

## ESTUDO DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DA CADEIRA 2 DO LAMINADOR CM3\*

Francisco Carvalho<sup>1</sup>

Mário Eduardo Correia<sup>2</sup>

Edmilson Ricardo de Oliveira Santos<sup>3</sup>

### Resumo

Durante o comissionamento o laminador Novelis CM3 apresentou níveis elevados de vibração, que causou instabilidades no processo de laminação, gerando problema de qualidade e desperdício de produto. Devido à vibração, as chapas produzidas pelo CM3 apresentaram marcas de *Chatter*, e para entender esse fenômeno foram empregadas as seguintes técnicas: Análise de Vibração, Análise da Forma de Deflexão Operacional e simulação numérica pelo Método dos Elementos Finitos-MEF. De acordo com a literatura, um laminador pode apresentar três modos de *Chatter*: 5-20 Hz (torção); 128-256 Hz (3ª oitava) e 500-700 Hz (5ª oitava). O modo de 3ª oitava é mais crítico para a estrutura. Na Análise de Vibração, os espectros apresentam níveis elevados na frequência de 153 Hz, sendo que na análise por ODS identificou-se movimentos relativos nos rolos de *Backup* e na estrutura de apoio em 153 Hz. Os cálculos por MEF destacaram a existência de um modo natural em 153 Hz nos rolos *Backup*, como observado nos modos operacionais obtidos por ODS, caracterizando ressonância no sistema. Esta ressonância está associada à vibração do modo de 3ª oitava, que ocasiona níveis elevados de vibração no sistema. A excitação deste modo natural faz com que haja a flexão dos cilindros, que causa variações na pressão de laminação gerando assim marcas nas chapas. Também, realizou-se uma Análise Modal do rolo *Backup* identificando-se uma frequência natural na região de 150 Hz, com a forma modal de flexão.

**Palavras-chave:** *Chatter*, Laminação; Ressonância; Forma modal.

### STUDY OF DYNAMIC BEHAVIOUR OF CM3 MILL

#### Abstract

During the start-up, the Novelis CM3 rolling mill presented high vibration levels that caused instabilities on the rolling process, thickness strip variations generating quality problem and product waste. Due to this vibratory condition the plates produced by CM3 have presented “*Chatter Marks*”. In this study was performed: bibliography revision, vibration analysis, Operating Deflection Shape-ODS Analysis and Finite Element Analysis - FEA, which allowed a better understanding of the *Chatter* phenomenon. According to the literature, rolling mill has three *Chatter* modes: 5-20 Hz (Torsional); 128-256 Hz (3<sup>rd</sup> octave) and 500-700 Hz (5<sup>th</sup> octave). The 3<sup>rd</sup> octave *Chatter* is most critical for structure. The vibration analysis has found high vibration levels on the system in 153 Hz and ODS has identified the higher lag phase on *Backup* rolls and their support structures. FEA found a CM3 natural mode shape around 153 Hz with higher deformation amplitude on *Backup* rolls as well as also found in the ODS, characterizing resonance on the system. This resonance is associated to the 3<sup>rd</sup> octave *Chatter* occasioning the high vibration levels found in the system. The excitation of this natural mode causes bending of the spindles, which causes pressure variations in milling generating, this way, marks on the strip. Finally, Modal Analysis of the *Backup* roll has identified a natural frequency in the region of 150 Hz with a simple bending characteristic in mode shape.

**Keywords:** *Chatter*, Rolling mill; Resonance; Shape mode.

<sup>1</sup> Eng./USP, Engenheiro de Materiais, Gerente de Processo, Novelis, Pindamonhangaba, SP, Brasil.

<sup>2</sup> Eng./UNIMEP, Eng. Mecânico, Coordenador de Eng., Análise Dinâmica, SKF do Brasil, Cajamar, SP, Brasil.

