

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

ALYSON CRYSTIAN LOPES DA SILVA

**IMPACTOS CAUSADOS POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS EM CHAPAS DE
ALUMÍNIO NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO**

Guaratinguetá
2015

ALYSON CRYSTIAN LOPES DA SILVA

IMPACTOS CAUSADOS POR VIBRAÇÕES MECÂNICAS EM CHAPAS DE ALUMÍNIO
NO PROCESSO DE LAMINAÇÃO A FRIO

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins

Guaratinguetá
2015

S586i	<p>Silva, Alyson Crystian Lopes da</p> <p>Impactos causados por vibrações mecânicas em chapas de alumínio no processo de laminação a frio / Alyson Crystian Lopes da Silva – Guaratinguetá, 2015.</p> <p>63 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 55-57</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2015.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins</p> <p>1. Laminação (Metalurgia) 2. Chapas de alumínio 3. Testes de vibração I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 621.771</p>
-------	---

ALYSON CRYSTIAN LOPES DA SILVA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ GERALDO TRANI BRANDÃO
UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ELIAS TOMAZINI
UNESP-FEG

Dezembro de 2015

DADOS CURRICULARES

ALYSON CRYSTIAN LOPES DA SILVA

NASCIMENTO	06.01.1989 - GUARATINGUETÁ / SP
FILIAÇÃO	Carlos Roberto da Silva Julene Lopes da Silva
2009/2015	Curso de Graduação Engenharia Mecânica - Universidade Estadual Paulista - Campus de Guaratinguetá

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, por ter me dado a sabedoria e a calma necessária para vencer todos os desafios que tive ao longo desse longo percurso.

aos meus pais Carlos Roberto da Silva e Julene Lopes da Silva que sempre incentivaram meus estudos e me apoiaram em minhas decisões.

à minha namorada Demylha Arneiro Ribeiro pela paciência demonstrada ao longo dos anos e pelo incentivo dado durante os obstáculos mais difíceis.

aos meus irmãos Anderson Carlos Lopes da Silva e Alexandra Cristina da Silva que sempre serviram de fonte de inspiração para que eu buscasse meus objetivos.

aos meus amigos e companheiros da universidade, pois juntos conseguimos vencer os mais variados desafios do percurso.

e finalmente, ao meu professor e orientador Prof. Dr. Marcelo Sampaio Martins, pelas excelentes aulas ministradas e a devida orientação na condução deste trabalho.

A ajuda e a presença de vocês nessa jornada tornaram a vitória obtida mais satisfatória.

SILVA, A. C. L. **Impactos causados por vibrações mecânicas em chapas de alumínio no processo de laminação a frio**. 2015. 63f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

RESUMO

Neste trabalho aborda-se uma análise sobre um dos principais problemas enfrentados pela indústria de laminação a frio da atualidade, as vibrações mecânicas. Fatores tais como alta produtividade e tiras com espessura cada vez mais finas fazem com que as vibrações estejam presente a todo momento durante a laminação. Essas exigências do mercado também impulsionam a indústria para o desenvolvimento tecnológico e com isso trazem os desafios da operação de um novo equipamento moderno e mais potente. Tem-se como objetivo analisar as forças que causam vibrações em um laminador tipo quádruplo de duas cadeiras, onde se deseja identificar as origens dessas forças vibracionais para que se possa anulá-las ou pelo menos controlar sua intensidade, para evitar que danos ocorram no laminador e garantir a qualidade do produto ao cliente. Para isto serão utilizados instrumentos capazes de registrar e armazenar as vibrações que ocorrem durante o processo de laminação. Com esses dados poder-se-á analisar as características das vibrações e atuar em sua eliminação. Ao final do trabalho espera-se demonstrar o quão importante é a visão crítica do engenheiro na análise dos gráficos aliada aos cálculos da frequência natural de vibração e de engrenamento de partes cruciais do laminador. Com essas duas ferramentas em mãos irá ser possível aumentar a produtividade do laminador e atuar de forma preventiva em manutenções no mesmo, reduzindo assim seu tempo de parada e aumentando a sua performance e eficiência.

PALAVRAS CHAVE: Laminados de Alumínio. Processo de laminação. Vibrações mecânicas.

SILVA, A. C. L. **Impacts caused by mechanical vibration in aluminum sheets in the cold rolling process.** 2015. 63 p. Graduate Work (Bachelor Degree in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

ABSTRACT

This paper purpose is to analyze one of the main problems faced by cold rolling industry of the current time, the mechanical vibration. Factors such as strips with high velocity in order to increase the productivity and thickness becoming thinner and thinner cause the vibrations to be present at all times during rolling. These market requirements also drive the industry for technology development and thus bring the challenges that the operation of a new modern equipment and more powerful. The initial purpose is to analyze the forces that cause vibration in a rolling mill type four high with two stands, where is desirable to identify the origins of these vibrational forces to make possible dismiss them or at least control its intensity, in order to prevent damage in the rolling mill and ensure product quality to the customer. For it, will be used instruments to record and store the vibrations that occur during the lamination process. With this data will be able to analyze the characteristics of the vibrations and act at your elimination. At the end of the work is expected to demonstrate how important the critical view of the engineer in the analysis of graphics combined with the calculations of the natural vibration frequency and engagement of key parts of the laminator. With these two tools at hand, will be possible to increase the productivity of the rolling mill and act preventively in maintenance, thereby reducing your downtime and increasing its performance and efficiency.

