.ufop.br

1 INTRODUÇÃO

Este trabalho foi desenvolvido no setor de laminação a frio da empresa Ternium Siderar, planta General Sávio na cidade de San Nicolás de los Arroyos, Argentina. Um processo de laminação é denominado “a frio” quando é realizado abaixo da temperatura de recristalização do material. O objetivo final é a produção de uma tira de aço cujas principais características de qualidade são espessura, que deverá ser controlada longitudinalmente e a planicidade controlada transversalmente.⁽¹⁾

As instalações onde acontece o processo de laminação a frio, localizadas na Planta General Sávio, produzem 580 mil t/ano de bobinas laminadas a frio. As tiras são laminadas por meio de um laminador tipo tandem é um processo de transformação mecânica que consiste na redução da seção transversal por compressão do metal por meio da passagem entre dois cilindros de trabalho em rotação que são acionados por cilindros de apoio.

1.1 Descrição do Processo

O sistema de laminação a frio tipo *tandem* da Ternium Siderar é composto por quatro cadeiras (*stands*) em série, um debobinador, um bobinador, um sistema automatizado de troca de cilindros e cabines de controle de processo. Na figura abaixo é possível ter uma noção do processo.

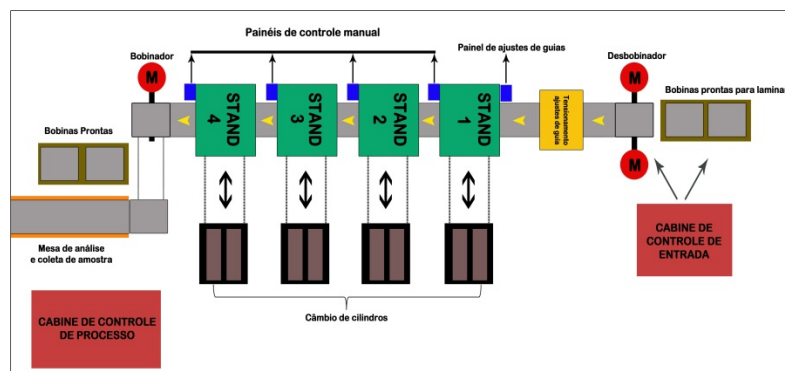


Figura 1: Esquema do processo de laminação a frio Ternium Siderar.

Na cabine de controle de entrada a bobina é centrada no debobinador e depois a ponta da tira é ajustada para que entre bem na cadeira #1. Depois a tira segue passando por cada uma das cadeiras seguintes sofrendo reduções por meio de esforços combinados de tração e compressão. As variáveis de processo são controladas pelo operador da cabine de controle de processo, exceto a força de *bending* que é controlada pelos operários que estão na linha de produção observando a forma da tira e fazendo os devidos ajustes por meio dos painéis de controle manual.

O processo de laminação é dividido em três etapas: entrada, laminação e saída. Entrada é a etapa que ocorre a baixa velocidade, é a fase de emboque da tira em cada cadeira. Laminação é a etapa predominante do processo, é onde velocidade de laminação aumenta até permanecer constante. Um *stand* apenas em estado de laminação quando o *stand* seguinte emboça a tira, ou seja, quando se estabelece uma tensão entre as cadeiras. Saída é a etapa onde há uma redução da velocidade de laminação para que o final da tira não saia do debobinador com uma velocidade

alta, fato que pode causar problemas para o processo, como marca de cilindros e deslocamento lateral da tira.

Os produtos gerados no processo de laminação são classificados de acordo com sua espessura como visto na Tabela 1.

Tabela 1: Classificação dos produtos laminados

MATERIAL	ESPESSURA
Grosso	$h_4 \geq 0.60mm$
Fino	$0,30mm \leq h_4 < 0,60mm$
Ultrafino (<i>Hojalata</i>)	$0,18mm \leq h_4 < 0,30mm$

1.2 Influência da Força de *Bending*

A força de *bending* é uma forma eficiente para controlar a planicidade da chapa. Com a ação desta força se pode uniformizar a distribuição da força de laminação ou então concentrá-la em uma parte específica da chapa.

Quando se tem *bending* positivo a força de compressão se concentra no centro da chapa, resultando em uma maior deformação nesta região. Em contrapartida, quando se tem *bending* negativo a força de compressão se concentra nos bordes da chapa, resultando em uma maior deformação nos bordes e, conseqüentemente, uma menor tensão nesta parte.