<sup>3</sup> Eng./UNICAMP, Dr. em Eng. Mecânica, Eng. de Simulação Numérica, Análise Dinâmica, SKF do Brasil, Cajamar, SP, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

No comissionamento do laminador Novelis CM3 ocorreram elevados níveis de vibração, os quais causaram instabilidades no processo de laminação, gerando problema de qualidade e desperdício de produto. Devido à vibração, as chapas produzidas pelo CM3 apresentaram marcas de *Chatter*, e para entender esse fenômeno realizou-se um estudo de Análise Dinâmica para avaliar as causas deste problema. O processo de Laminação a frio consiste em reduzir a espessura de uma placa de aço para obter a dimensão desejada pelo cliente. Este processo de deformação plástica tem uma combinação de fatores, tais como: a compressão, a velocidade, a tensão, o coeficiente de atrito e etc. Durante o processo de Laminação, é necessário ter um conhecimento abrangente dos fatores que afetam a taxa de redução de espessura. Para evitar as instabilidades do processo Laminação, esses fatores ou condições de Laminação devem ser combinados corretamente. O processo de instabilidade de Laminação causa imprecisão na espessura, gerando sucata do produto. As forças dinâmicas envolvidas durante o processo de laminação causam deformações na estrutura que provocam deslocamento entre os cilindros e a tira. Estas variações resultam em alterações nas forças de Laminação. Estes fatores se combinam com a energia do acionamento, com isto tem-se como resultante a energia vibracional [1-4]. De acordo com Robert [5], o processo de Laminação envolve fenômenos dinâmicos que o tornam auto-excitável, que por sua vez promovem a vibração mecânica. As marcas de *Chatter* são fenômenos conhecidos em processos de Laminação a frio de aço, alumínio e até mesmo na fabricação de papel. No processo de Laminação a frio, as marcas de vibração são caracterizadas por faixas alternadas, claras e escuras, paralelas entre si, e na direção transversal a laminação (Figura 1).



Figura 1. Marcas de *Chatter*.

O *Chatter* é uma condição vibracional indesejável durante o processo de Laminação, que degrada a qualidade superficial da tira. Existem casos de *Chatter* que a severidade de vibração atinge níveis que comprometem o equipamento [5-6] classificou o *Chatter* em três, Meehan [7] separou por modo de frequência: 5 – 20 Hz (torcional); 128 – 256 Hz (3ª oitava) e 500 – 700 Hz (5ª oitava). O *Chatter* torcional, normalmente, é ocasionado pelo sistema de acionamento e/ou pelo controle do motor. De acordo com Yun et al. [1-4], este modo de vibração causa padrões de flutuação na espessura e alteração na refletividade na superfície da tira. O *Chatter* de 3ª oitava, que ocorre no intervalo de 128 a 256 Hz, no estado inicial do fenômeno, apresenta distúrbios oscilatórios que introduz em pequenas variações na espessura tira, gerando uma componente dinâmica de força de Laminação. Esta condição flexiona a estrutura do laminador, causando variação da distância entre os cilindros e as folgas entre *liner's* da estrutura. Este mecanismo amplifica e provoca maiores forças de Laminação. No entanto, existe uma condição de ressonância no sistema, que promove a interação entre a estrutura do laminador e o processo de Laminação. Esta condição de interação leva a instabilidade do processo [1-4]. Os eventos ocorrem de forma instantânea e estão relacionados com a frequência natural do cilindro de encosto. Devido ao rápido aparecimento do *Chatter* 3ª oitava, isto indica