KEYWORDS: Aluminum rolling. Rolling process. Mechanical Vibration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Figura 1 – Laminador tipo Duo.	16
Figura 2 – Laminador tipo Trio.	17
Figura 3 – Laminador tipo Quádruo.	17
Figura 4 – Laminadores tipo 6-high, 12-high, 20-high	18
Figura 5 – Ilustração do processo de laminação	18
Figura 6 – Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação. ...	19
Figura 7 – Zona de deformação e ângulos de contato durante a laminação.	21
Figura 8 – Esquema das forças atuantes no momento do contato do metal com os cilindros do laminador.	21
Figura 9 – Fontes causadoras de marca de vibração em tiras.	24
Figura 10 – Modos de vibração.	25
Figura 11 – Espectro de vibração 1.	32
Figura 12 – Escala de vibração.	32
Figura 13 – Espectro de vibração 2.	34
Figura 14 – Espectro de vibração bom x ruim.	34
Figura 15 – Espectro de vibração 3.	35
Figura 16 – Espectro de vibração 4.	35
Figura 17 – Pescoço do <i>work roll</i>	36
Figura 18 – Micrômetro.	36
Figura 19 – Pescoço do cilindro de trabalho.	38
Figura 20 – Micrômetro tubular.	38
Figura 21 – <i>Spindle pod</i>	39
Figura 22 – Discretização da caixa redutora.	40
Figura 23 – Espectro de vibração 5.	42
Figura 24 – Espectro de vibração região de 700 Hz.	42
Figura 25 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 1.	43
Figura 26 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 2.	43
Figura 27 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 3.	44
Figura 28 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 1.	44
Figura 29 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 2.	45
Figura 30 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 3.	45

Figura 31 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 4.	46
Figura 32 – Espectro de vibração 6 – 30 de agosto.	47
Figura 33 – Espectro de vibração 7 – 30 de outubro.	47
Figura 34 – Espectro de vibração 8 – 30 de novembro.	48
Figura 35 – Anel <i>spindle pod</i>	49
Figura 36 – Espectro de vibração 9.	50
Figura 37 – Espectro de vibração - Anel antigo x Anel novo.	50
Figura 38 – Espectro de vibração 10.	52
Figura 39 – Espectro de vibração 11.	52
Figura 40 – Espectro de vibração 12.	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Medidas do pescoço dos cilindro de trabalho.	37
Tabela 2 – Medida do <i>spindle</i> pod.	39
Tabela 3 – Frequências naturais dos oitenta primeiro modos da carcaça do redutor de acionamento da cadeira 2 do laminador.	41

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
1.1 JUSTIFICATIVA.....	12
1.2 OBJETIVOS	12
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	13
2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA	15
2.1 PROCESSO DE LAMINAÇÃO.....	15
2.1.1 HISTÓRIA	15
2.1.2 TIPOS DE LAMINADORES	15
2.1.3 MECANISMO DA LAMINAÇÃO	18
2.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS.....	22
2.2.1 INTRODUÇÃO	22
2.2.2 TORSIONAL CHATTER.....	26
2.2.3 CHATTER DE TERCEIRA OITAVA	27
2.2.4 CHATTER DE QUINTA OITAVA.....	28
3. ESTUDO DE CASO	31
3.1 METODOLOGIA DE ESTUDO	31
3.2 REGIÃO DE CONTATO CILINDRO DE TRABALHO E SPINDLE POD.....	34
3.3 CAIXA REDUTORA CADEIRA 2.....	40
3.4 CAIXA REDUTORA CADEIRA 1.....	44
4. RESULTADOS	49
4.1 REGIAO DE CONTATO CILINDRO DE TRABALHO E SPINDLE POD.....	49
4.2 ENGRENAMENTO CAIXA REDUTORA DA CADEIRA 2	51
4.3 ENGRENAMENTO CAIXA REDUTORA DA CADEIRA 1	52
5. CONCLUSÃO	54
REFERÊNCIAS	55
BIBLIOGRAFIA CONSULTADA	57
ANEXO A	58

1. INTRODUÇÃO

Dentre os processos de conformação mecânica a laminação é o mais utilizado na indústria metal mecânica. Isso se deve ao fato da laminação apresentar alta produtividade, boa variedade de produtos e excelente controle dimensional do produto final.

O processo pode ser dividido em duas etapas, laminação a quente e laminação a frio. Como o próprio nome já sugere, o processo de laminação a quente é realizado sob altas temperaturas, acima da temperatura de recristalização do material, nessa etapa grandes reduções são impostas na seção transversal do lingote, transformando-o em uma chapa grossa. Já o processo de laminação a frio requer que a chapa esteja à temperatura próxima a do ambiente. O processo de laminação a frio proporciona ao material o aumento de suas propriedades mecânicas, devido ao encruamento que ocorre na deformação, o acabamento superficial também é de excelente qualidade e a chapa final pode atingir espessuras muito finas com ótima precisão dimensional (DIETER, 1981).

Diversos são os tipos de laminadores que podem ser utilizados na indústria, cada um com suas vantagens e desvantagens. Dentre os principais laminadores destacam-se: O laminador duo, o qual é composto por dois rolos, um sobre o outro e a chapa a ser laminada se desloca entre eles. Duo reversível, o qual permite que a direção do giro dos rolos seja invertida, isso possibilita que a chapa “vá e volte” no mesmo laminador, esse tipo de laminador é muito visto na laminação a quente e permite que grandes reduções sejam obtidas no material a ser laminado utilizando o mesmo laminador e com boa velocidade. Há também laminadores quádruplos, os quais contam com dois cilindros de apoio posicionados sobre os cilindros de trabalho, com essa combinação, cargas mais altas podem ser aplicadas sobre os cilindros de trabalho e reduções mais precisas podem ser obtidas nos produtos finais. Finalmente, há também laminadores agrupados, os quais são laminadores compostos por diversos cilindros, esse tipo de laminador é muito utilizado para a obtenção de folhas com espessuras finas, na ordem de grandeza de micrômetros (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Para que seja possível o processo de laminação, um laminador é composto por diversas estruturas mecânicas interligadas entre si, como os cilindros de laminação, mancais, a gaiola, motores, moto-redutores, entre outros. Essas estruturas estão mecanicamente ligadas umas às outras e por isso transferem força entre si.

