

VIBRAÇÃO E ESTATÍSTICA PARA GARANTIR QUALIDADE DAS CHAPAS PARA LATAS DOS LTF 1 E 2 - CSN

Ulisses Rocha Gomes¹
 Wilson de Sousa Paulino²
 Pedro Corrêa do Amaral Neto³
 Ricardo Perroni Aquino⁴
 Gustavo Leopoldo Gomes⁵

Resumo

A fabricação de aços finos para atender a demanda da indústria alimentícia deve atender às exigências dimensionais e propriedades mecânicas mais restritas. A laminação é sensível às condições operacionais, onde a instabilidade pode causar descontrole na espessura, levando a perdas de produção. No presente trabalho avalia-se o comportamento dinâmico dos Laminadores de Tiras a Frio 1 e 2 - CSN. As metodologias adotadas neste trabalho são: implantação de monitoramento de vibração, investigação por meio de vibração e análise estatística utilizando planejamento de experimento "Designs of Experiments - DOE". Os resultados mostram que o LTF#1 é excitado na faixa do *chatter* de 3ª oitava; este evento é auto-excitável. O teste de *run up* caracteriza as velocidades críticas. O DOE mostra os parâmetros relevantes do processo. LTF#2 evidencia o *chatter* de 5ª oitava. O teste de *run up* demonstra a causa raiz das baixas frequências. Os experimentos feitos no LTF#2 demonstram que as folgas são potencializadas pela velocidade. Conclui-se que o monitoramento *on-line* interage com os parâmetros por meio de modelos matemáticos definidos por respostas do DOEs, e assim garante a estabilidade da laminação suprimindo o fenômeno do *chatter*.

Palavras-chave: Laminador; Chatter; Planejamento; Experimentos.

VIBRATION AND STATISTICS - TO ENSURE QUALITY OF THE STRIPS THE TCM 1 AND 2 CSN CANS DIMENSIONS

Abstract

In this paper the dynamic behavior of CSN Tandem Cold Mill (TCM) 1 and 2 is evaluated. The manufacture of thin steel is sensitive to operational conditions and stability of these conditions is very important to attend special dimensional requirements, like need by food industry applications. The rolling process is sensitive to operational conditions. Therefore, instability may cause the thickness of the material to get out of control, resulting in production losses. The adopted methodologies are the implementation of vibration monitoring, investigation through vibration of peripheral equipment and statistical analysis using Designs of Experiments (DOE). The results show that TCM#1 is excited in the third-octave *chatter* range; this event is self-excited. Run-up test characterizes critical speeds. DOE shows the relevant parameters of the process. TCM#2 appears in the fifth-octave *chatter*. The run-up test demonstrates the root cause of low frequencies. Experiments performed in the TCM#2 demonstrate that clearances are not affected by speed. Our conclusion is that online monitoring (*SKF MasCon*®), which interacts with parameters by defined mathematical models through DOE's ensure the stability process by eliminating the *chatter* phenomenon.

Key words: Rolling; Chatter; Design; Experiments.

1 INTRODUÇÃO

O processo de laminação a frio consiste em reduzir a tira para atender aos requisitos do cliente, inclusive as dimensões. Durante controle do processo, necessita-se de um pleno conhecimento dos parâmetros que afetam o processamento da tira e a obtenção de suas dimensões.

A instabilidade do processo de laminação causa descontrole da espessura, gerando refugo de produto. De acordo com Roberts⁽¹⁾ e Yun, Wilson e Ehmann,⁽²⁻⁴⁾ o processo de laminação envolve fenômenos dinâmicos que o tornam auto-excitável promovendo a vibração mecânica. O *chatter* é uma condição vibracional

¹Membro da ABM, Mestre pela PUC-RJ e Engenheiro Metalurgista. CSN, BR 393, Km 5001, s/n, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: ulisses.gomes@csn.com.br

²Membro da ABM, Mestre, Engenheiro Mecânico. Av. Bartolomeu de Gusmão, 19, Cep 11045-400, Santos, SP, Brasil. E-mail: wpaulino@yahoo.com

³Engenheiro Eletricista, UFF, CSN. BR 393, Km 5001, s/n, Cep 27260-390, Volta Redonda, RJ, Brasil. E-mail: pedro.correa@csn.com.br

⁴Engenheiro SKF do Brasil. Estrada do Ingá, 11370, Cep 06421-400, Barueri, SP, Brasil. E-mail: ricardo.a.perroni@skf.com

⁵Engenheiro SKF do Brasil. Estrada do Ingá, 11370, Cep 06421-400, Barueri, SP, Brasil. E-mail: gustavo.l.gomes@skf.com