que este fenômeno é auto-excitado em função do processo, mais do que as excitações externas [8]. Esta condição causa oscilações de maneira defasada nos cilindros de trabalho, degradando a superfície da tira e em alguns casos, podendo levar a ruptura da mesma [9-11]. O *Chatter* de 3ª oitava é detectado de forma audível e pode ser minimizado através da redução da velocidade de Laminação ou alteração dos parâmetros do processo. Para trem de laminação, ou seja, múltiplas cadeiras, o *Chatter* pode ser gerado também pelo amortecimento negativo. Este fenômeno deve-se as variações de tensões causados pela vibração dos cilindros, que promovem forças indesejadas no processo, que excitam as próximas cadeiras de Laminação [12]. O modo de vibração (*Chatter* de 3ª oitava) que provoca ruptura da chapa pode também danificar o equipamento, de acordo com Yun et al. (1998). Estes tipos de casos estão sempre associados à alta velocidade e grandes reduções. Estas condições operacionais são ideais para alta produtividade e são similares a da Novelis. Tamiya [8] indicou como o favorecido da formação do *Chatter* de 3ª Oitava (auto-excitável), a combinação de fatores como: espessuras finas; instabilidade na aplicação de solução; coeficiente de atrito baixo ou alto (excesso de lubrificante); alta velocidade; tensão entre cadeiras inadequada; redução extremamente alta ou baixa; variação abrupta no processo. Estas condições anteriores também foram discutidas por Luc Chefneux et al. [10] e Roberts [5], onde sugeriram que o processo de Laminação é sensível à força de Laminação, ao excesso de redução da tira, a condição inadequada do coeficiente de atrito, etc. Ambos concluíram que a otimização dos parâmetros operacionais, pode minimizar a ocorrência do *Chatter* de 3ª oitava. Os laminadores são também vulneráveis a fontes externas de excitação como: instabilidade do sistema de acionamento (torcional); padrões de desgaste nos cilindros (facetamento); folgas no acionamento; folgas nos *liner's* e etc. Portanto, qualquer vibração externa que coincida com a frequência do *Chatter* de 3ª oitava, promoverá distúrbio ao laminador [13]. O *Chatter* de 5ª oitava ocorre na faixa de frequência maior do que o *Chatter* de 3ª oitava. Este fenômeno ocorre com mais frequência em laminadores: *temper*, *skin pass mill* e também em *LTF*. A vibração do *Chatter* de 5ª oitava excita a frequência natural dos cilindros de trabalho, que oscilam em contra fase entre os cilindros de encosto ou intermediários Paulino et al. [14]. Como a espessura entre os cilindros de trabalho não se altera, sobretudo a espessura da tira não será afetada. Este fenômeno causa a marcação (facetamento) dos cilindros *Backup* ou intermediários. As marcas desenvolvem de maneira gradual com um padrão que é transferido para a tira. Normalmente, não é detectada imediatamente a sua ocorrência, por se tratar de ruído de alta frequência. Para evitar a degradação da qualidade da tira, faz-se a troca dos cilindros de forma precoce, baseando-se em alarmes definidos através de banda espectrais [15]. Apesar do *Chatter* de 5ª oitava ser menos severo do que o *Chatter* de 3ª oitava, no entanto, pode ser fonte excitadora do mecanismo do *Chatter* de 3ª oitava. O *Chatter* da 5ª oitava é mais fácil de eliminar do que *Chatter* da 3ª oitava. Sobretudo, *Chatter* de 5ª oitava requer inúmeras ações relacionados à qualidade da manutenção do equipamento [12]. Como: trocas dos cilindros de forma precoce, diminuição da velocidade de laminação e inspeção cuidadosa dos cilindros (evitar fontes excitadoras proveniente da retífica). Todas estas ações afetam a produtividade do laminador.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

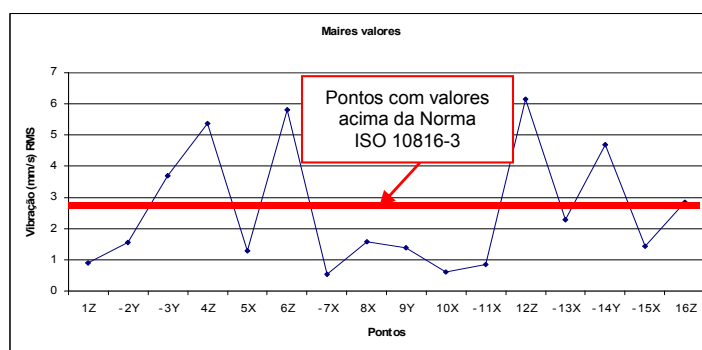
### 2.1 INSTRUMENTAÇÃO E PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

