

GERENCIAMENTO DA ROTINA DO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO DO GRAU DE AÇO UTILIZADO NA FABRICAÇÃO DE LATAS EXPANDIDAS

Willian Costa do Nascimento ¹

Eduardo Amorim Motta ²

Alexandre Lorandes ³

Ulisses Rocha Gomes ⁴

Alexandre Vieira Telles ⁵

Resumo

O presente trabalho visa mostrar os resultados da padronização de parâmetros de laminação, que influenciam diretamente na redução da ocorrência do fenômeno *chatter* durante o processo. Estes parâmetros, necessários a uma equalização do processo de laminação, foram explorados por meio de estudo e aplicação de planejamento de experimento realizado pela CSN em conjunto com a empresa SKF. É também mostrada, neste trabalho, a interação dos parâmetros de laminação em busca da melhor combinação para obtenção de resultados ótimos no processo, voltados para melhoria da uniformidade da espessura do material laminado, da redução de ocorrência de *chatter* durante o processo de laminação e na redução de reclamação de cliente devido ao rompimento do material oriundo de problemas relacionados com a variação brusca de sua espessura relacionada com a ocorrência de *chatter* de 3ª oitava.

Palavras-chave: *Chatter*; Laminação; Espessura.

ROUTINE MANAGEMENT OF COLD ROLLING PROCESS OF THE GRADE OF STEEL USED IN THE FABRICATION IN THE EXPANSION TIN CAN

Abstract

This paper aims to demonstrate the results of the rolling parameters standardization on the unwanted rolling condition known as chatter. These parameters, which directly influence the rolling process, were jointly investigated by CSN and SKF, through a careful experiment design. Also, the interrelationship of the various rolling parameters are studied with the aim of optimizing the whole process, including improved thickness, chatter abatement and drop in customers' claims due to material breakage arising from abrupt thickness variation caused by third octave chatter.

Key words: Chatter; Rolling; Thickness.

¹ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Desenvolvimento da Gerência de Processos de Laminação, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Rod. Lucio Meira, Km 5001, Vila Sta. Cecilia, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: Willian.costa@csn.com.br

² Engenheiro Metalúrgico, MSc Engenheiro de Processo da Gerência Geral de Folhas Metálicas, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Rod. Lucio Meira, Km 5001, Vila Sta. Cecilia, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: eduardoamorim@csn.com.br

³ Engenheiro Metalúrgico, Engenheiro de Processo da Gerência de Laminação a Frio, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Rod. Lucio Meira, Km 5001, Vila Sta. Cecilia, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: Alexandre.lorandes@csn.com.br

⁴ Engenheiro Metalúrgico, MSc. Coordenador Técnico da Gerência Geral de Produtos Longos, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Rod. Lucio Meira, Km 5001, Vila Sta. Cecilia, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: Ulisses.gomes@csn.com.br

⁵ Técnico Eletromecânico, Técnico de Processo da Gerência de Laminação a Frio, Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, Rod. Lucio Meira, Km 5001, Vila Sta. Cecilia, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: alexandre.telles@snt.com.br

I INTRODUÇÃO

O produto lata expandida é largamente utilizado nos mercados europeu e americano, sendo lançada no Brasil em meados de 2002. Esse tipo de embalagem apresenta formatos diferenciados obtidos pelo alto grau de deformação ao qual o material é submetido, sendo assim exigido ao material um alto nível de estampabilidade necessário ao processo de fabricação da lata, podendo o formato adquirido pelo material ser de exclusividade de um fabricante.

Devido ao alto grau de estampabilidade exigido ao produto, a uniformidade da espessura do material ao longo de todo o seu comprimento é de suma importância para que, durante o processo de expansão da lata, não haja concentração localizada de tensão, ocorrendo o rompimento do material em posições fora da solda, conforme mostrado na Figura 1, causando perdas de material e de produtividade no cliente.



Figura 1. Face exterior da lata rompida após seu processo de expansão.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Por meio de análise investigativa e estratificações realizadas com os dados recebidos do cliente, determinaram-se as possíveis causas que levaram ao rompimento do material durante a fabricação da lata expandida. Essa ocorrência tendo como consequência uma variação brusca e localizada da espessura do material, causa o rompimento

da lata durante o seu processo de expansão, sendo assim caracterizado o fenômeno *chatter* como sendo o responsável pela não conformidade atribuída à ocorrência da variação de espessura do material.