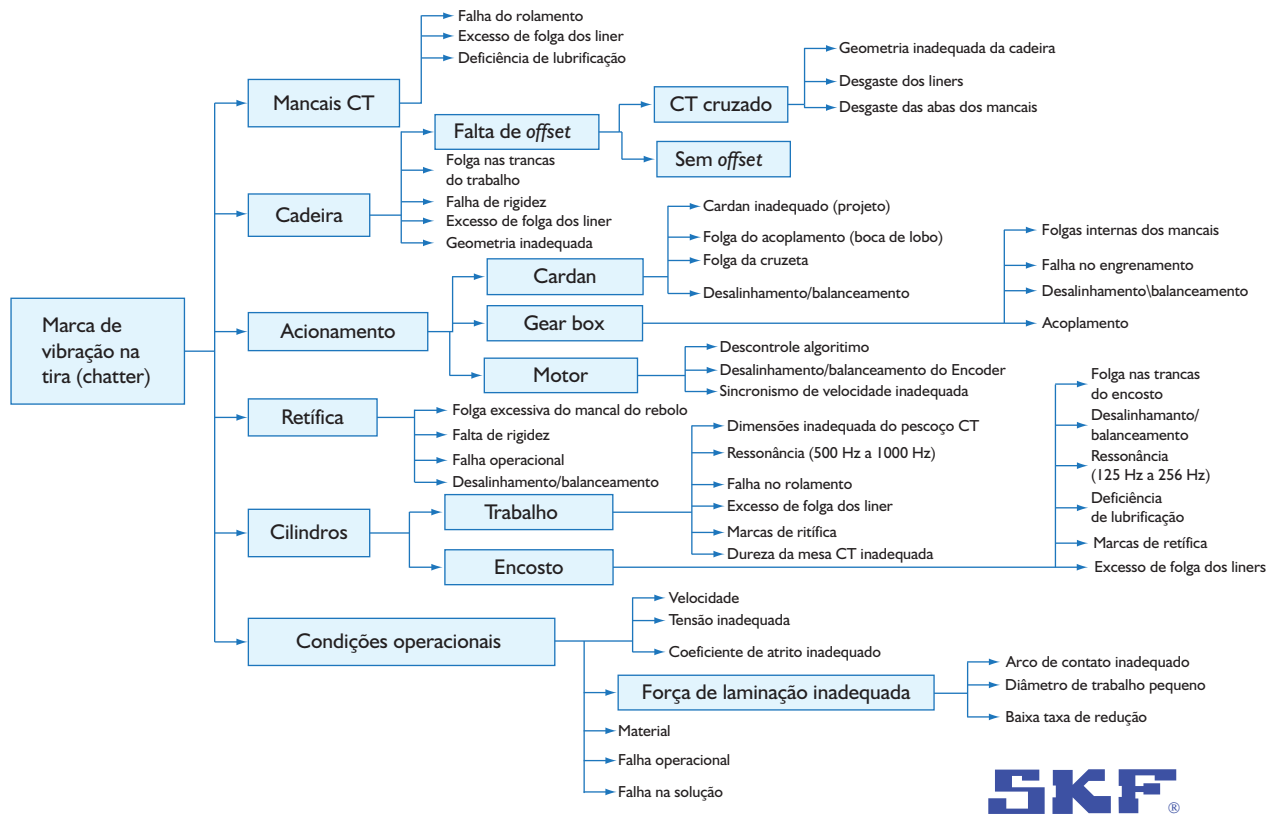


Figura 1. Diagrama de árvore de falhas potenciais do chatter.

indesejável durante o processo de laminação que degrada a qualidade da tira.⁽⁵⁾ Existem casos de *chatter* em que a severidade de vibração atinge níveis que comprometem o equipamento.⁽⁶⁾ A Figura 1 apresenta uma árvore de falhas potenciais sobre *chatter* e que são discutidas no projeto. Roberts⁽⁷⁾ e Yun, Wilson e Ehmann,⁽⁸⁾ classificam o *chatter* em três faixas:

- a) 5 Hz-20 Hz (*chatter* torcional);
- b) 128 Hz-256 Hz (terceira oitava); e
- c) 500 Hz-700 Hz (quinta oitava). Yarita, Furukawa e Seino⁽⁹⁾ também caracterizam em faixa de frequência.

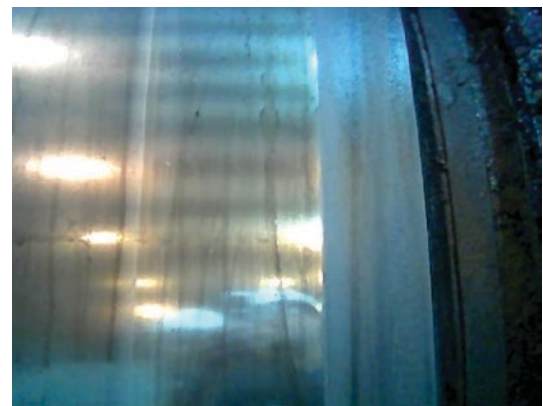


Figura 2. Marcas no cilindro de encosto.

2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Os defeitos são evidenciados pelas marcas no produto laminado, nos cilindros de trabalho e nos encostos. É possível detectar a severidade do defeito durante o processo por meio de inspeção visual e/ou auditivo conforme se observa na Figura 2. Nos equipamentos mais recentes existem tecnologias que detectam esse problema, por meio das técnicas de vibração usadas neste trabalho.

3 OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivos:

- 1) identificar as causas do *chatter* nos LTFs 1 e 2;
- 2) monitorar as condições vibracionais dos Laminadores; e
- 3) identificar as interações das condições operacionais com a vibração usando estatística (*Design of Experiments - DOE*).

4 DESCRIÇÃO DOS LAMINADORES

A Tabela 1 apresenta as características e os valores adotados durante o experimento dos Laminadores de Tiras a Frio nº 1 e 2 da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN).

Tabela 1. Especificações dos laminadores e dados do experimento

	LTF#1	LTF#2
Fabricante	Mesta / Hitachi	Mesta / Hitachi
Tipo	Quadruo contínuo	Quadruo contínuo
Nº de cadeiras	Cinco	Cinco
Velocidade	1.950 mpm	1.540 mpm
Espessura máx./mín.	0,45 / 0,18 mm	0,45 / 0,18 mm
Largura máx./mín.	1.000 / 600 mm	1.000 / 600 mm

5 METODOLOGIA

5.1 Diagnóstico por Meio de Vibração

A Figura 3a apresenta a arquitetura de monitoramento *on-line* utilizada para coletar os eventos durante a laminação. A Figura 3b mostra o instrumento utilizado para investigar os equipamentos.

