

MELHORIA DA PLANICIDADE NA LAMINAÇÃO A FRIO DA USIMINAS – USINA DE CUBATÃO¹

Celio Souza do Rosario²
Fabio Tavares Chamonge³
José Dias Blanco⁴
José Valdir Amorim Dantas⁵
Karl Kristian Bagger⁶
Luiz Fernando Alves⁷
Marcelo Moreira Lima⁸
Mateus Alexandre da Silva⁹

Resumo

As indústrias nacionais de veículos e de eletrodomésticos vêm apresentando constante evolução tecnológica, refletindo em um considerável aumento nas exigências de qualidade de chapas de aço. Características controladas e parâmetros com limites de variação permissíveis cada vez mais estreitos vêm sendo exigidos pelos clientes ao longo dos últimos anos. Isto se configura na busca contínua por melhorias em processos, desenvolvimento de novos produtos e exige aprimoramentos contínuos. Além dos aspectos funcionais e estéticos da aplicação, outras exigências surgiram, os próprios processos passaram a demandar algumas propriedades específicas. A automação dos processos de manufatura com a introdução de robôs que manipulam a chapa sem interferência humana, foi um aspecto novo. Para que sejam fornecidos materiais adaptados para estas novas exigências do mercado, um incremento no controle da planicidade de chapas de aço laminadas a frio se faz necessário. Este trabalho teve por objetivo estudar mecanismos para melhoria da planicidade em uma planta de produção de chapas de aço plano através de ajustes e melhoria no processo de laminação. Após a implementação foi possível obter uma melhoria na performance de planicidade e redução nos índices de retrabalho na laminação a frio.

Palavras-chave: Laminação; Planicidade; Processo.

IMPROVING FLATNESS IN USIMINAS'S CUBATÃO COLD ROLLING MILL

Abstract

The national industries of vehicles and appliances are presenting constant technological evolution, reflecting in a considerable increase in quality requirements of steel plates. Controlled characteristics and parameters with limits of permissible variation tighter are demanded by customers over the last years. This is a continuous search for improving process, new product development and requires continuous improvements. Beyond the functional and esthetics aspects of the application, other requirements the customers process have some specific properties demands. The automatization of the manufacturing with the robots that manipulate the plates without human interference was a new issue. To be supplied materials adapted to the new requirements of the market, an increase in control of flatness steel sheet cold rolled is required. This work aims to study mechanisms to improve the flatness in a plant producing flat steel plates through adjustments and improvements in the cold rolling process. After implementation was possible to obtain an improvement in flatness performance and reduction in reworks in cold rolling plant.

Keywords: Cold rolling; Flatness; Quality.

¹ *Contribuição técnica ao 50º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 18 a 21 de novembro de 2013, Ouro Preto, MG, Brasil.*

² *Eng. Metalurgista, Gerente do Laminador de Tiras a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

³ *Eng. Metalurgista, Gerente-geral da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁴ *Técnico em Metalurgia, Assistente Técnico Industrial da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁵ *Técnico em Eletrônica, Assistente Técnico Industrial da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁶ *Eng. Metalurgista, Gerente Técnico da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁷ *Técnico em Metalurgia, Assistente Técnico Industrial da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁸ *Eng. Metalurgista, Engenheiro de Produção da Laminação a Frio da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

⁹ *Eng. Metalurgista, Gerente da Laminação a Quente nº 2 da Usiminas. Cubatão, São Paulo, Brasil.*

1 INTRODUÇÃO

A planta da laminação a frio da Usina de Cubatão possui duas linhas de decapagem, um laminador de tiras a frio, três linhas de fornos de recozimento, dois laminadores de encruamento e duas linhas de inspeção. Sua capacidade de produção instalada é de um milhão e duzentas mil toneladas por ano.

Após suas modernizações, o que ocorreram entre 1997 e 2000, os laminadores foram capacitados a processar materiais considerados finos, com espessuras de até 0,38 mm.

Embora seja uma planta relativamente nova, a evolução do mercado consumidor – que busca constantemente produtos de melhor qualidade – associado às prioridades da empresa de uma maior produtividade, exige dela o desenvolvimento contínuo de seus produtos e processos.

O processo de laminação consiste em transformar mecanicamente metais por deformação plástica que ocorre quando o material é tracionado e comprimido na sua passagem entre os cilindros de laminação. Ela tem como objetivo principal reduzir a espessura da tira de acordo com as especificações e necessidades dos clientes. A Figura 1 apresenta uma imagem do Laminador de Tiras a Frio da Usiminas Cubatão.