A instrumentação e programas computacionais utilizados nas medições de Análise de Vibração Convencional, ODS, bem como na simulação numérica foram os seguintes: sistema on-line de 16 Canais SKF IMX-p; acelerômetros SKF CMSS 2200; programas de análise e gerenciamento SKF *@ptitudeAnalyst 8.0.1680*; programa de desenho mecânico Creo Parametric 2.0 e programas de Análise Dinâmica ME'scopeVES 5.0; ANSYS® 15 e SKF Simulator 3.2. A análise de vibração convencional foi realizada nos mesmo pontos de medição da técnica de ODS.

## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

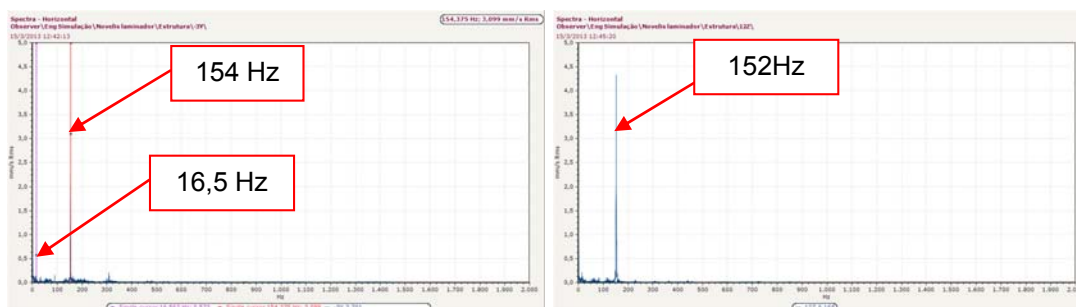
### 3.1. Análise de Vibração e ODS do Laminador CM3

Os resultados obtidos através da Análise de Vibração foram baseados na International Standard (ISO 10816-3) [16]. Os sinais mostraram que as vibrações medidas no sistema apresentam níveis de amplitude e frequência diferente para cada coordenada, (Figura 2). Os diagnósticos têm como base os espectros de vibração referentes às (Figuras 3(a) e 3(b)).



**Figura 2.** Gráfico com valores máximos medidos nos rolos e cadeira 2 do laminador CM3.

A direção -3Y, localizada no rolo *Backup* superior - lado oposto ao operador, apresenta o destaque da frequência de 16,53 Hz (rotação do rolo *Work*) em menor amplitude e 154 Hz com maior amplitude (Figura 3(a)). A direção 12Z, localizada no rolo *Backup* inferior - lado operador, também destaca a frequência de 152 Hz em maior amplitude (Figura 3(b)).



**Figura 3.** (a): Espectro de vibração no ponto -3Y e (b): Espectro de vibração no ponto 12Z - cadeira 2 do laminador CM3.

Os resultados da Análise de Vibração possibilitou a identificação da frequência 153 Hz, que é predominante no sistema, e portanto, o estudo de ODS foi realizado com base nesta frequência para verificar o comportamento dinâmico do laminador. Por ODS observou-se que os maiores níveis de defasagem estão ocorrendo na estrutura de apoio dos rolos, especialmente na região dos rolos *Backup* (Figura 4).

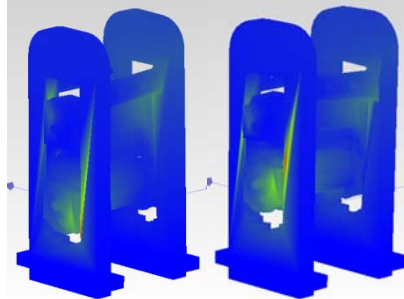


Figura 4. Modo operacional na frequência de 153 Hz.