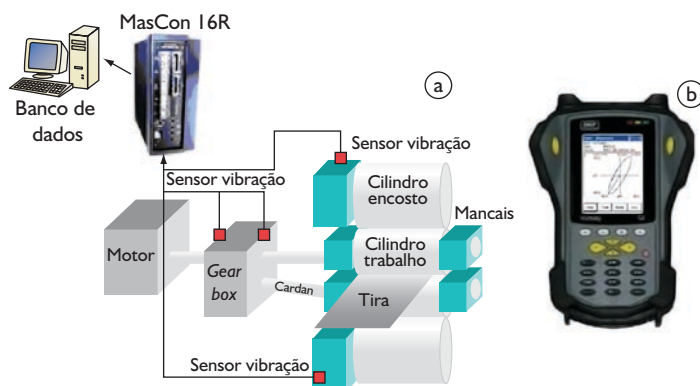


Figura 3. a) Esboço da arquitetura do monitoramento, onde são implementados sensores nos mancais de cilindro de encosto para detectar eventos predefinidos entre as bandas 120 Hz a 250 Hz e 500 KHz a 1 kHz. Neste monitoramento também são instalados sensores na entrada e saída das redutoras para detectar falhas do equipamento (SKF MasCon®); e b) Coletor portátil (SKF CMXA 70 GX) para investigar eventos nas retíficas, bem como comparar com os resultados do sistema de monitoramento.

5.2 Aplicação do Projeto de Experimento de Modo Fatorial 2^K

Para evidenciar os parâmetros operacionais que geram *chatter* durante o processo, utilizou-se o planejamento de experimento (Figura 4): Fatorial com vários fatores (2^K).⁽¹⁰⁾ Foram feitos experimentos com todas as combinações dos níveis de fatores (X_i) e os seus efeitos (B_j), sem e com réplicas, tendo como resposta a vibração (Y) (Equação 1). Utilizou-se o Software Minitab R14 (Design of Experiments – DOE).

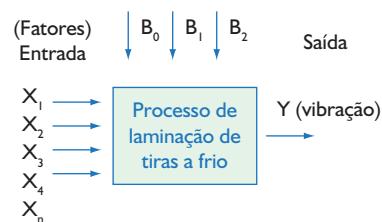


Figura 4. Modelo adotado pelo DOE.⁽¹⁰⁾

$$Y = B_0 + B_i X_i + \dots \begin{cases} B_0 = \text{combinação} \\ X = n - \text{fatores} \\ i = 1, 2, \dots, a \\ j = 1, 2, \dots, b \end{cases} \quad (1)$$

em que:

X_i = n-fatores operacionais, por exemplo: velocidade e força de laminação;

B_i = nível de efeitos do experimento;

B₀ = fator empírico baseado no conhecimento operacional;

a = nível de combinação do experimento; e

b = nível de combinação do experimento.

Foram feitos três experimentos, combinando-se diferentes parâmetros operacionais, para quantificar a resposta dinâmica do laminador. A Tabela 2 mostra as grandezas físicas e as condições aplicadas. Para cada experimento, adotou-se análise aleatória para criar os contrastes do experimento.

6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 Caracterização do Problema nos Laminadores LTF#1 e LTF#2

6.1.1 LTF#1

A Figura 5 mostra a vibração nos sensores instalados nos mancais do cilindro de encosto da 5ª cadeira do LTF#1.

Nota-se que as excitações das bandas laterais foram promovidas pela defasagem do cilindro de encosto (Figura 5b), enquanto a frequência portadora encontra-se na faixa do *chatter* de 3ª oitava conforme apresentado na Figura 5a.

A Figura 6 mostra o teste de rampa de aceleração (*run up*) no LTF#1 para identificar as velocidades críticas relacionado-as com as frequências de vibração também críticas para o equipamento e o processo.

Tabela 2. Parâmetros dos experimentos

Laminador	Experimentos	Fatores	Condições operacionais*	
LTF#1	Teste-1 (full factorial designs 2 ⁴ sem réplicas)	Tensão 3 / 4 (kgf/cm ²)	↑	↓
		Redução da 1 ^a cadeira (%)	↑	↔
		Redução da 5 ^a cadeira (%)	↔	↓
		Diâmetro do CT (mm)	intermediário	início
LTF#2	Teste-2 (full factorial designs 2 ³ com réplicas)	Tensão 4 / 5 (kgf/cm ²)	↔	↓
		Redução da 1 ^a cadeira (%)	↑	↓
		Redução da 5 ^a cadeira (%)	↔	↓
	Teste-3 (full factorial designs 2 ⁴ sem réplicas)	Tensão 4 / 5 (kgf/cm ²)	↔	↓
		Redução da 1 ^a cadeira (%)	↑	↓
		Redução da 5 ^a cadeira (%)	↔	↓
		Velocidade (m/min)	↑	↔

* Nota: ↑ severa ou alta; ↓ baixa e ↔ média ou intermediária.