Figura 1. Laminador de Tiras a Frio da Usiminas – Usina de Cubatão.

A Usiminas – Usina de Cubatão possui dois laminadores de encruamento. O laminador n.º1 (Figura 2) foi fabricado em 1964, possui uma cadeira com quatro cilindros, lamina a uma velocidade de até 1.000 metros por minuto (mpm), e é capaz de processar materiais com espessuras entre 0,60 e 3,00mm.

O Laminador de Encruamento nº 2 (Figura 3) é um equipamento totalmente automatizado e foi instalado em 2000, possui uma cadeira com cinco cilindros, lamina a uma velocidade de até 1.200 mpm e é capaz de aplicar um alongamento (no comprimento) de até 10%. Tal capacidade (de alongar) melhora a planicidade final e possibilita a laminação de materiais destinados às aplicações para fins elétricos.



Figura 2. Laminador de encruamento n.º1.



Figura 3. Laminador de encruamento n.º2.

No material laminado a frio recozido, há uma descontinuidade na transição entre o regime plástico e o regime elástico, conhecido como Patamar de Escoamento. Essa descontinuidade, caso não seja eliminada, resultará em deformações heterogêneas no material estampado, provocando o defeito banda de Lüders.⁽¹⁾ Dessa forma, no acabamento final do produto a frio é necessária uma laminação de baixa redução após o processo de recozimento, que chamamos de Laminação de Encruamento.

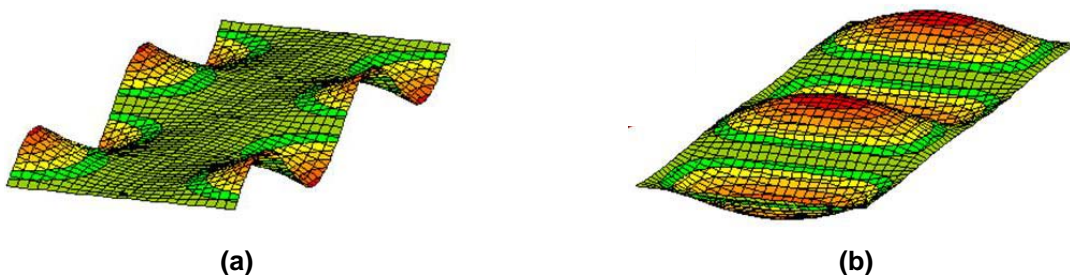
Esta etapa de processo tem três principais finalidades:

- Ajuste das propriedades mecânicas – através da eliminação do Patamar de Escoamento do material recozido, através da aplicação de uma taxa de alongamento geralmente entre 0,5 a 4,0 %;
- Acabamento superficial final – através do contato da superfície dos cilindros de trabalho como material em processo ocorre a impressão da rugosidade na superfície da tira seguindo as exigências do cliente final de acordo com a sua aplicação; e
- Melhoria na forma do material (planicidade) – através da aplicação da laminação diferenciada ao longo da largura do material de forças de compressão (com o uso de compensadores de coroa nos cilindros de trabalho) ocorre a correção reduzindo as ondulações.

1.1 Definições

Planicidade 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.⁽²⁾

A Figura 4 mostra dois tipos de defeitos de planicidade, sendo caracterizados como ondulação central e lateral.



(a) Ondulação lateral; **(b)** Ondulação central.
Figura 4. (a) Ondulação lateral; (b) Ondulação central.

A planicidade pode ser quantificada pela diferença de alongamento ao longo da largura através da unidade UI (I-Unit), a qual está diretamente relacionada com a altura e o comprimento (amplitude) das ondulações,⁽²⁾ demonstradas na equação 1.

$$UI = \left(\frac{\Delta L}{L_{ref}}\right) \times 10^5 = \left[\left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{H}{L}\right)\right]^2 \times 10^5 \quad (1)$$

Valores aceitáveis para planicidade de chapas laminadas a frio atualmente estão entre 0 a 20 UI. Em laminados a quente estes valores podem chegar a 40 UI.⁽³⁾

A tira laminada a quente não possui a mesma espessura ao longo de toda a largura, sendo então necessário o controle de duas variáveis geométricas após a laminação a quente, sendo estas:

- Coroa: caracterizada pela diferença de espessura entre o centro e a média da espessura a uma determinada distância das bordas (geralmente a 25 ou 40 mm). Valores usuais em tiras a quente variam entre 20 a 80 μm ; e
- Cunha: caracterizada pela diferença entre a espessura das bordas. Valores usuais variam entre 0 a 30 μm .