Todos esses elementos do laminador apresentam massa e características elásticas e por esse motivo apresentam ao menos uma frequência natural, que é a frequência na qual o sistema vibra a partir de uma condição inicial. Há dois tipos de vibrações que podem ocorrer,

a vibração livre e a vibração forçada. A primeira ocorre em decorrência de forças internas, enquanto que a outra necessita de forças externas para ocorrer. Quando a frequência de excitação se iguala a frequência natural, ocorre o fenômeno conhecido como ressonância, que é caracterizado pela geração de vibrações de grande amplitude, podendo levar a estrutura ao colapso (MACHADO Jr., 2015). Em um processo tão preciso quanto o de laminação, essas variações com certeza impactarão na produtividade e na qualidade do produto final.

Dada essas circunstâncias, é de vital importância para o profissional dessa área o domínio dos mecanismos que ocorrerão no processo de laminação. O entendimento das forças que ocorrem no processo e os impactos que elas causam tanto na produtividade do laminador quanto na qualidade do produto obtido são essenciais para a obtenção do sucesso da fábrica.

1.1 JUSTIFICATIVA

Na era pós revolução industrial, cada vez mais as empresas buscam produzir com velocidade maior e sempre que possível, aprimorar a qualidade técnica de seus produtos, de forma assim a suprir as necessidades de seus clientes e se manterem competitivas e lucrativas no mercado internacional. Isso não é diferente para a indústria da laminação, a cada dia os produtos são laminados a velocidades mais altas e a qualidade do produto final deve ser mantida e/ou melhorada. Por isso, é possível encontrar no mercado laminadores mais potentes e precisos, com tecnologia de ponta instalada. Porém, mesmo com todo esse investimento realizado, nem sempre é possível obter o que se deseja de imediato, muitas vezes a velocidade de laminação é limitada devido a problemas que ocorrem na chapa laminada, escorregamentos e muitas outras variáveis. Por isso é essencial que entendamos um dos agentes causadores dessas limitações, a vibração.

1.2 OBJETIVOS

O propósito deste trabalho é estudar um laminador a frio do tipo quádruplo, o qual mesmo com tecnologia suficiente para laminar a velocidade de 1800 metros por minuto atualmente opera com velocidade pouco superior a metade do que foi projetado. Essa limitação se dá devido as restrições causadas por vibrações mecânicas do próprio processo de laminação. Inicialmente será identificada a origem das fontes causadoras de vibrações mecânica para

então atuar de forma a atenuá-las. As melhorias alcançadas serão apresentadas ao final deste trabalho.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em capítulos, conforme descrito a seguir:

Capítulo 2: REVISÃO BIBLIOGRAFICA

Este capítulo aborda os principais fatores que ocorrem e devem ser considerados durante o processo de laminação. Inicialmente é introduzido um histórico do processo de laminação, seguido da apresentação de modelos de laminadores e seus princípios de funcionamento.

Em etapa posterior são introduzidos os mecanismos que causam vibrações em estruturas mecânicas. Tem-se a validação do quão importante é o estudo dos agentes causadores de vibração no processo de laminação. Também são apresentados os locais onde essas fontes causadoras de vibração podem estar. Então o conceito de *chatter* é introduzido e suas características são estudadas para cada nível de classificação: *chatter* torsional, *chatter* de terceira oitava e finalmente *chatter* de quinta oitava, com um enfoque especial nas duas últimas.

Capítulo 3: ESTUDO DE CASO

Neste capítulo é apresentada uma situação real vívida por uma empresa de laminação de alumínio, onde a capacidade produtiva do laminador é de 1800 metros por minuto, mas que devido a problemas de vibrações mecânicas, não consegue operar nessa velocidade. Serão levantadas as possíveis causas dessa limitação e as ações que podem ser tomadas para inibir esses problemas.

Capítulo 4: RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados dados os fatores levantados no capítulo anterior. Também serão apresentadas as medidas tomadas para solução dos problemas e o resultado final obtido.

Capítulo 5: CONCLUSÃO

Ao final do trabalho são apresentadas as conclusões que puderam ser obtidas durante o período de pesquisa.

REFERÊNCIAS

Também ao final do trabalho são apresentadas todas as referências bibliográficas que foram utilizadas durante este trabalho.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Nem todos os artigos, periódicos e livros que foram lidos estão diretamente citados neste trabalho, entretanto, eles foram fundamentais para a solidificação do conhecimento durante a realização do mesmo. Neste capítulo eles são então apresentados.

ANEXO A:

Neste anexo é apresentando o formulário utilizado para o cálculo das frequências fundamentais de algumas partes do laminador, além dos dados técnicos necessários para a efetuação dos cálculos.

2. REVISÃO BIBLIOGRAFICA

2.1 PROCESSO DE LAMINAÇÃO

2.1.1 HISTÓRIA

Os primeiros registros do desenvolvimento da tecnologia de laminação são atribuídos a desenhos feitos por Leonardo da Vinci no final do século 15. Entretanto, não há nenhuma evidência de que um modelo de laminador tenha sido construído nessa época. De fato, só se tomou importância da construção de laminadores no meio do século 16.

No final do século 16, já eram laminados ouro e prata com o objetivo de cunhar moedas e chumbo para produzir telhados e calhas para as casas, todos esses materiais eram laminados a temperatura ambiente.

Os primeiros registros de produtos sendo laminados a quente datam do meio do século 17, onde eram utilizados laminadores do tipo duo. O conceito de laminadores quádruplos e reversíveis só foram desenvolvidos no século seguinte pelo sueco Christopher Polhem. Entretanto, foi apenas no século 19, que graças a revolução industrial, que se criou uma grande demanda de produtos laminados, forçando assim o desenvolvimento da indústria de laminação.