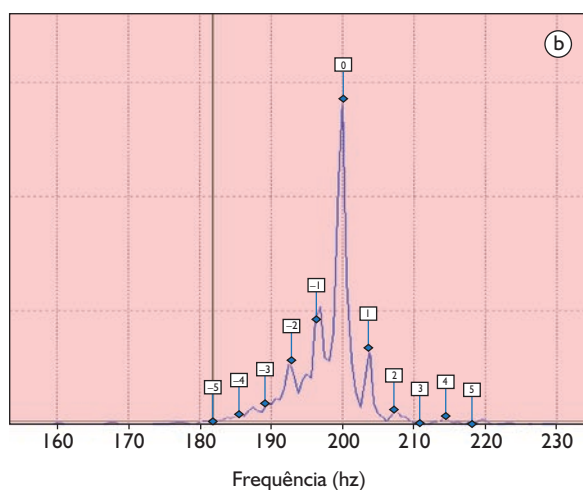
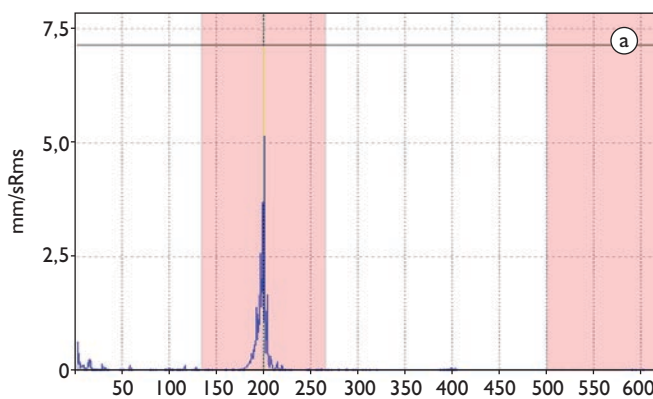


Figura 5. a) Espectro na faixa entre 0 Hz a 610 Hz (detectado por monitoramento) do processo de laminação, onde se detectou excitação em 200 Hz; e b) Faixa ampliada da figura 5a na região da faixa de 200 Hz, onde os cursores mostram as bandas laterais com modulação na rotação do encosto caracterizando a 3^a oitava.

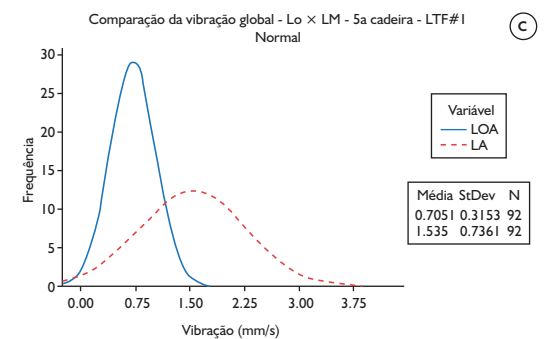
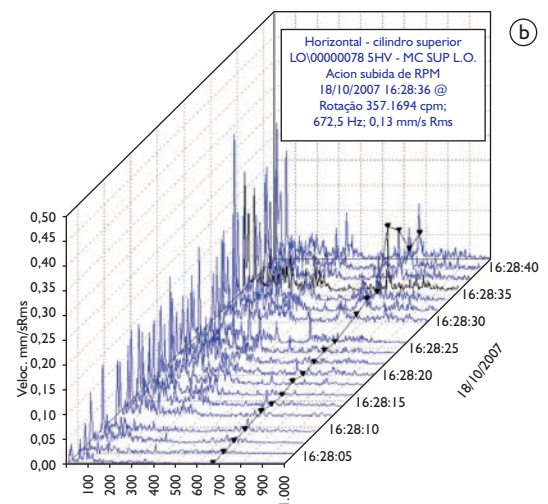
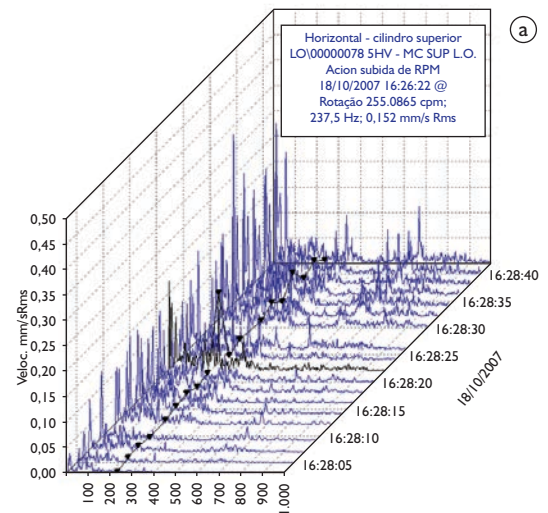


Figura 6. a) Espectro na forma de cascata. A linha preta em destaque mostra ocorrência de ressonância na faixa 200 Hz durante teste caracterizando-a o *chatter* 3^a oitava; b) A linha preta da Figura 6b mostra também ocorrência de ressonância em 672,5 Hz caracterizando-a o *chatter* 5^a oitava em velocidade em regime operacional; e c) Investigou-se a ocorrência do *chatter* 5^a através de histogramas comparativos e, portanto foi observada uma média de vibração de 1,55 mm/s e maior dispersão do lado acionado, enquanto lado oposto do acionamento apresenta menor vibração e dispersão (Lado Oposto do Acionamento – LOA e Lado do Acionamento – LA). Isso indica falha do equipamento para essa faixa de 672,5 Hz.

No LTF#1 foram observadas ocorrências de *chatter*(s) de 3ª e 5ª; porém, o *chatter* 3ª é significativamente maior (18 vezes) do que *chatter* 5ª. Analisando os dados, caracteriza-se que o *chatter* de 5ª oitava é proveniente das folgas dos mancais da 5ª cadeira do lado do acionamento (Figura 6c), enquanto o *chatter* 3ª trata-se de fenômenos intrínseco à operação que seã investigados estatisticamente.