Figura 5. (a) Coroa; (b) Cunha.

Nos laminadores a frio, a coroa da tira é uma variável de entrada, não havendo possibilidade de atuação sobre ela durante o processo de laminação, sendo assim há a necessidade de atuação sobre a flexão de cilindros. A flexão dos cilindros possui correlação direta com a força de laminação, que depende da redução a ser aplicada.⁽²⁾

A Figura 6 ilustra a aplicação destas forças e os seus efeitos sobre a flexão dos cilindros.

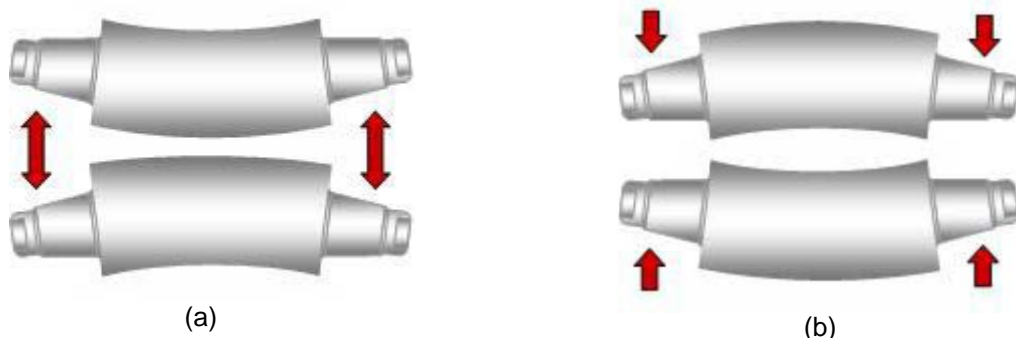


Figura 6. (a) Utilização de flexão positiva; (b) Utilização de flexão negativa.

1.2 Princípio De Medição De Planicidade

Na saída do Laminador de Tiras a Frio foi instalado um rolo de medição Stressometer®, que usa transdutores pressductor, arranjados em zonas de medição,⁽⁴⁾ como mostrado na Figura 7.

Em função da baixa impedância elétrica e do sinal de saída elevado os transdutores pressductor que utilizam o princípio magneto-elástico suportam a medição de força

sob condições ambientais adversas. A vida útil para o rolo de medição normalmente excede 10 anos.

O rolo tem 32 zonas de medição com uma largura de 50 mm cada zona. Existem 4 transdutores, defasados 90 graus, em cada zona de medição.



Figura 7. Vista do rolo de medição.⁽⁴⁾

A planicidade resultante é apresentada em forma gráfica e usada de entrada para as funções de controle de forma.

A planicidade da chapa é definida, principalmente, no *gap* (abertura entre os cilindros) dos cilindros. Portanto, ajustando o *gap* dos cilindros, é possível corrigir a medida dos desvios para obter uma forma desejada.

Na maioria dos laminadores, a planicidade é controlada por meio de atuadores mecânicos ou por atuação térmica, exemplo é a refrigeração localizada dos cilindros de trabalho.⁽⁴⁾

O conceito do controle de planicidade do Stressometer® é efetuado através dos seguintes controles:

1.2.1 Nivelamento de cilindros

Este tipo de controle é utilizado em erros de planicidade assimétricos (Figura 8).

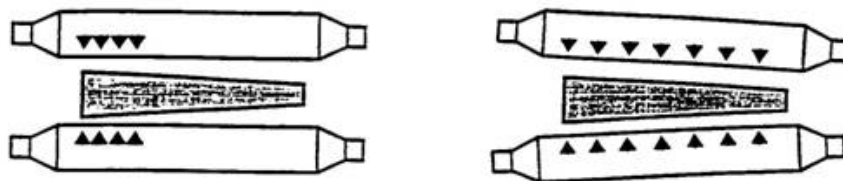


Figura 8. Princípio da atuação do nivelamento.⁽⁴⁾

1.2.2 Compensador de coroa

Este tipo de controle trata erros de planicidade simétricos (Figura 9).

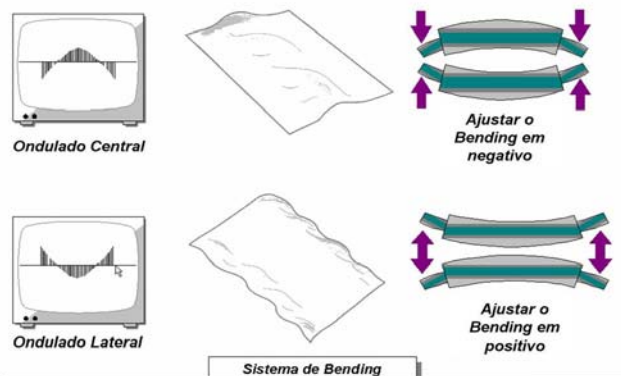


Figura 9. Atuação do bending (flexão) de cilindros.