Devido a esta maior deformação que surgem as ondulações na superfície da chapa. Considerando os fatores acima, quando há um aumento de velocidade de laminação a tendência é por o *bending* o mais negativo possível, sem danificar a forma da chapa. Assim, pode-se diminuir a probabilidade de corte de chapa, uma vez que haverá uma maior concentração de tensão no centro da chapa, já que os bordes sofrerão uma maior deformação.

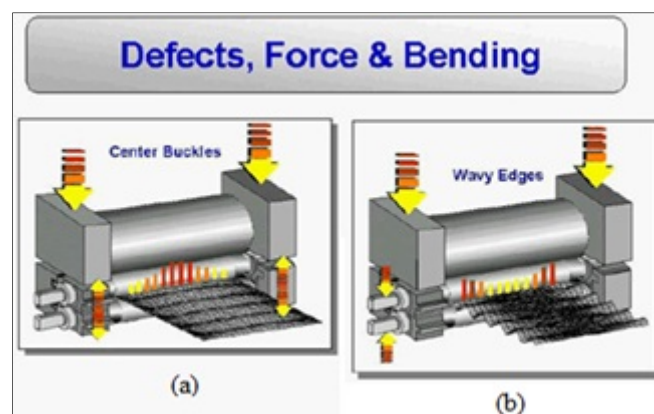


Figura 2: Influência da força de *bending*.

Na Figura 2, pode-se verificar os efeitos da força de *bending*. Quando a força de *bending* tende a flexionar os cilindros positivamente (a) concentra-se a força de laminação no centro da chapa, causando ondulação nesta região. Quando a força de *bending* tende a flexionar os cilindros negativamente (b) concentra-se a força de laminação nos bordes da chapa, causando ondulação nesta região.

2 OBJETIVO

Encontrar valores mais confiáveis de aplicação de força de *bending* com a finalidade de melhorar a etapa de entrada e diminuir os índices de ruptura de chapa entre *stands* aumentando, desta forma, a produtividade do processo de laminação a frio da empresa Ternium Siderar.

3 METODOLOGIA

Para alcançar o objetivo será feito um seguimento dos valores de *bending* indicados pelos operadores nos estados de entrada e laminação para o produto *hojalata*.

Basicamente, a estratégia deste trabalho consiste em alterar, manualmente, os valores de *bending* durante a etapa de laminação, na cadeira #3, até que haja ondulações nos bordos da chapa. Os pontos em que se percebe este fenômeno são registrados e com eles, se extraem os valores das variáveis por meio dos *trendings*(1) do Phindows(2) e se faz uma análise de correlação entre força de *bending* e variáveis de processo (largura, forças, quilômetros de desgaste de cilindros, reduções, tensão)

Uma vez analisados os dados, podem-se estabelecer padrões mais confiáveis de *presets* de laminação e criar ações de controle automático de produção, melhorando a produtividade do setor.

Além disso será feito um estudo sobre o modelo CORUM®

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Estudo do Modelo CORUM®

Basicamente CORUM® é um modelo determinístico que usa submodelos metalúrgicos individuais para calcular valores ótimos para o processo de laminação a frio baseando-se nas características do processo e dados de produtos primários de entrada.

Sua função é determinar os *presets* ótimos para o processo de laminação possa ocorrer com uma melhor distribuição de cargas nas cadeiras para uma maior velocidade de laminação, mantendo a qualidade do produto e uma melhor produtividade. Para alcançar isto, o modelo CORUM® usa:

- submodelos individuais ordenados para calcular o comportamento do produto;
- estratégias de otimização para gerar os *presets*; e
- equações inversas para adaptar automaticamente os parâmetros internos.