6.1.2 LTF#2

Foi evidenciada a ocorrência predominante de *chatter* de 5ª oitava. A Figura 7 apresenta os espectros coletados através do sensor de vibração instalado no mancal do cilindro de encosto da 5ª cadeira do LTF#2.

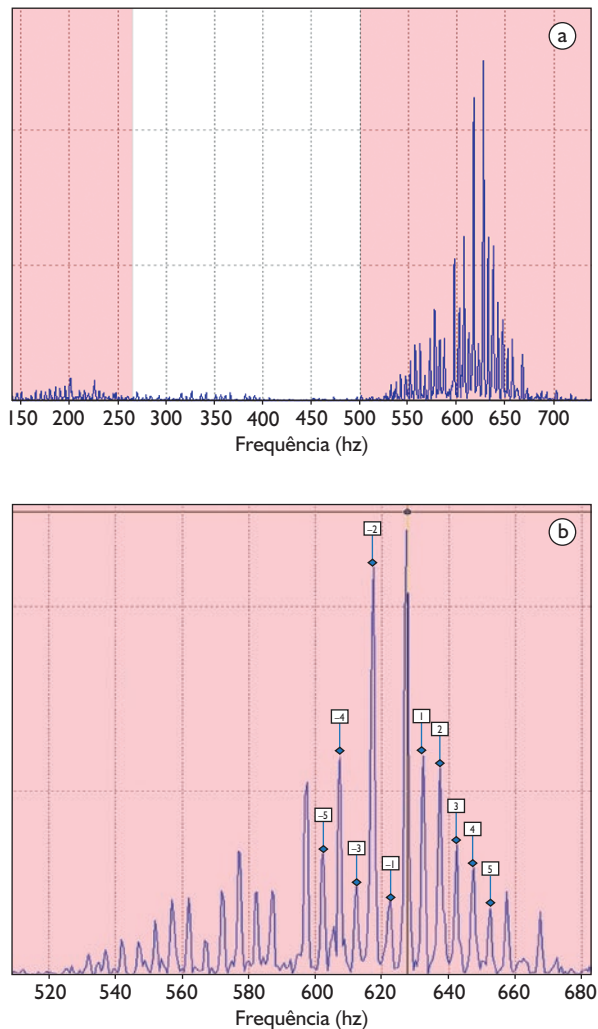


Figura 7. a) Espectro entre 150 Hz a 750 Hz, que apresenta excitação na região 550 Hz a 680 Hz, caracterizando o *chatter* 5ª oitava; e b) Faixa ampliada da região excitada, evidenciando as bandas laterais moduladas na rotação do cilindro de trabalho ou falha do sistema de acionamento. Estas bandas aproximam-se de 7,5 Hz, que representa meia volta, ou 15 Hz, que significa uma volta da rotação do laminador.

Observa-se a existência de bandas laterais relacionadas à rotação do sistema de acionamento ou conjunto dos cilindros de trabalho.

A Figura 8 evidencia a presença de excitações de baixa frequência (<20 Hz), indicando anomalias do sistema de acionamento (*chatter* torcional).

Resumidamente, pode-se dizer que predomina no LTF#1 o *chatter* de 3ª oitava, causado pelas condições operacionais, enquanto no LTF#2 predomina o *chatter* de 5ª oitava causado pelo equipamento.

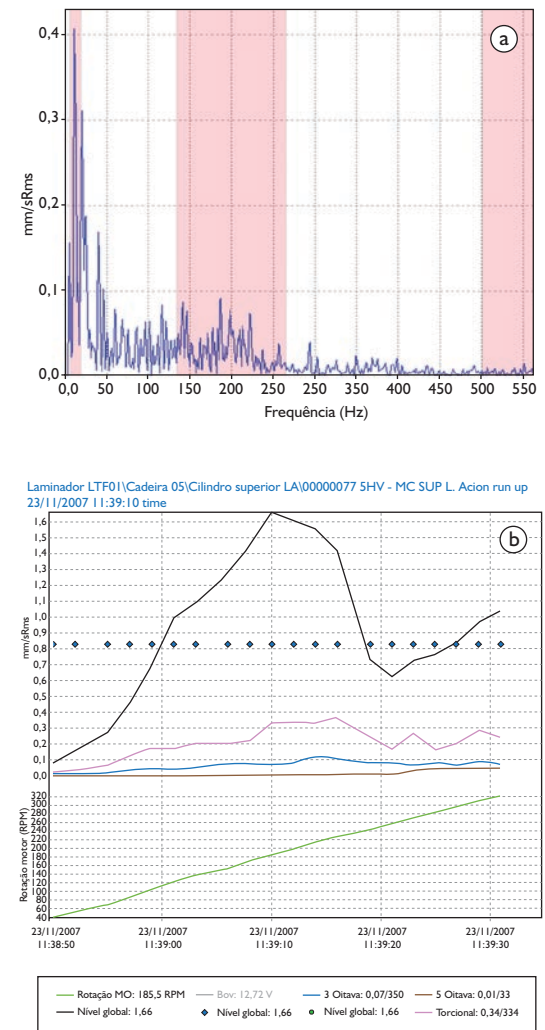


Figura 8. a) Espectro de vibração entre 0 Hz a 560 Hz, existe uma excitação de frequências baixas (<20 Hz); b) Gráfico do teste de aceleração (*run up*), onde a linha preta mostra vibração global; a linha cor de rosa indica vibração oriundas de vibração < 20 Hz; a linha azul indica vibrações na faixa 120 Hz a 250 Hz e a linha verde significa aceleração do laminador. A seta indica ressonância em uma determinada velocidade, sendo excitada predominantemente pelas vibrações < 20 Hz do sensor instalado do lado acionado.