O grau *extra low carbon* (extra baixo carbono) do aço devido a sua composição química, conforme mostrado na Tabela 1, em comparação com o grau *low carbon* (baixo carbono), possui um processo de laminação a frio bastante crítico com baixas cargas de laminação necessárias para sua conformação conforme Figura 2. Essa situação crítica

Tabela 1. Composição química dos graus *extra low carbon* e *low carbon*

	<i>Extra low carbon</i>		<i>Low carbon</i>	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
C	0,018	0,024	0,03	0,05
Mn	0,10	0,20	0,25	0,35
P	0	0,02	0	0,02
S	0	0,02	0	0,025
Si	0	0,02	0	0,02
Al	0,02	0,06	0,02	0,05
N	0,0015	0,005	0	0,006

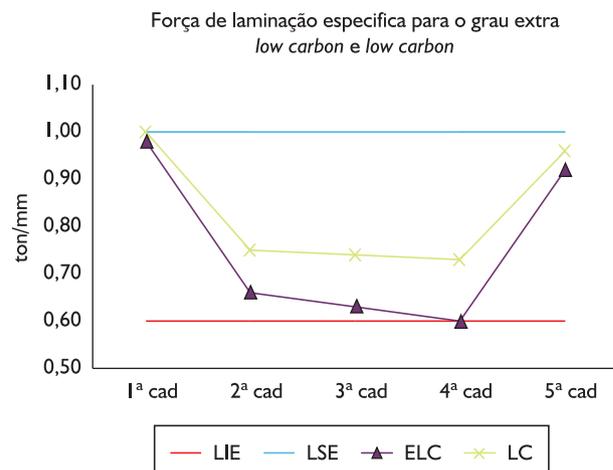


Figura 2. Gráfico da força de laminação específica média praticada pelos graus ELC – *extra low carbon* e LC – *low carbon*.

de processo leva a um processo de laminação onde as cargas atingem valores abaixo da região de cedagem do laminador, atingindo a região “mole” da cadeira onde há folgas relativamente grosseiras a serem eliminadas, o que torna a cedagem da cadeira maior que a normal.⁽¹⁾

Para o caso onde haja uma aproximação ou até mesmo coincidência entre a frequência natural do equipamento e as frequências de processo, haverá um crescimento no nível vibracional do equipamento, provocando o fenômeno de ressonância. Em sistemas

mais complexos, ou seja, a ocorrência de mais de uma frequência natural, existem várias chances de aumento do nível vibracional do equipamento pela ocorrência da ressonância, aumentando a probabilidade de ocorrência de *chatter* de 3ª oitava durante o processo de laminação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Laminador de Tiras a Frio

É um equipamento composto por cadeiras de laminação, que são compostas por um conjunto de pares de cilindros de encosto e trabalho, sendo este de diâmetro inferior ao dos cilindros de encosto, cuja função principal é de amenizar a deflexão dos cilindros de trabalho ocasionada pela força resistiva do material durante seu processo de deformação. A redução total atribuída ao material durante o processo pode atingir um valor de até 90%, onde cada cadeia de laminação é responsável por atribuir ao material um passe de redução objetivando a espessura final requerida. Como principal característica do processo, pode-se citar: qualidade superficial, controle da planicidade e controle da espessura final do produto ao longo de todo o seu comprimento.

3.2 O Fenômeno *Chatter*

O *chatter* na operação de laminação resulta em uma severa e inaceitável variação de espessura na tira laminada, conforme mostrado na Figura 3, causando também marcas transversais na superfície dos cilindros de encosto, conforme apresentado na Figura 4. Estas marcas impressas na superfície do produto laminado são de efeito danoso, principalmente em produtos que demandam uma alta qualidade superficial e com restrita tolerância na espessura final. A ocorrência de *chatter* pode também ocasionar a ruptura da tira laminada ou danos no laminador de tiras a frio diminuindo a vida útil de equipamentos periféricos.⁽²⁾