1.2.3 Refrigeração seletiva

O Stressometer® controla o modo automático dos coletores para ligar e desligar a refrigeração localizada. A parte do erro de planicidade que não pode ser corrigido através dos atuadores mecânicos será eliminada através do sistema de refrigeração localizada dos cilindros de trabalho.

O controle liga/desliga tem apenas um bico no coletor superior e um no coletor inferior para refrigeração localizada para cilindros de trabalho. Cada bico é projetado para o máximo fluxo.

A refrigeração da cadeira compreende um coletor para refrigeração básica e um para refrigeração localizada. A Figura 10 mostra a disposição destes coletores.

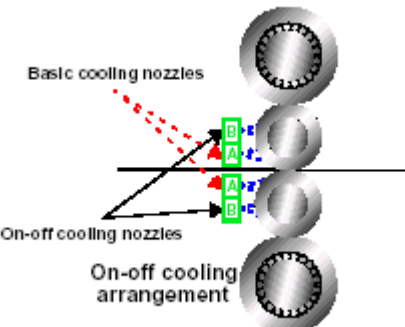


Figura 5. Distribuição da refrigeração seletiva.⁽⁴⁾

1.3.3 Classificação de planicidade

O sistema Stressometer® classifica a planicidade em quatro níveis de qualidade sendo estes de Q1 a Q4. A Tabela 1 mostra a equivalência destes indicadores:

Tabela 1. Classificação de planicidade⁽⁴⁾

Indicador	Planicidade (UI)
Q1	< 5
Q2	5 a 10
Q3	10 a 15
Q4	>15 UI

O objetivo é que a maior parte da tira laminada a frio esteja com valores de planicidade inferior a 10UI, ou seja, a maioria do material laminado esteja com planicidade entre Q1 e Q2.

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Observação da Situação Anterior

Durante todo o período de operação do sistema Stressometer a planicidade obtida – em UI – na saída do Laminador de Tiras a Frio, apresentava valores bem abaixo do objetivado. O gráfico (Figura 11) demonstra os resultados obtidos:

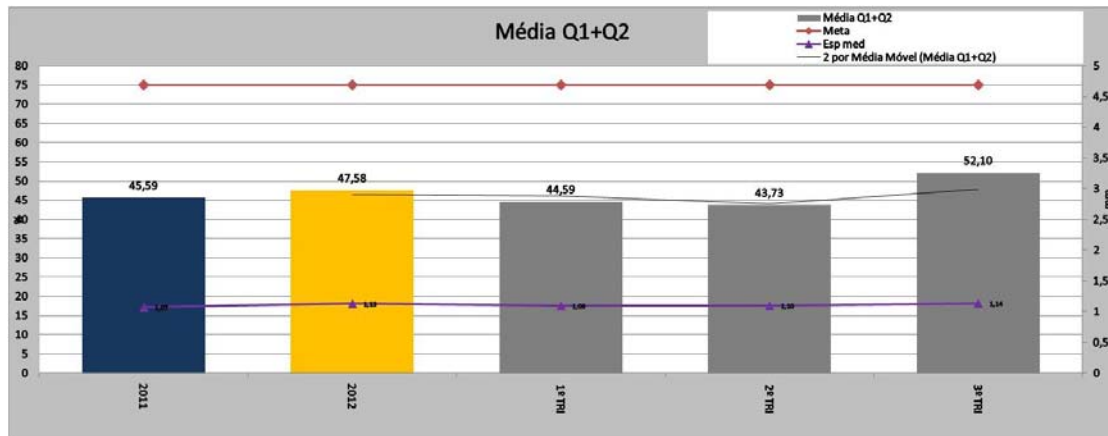


Figura 6. Planicidade (UI) obtida na saída do Laminador de Tiras a Frio.

Os níveis de retrabalho por problemas de planicidade motivaram a formação de um grupo de estudos. Este trabalho tem por objetivo apresentar as ações tomadas no processo de laminação de Encruamento visando uma melhor condição de planicidade do material, e por conseqüência um menor índice de retrabalho por motivos de planicidade (ondulação central e ondulação lateral). A Figura 12 mostra os níveis de retrabalho por problemas de planicidade.