6.2 Análise do Delineamento do Experimento (Design of Experiments - DOE)

6.2.1 Teste – I (LTF#1)

Examinaram-se os efeitos operacionais do Lamiador usando: i) a tensão entre o vão $\frac{3}{4}$ ($T\frac{3}{4}$); ii) a taxa de redução da 5ª cadeira ($\Delta R5^a$); iii) a taxa de redução da 1ª cadeira ($\Delta R1^a$); e iv) o diâmetro do cilindro de trabalho da 4ª cadeira do Laminador LTF#1 ($\varnothing WR4^a$). A Tabela 3 apresenta os valores codificados do experimento¹⁰ os parâmetros utilizados, bem como as respostas obtidas na vibração global.

Tabela 3. Valores codificados, parâmetros e respostas em vibração

Amostras	Valores codificados				Parâmetros operacionais				Resposta (Y) mm/s (RMS)
	$T\frac{3}{4}$	$\Delta R5^a$	$\Delta R1^a$	$\varnothing WR4^a$	$T\frac{3}{4}$	$\Delta R5^a$	$\Delta R1^a$	$\varnothing WR4^a$	
					(ton)	(%)	(%)	(mm)	
1	-1	-1	-1	-1	13	31	36	447	0,530428
2	1	-1	-1	-1	10	31	36	447	0,648907
3	-1	1	-1	-1	13	34	36	447	0,547488
4	1	1	-1	-1	10	34	36	447	0,632219
5	-1	-1	1	-1	13	31	39	447	0,496089
6	1	-1	1	-1	10	31	39	447	0,588982
7	-1	1	1	-1	13	34	39	447	0,513373
8	1	1	1	-1	10	34	39	447	0,543555
9	-1	-1	-1	1	13	31	36	454	0,491604
10	1	-1	-1	1	10	31	36	454	0,535878
11	-1	1	-1	1	13	34	36	454	0,574618
12	1	1	-1	1	10	34	36	454	0,560433
13	-1	-1	1	1	13	31	39	454	0,604934
14	1	-1	1	1	10	31	39	454	0,544998
15	-1	1	1	1	13	34	39	454	0,561274
16	1	1	1	1	10	34	39	454	0,455201

A Figura 9a apresenta isoladamente os principais efeitos como resposta vibracional (3ª oitava). A Figura 9b detalha a interação entre os efeitos investigados. Observa-se que o diâmetro $\varnothing WR4^a$ e a $\Delta R5^a$ são fatores significativos do experimento.

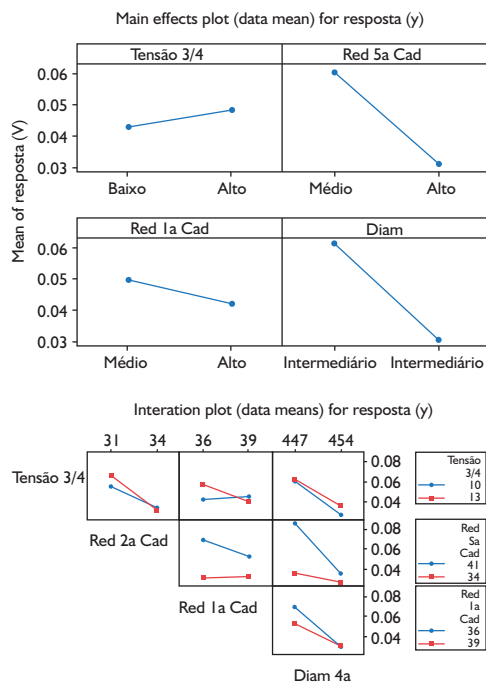


Figura 9. a) Principais efeitos relacionando, distintamente, com a vibração de 3ª oitava; e b) $\varnothing WR4^a$ tem a maior interação com demais efeitos.

Os gráficos de topografia da Figura 10 apresentam as combinações entre as variações do $\varnothing WR4^a$ com $\Delta R5^a$ e $T\frac{3}{4}$, bem como os níveis de vibração.

A combinação do aumento $\varnothing WR4^a$ com a diminuição da tensão entre os vãos causa a diminuição dos níveis de vibração na faixa de 3ª oitava. A Figura 10c apresenta os níveis de vibração global com diferentes $\varnothing WR4^a$, processados em uma campanha de cilindro de encosto.