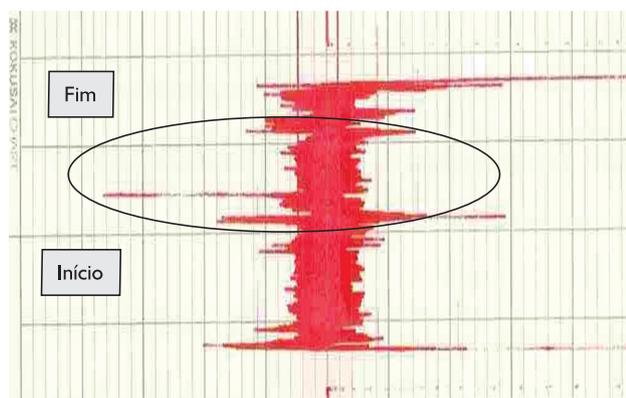


Figura 3. Distúrbio na espessura da tira ocasionada pela ocorrência de *chatter* de 3ª oitava.

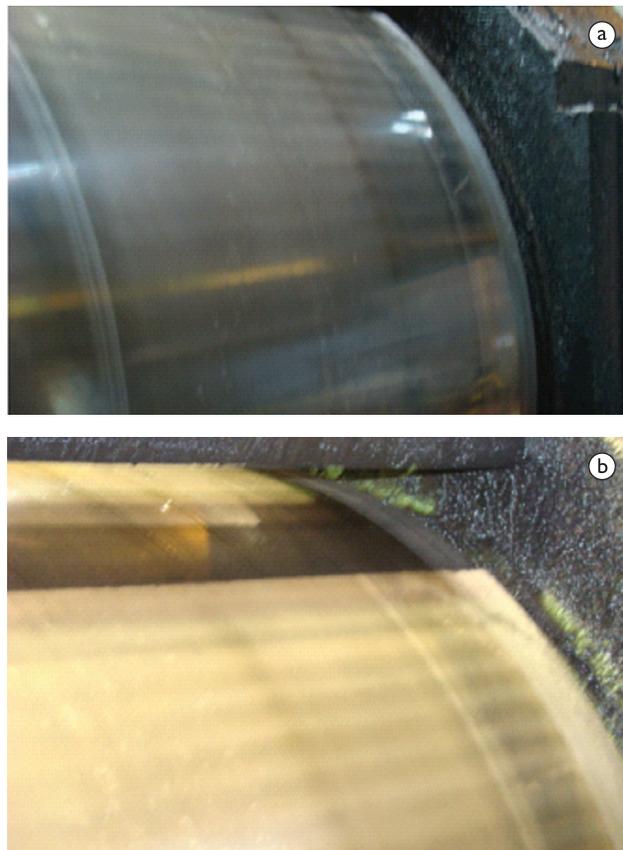


Figura 4. Marcas impressas no cilindro de encosto do laminador devido a ocorrência de *chatter* de 5ª oitava.⁽³⁾

O *chatter* é um caso particular de auto-excitação vibracional, o qual se acredita surgir da operação de laminação como consequência de uma interação entre a estrutura dinâmica da cadeia de laminação, e as próprias operações de laminação. Para entender o comportamento dinâmico de laminação, a cadeia é modelada como uma parte de um sistema de parâmetros lineares, com todas as massas vibrando ao longo da mesma direção, perpendicular à tira laminada.⁽²⁾ Para simplificar a análise do comportamento deste modelo linear, a vibração vertical de uma cadeia de laminação é frequentemente considerada como simétrica em relação à tira laminada.

Uma cadeia de laminação é considerada vibrando ao longo de uma direção principal, longitudinal e perpendicular ao fluxo da tira, e pode ser representada como um sistema vibracional com quatro graus de liberdade, em um diagrama esquemático, conforme apresentado na Figura 5.⁽²⁾

Contudo, para simplificar a análise da estabilidade do processo de laminação, a massa do cilindro de trabalho pode ser negligenciada, baseado no fato que sua massa é muito menor do que a massa dos cilindros de encosto.