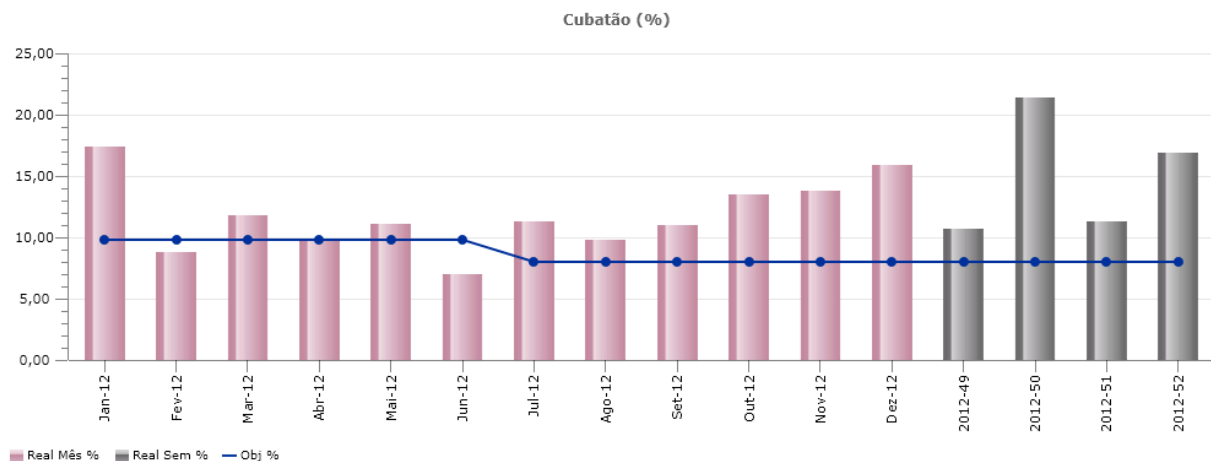


Figura 7. Índices de retrabalho - Laminação a Frio.

A ondulação no material se dá através de uma deformação heterogênea ao longo da largura do material.

Aquelas regiões do material que sofreram maior deformação apresentarão problemas de ondulação, sendo necessário a relaminação ou desempenho na Linha de Inspeção.

2.2 Otimizações Efetuadas

2.2.1 Redução da coroa dos cilindros

A primeira ação para melhoria da planicidade foi a redução do coroamento de cilindros no Laminador de Tiras a Frio e Laminadores de Encruamento.

Uma redução maior no centro da tira gera tensões de compressão nessa região e, conseqüentemente favorece o surgimento de ondulações centrais. O excesso de coroa de cilindros poderá causar tensões residuais de compressão no centro e tração nas bordas, podendo causar ondulações centrais.

Através da avaliação dos defeitos de planicidade nas linhas finais verificou-se uma tendência de ocorrência de ondulado central. Foi efetuado um levantamento do coroamento do material a quente onde se obteve a dispersão de resultados mostrados no gráfico da Figura 13.

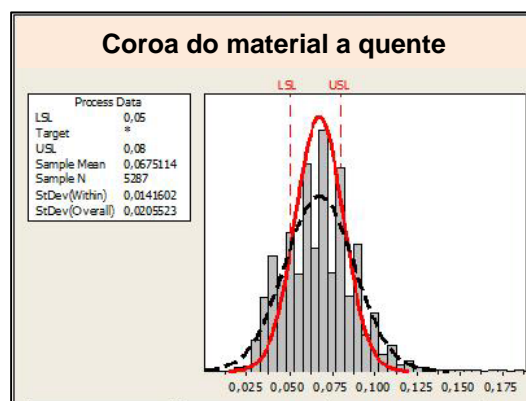


Figura 8. Coroamento do material a quente.

A partir dos resultados obtidos na análise estatística do coroamento da matéria prima foi então efetuada uma avaliação dos compensadores de coroa utilizados por largura do material no Laminador de Tiras a Frio e Laminador de Encruamento.

Com base nos dados obtidos optou-se pela redução no coroamento de cilindros do Laminador a Frio (LTF) e Encruamento.

A Tabela 2 mostra a redução do coroamento de cilindros efetuada nos dois laminadores.

Tabela 2. Redução no coroamento de cilindros

Laminador/cadeira	Antes (mm)	Redução (%)
LTF – cadeiras iniciais	0,07	30%
LTF – Cadeira 4	0,08	25%
Encruamento	0,04	100%

2.2.2 Normalização da refrigeração do laminador a frio

Um fator importante para planicidade está ligado ao coroamento térmico dos cilindros de laminação.