Os primeiros laminadores construídos eram movidos a mão, através da utilização de manivelas e trabalho mecânico. Devido a essa limitação de potência, apenas materiais leves poderiam ser laminados, como por exemplo: chumbo, ouro e prata. Depois passaram a utilizar laminadores movidos a rodas d'água ou motores a vapor, aumentando a potência para aproximadamente 4.000 HP. Entretanto, as máquinas a vapor ainda representavam um grande custo para sua produção e o custo benefício não era tão vantajoso. Até que então, foram desenvolvidos laminadores movidos a motores elétricos, aumentando a eficiência e a transmissão de torque. A partir de 1940, todos laminadores passaram a ser construídos com motores elétricos. (Novelis Rolling Group, 2008).

2.1.2 TIPOS DE LAMINADORES

Uma forma de classificar os tipos de laminadores é levar em consideração qual tipo de liga ele estará produzindo e qual a espessura final que se deseja obter. Por exemplo, laminadores denominados *Breakdown* são empregados onde se deseja obter grandes reduções

na seção transversal, para isso a matéria prima precisa estar quente e esse tipo de laminador é empregado na laminação a quente. Laminadores acabadores são utilizados para produzir chapas com as propriedades mecânicas, qualidade superficial e a espessura requisitadas pelos clientes, por isso são utilizados na laminação a frio. Há também laminadores de folhas finas, onde são produzidas folhas de alumínio com espessura bem menor do que os produzidos nos laminadores acabadores, essas folhas podem tem espessuras realmente muito pequenas na ordem de poucos microns.

Outra forma de classificar os tipos de laminadores leva em conta a quantidade de rolos utilizados para laminação. Por exemplo, o laminador duo ou *2-high*, é constituído por dois rolos que giram em sentidos contrários, entre os rolos passam as chapas a serem laminadas. Na indústria, a aplicação desse tipo de laminador é limitada pois devido a carga de laminação ser muito alta, podendo atingir facilmente milhares de toneladas, os rolos tendem a flexionar, o que acaba obrigando a reduzir a carga de laminação. O laminador Duo pode ser não reversível, onde o sentido de giro do rolo não pode ser invertido, ou reversível, onde é possível inverter o sentido de giro dos rolos, conforme pode ser observado na Figura 1 (BRESCIANI FILHO et al., 2011).

Figura 1 – Laminador tipo Duo

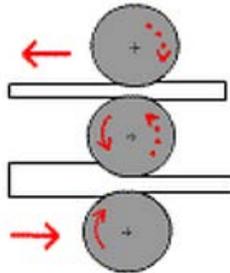


Fonte: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico

Outro tipo de laminador também utilizado é o trio ou *3-high*, esse tipo de laminador é constituído por dois rolos com diâmetros maiores e um rolo de diâmetro menor, por possuir um rolo de menor diâmetro, esse tipo de laminador se adapta melhor as forças impostas na laminação, reduzindo os impactos causados pela flexão dos rolos, esse tipo de laminador é muito empregado na laminação a quente. Esse tipo de laminador, não permite que seja

invertida a rotação dos rolos, porém, é possível fazer com que a chapa laminada passe entre um par de rolos e retorne pelo outro par, aumentando assim a sua produtividade, Figura 2.

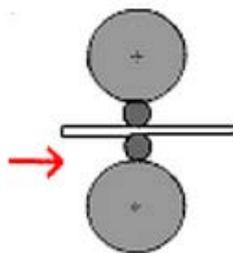
Figura 2 – Laminador tipo Trio



Fonte: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico

Há também o laminador quádruplo ou *4-high* o qual é o mais popular na laminação a frio, ele é formado por dois rolos de diâmetro maiores trabalhando como cilindros de apoio e por dois rolos de diâmetros menores atuando como cilindros de trabalho, esse tipo de configuração permite que cargas maiores sejam aplicadas no processo de laminação, possibilitando que reduções maiores e mais precisas sejam obtidas, aumentando a produtividade, Figura 3.

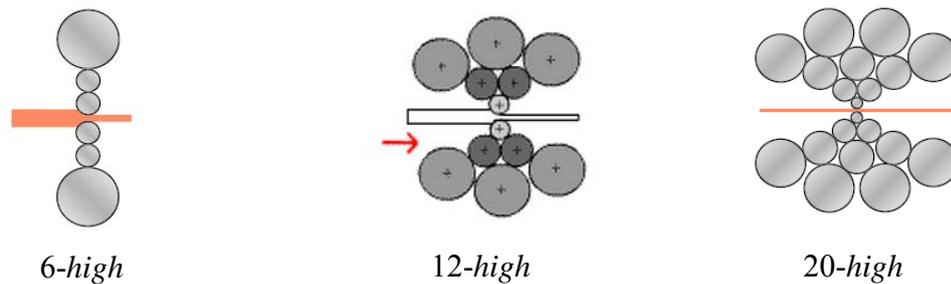
Figura 3 – Laminador tipo Quádruplo



Fonte: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico

Outros tipos de laminadores também visto na indústria são: *6-high*, *12-high*, *20-high*, tipo Sendzimir, esses laminadores possuem mais rolos apoiados uns sobre os outros, isso faz com que os efeitos da flexão causadas pelas altas cargas de laminação sejam reduzidos, possibilitando que folhas muito finas sejam obtidas com qualidade, Figura 4.