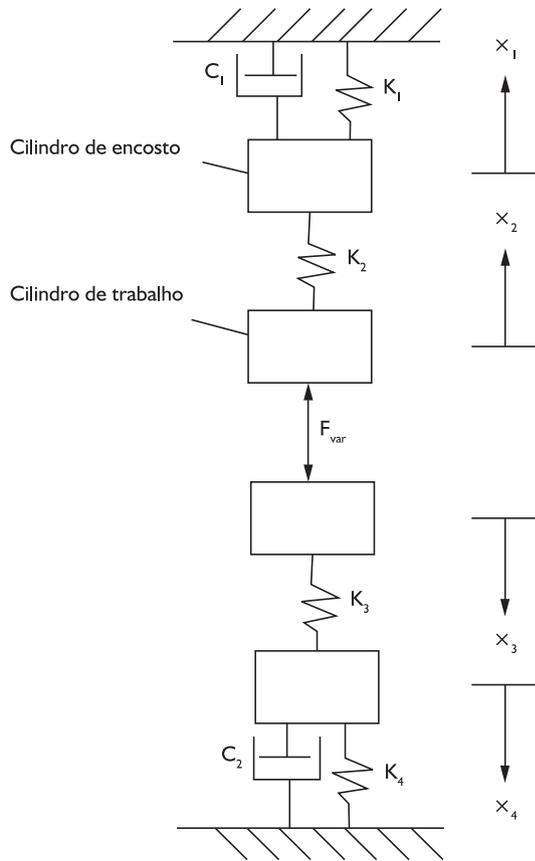


Figura 5. Modelo de uma estrutura de uma cadeia de laminação com quatro cilindros.⁽²⁾

Assim, o sistema de vibração com 4 graus de liberdade pode ser simplificado tornando este um sistema com 2 graus de liberdade.⁽²⁾ A equação diferencial de movimento do sistema mostrado na Figura 5 pode ser escrita como: $m = \text{massa}$, $k = \text{mola}$ e $c = \text{amortecedor}$.⁽²⁾

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = 0 \quad (1)$$

$$m_1\ddot{x}_1 = -c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 - k_2(x_1 - x_2) \quad (2)$$

$$m_2\ddot{x}_2 = k_2(x_1 - x_2) - F_{var} \quad (3)$$

$$m_3\ddot{x}_3 = k_3(x_4 - x_3) - F_{var} \quad (4)$$

$$m_4\ddot{x}_4 = -c_2\dot{x}_4 - k_4x_4 - k_3(x_4 - x_3) \quad (5)$$

A equação diferencial de movimento por este modelo simplificado da estrutura do laminador pode ser escrita como:

$$m_1\ddot{x}_1 = -c_1\dot{x}_1 - k_1x_1 - F_{var} \quad (6)$$

$$m_4\ddot{x}_4 = -c_2\dot{x}_4 - k_4x_4 - F_{var} \quad (7)$$

Considerando que a massa do cilindro de trabalho pode ser negligenciada nas equações 2 e 3, pode-se reescrever como:

$$0 = k_2(x_1 - x_2) - F_{var} \quad (8)$$

$$0 = k_3(x_4 - x_3) - F_{var} \quad (9)$$

Então, pelas equações anteriores, a relação entre a variação do roll gap, $h_{dvar} = (x_2 + x_3)$ e F_{var} pode ser obtida como:

$$h_{dvar} = (x_1 + x_4) - F_{var} \left(\frac{k_2 + k_3}{k_2 k_3} \right) \quad (10)$$

Desde que a cadeia de laminação é considerada simétrica em relação à tira laminada, a equação 10 pode ser simplificada tomando a forma:

$$h_{dvar} = 2x - F_{var} \left(\frac{2}{k} \right) \quad (11)$$

Quando implementado para analisar o comportamento de *chatter*, o modelo estrutural unimodal, mostrado na Figura 5, é uma boa predição quantitativa da frequência dos modos de vibração na direção longitudinal. Estas frequências são tipicamente associadas com as frequências das variações de espessura observadas na tira e com as estrias na superfície da tira observadas após ocorrência de *chatter*. O modelo estrutural unimodal é suficiente para investigação de *chatter* devido ao amortecimento negativo.⁽²⁾

3.2.1 Os tipos de *chatter*

Basicamente, existem três tipos predominantes de oscilações na laminação, que podem ser descritos como:

- Torcional;
- Modo de *chatter* de 3ª oitava;
- Modo de *chatter* de 5ª oitava.

Estes modos de *chatter* são diferenciados basicamente pela sua frequência de ressonância: no caso (1) - uma frequência aproximada de 5 Hz a 15 Hz; no caso (2), de 125 Hz a 240 Hz e finalmente, no caso (3), de 550 Hz a 650 Hz. No caso de altas velocidades para redução a frio da tira o *chatter* torcional ocorre apenas como resultado de um mau funcionamento do circuito de controle de velocidade do motor, este causa pequenas flutuações na espessura da tira.