Para reduzir este efeito são utilizados coletores de refrigeração com objetivo de controlar o coroamento térmico dos cilindros de trabalho do laminador a frio.

O primeiro passo foi desenvolver uma norma técnica com os desenhos e códigos dos bicos e coletores utilizados no laminador.

O segundo passo foi efetuar a avaliação dos bicos de refrigeração de cilindros no fornecedor de bicos.

Foi efetuada a instalação de novos coletores e bicos de acordo com a especificação do fabricante e norma técnica desenvolvido. Todos os coletores e bicos foram normalizados, incluindo a refrigeração seletiva do Stressometer. A Figura 14 mostra os novos coletores instalados na cadeira do laminador.



Figura 9. Novos coletores e bicos de refrigeração de cilindros.

Foi implantada uma rotina diária de avaliação de todos os coletores e bicos quanto a entupimento. O operador avalia a situação de todos os sistemas de refrigeração uma vez por dia. A Figura 15 mostra uma avaliação sendo efetuada.



Figura 10. Rotina de inspeção diária da refrigeração.

2.2.3 Melhoria na classificação de planicidade

Os indicadores de planicidade eram calculados para todo o comprimento da tira e mostrados ao final da laminação.

Durante as experiências verificou-se a necessidade de:

- Mostrar a tendência de variação da planicidade on-line, onde foi implantado através do software IBA Analyser com módulo QPanel uma interface gráfica otimizada para o operador. A tela mostrada na Figura 17 mostra um exemplo desta aplicação;

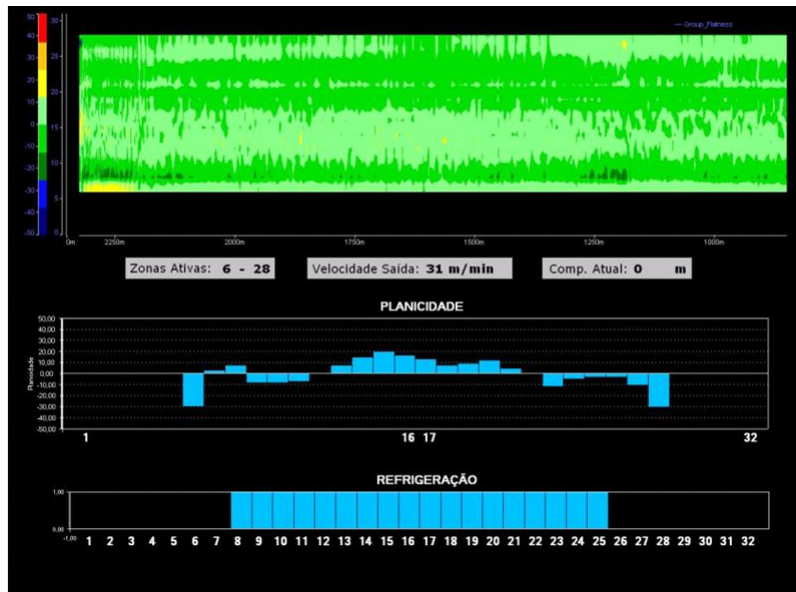


Figura 11 - Tela de tendência de planicidade.

- Através de um algoritmo foi efetuado o cálculo dos índices de qualidade para cada seção da tira. A Figura 18 mostra os cálculos por seção (LM – lado motor, centro e LO – lado operação).



Figura 17. Gráficos de planicidade por setor.

2.2.4 Planicidade do Laminador de Encruamento

A correção de forma do material no processo de Encruamento é a utilização da laminação diferenciada, conforme Figura 18, através da aplicação de compensadores de coroa nos cilindros de trabalho.

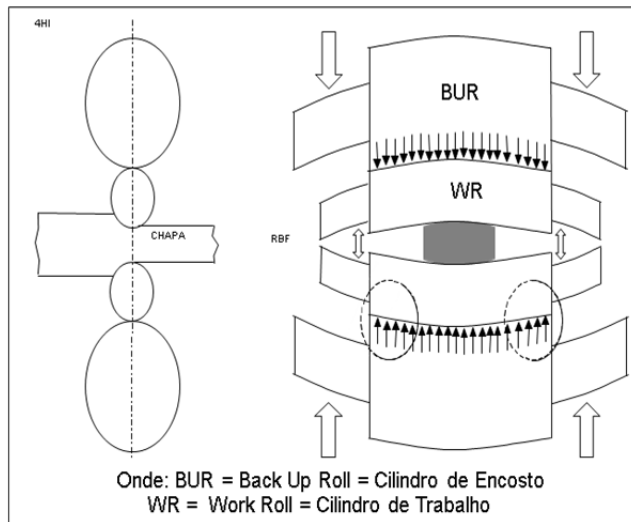


Figura 18 – Sistema de correção do Laminador de Encruamento.