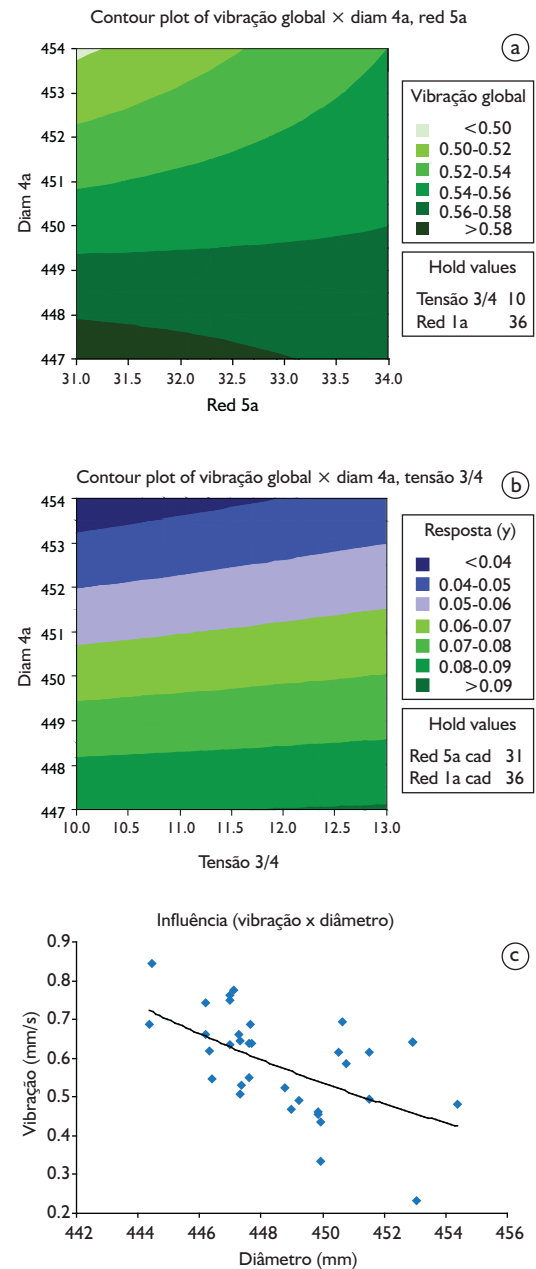


Figura 10. a) $\varnothing WR4^a$ X $\Delta R5^a$ e níveis topográficos de vibração; b) $\varnothing WR4^a$ X $T\frac{3}{4}$ das cadeiras e níveis topográficos de vibração; e c) O Aumento do $\varnothing WR4^a$ decresce os níveis de vibração global referentes a uma campanha de encosto.

O aumento do diâmetro do cilindro de trabalho significa aumentar o arco de contato; por sua vez, promove o deslocamento da força máxima para o início da mordida, minimizando o efeito do amortecimento negativo que suprime o fenômeno do *chatter*.⁽⁵⁾

O experimento propõe modelo estatístico ajustado pelos fatores (Equação 2) para o LTF#1, sobretudo utilizando-se o princípio da análise de variância, ou seja:

$$\hat{y} = 32,9 - 0,164A - 0,89B + 0,0024C - 0,072D + 0,00037AD + 0,002BD \quad (2)$$

6.2.2 Testes – 2 e 3 (LTF#2)

Inicialmente, foram examinados os efeitos da tensão 4/5 (T4/5), taxa de redução da 5ª cadeira ($\Delta R5^a$), e taxa de redução da 1ª cadeira ($\Delta R1^a$). O teste de probabilidade normal evidencia que a combinação dos fatores escolhidos é competitiva entre si; portanto, seria necessário incluir um fator significativo para resposta (Y), o que resultou na escolha da velocidade.

Comparando o teste 2 com 3, pode-se dizer que a velocidade introduz energia no sistema e potencializa a resposta. Os fatores (Figura 11b) que se mostraram mais significativos do LTF#2 estão relacionados à falta de rigidez.

O decréscimo T4/5 de forma combinada com o aumento da velocidade implica em elevar os níveis de vibração. Este fato é amplamente discutido na literatura⁽⁶⁾, e as suas origens são provenientes de folgas mecânicas dos conjuntos do laminador.⁽⁷⁾

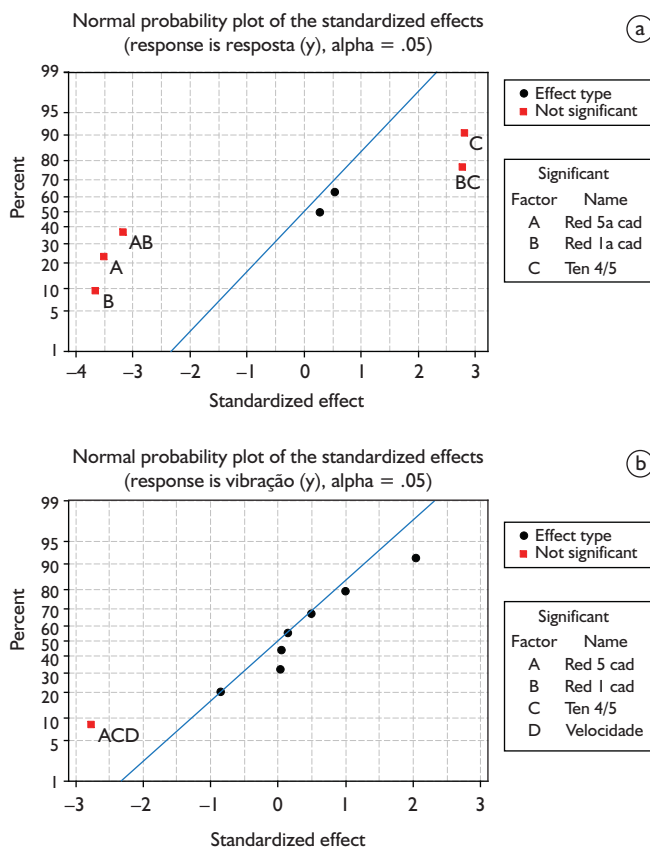


Figura 11. Resultados da probabilidade normal dos efeitos significativos dos testes 2 e 3: a) sem influência da velocidade; e b) com influência da velocidade. Com a velocidade os demais parâmetros não foram significativos.