O *chatter* de 3ª oitava é caracterizado por uma ocorrência repentina estendendo à sua amplitude máxima em poucos segundos. Assim, essa ocorrência é auto excitável, resultando em severas variações de espessura na tira laminada e flutuações pronunciadas de tensões entre vãos de cadeia, podendo também resultar em arrebenamentos da tira. Usualmente, essa ocorrência começa

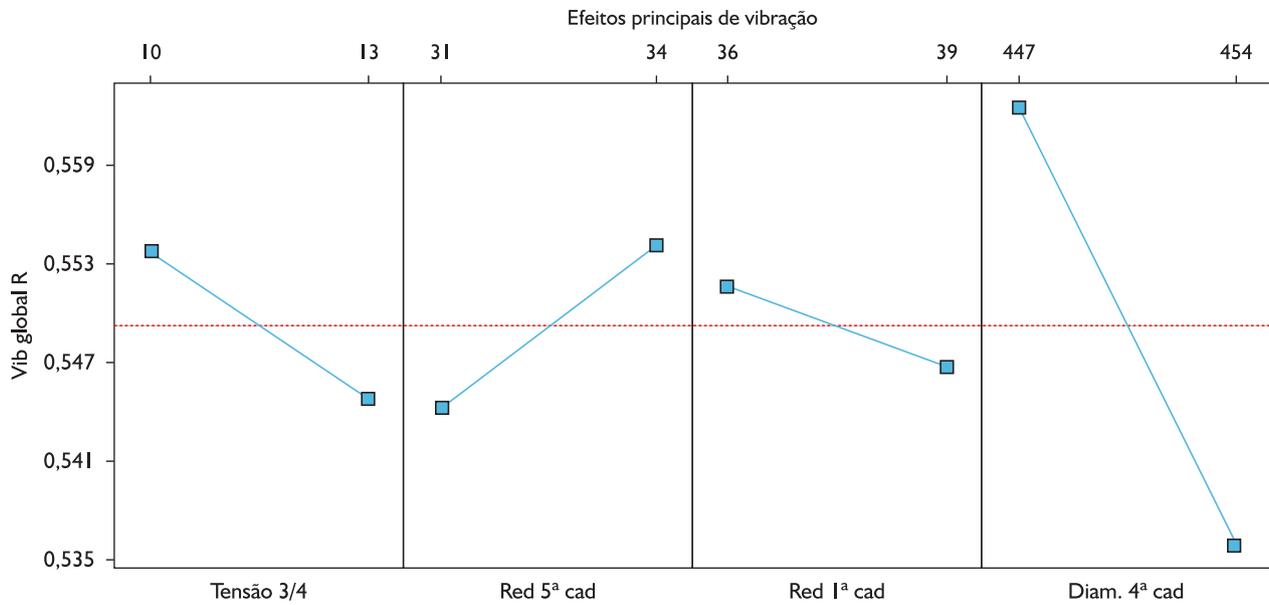


Figura 6. Resultado das interações.⁽³⁾

com um estrondo em baixas frequências sendo detectada de forma auditiva e imediatamente suprimida por uma redução na velocidade de laminação por parte do operador ou do próprio equipamento.

O *chatter* de 5ª oitava é uma ocorrência acompanhada pelo desenvolvimento de marcas superficiais nos cilindros de laminação. Uma vez desenvolvidas, elas não apenas excitam o laminador como também causam estrias que são impressas na superfície na tira laminada em qualquer velocidade de laminação. Esse tipo de vibração não altera a espessura da tira laminada, porém afeta o seu aspecto superficial.⁽²⁾

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Pelo estudo dos parâmetros de laminação realizado pela CSN em conjunto com a empresa SKF, utilizando como ferramenta, a técnica DOE (*Design Of Experiment*), realizou-se um planejamento fatorial 2^k , em que foram definidas as principais variáveis de processo que poderiam levar à ocorrência de *chatter* durante o processo de laminação, sendo estas assim combinadas a fim de verificar sua interação para ocorrência do fenômeno. Foram definidos operacionalmente os principais aspectos ou variáveis que poderiam levar à ocorrência de *chatter* durante o processo: tensão do vão $\frac{3}{4}$, redução da 1ª cadeira, redução da 5ª cadeira e diâmetro do cilindro de trabalho da 4ª cadeira, atribuindo valores máximos e mínimos a cada uma das variáveis eleitas.⁽³⁾ Estas interações foram monitoradas observando-se o nível vibracional do laminador com cada valor atribuído ao processo. O resultado da análise é mostrado na Figura 6.