## 3.2. Simulação Numérica

### 3.2.1 Análise modal da cadeira de laminação

Os objetivos da análise por simulação numérica foram determinar as frequências e modos naturais da cadeira de laminação CM3 da Novelis. Desta forma, será possível confirmar de forma teórica a existência dos modos naturais experimentais identificados pelas análises de vibração e análise por ODS, e também propor soluções que minimizem as condições ressonantes de operação. Para a realização desta análise foi utilizado o programa computacional Creo Parametric 2.0 na modelagem da geometria do laminador, que representativa da estrutura real. Tal geometria (Figura 5) foi importada para o programa de simulação numérica Ansys® 15, no qual foram definidas as massas, material, e condições de contorno. Para a modelagem da cadeira foi considerado o ASTM A36 cujas propriedades mecânicas são: Módulo de Elasticidade  $E= 2 \times 10^5$  MPa; Coeficiente de Poisson de 0,3; Densidade de 7850 kg/m<sup>3</sup>; Resistência Mínima de Escoamento de 250 MPa e Resistência Mínima à Tração de 460 MPa. De posse do modelo discretizado foi realizada a Análise Modal do sistema, com o intuito de determinar as frequências naturais da estrutura e seus modos naturais associados. Esta análise foi realizada considerando-se as seguintes condições de contorno: engastamento do suporte de apoio da cadeira, na região de contato com o solo (Figura 5).

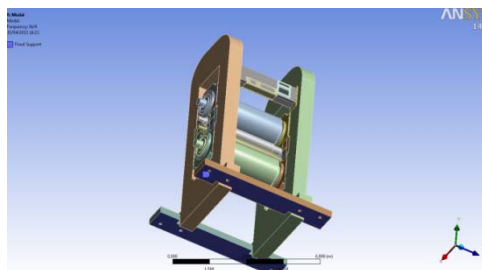
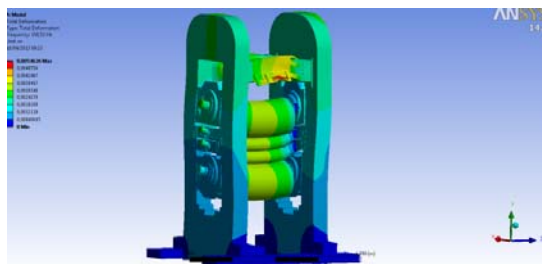


Figura 5. Modelo e aplicação da condição de engastamento do suporte de apoio da cadeira.

A análise dos resultados permitiu verificar a existência da frequência natural em 150,52 Hz. A forma de deformação característica dessa frequência natural está apresentada na Figura 6. Também, observou-se que o modo natural na frequência



de 150,52 Hz apresenta a flexão dos cilindros, que causam a deformação da cadeira.