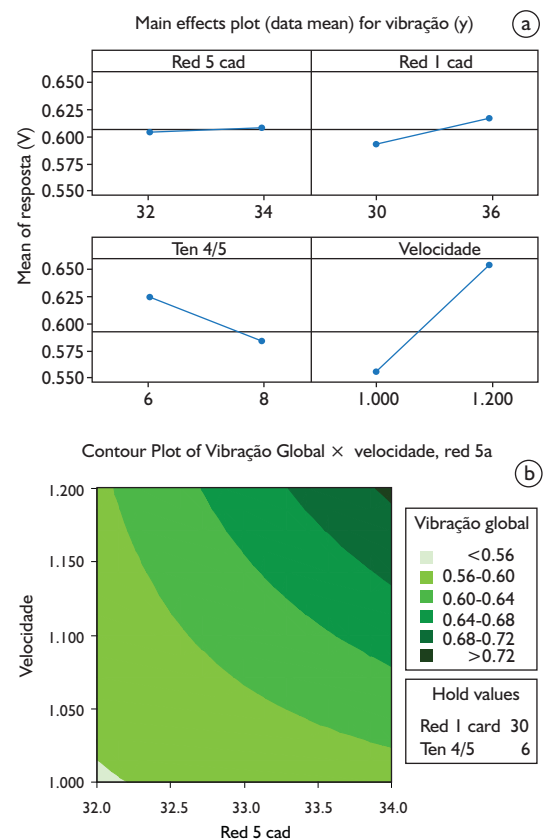


Figura 12. Resultados do teste 3: a) avaliam-se separadamente os efeitos principais (evidencia-se a maior variação da vibração relacionado com a velocidade); e b) aumento da velocidade combinado com a redução de 5ª cadeira resultando no aumento linear da vibração.

Para LTF#2 destacaram-se os fatores correlacionados com a rigidez do equipamento. De modo geral, um aumento da velocidade potencializa efeitos relacionados à folga laterais. De fato, este fenômeno foi evidenciado no teste 3 pelos dos resultados apresentados nas Figuras 12a,b. O teste 3 propôs o modelo estatístico ajustado (Equação 3) para LTF#2, utilizando-se o princípio da análise de variância, ou seja:

$$\hat{y} = 9,007 - 0,26A + 0,0014B - 0,06C - 0,016D + 0,0005AD - 0,0000002BD + 0,0012CD - 0,000004ACD \quad (3)$$

7 CONCLUSÕES

O LTF#1 entra em ressonâncias (± 200 Hz) severamente e instantânea em 3ª oitava, a frequência fundamental encontra-se modulada ao encosto.

Pela análise empregando-se o DOE, constata-se que o LTF#1 é sensível, predominantemente, ao efeito do diâmetro de trabalho da 4ª cadeira (amortecimento negativo) e também ao efeito da tensão 3/4.

O LTF#1 é excitado na frequência de 672,5 Hz e na frequência fundamental de 15 Hz, que corresponde à rotação do cilindro de trabalho da 5ª cadeira. Trata-se de folga lateral do conjunto de trabalho ou força de excitação do acionamento.

O LTF#2 é excitado na faixa de 5ª oitava (550 Hz a 680 Hz) devido à falta de rigidez no interior da cadeira combinado com as forças externas provenientes do acionamento. A frequência fundamental tem origem no sistema de acionamento.

O LTF#2 entra em ressonância nas frequências de 177,5 e 186,25 Hz que se referem à 3ª oitava com maior excitação do lado acionado.

Pelos testes de DOE, constata-se que o LTF#2 vibra em função do aumento da velocidade, caracterizando folga no interior da cadeira, potencializado pelo acionamento.

REFERÊNCIAS

- 1 ROBERTS, W.L. Four-high mill stand chatter of the fifth-octave mode. **Iron and Steel Engineer**, v. 55, n. 10, p. 41-7, Oct. 1978.
- 2 YUN, I.S.; WILSON, W.R.D.; EHMANN, K.F. chatter in the strip rolling process. Part I: dynamic model of rolling. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 120, n. 2, p. 330-6, May 1998.
- 3 YUN, I.S.; WILSON, W.R.D.; EHMANN, K.F. chatter in the strip rolling process. Part II: dynamic rolling experiments. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 120, n. 2, p. 337-42, May 1998.
- 4 YUN, I.S.; WILSON, W.R.D.; EHMANN, K.F. Chatter in the Strip Rolling Process, Part III: chatter model. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**, v. 120, n. 2, p. 343-8, May 1998.
- 5 REMN-MIN, G. Material damping during mill chatter. In: AISE ANNUAL CONFERENCE, 1993, Pittsburgh, PA. [S.l.]: AISE, 1993. p. 430-9.
- 6 PAULINO, W.S.; HANSEN, B.L.; PELLEGRINI, H.; NOVAES, G.O.; LAGO, A.S.; BARROS, L.C.M. Análise e determinação experimental do comportamento vibratório do laminador de encruamento – chatter. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MANUTENÇÃO, 21, 2006, Aracaju. **Anais...** Rio de Janeiro: ABRAMAN, 2006. 1 CD-Rom.
- 7 ROBERTS, W.L. **Flat processing of steel**. New York: Marcel Dekker, 1987.
- 8 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.
- 9 YARITA, I.; FURUKAWA, K.; SEINO, Y. An analysis of chattering in cold rolling for ultrathin gage strip steel. **Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan**, v. 19, p. 1-10, 1978.
- 10 MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G.C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: LTC, 2003.

Recebido em: 4/11/2008

Aceito em: 19/06/2009

Proveniente de: CONGRESSO ANUAL DA ABM, 63., 2008, Santos, SP. São Paulo: ABM, 2008.