Na Figura 3 mostra-se o esquema de funcionamento do modelo CORUM®

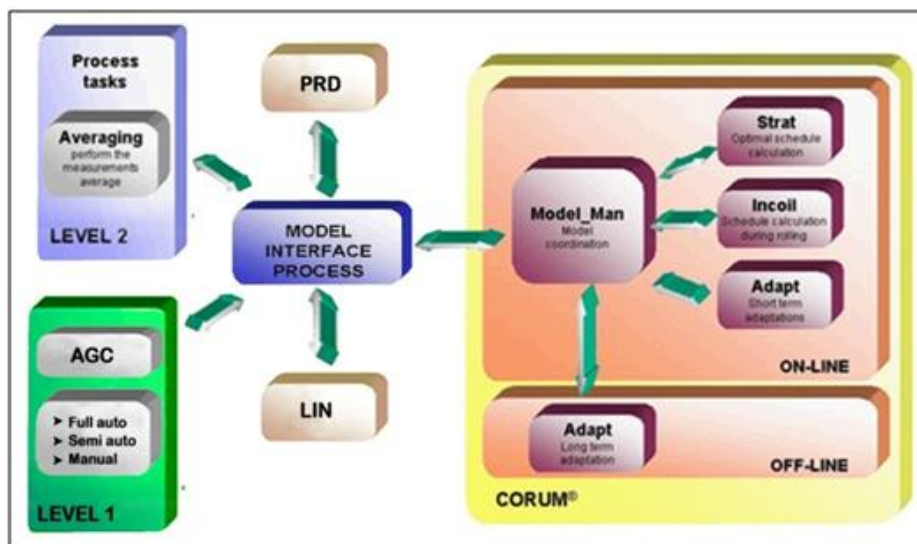


Figura 1: Esquema de funcionamento do modelo CORUM®.

- 1 - **Trending**: Gráficos que contem todas as informações das variáveis do processo em função do tempo.
- 2 - **Phindows**: Sistema supervisório de onde se tem acesso ao banco de dados do processo, gráficos, estatísticas, valores de todas as variáveis de processo, mímicos, tabelas de gestão e manutenção, escala de turnos e outros.

Como se observa na Figura 3, há uma divisão interna de execução de tarefas. Cada parte é responsável por uma ação que pode ser cálculo, adaptação, otimização ou comunicação. Uma parte é responsável por armazenar os dados e outra por fazer a gestão de todas as tarefas:

- **Strat** – Responsável por calcular os *presets* de laminação;
- **Adapt** – Analisa as medidas e faz pequenas modificações para adaptar os coeficientes;
- **Incoil** – Indica as referências da bobina atual e é responsável por todas as otimizações;
- **Averaging** – Esta função faz medições do AGC (*Automatic Gauge Control*) e envia os valores médios para o modelo fazer as adaptações para diferentes fases;
- **Model-Man** – Gerencia todas as tarefas citadas. É responsável pela comunicação com o nível 2 do processo, pelo movimento de informações entre as tarefas e ativação de outras;
- **MIP (Model Interface Description)** – Envia e recebe mensagens referentes às tarefas para o Model-Man e atualiza os dados da memória compartilhada do CORUM (LIN y PRD)
 - **LIN** – É responsável por ter as informações para descrever a laminação em detalhes (cadeia, cilindro, custo, coeficiente de atrito, tensionamento, motor...);
 - **PRD** – Contém todas as informações a respeito de um produto específico tanto da bobina atual como da próxima bobina. (PDI - dados primários de entrada, PRS - estrutura de programação, MEA – estrutura medida, PRO – dados de processo e produção).

Os dados determinados pelo modelo CORUM® são entregues ao AGC para que possa determinar e enviar as ordens adequadas para o funcionamento dos atuadores.

3.2 Análise: *Bending* e Força Específica de Laminação

Neste estudo analisou-se o comportamento da força de *bending* com a força específica de laminação para os casos de chapa com bordas onduladas e não onduladas.

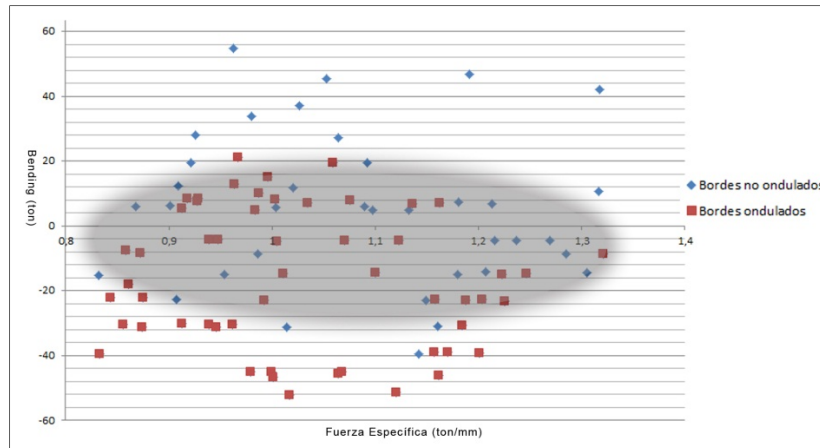


Figura 4: Dispersão força específica de laminação e força de *bending*.