**Figura 6.** Vigésimo quinto modo natural da cadeira 2 do laminador CM3 em 150,52Hz.

Sendo assim, através da combinação dos resultados obtidos pela análise de vibração, ODS e MEF verificou-se que a cadeira 2 do laminador CM3 apresenta uma frequência natural em 153 Hz que está sendo excitada na condição de operação gerando assim o fenômeno de ressonância. Por Análise de Vibração identificou-se que a frequência de 153 Hz tem nível elevado no sistema, e durante as medições também foi identificado um forte ruído associado à vibração do laminador. As análises por ODS indicaram que na frequência de 153 Hz foram encontradas deflexões principalmente na região do rolo *Backup*. Com os resultados obtidos pelo MEF identificou-se um modo natural do laminador na região de 150,52 Hz, com deformações principalmente na região dos rolos *Backup*, similares ao encontrado na análise por ODS caracterizando a ressonância. De acordo a revisão bibliográfica, estas características estão associadas à excitação do *Chatter* de 3ª oitava. Também de acordo com a literatura, o fenômeno de *Chatter* é definido como uma condição operacional do laminador em que as frequências de excitação coincidem com as frequências naturais e o laminador entra em ressonância, provocando nível de vibração muito elevado e ruído severo, como está ocorrendo com a cadeira 2 do laminador Novelis CM3. A existência deste fenômeno de *Chatter*, devido à excitação da frequência natural de 150,52 Hz, também pode ser confirmada pela informação das chapas produzidas pelo laminador CM3, ou seja, a cadeira 2 trabalhando com velocidade de 990 m/min apresentam defeitos de fabricação com marcas a cada 55 mm. Na velocidade de operação do laminador a 990 m/min o *Work roll* trabalha a uma velocidade de 702 RPM, que corresponde a 11,7 Hz. Então, calculou-se o tempo para que o *Work roll* execute uma rotação, e obteve-se 0,08547 segundos. O modo natural que está sendo excitado ocorre em 150,52 Hz, que corresponde a 150,52 ciclos/segundo. A excitação deste modo natural faz com que haja a flexão dos cilindros, como pode ser verificado na (Figura 6). Esta flexão causa variações na pressão de laminação gerando assim marcas na chapa, tanto quando os cilindros se deslocam na direção do rolo *Backup* superior quanto quando eles se deslocam na direção do rolo *Backup* inferior. A excitação deste modo natural faz com que o conjunto de cilindros execute 150,2 ciclos de flexão por segundo. Considerando que o tempo para uma revolução do *Work roll* é de 0,08547 s, então calculou-se o número de flexões executadas pelos cilindros no tempo de uma rotação do *Work roll*. Desta forma, a cada volta do *Work roll* ocorrerão 12,865 ciclos de flexão e como em cada ciclo de flexão ocorrem duas condições e variação de pressão de laminação, haverá 25,73 marcas na chapa a cada rotação do *Work roll*. A partir do número de marcas é possível calcular a frequência em que as mesmas ocorrem e que será denominada frequência de facetes:

$$f_{\text{facetes}} = \text{rotação} \times \text{número de marcas} = 11,7 \times 25,73 = 301,04 \text{ Hz} \quad (1)$$

Com a frequência de facetas também é possível calcular o tempo de ocorrência de cada marca que será de: 0,00332 s. Então, a velocidade periférica do *Work roll*, pode ser obtida pela seguinte expressão:

$$V = \pi f_{\text{rotação}} \phi \quad (2)$$

sendo que,  $\phi$  é o diâmetro do *Work roll*. Assim, a velocidade periférica do *Work roll* é de:  $V=16539,99$  mm/s. Com as informações da velocidade periférica e o tempo para a ocorrência entre as marcas, foi possível calcular a distância entre as marcas na chapa geradas pela ressonância do modo de 150,52 Hz. Por este cálculo verificou-se que as marcas na chapa causadas pela ressonância do modo de 150,52 Hz ocorrem a cada 54,91 mm. De acordo com a Novelis, as marcas encontradas em campo estão ocorrendo a cada 55 mm. Sendo assim, este resultado também confirma a ressonância do modo natural da cadeira 2 do laminador CM3 e a condição de excitação de *Chatter* de 3ª oitava.