Desta forma, a maior incidência de ocorrência de ondulação do laminado a frio após o Laminador de Encruamento é o ondulado central, conforme Figura 19.

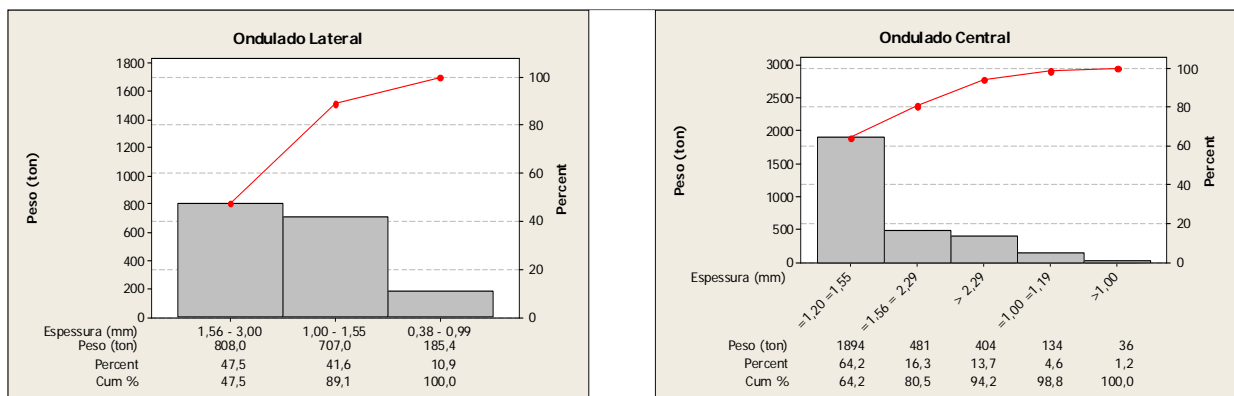


Figura 19. Estratificação de ocorrências de ondulação central.

O Laminador de Encruamento 2 da Usiminas Cubatão possui um conjunto de rolos tensores, sendo estes instalados na entrada e na saída do equipamento. Com o objetivo de atuar estirando o material através da ação de tensões oriundas do torque aplicado pelo conjunto de rolos tensores. A Figura 20 mostra o esquemático do Laminador de Encruamento com o detalhe da passagem do material pelos rolos tensores.

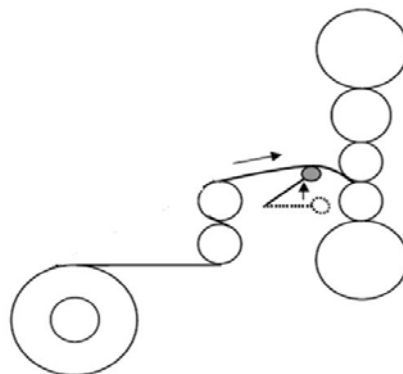


Figura 12. Passagem do material pelos rolos tensores.

Inicialmente, o Laminador de Encruamento 2 processava apenas materiais de espessura inferior a 1,00 mm. Porém o nível de retrabalho por ondulação central e lateral em materiais com espessura acima de 1,00 mm levou à equipe do Laminador de Encruamento a criar o procedimento de processo para materiais com espessura até 1,50 mm, sem nenhuma necessidade de alteração nas guias dos rolos tensores. Posteriormente, foi proposta a utilização dos rolos tensores para materiais com espessura acima de 1,50 mm em função da boa condição de planicidade do material após o uso dos rolos tensores.

Para isso foi necessário realizar uma adaptação nas guias de entrada e saída dos rolos tensores do laminador de encruamento efetuando o reforço das fixações nos mancais, para que não houvesse cisalhamento dos parafusos durante o processo de encaixe da tira.

3 RESULTADOS OBTIDOS

Após a implantação das ações para melhoria da planicidade conseguimos obter um aumento nos índices de qualidade (Q1+Q2), reduzindo assim a ondulação na saída do Laminador a Frio conforme Figura 21.