Figura 4 – Laminadores tipo 6-high, 12-high, 20-high

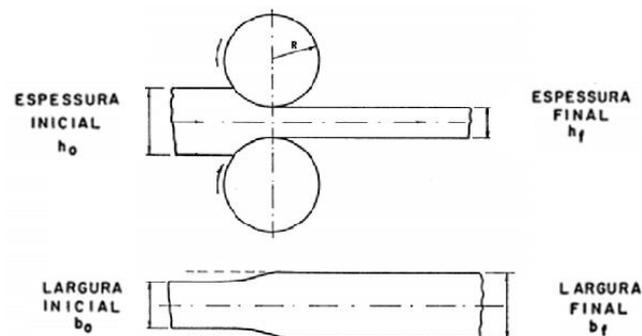


Fonte: http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico

2.1.3 MECANISMO DA LAMINAÇÃO

De acordo com Bresciani Filho et al. (2011), o processo de laminação é constituído pela passagem de uma peça sólida entre dois cilindros que giram em sentidos contrários com a mesma velocidade periférica. Como a distância entre os dois cilindros é menor do que a altura da peça, ao passar pelos cilindros a peça sofre uma deformação plástica, reduzindo a sua seção transversal e aumentando seu comprimento e largura, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Ilustração do processo de laminação



Fonte: Bresciani Filho et al., 2011

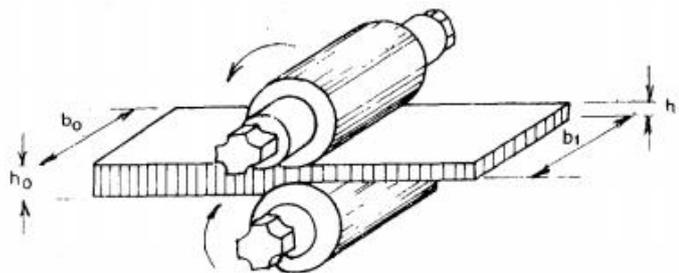
O processo de laminação pode ser dividido em duas categorias, laminação a quente ou laminação a frio e são classificados de acordo com uma temperatura específica, a temperatura de recristalização do material, (CHIAVERINI, 1986).

Chiaverini (1986) também classifica as vantagens e as desvantagens de cada um desses dois processos:

- Considerando a mesma redução na seção transversal da chapa, quando efetuado a quente, o equipamento utilizado pode ser de menor capacidade, uma vez que exigirá forças menores para a deformação;
- Durante o trabalho a quente, a estrutura do material é refinada, de modo a aumentar sua tenacidade. Já o trabalho a frio deforma a estrutura cristalina do material, aumentando sua resistência e dureza mas diminuindo a ductilidade. Essas alterações podem ser desejáveis em algumas aplicações, se caso não forem convenientes, elas podem ser reduzidas com o tratamento térmico de recozimento;
- O trabalho a quente elimina porosidades e segrega impurezas, escoria e outras inclusões são comprimidas na forma de fibra, aumentando assim a resistência do material em uma determinada direção;
- O trabalho a quente permite maiores reduções que o trabalho a frio, devido a constantes recristalizações que ocorrem na peça trabalhada;
- O trabalho a frio permite que a obtenção de dimensões dentro de estreitas faixas de tolerâncias e melhor acabamento superficial.

Segundo Bresciani Filho et al. (2011), o processo de laminação pode ser classificado como um processo de compressão direita, pois os cilindros de trabalho atuam com esforços de compressão sobre a peça. Considerando o princípio da conservação da massa e que em chapas a deformação lateral é muito menor do que a deformação longitudinal. Pode-se considerar que toda a redução ocorrida na seção transversal da chapa é transformada no alongamento da mesma. Como os cilindros de laminação apresentam a mesma velocidade periférica, pode-se afirmar que a chapa sai dos rolos com uma velocidade superior a velocidade que entrou.

Figura 6 – Representação esquemática, em perspectiva, do processo de laminação



Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

A partir da Figura 6, temos:

$$h_0.v_0.b_0 = h_1.v_1.b_1 \quad (1)$$

$$b_0 \approx b_1 \quad (2)$$

$$h_0 > h_1 \quad (3)$$

$$v_0 < v_1 \quad (4)$$

Onde:

$h_0 \rightarrow$ Altura da chapa antes de laminar [m];

$v_0 \rightarrow$ Velocidade da chapa antes de laminar [m/s];

$b_0 \rightarrow$ Largura da chapa antes de laminar [m];

$h_1 \rightarrow$ Altura da chapa após laminar [m];

$v_1 \rightarrow$ Velocidade da chapa após laminar [m/s];

$b_1 \rightarrow$ Largura da chapa após laminar [m];

Cada cilindro entra em contato com o metal segundo o arco AB, Figura 7. Que se chama arco de contato. A esse arco corresponde o ângulo α denominado por ângulo de contato e que pode ser definido pela equação (5).

Onde:

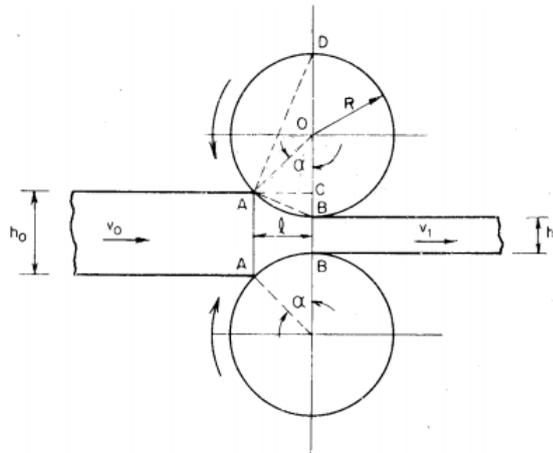
$h_0 \rightarrow$ Altura da chapa antes de laminar [m];

$h_1 \rightarrow$ Altura da chapa após laminar [m];