Como se observa na Figura 3, não se constatou um comportamento bem definido entre a força específica de laminação e a força de curvatura dos cilindros de trabalho. Não há uma divisão nítida entre pontos em que se encontram bordas onduladas e bordas não onduladas na chapa. O que se verifica é uma zona de transição onde há uma mescla de pontos dos dois casos entre uma força de -30 e 20 t de *bending*. Para forças acima de 20 t tem-se bordas onduladas e para forças abaixo de -30 t predominam bordas onduladas.

Foi feito, também, um teste “a vazio” de variação de *bending* durante a imposição de uma força de laminação constante para depois fazer uma análise direta da relação entre os parâmetros analisados sem a intervenção de outras variáveis de processo. Abaixo há uma imagem extraída do *trending* que mostra o teste feito.

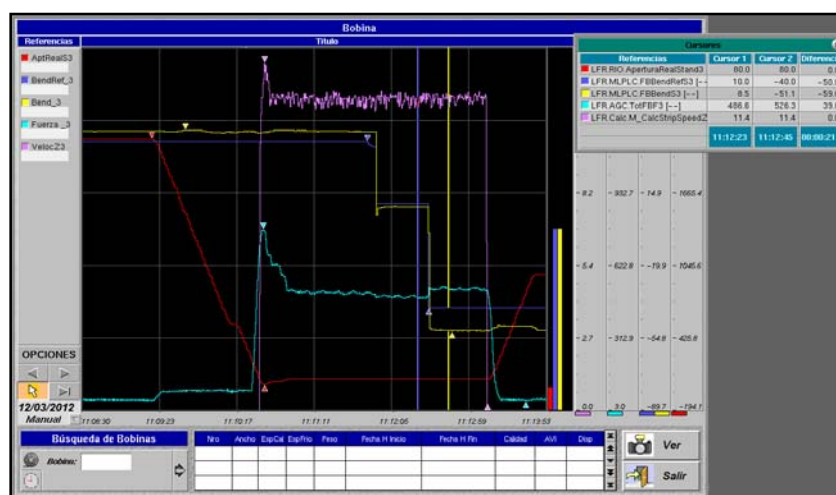


Figura 5. Dados do teste extraídos do *trending*.

Pode-se perceber que a variação de *bending* (linha amarela) possui pouca interferência na força de laminação (linha magenta) para valores positivos de *bending*, posto que se iniciou com uma força de flexão dos cilindros de 40 t, alterou-

se para 10t sem que se observasse uma influência na força de laminação. Porém, com a mudança para -40t pode-se verificar uma variação de 39,6ton na força de laminação, conforme pode ser visto na Figura 4.

3.3 *Bending* e Quilômetros de Desgaste dos Cilindros

Uma vez coletados os dados do proceso, fez-se um gráfico de dispersão com valores de *bending* e seus respectivos valores de km de laminação durante o processo de laminação de folhas finas.

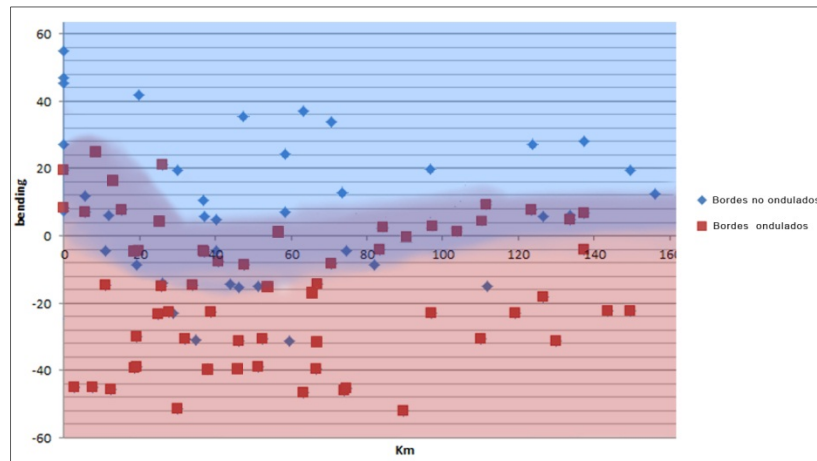


Figura 6. Dispersão quilômetros de desgaste dos cilindros de trabalho x força de *bending*.