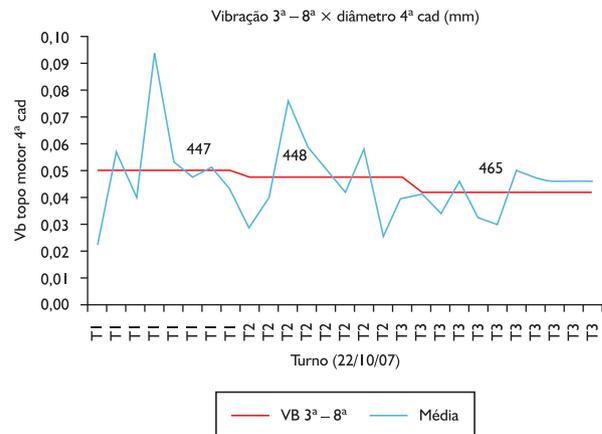


Figura 7. Nível vibracional do laminador com diferentes diâmetros de cilindro de 4ª cadeira.⁽³⁾

A confirmação do experimento realizado em busca da normalidade do processo pela ocorrência de *chatter* de 3ª oitava é mostrada na Figura 7, que apresenta os níveis vibracionais obtidos com o uso de três diferentes diâmetros dos cilindros de trabalho da 4ª cadeira de laminação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O fluxo proposto para o gerenciamento da rotina é mostrado na Figura 8⁽⁴⁾, após a identificação da anomalia crônica, por meio de dados e estratificações, utilizando também o estudo realizado com o planejamento fatorial⁽³⁾ para eliminação das causas de ocorrência de *chatter* de