$R \rightarrow$ Raio do cilindro de trabalho [m];

$$\cos \alpha = 1 - \frac{h_0 - h_1}{2R} \quad (5)$$

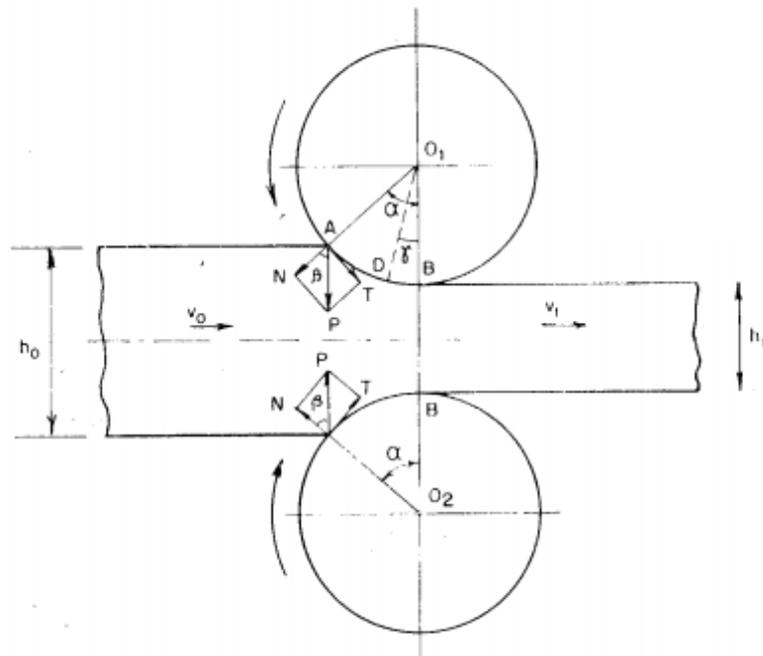
Figura 7 – Zona de deformação e ângulos de contato durante a laminação



Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

A Figura 8, mostra as principais forças que atuam durante todo processo de laminação, são elas: a força N, conhecida por força normal ou radial e a força T, que é a força tangencial ou de atrito.

Figura 8 – Esquema das forças atuantes no momento do contato do metal com os cilindros do laminador.



Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

Entre o plano de entrada AA e o ponto D, o movimento da placa é mais lento que o da superfície dos cilindros e a força de atrito atua no sentido de arrastar o metal entre os cilindros. Ao ultrapassar o ponto D, o movimento da placa é mais rápido que o da superfície dos cilindros. Assim, a direção da força de atrito inverte-se, de modo que sua tendência é opor-se a saída da placa dos cilindros (Chiaverini, 1986, 61).

A carga de laminação P é dada pela componente vertical da força radial N , e é definida como a força que os cilindros exercem sobre o metal. A pressão específica de laminação é a carga de laminação P dividida pela área de contato, e pode ser representada pela expressão (6):

$$\rho = \frac{P}{b \cdot L_p} \quad (6)$$

ρ → Pressão específica de laminação [Pa];

P → Carga de laminação [N];

b → Largura da placa [m];

L_p → Comprimento do arco de contato AB [m];

2.2 VIBRAÇÕES MECÂNICAS

2.2.1 INTRODUÇÃO

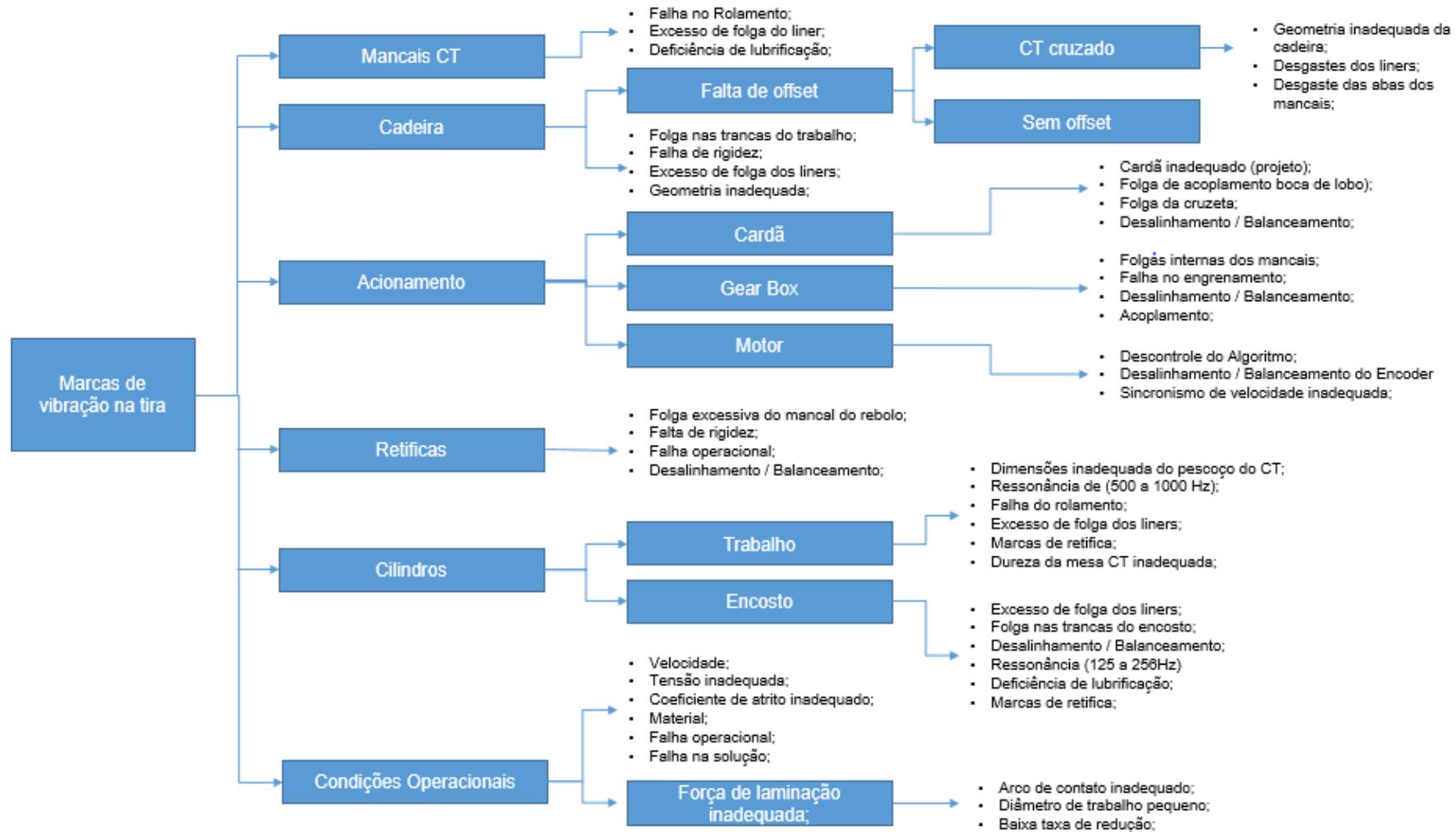
O processo de laminação a frio é o principal responsável pela produção de chapas planas de metal para o mercado. Com o objetivo de aumentar a produtividade, as empresas buscam sempre laminar as chapas metálicas na maior velocidade e com a máxima redução possível no processo. Entretanto, essas duas características estão diretamente relacionadas com as forças que causam o aumento das vibrações dentro dos laminadores. Quando ocorrem, as vibrações podem chegar a ocasionar variações na espessura e na qualidade superficial do produto laminado (HU; EHMANN, 2001). Então, com o objetivo de aumentar a produtividade, os lucros e garantir a qualidade do produto final oferecido, torna-se essencial