### 3.3.2 Análise modal do *backup roll*

A simulação desenvolvida é baseada em um modelo matemático construído no programa computacional SKF Simulator 3.2. Nessa simulação todos os componentes são considerados rígidos, menos o rolo que é extrapolado para uma viga de elasticidade linear. Essa análise é mais bem avaliada para rolamentos SKF BC4-8015 A/HB1 (folga radial classe C4). As condições de contorno principais do modelo são: tolerância do eixo 780,310 a 780,390 mm, tolerância da caixa H7, rotação 664 RPM, potência 7000 kW, temperaturas do anel interno 70 °C, anel externo 60 °C, caixa de mancal 55 °C e eixo 65 °C. O lubrificante considerado é ISO VG 460. A pré-carga do rolamento axial em operação de 0,100 mm em cada carreira. A força de separação máxima por Laminação de 20000 kN (10000 kN/mancal). A (Figura 7) apresenta o modelo matemático construído. Pela análise modal efetuada, o rolo apresenta frequência natural na região de 150 Hz. Segue na Tabela 1 os dez primeiros modos para duas condições de carregamento (50% e 100% da força de separação). Analisando a configuração de rolamentos, verificou-se que o rolamento radial apresenta folga interna classe C4. Logo, a folga radial residual esperada é de 0,300 mm, com zona de carga de 120°. Ao alterar essa folga radial para classe Normal (0,310 a 0,470 mm), por exemplo, a folga radial residual esperada é menor, com zona de carga de 174°. Nessa condição, a rigidez do rolamento é maior e por consequência, a rigidez do rolo *Backup* também. Logo, ao recalculer as frequências naturais do rolo, a frequência da região de 150 Hz desaparece, conforme Tabela 2.

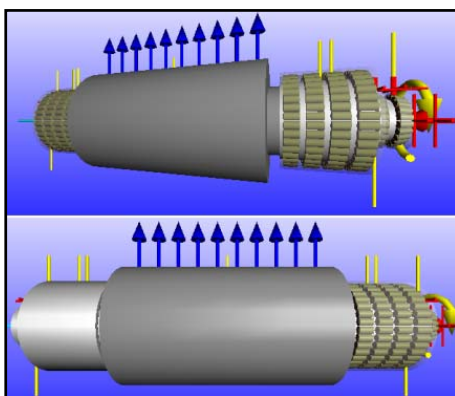


Figura 7. Modelo matemático construído no SKF Simulator 3.2, rolo *Backup* superior

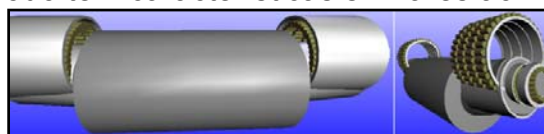
**Tabela 1.** Frequências naturais do rolo *Backup Roll*

50% da Força de Separação		100% da Força de Separação Máxima	
Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)
1	76	1	76
2	129	2	129
3	146	3	205
4	207	4	210
5	245	5	391
6	391	6	399
7	475	7	588
8	554	8	590
9	579	9	611
10	604	10	611

**Tabela 2.** Frequências naturais do rolo *Backup*

50% da Força de Separação		100% da Força de Separação Máxima	
Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência (Hz)
1	76	1	76
2	129	2	129
3	205	3	208
4	210	4	214
5	391	5	397
6	399	6	410
7	588	7	591
8	590	8	600
9	611	9	612
10	611	10	618

Detalhe para o 3° modo, o qual apresenta perfil de deflexão conforme (Figura 8), flexão simples. Esse modo tem características similares ao modo da (Figura 6).

**Figura 8.** Modo de deflexão na região de 150 Hz (flexão simples)

#### 4 CONCLUSÃO

O fenômeno *Chatter* é uma condição operacional do laminador em que as frequências de excitação coincidem com as frequências naturais, assim o laminador entra em ressonância, provocando níveis de vibração elevados e ruídos severos. Com a análise de vibração realizada no Laminador CM3 verificou-se a que os níveis de vibração encontrados neste sistema não estão em conformidade com os valores recomendados pela Norma ISO 10816-3, sendo que a frequência predominante no sistema é de 153 Hz. A partir da análise por ODS observou-se que as defasagens eram mais intensas nos rolos *Backup* e estrutura de apoio. Por MEF verificou-se a existência de um modo natural do sistema na região de 150,52 Hz, sendo que a forma de deformação característica deste modo apresenta os maiores