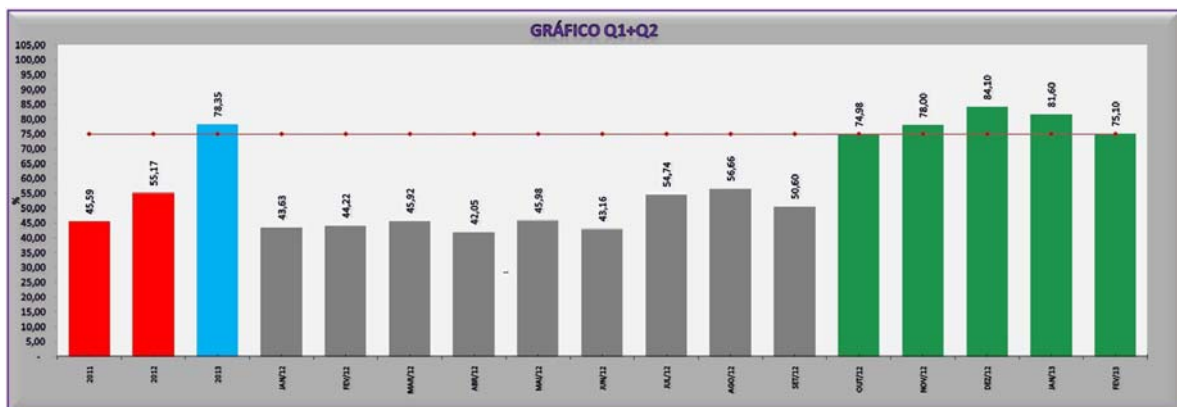


Figura 13. Resultado de planicidade - Q1+Q2.

Os valores que antes estavam abaixo do objetivado (aumentando os índices de retrabalho) superaram os valores objetivados superiores a 75% de Q1+Q2 (< 10 UI). Já os valores de retrabalho nas linhas finais foram reduzidos, alcançando a meta e reduzindo o custo de fabricação. A Figura 22 mostra o gráfico dos resultados de retrabalho.

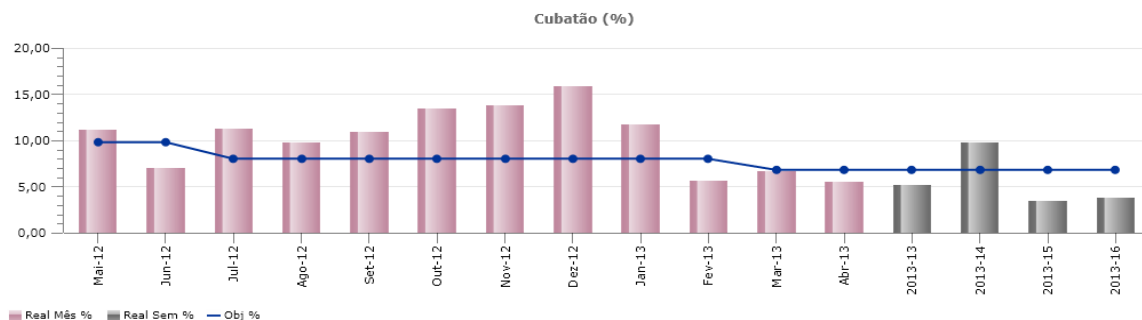


Figura 14. Resultados de retrabalho após as melhorias.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Uma série de trabalhos foram desenvolvidos no processo de Laminação a Frio com objetivo de melhorar a performance de planicidade e reduzir os índices de retrabalho, reduzindo-se os custos de fabricação.

Após as otimizações efetuadas no processo foi possível obter um aumento de 30 p.p. na performance de planicidade na saída do Laminador de Tiras a Frio e conseqüentemente uma redução de 60% nos índices de retrabalho na Laminação a Frio, acarretando em um aumento em 51h na disponibilidade para produção do Laminador de Encruamento.

REFERÊNCIAS

- 1 SILVA, C.N. ET AL. Efeito da flexão dos cilindros na laminação de encruamento sobre a planicidade de tiras de aço. Revista Matéria, v. 13, n. 2, pp. 412 – 417, 2008.
- 2 WILMS, W.; VOGTMANN, L.; KLÖCKNER, J.; BEISEMANN, G. and ROHDE, W. Profile and flatness control in hot strip mills. Metallurgical Plant and Technology, pp. 74-90, 1985.
- 3 SHIGAKI, Y. Um estudo da laminação de tiras e chapas planas através de um modelo matemático-numérico de um laminador quádruo. 2001. 238 f. Tese (Doutorado em Metalurgia da Transformação). Programa de Pós-graduação em Engenharia Metalúrgica da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2001.
- 4 ABB. ABB Stressometer – Operation and Maintenance Binder 1 – Course D100. Manual de Operação e Manutenção do Sistema Stressometer, 1996.