que pesquisas sejam conduzidas para que seja possível entender com mais clareza as vibrações que ocorrem dentro dos processos dinâmicos e preveni-las.

As vibrações mecânicas que ocorrem no processo de laminação são resultado das interações entre a estrutura do laminador e o processo de laminação. As forças dinâmicas observadas no processo acabam se refletindo na estrutura metálica do laminador, podendo causar variações no processo, como por exemplo o distanciamento dos rolos e/ou variação na velocidade de rotação dos mesmos (HU; EHMANN, 2001). Essas perturbações acabam causando variações na carga de laminação aplicada no processo, proporcionando novas vibrações e assim por diante. O estudo e os impactos causados por essas vibrações no processo de laminação, as quais são conhecidas como *chatter*, são de suma importância para a indústria de laminação.

O principal desafio em analisar as vibrações que ocorrem no processo, é justamente identificar quais são as fontes causadoras dessa situação. Ou seja, é necessário que se obtenha o maior conhecimento possível sobre as fontes causadoras dessa instabilidade no processo. A Figura 9 exemplifica algumas das possíveis fontes causadoras de marcas de vibração durante a laminação de tiras à frio.

Figura 9 – Fontes causadoras de marca de vibração em tiras

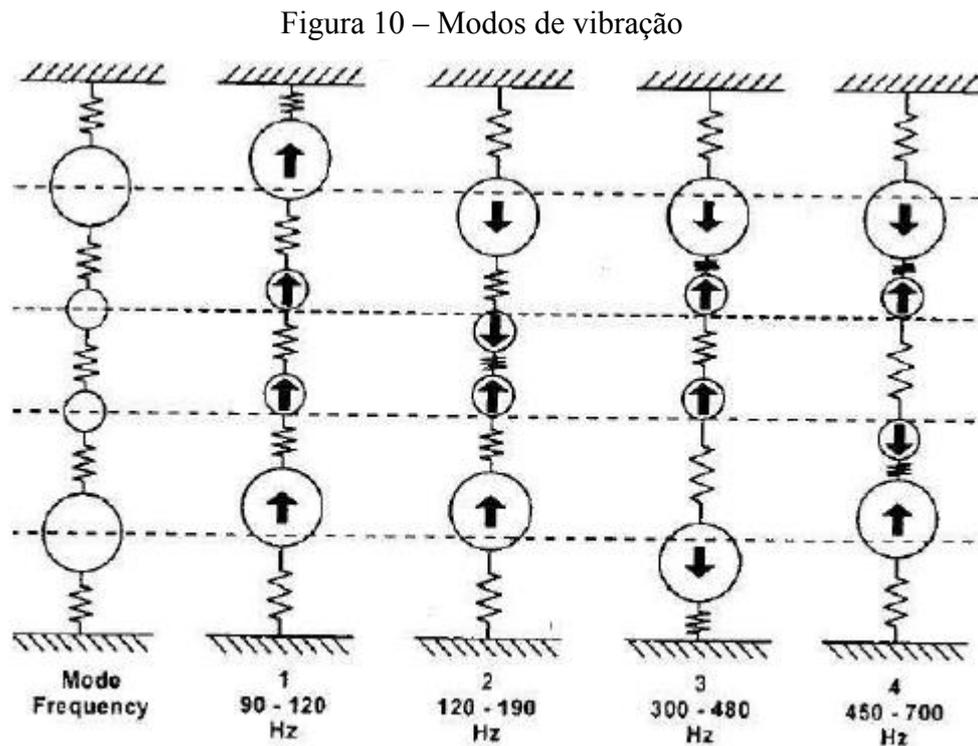


Fonte: adaptado, SKF, 2013

De acordo com Roberts (1978), o processo de laminação envolve forças vibracionais que são auto excitáveis. Ele as dividiu em três grupos, que são amplamente conhecidos no meio acadêmico e industrial. Esses modos de vibração estão classificados conforme exemplificado abaixo:

- *Chatter* torcional (*Torsional chatter*), esse tipo de vibração ocorre principalmente entre as frequências de 5 até 20 Hz;
- Terceira oitava (*Third Octave*) esse tipo de vibração ocorre principalmente entre as frequências de 125 até 240 Hz;
- Quinta oitava (*Fifth octave*) esse tipo de vibração ocorre principalmente entre as frequências de 500 até 700 Hz.