Como visto no gráfico da figura 6, percebe-se uma zona de transição entre os casos de bordas onduladas e não onduladas, embora haja alguns resíduos de pontos de bordas não onduladas junto com pontos de bordas onduladas. Analisando o gráfico foi possível verificar que a força de *bending* tem a tendência de abaixar quando aumentam os quilômetros de laminação.

Observa-se que depois de aproximadamente 25 km de desgaste dos cilindros de trabalho a zona de transição tende a ser menor e mais estável. Isto é devido ao fato de que nos quilômetros iniciais de laminação há um aquecimento dos cilindros devido aos esforços do processo de laminação e, desta forma, os mesmos vão adquirindo uma coroa térmica até um determinado ponto onde esta tende a permanecer constante (estabiliza sua temperatura).

Para comprovar isto, fez-se também um estudo para verificar o comportamento da coroa térmica do cilindro de laminação da cadeira #3 durante o processo de laminação. A Figura 7 ilustra o teste realizado.

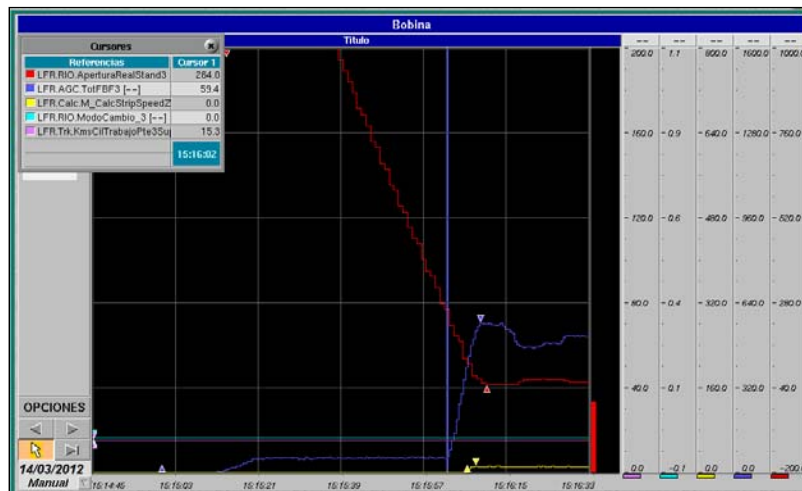


Figura 7: Medição do ponto de contato entre os cilindros de trabalho.

O teste consistiu em diminuir a abertura entre os cilindros (linha vermelha) e impor uma força de laminação (linha azul). No ponto em que a força começa a subir é onde os cilindros entram em contato. Assim se pode fazer um seguimento da coroa térmica dos cilindros ao verificar o ponto de contato dos mesmos.

O procedimento foi feito em 31 pontos de medição, desde a entrada dos cilindros (temperatura ambiente e 0km de laminação) e os demais no final de laminação de cada bobina, até a troca dos cilindros. Com os dados adquiridos construiu-se um gráfico com os valores de abertura onde os cilindros de tocavam e seus respectivos quilômetros de laminação, o qual pode ser visto na Figura 8.

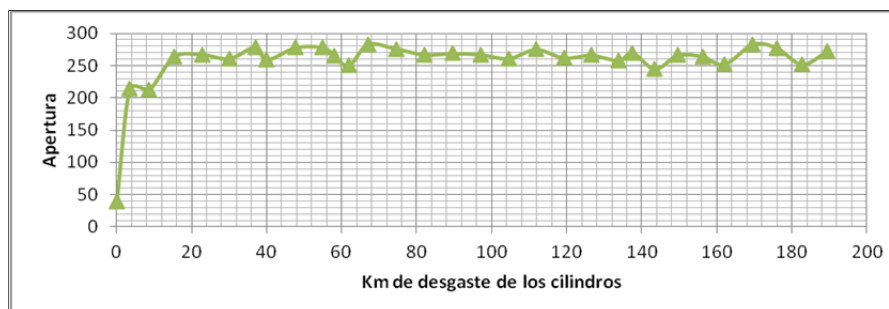


Figura 8: Análise da coroa térmica dos cilindros de trabalho.

Como visto no gráfico os cilindros vão ganhando coroa térmica conforme aumentam os quilômetros de laminação até que depois de 20 km, aproximadamente, tendem a se estabilizar. Um comportamento semelhante a variação de *bending* com os quilômetros de laminação.

Uma vez feito o acompanhamento da coroa térmica dos cilindros durante o processo de laminação, fez-se uma medição de perfil térmico dos mesmos quando foram trocados.