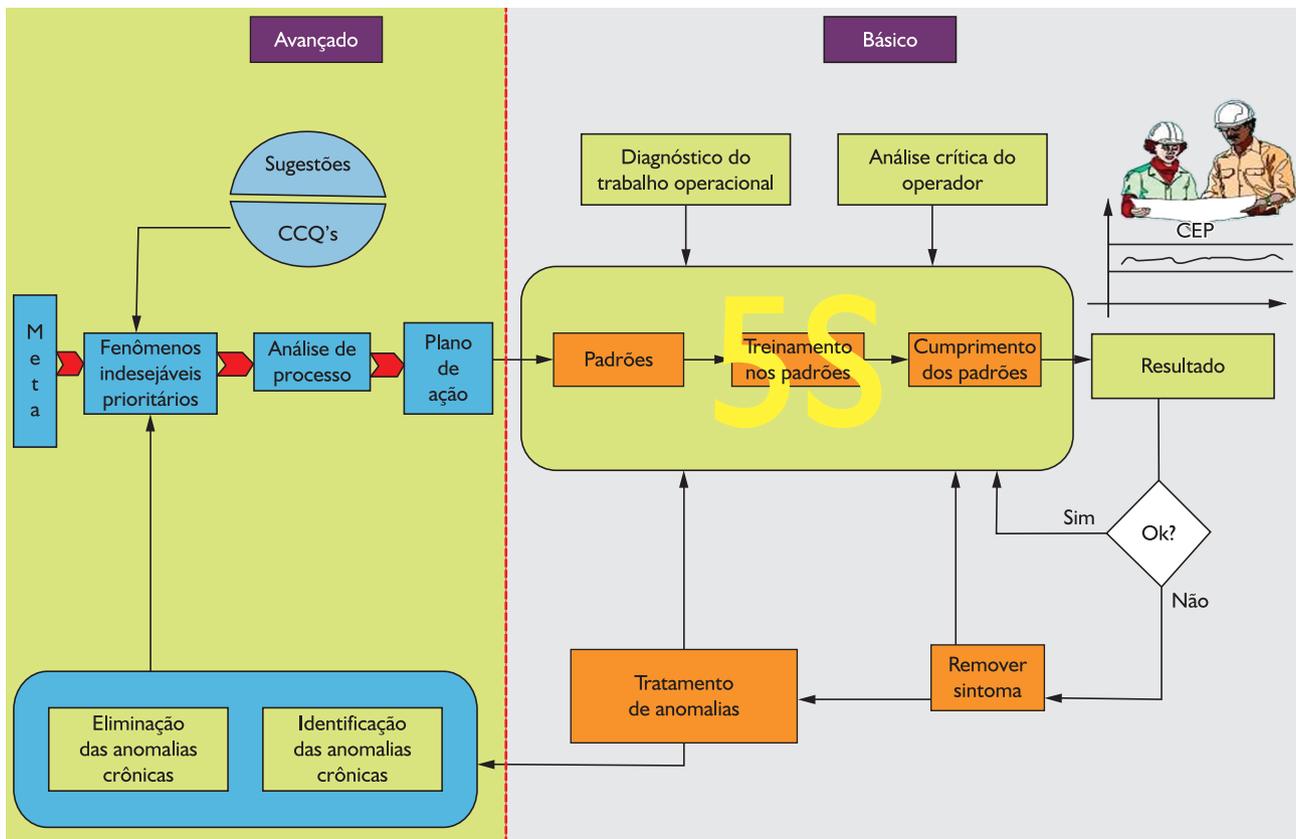


Figura 8. Sequência para aplicação do gerenciamento da rotina ou da melhoria, no laminador de tiras a frio da CSN.⁽⁴⁾

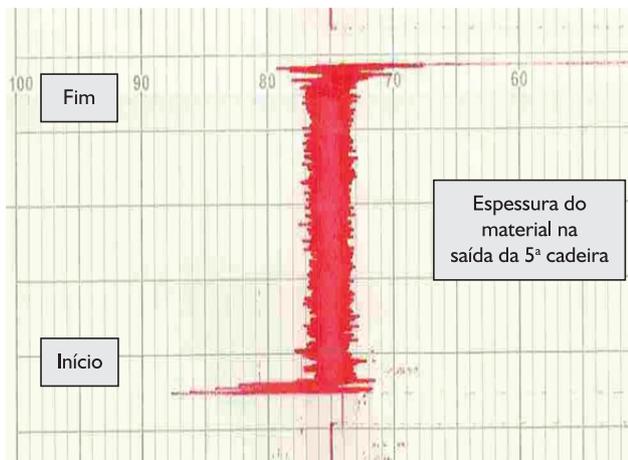


Figura 9. Espessura do material processado com diâmetro da 4ª cadeira igual a 460 mm.

3ª oitava no laminador. Foram confeccionados padrões operacionais, que são instrumentos básicos do “Gerenciamento do Trabalho do dia-a-dia”. É ele que indica a meta e os procedimentos para a execução do trabalho.⁽⁴⁾

Apesar de as outras variáveis de processo terem menor influência no comportamento vibracional do laminador, em comparação ao diâmetro do cilindro de trabalho da 4ª cadeira, todas as variáveis de processo foram incluídas

na confecção dos padrões operacionais para o processo de laminação do grau *extra low carbon*, utilizado na fabricação de latas expandidas, destacando as seguintes atividades: i) processo com o diâmetro de cilindro da 4ª cadeira maior ou igual a 460 mm; ii) percentual de redução da 5ª cadeira igual a 31%; valor de tensão do vão $\frac{3}{4}$ igual a 13 toneladas. Todos os operadores envolvidos foram treinados na execução das atividades supracitadas. O uso de cilindros com maiores diâmetros na 4ª cadeira, também conduziu a um processo de laminação com maiores cargas na 4ª cadeira, deslocando o processo para uma região distante da região “mole” do laminador, região onde se localizam as folgas grosseiras do equipamento, fato que, conforme descrito no item 2, levaria o laminador à ressonância com conseqüente ocorrência do fenômeno *chatter*.