deslocamentos na região dos rolos. Assim, comparou-se o modo de deflexão operacional obtido por ODS com a forma de deformação modal identificada pelo MEF, verificando-se a semelhança entre ambos. Sendo assim, a cadeira 2 do laminador CM3 apresenta uma frequência natural em 153 Hz, a qual está sendo excitada na condição de operação, gerando assim o fenômeno de ressonância. Esta ressonância está associada ao *Chatter* de 3ª oitava, sendo esta a causa dos elevados níveis de vibração encontrados no sistema. A excitação do modo natural em 153 Hz faz com que haja a flexão dos cilindros, causando variações na pressão de laminação e gerando marcas nas chapas. Também, realizou-se a Análise Modal do rolo *Backup* identificando-se uma frequência natural na região de 150 Hz. O modo associado tem característica de flexão simples. Ao alterar a rigidez dos rolamentos radiais, esse fenômeno não é mais evidenciado.

## REFERÊNCIAS

- 1 Yun, IS; WRD Wilson, Ehmann KF "Chatter in the Strip Rolling Process, Part I, Dynamic Model of Rolling" Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, May 1998, Vol. 120,
- 2 Yun IS; WRD Wilson, Ehmann KF "Chatter in the Strip Rolling Process, Part II, Dynamic Rolling Experiments" Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, May 1998, Vol. 120
- 3 Yun, IS; WRD Wilson, Ehmann KF "Chatter in the Strip Rolling Process, Part III, Chatter Model" Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME, , May 1998, Vol. 120
- 4 Yun, IS; WRD Wilson, Ehmann KF "Review of Chatter studies in cold rolling" International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1998, Vol. 38, 1499-1530
- 5 Roberts, WL."Four-high Mill Stand Chatter of the Fifth-Octave Mode," Iron and Steel Engineer, October 1978, Vol. 55, No.10, 41-47.
- 6 Roberts, WL.: "Four-high mill stand Chatter of fifth-octave mode" AISE Year Book, 1978, pp.396-402
- 7 Meehan, P. A. W. John Edwards and Glen A. Wallace "Modelling And Simulation of Vibration Phenomena in Rolling Mills" 7th International Conference on Steel Rolling, Tokyo, Japan - October 1998
- 8 Tamiya, T. Furui, K.; Iida H.: "Analysis of Chattering phenomena in cold rolling" Proc. Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo, 1980, pp.1191-1202
- 9 Yarita, I, Furukawa, K, and Seino, Y, "An Analysis of Chattering in Cold Rolling for Ultrathin Gage Strip Steel," Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, 1978, Vol. 19, No. 1, pp 1-10
- 10 Luc Chefneux, Jean-Paul Fischbach and Gouzou J, "Study and Industrial Control of Chatter in Cold Rolling," AISE Year Book, 1984, pp 504-513. Iron and Steel Engineer,
- 11 Paton, DL, and Critchley, S, "Tandem Mill Vibration: Its Cause and Control," AIME, Mech. Working Div., Oct. 1984, pp 247-255
- 12 Pei-Hua Hu and Kornel F. Ehmann, "Regenerative Effect in Rolling Chatter" Journal of Manufacturing Processes, 2001, Vol. 3, No. 2, pp 83 - 84
- 13 Remn-Min Guo, Urso AC, and Schunk JH, "Analysis of Chatter vibration phenomena of rolling mills using finite element methods" Iron and Steel Engineer, Jan 1993, Vol. 70, No. 1, pp 29-39
- 14 Paulino, W.S.; Hansen B.L.; Pellegrini, H; Novaes, GO; Lago, AS e Barros, LCM "Análise e Determinação Experimental do Comportamento Vibratório do Laminador de Encruamento da Cosipa – Chatter" Congresso Brasileiro de Manutenção – Set, 2006
- 15 Hofmann, W. Aigner H. "Reduction of Chatter marks during skin pass rolling of steel strips" MPT International 1/1998
- 16 International Standard, Norma ISO 10816-3, 1998, pp 1-18