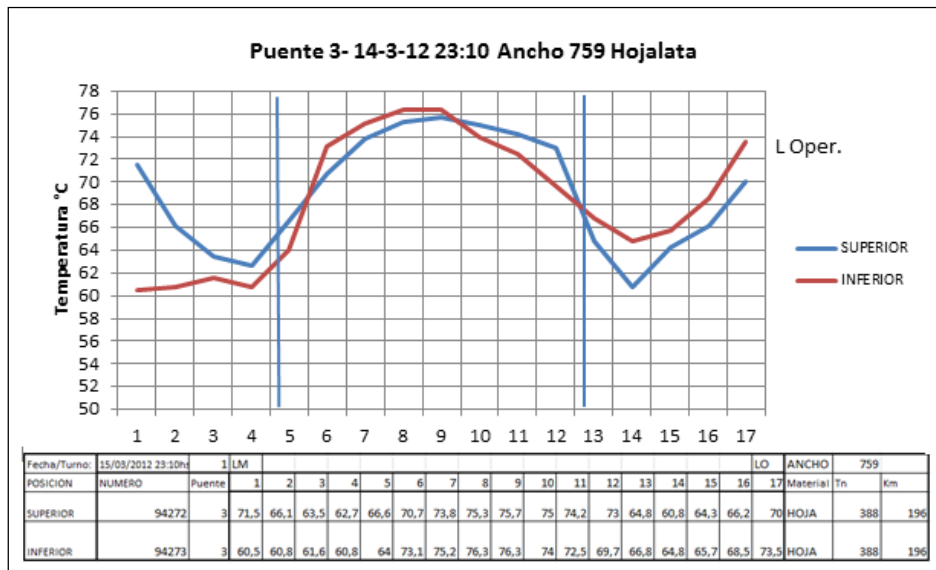


Figura 9: Perfil térmico dos cilindros de trabalho.

Verifica-se que a coroa térmica é maior na região de contato entre a chapa e os cilindros de trabalho devido à energia térmica gerada pela zona de atrito durante o processo de laminação.

3.4 *Bending* e Largura da Tira

Para o estudo de comportamento da força de curvatura dos cilindros de trabalho em relação à largura de uma chapa, analisou-se os valores de *bending* e sua influencia na forma de chapa para uma determinada largura.

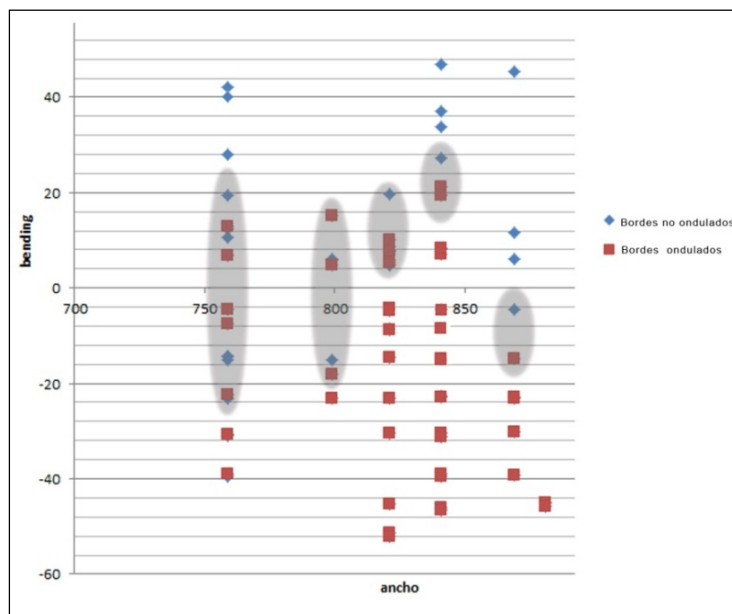


Figura 10: Dispersão largura de chapa e força de *bending*.

Ao analisar o gráfico se pode ver uma que quanto menor a largura da chapa maior é a zona de transição de pontos ondulados e pontos não ondulados, isto quer dizer que quanto maior é a largura da chapa maior é a sua sensibilidade à ação da força de *bending*.

4 CONCLUSÕES

Por meio dos dados observados pode-se concluir que o processo de laminação a frio é muito dinâmico e totalmente multivariável, onde se observa uma correlação entre as variáveis analisadas.