Na Figura 9, é mostrada a uniformidade da espessura na saída da 5ª cadeira, após padronização do processo de laminação. Este fato, somado à não ocorrência de *chatter* audível durante o processo de laminação, à padronização das variáveis de processo de laminação ótimas e ao treinamento dos operadores envolvidos para o cumprimento destas atividades operacionais, levou a resultados satisfatórios quanto à evolução das reclamações de clientes por problemas de rompimento da lata durante seu processo de expansão, tendo-se como motivo a variação brusca e localizada da espessura do material conforme mostrado

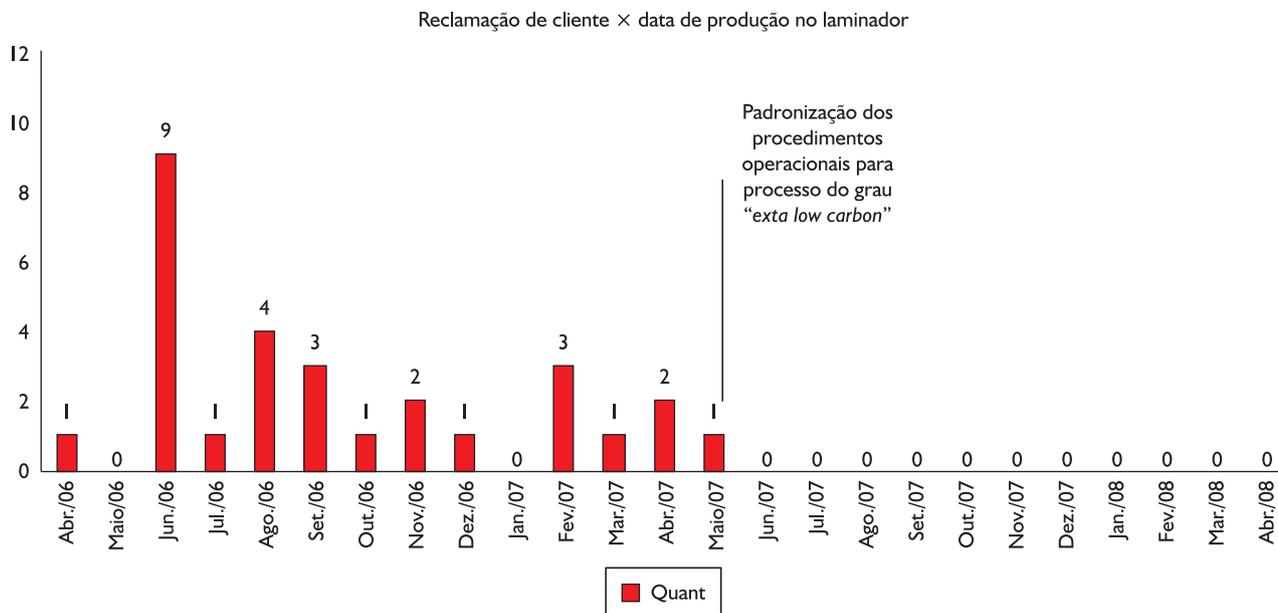


Figura 10. Gráfico de reclamações no período de padronização das ações.

na Figura 10. Além disso, o treinamento operacional para segregação de materiais, onde houver a ocorrência do problema, também contribuiu para que a não conformidade chegasse ao cliente final.

6 CONCLUSÃO

- As características relacionadas ao planejamento de experimento como importantes para redução da ocorrência de “chatter” no laminador foram confirmadas por meio dos resultados verificados na espessura final e na redução da ocorrência de reclamação de cliente.

- A segregação de materiais em que houver a ocorrência de chatter e a definição de novo fluxo para segregação do trecho afetado também se mostraram eficazes para contenção do efeito a fim de que as não conformidades não cheguem ao cliente.

- O aumento da demanda e o gráfico mostrando a redução das reclamações por problemas relacionados à espessura nos evidenciam a eficácia das ações tomadas para o processo do grau extra low carbon no laminador de tiras a frio n°. 1 da CSN.

REFERÊNCIAS

- 1 ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS. Curso de laminação de produtos planos. São Paulo, 2004. [Apostila].
- 2 YUN, I. S.; WILSON, W. R. D.; EHMANN, K. F. Review of chatter studies in cold rolling. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 38, n. 12, p. 1499-530, Dec. 1998.
- 3 GOMES, U. R. et al. Melhoria da qualidade das dimensões das chapas para latas dos LTF1 e 2 da CSN usando vibração e planejamento de experimentos –chatter. In: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 63., 2008, Santos. *Anais...* São Paulo: ABM, 2008. p. 1547-55.
- 4 CAMPOS, V. F. *Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia*. Belo Horizonte. Desenvolvimento Gerencial, 1998.

Recebido em: 19/01/2009

Aceito em: 29/06/2011