Para o regime estacionário de laminação, não se vê uma correlação linear bem evidente entre as variáveis analisadas. Porém, vê-se que há sempre uma zona de transição entre os casos de bordas onduladas e não onduladas, conforme já analisado neste trabalho. Este fenômeno foi mais evidente para o comportamento da força de *bending* com os quilômetros de desgaste dos cilindros de trabalho, devido ao efeito de coroamento térmico que tais cilindros sofrem.

Outra importante conclusão é que em todas as bobinas analisadas, para regime estacionário na cadeira #3 e material *hojalata*, os operadores (baseados em sua experiência de processo) trabalham com um intervalo entre 30t e 50t para valores de força de *bending* em 88% dos casos, durante o período de análise. Em contrapartida, depois de fazer a análise de variação da força de *bending*, observou-se (para 98% dos casos) que a zona de transição de bordas onduladas para bordas não onduladas na chapa está abaixo de 20t de força de curvatura dos cilindros de trabalho. Assim, conclui-se que, para a maioria dos casos analisados, os cilindros de trabalho atuam exercendo uma maior força de laminação no centro da tira e, assim, uma maior tensão nas bordas, aumentando a probabilidade de a mesma se romper durante o processo.

Observou-se, também, que durante o período de aceleração da tira, antes do regime estacionário, os pontos onde ela começa a ter bordas onduladas mostram valores de força de *bending* relativamente maiores, comparados ao período de velocidade constante. Isto é devido ao fato de que as variáveis de força de laminação, tensão, e reduções possuem valores muito instáveis durante a fase de aceleração.

As conclusões tomadas são baseadas em um número relativamente pequeno de amostras. Para conclusões mais precisas será necessário coletar um número muito maior de dados

5 SUGESTÕES

5.1 Mudança Valores de *presets de bending*

Considerando as conclusões, a primeira recomendação é abaixar os valores de força de *bending* utilizados na cadeira #3, para uma faixa entre 25 t e 20 t, que é o intervalo que está mais perto da zona limite entre bordas onduladas e não onduladas. Esta recomendação é pertinente, uma vez que se percebeu, para a maioria dos casos antes dos testes de variação da força de flexão dos cilindros de trabalho, que os valores de referência utilizados pelos operadores estão muito acima da zona de transição.

Assim, com esta medida tomada, espera-se que o processo, na etapa de laminação, ocorra de modo que a chapa passe com tensão menor em suas bordas, diminuindo desta forma a probabilidade de ocorrer uma ruptura de chapa.

Depois de implantar a recomendação deverá ser feita uma análise comparativa dos índices de corte de chapa no período de prova com os períodos anteriores e, assim verificar o efeito da utilização dos novos valores de referência de *bending*.

Com isto se pode obter uma padronização do processo e um melhor controle de processo.

5.2 Implementar o modelo CORUM® para gerar valores de *presets* de *bending* para o processo.

Como visto, CORUM® calcula os *presets* de *bending*, porém os mesmos não são utilizados como referência para os operadores no processo de laminação de *hojalata*.

A ideia é implementar, inicialmente, um sistema semiautomático de aplicação da força de *bending*. Inicialmente o operador utiliza os valores de referência iniciais sugeridos anteriormente e depois utiliza os valores de *preset* indicados pelo modelo CORUM®. Neste sistema proposto, os valores de referência surgirão nos painéis de controle manual para que o operador possa segui-los.

É importante que durante a implementação do trabalho proposto seja feito um acompanhamento para verificar se os valores calculados pelo modelo resultam em uma boa forma de tira.

Uma vez comprovada a eficácia do sistema, é possível fazê-lo de modo totalmente automático, com a vantagem de não haver necessidade de se fazer investimentos para isto, basta apenas fazer ajustes no sistema, dado que se utilizará um recurso já disponível, porém não aproveitado para o tipo de material laminado em questão.

5.3 Automação do Sistema de Controle de Abertura dos Cilindros de Trabalho

Ao fazer os testes para medições de coroa térmica, verificou-se que é possível fazer um controle automático de abertura dos cilindros de trabalho para cada bobina a ser laminada, uma vez que se podem detectar os pontos de contato entre os cilindros de trabalho quando o operador sobe os cilindros para saída do final da chapa e, depois, os abaixa novamente para iniciar a laminação da bobina seguinte. Desta forma, se pode determinar, de modo automático, o posicionamento dos cilindros de trabalho para a etapa de entrada, considerando o comportamento da coroa térmica. Atualmente este procedimento é totalmente manual.

O diagrama de blocos com a lógica de funcionamento proposto para esta aplicação é dado a seguir:

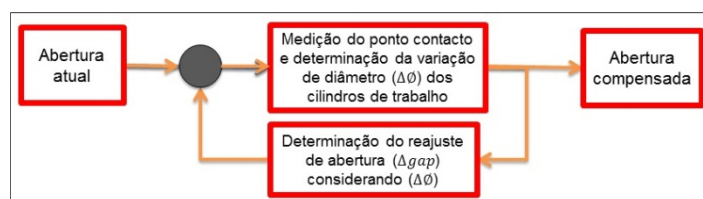


Figura 11. Diagrama de blocos proposto para o controle de abertura

Uma vez que se tem um valor de referência de abertura, faz-se uma nova medição de ponto de contato dos cilindros, calcula-se a variação de diâmetro e, com isso, faz-se uma realimentação utilizando o valor determinado de variação de abertura reajustada.

Com esta aplicação é possível fazer o procedimento de modo automático, diminuindo o tempo e melhorando a etapa de entrada da chapa.

5.4 Melhora do Sistema de Aquisição de Dados

O processo de laminação a frio é totalmente dinâmico e multivariável. Devido a isto, para que se possa obter um sistema automático de controle satisfatório é

indispensável, primeiro, adquirir dados confiáveis, e estes apenas são obtidos por meio de investimentos que possam fazer a leitura do processo com índices satisfatórios de confiabilidade.

Uma ideia é implementar um sistema de detecção de ondulações nos bordos da chapa meio do processamento de imagens, uma vez que o sistema é muito agressivo e sujeito a cortes de chapa o que pode danificar equipamentos convencionais de medição de planicidade.

Uma câmera seria instalada para capturar as imagens que seriam processadas por um *software* detectando com precisão o momento em que a tira começasse a ondular e assim coletar vários pontos, obtendo uma maior quantidade de dados mais precisos em relação ao sistema de inspeção visual utilizado para o desenvolvimento deste trabalho.

Obtendo-se um sistema confiável de aquisição de dados e em quantidade suficiente para compreender as correlações entre as variáveis do processo de laminação, uma recomendação para otimizar a geração de *presets* é a utilização de redes neurais. Isto é devido à alta capacidade que as mesmas têm no processamento e geração de respostas em processos multivariáveis como o de laminação a frio.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Ternium Siderar, unidade de San Nicolás, Argentina, na pessoa do seu Gerente Geral da Laminação, Sr. Jorge Von Bergen, pela disponibilização de suas instalações e equipamentos e pela concessão e tutoria do estágio ao Graduando Cesar Henrique Maciel Ribeiro, encarregado da coleta de dados que deu origem a esta contribuição. Esta tutoria foi conduzida pelos Engenheiros Jorge Carrara e Esteban Kemerer. Agradecem, também, ao Departamento de Pesquisa e Educação Continuada da Fundação Gorceix, Ouro Preto, MG, Brasil, por possibilitar a efetiva orientação do Graduando, realizada pelos demais autores deste trabalho. Agradecem, ainda, ao professor Dr. Agnaldo José de Rocha Reis pela colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- 1 BRESCIANI Filho *et al*; Conformação plástica dos metais, 5a. Ed., Campinas – SP, 2011.
- 2 FERREIRA, Henrique Cezar; Geração de referências para as malhas de controle de um laminador de tiras a frio, São Paulo, 2004.
- 3 GOMES, Ulisses Rocha; Otimização do processo de laminação a frio através de planejamentos de experimentos, Rio de Janeiro, 2007.
- 4 GORNI, Antonio Augusto; Modelamento matemático da laminação: de ficção científica a ferramenta para a capacitação industrial, Cubatão – SP, 2005.
- 5 MARTIN, Paul; SIDERAR San Nicolas CORUM™ Model Expertise Report, Siemens, 2008.
- 6 MENDEZ, Julio *et al*; Process control optimization in a tandem cold Mill installation of an on-line auto adaptive preset model, Ternium Siderar , San Nicolás, 2002.
- 7 SILVA, Caetano Nunes; Efeito da flexão dos cilindros na laminação de encruamento sobre a planicidade de tiras de aço, REDEMAT, Ouro Preto – MG, 2008.
- 8 VAI CLECIM; Manuales del modelo CORUM®, 1998.
- 9 ZÁRATE, Luis E.; HELMAN, Horacio, GÁLVEZ, José M.; Representação e controle de laminadores tandem baseado em funções de sensibilidade obtidos através de redes neurais, Belo Horizonte – MG, 2003.