Na Figura 10 são apresentadas as forças impostas sobre os cilindros de laminação, conforme estudos conduzidos por Meehan (1998).



Fonte: adaptado, MEEHAN, 1998.

De acordo com Mabie (1980), toda estrutura rígida apresenta ao menos uma frequência natural de vibração. Para calcular essa frequência, pode-se utilizar a equação (7):

$$fn = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (7)$$

Sendo:

$fn \rightarrow$ Frequência natural [Hz];

$k \rightarrow$ Rigidez [N/m];

$m \rightarrow$ massa [kg].

Em seus estudos Remm-Min et al. (1993) determina como calcular a frequência de *chatter*.

$$fchatter = \frac{v}{D} \quad (8)$$

Sendo:

$f_{chatter} \rightarrow$ Frequência de *chatter* [Hz];

$v \rightarrow$ velocidade de laminação [m/s];

$D \rightarrow$ Distância entre as marcas.

De acordo com Machado Junior (2015), a ressonância ocorre quando há a combinação entre uma das frequências naturais do equipamento com uma de suas frequências excitadoras. Quando essa combinação ocorre, os níveis de vibração no sistema são elevados ao extremo, podendo causar severos danos ao equipamento. Quando essa combinação ocorre temos então uma das três situações anteriormente descritas por Roberts.

2.2.2 TORSIONAL CHATTER

De acordo com Yun et al. (1995) o *chatter* torsional é responsável por causar padrões de variação na espessura da chapa laminada e também alterações na refletividade de sua superfície. Esse tipo de *chatter* é observado sob baixas frequências e é geralmente causado pelo sistema de acionamento ou controle do motor.

2.2.3 CHATTER DE TERCEIRA OITAVA

Dos tipos de vibrações observadas nos laminadores, a de terceira oitava é considerada a mais grave de todas, pois esse tipo de *chatter* pode causar grandes variações na espessura do produto laminado, defeitos superficiais nas chapas laminadas e até danos no laminador (HU; ZHAO; EHMANN, 2006).

De acordo com Yun (1995) a terceira oitava ocorre entre as frequências de 120 a 300Hz. Inicialmente, esse fenômeno vibracional causa pequenas variações na espessura da tira, o que acaba criando uma componente dinâmica de força de laminação. Essa componente, flexiona a estrutura do laminador forçando uma variação entre a distância dos cilindros. Como resultado dessas interações, ocorre a variação das forças de laminação. Quando o estado de ressonância entre a estrutura do laminador e o processo de laminação é atingido gera-se instabilidade no processo.

Em seu estudo, Tamiya (1980) classifica o fenômeno de terceira oitava como auto excitável em função do processo. Também é válido ressaltar que essa condição causa oscilações de maneira defasada nos cilindros de trabalho, degradando a superfície da tira, podendo até mesmo levar a sua ruptura dentro do laminador (YARITA et al., 1978). De acordo com Yun (1995) a ruptura da chapa dentro do laminador devido as oscilações causadas pelo *chatter* de terceira oitava podem também danificar o equipamento. As rupturas geralmente ocorrem em situações onde se buscam alta velocidade e/ou grandes reduções, características essas que estão diretamente relacionadas a produtividade do laminador.

De acordo com Tamiya (1980), uma combinação de fatores acabam por favorecer o aparecimento do *chatter* de terceira oitava. São eles:

- Espessura da tira muito fina;
- Instabilidade na aplicação da solução;
- Ineficiência no processo de lubrificação, seja por falta ou por excesso da mesma;
- Alta velocidade de laminação;
- Tensão entre as cadeiras inadequada;
- Reduções muito baixa na chapa laminada;
- Reduções muito alta na chapa laminada;
- Variações repentinas no processo.

Roberts (1978) conclui que a otimização dos parâmetros operacionais, por exemplo o controle da carga de laminação, o controle do atrito entre chapa e rolo e das reduções da tira, podem minimizar a ocorrência do *chatter* de terceira oitava.

Entretanto, há também fontes externas que causam excitações no laminador, são elas:

- Instabilidade do sistema de acionamento;
- Cilindros desgastados;
- Folgas no acionamento;
- Folgas nos liners.

Portanto, se qualquer frequência de vibração externa coincidir com uma das frequências de vibração do *chatter* de terceira oitava, teremos formado o fenômeno de ressonância (Remn-Min, 1999).

2.2.4 CHATTER DE QUINTA OITAVA

Quando comparada com a vibração de terceira oitava, observa-se que os impactos são menores nas vibrações de quinta oitava, mas mesmo assim é de vital importância para o domínio do laminador, ter-se uma maior compreensão sobre os fatores que levam a essa vibração e quais são suas consequências.

Vibrações de quinta oitava são geralmente caracterizadas por causar marcas nas chapas laminadas, perpendicular a direção de laminação. Essas marcas podem também ser impressas nos rolos de laminação e conseqüentemente causar a vibração de terceira oitava.

Embora seja um pouco mais simples de controlar do que o *chatter* de terceira oitava, para se controlar o *chatter* de quinta oitava, é necessário que se tome medidas que podem diminuir a produtividade do laminador. Para evitar essa vibração, medidas tais como, alterar as velocidades de laminação, cuidadosamente selecionar os rolos que serão utilizados no laminador e previamente efetuar a troca dos rolos, tornam-se necessárias. Tais medidas irão com certeza reduzir a produtividade do laminador (HU; EHMANN, 2001).

Mesmo não causando grandes impactos com relação a espessura e a dureza da chapa laminada, a qualidade superficial da chapa e do rolo de laminação podem ser severamente danificadas pelo *chatter* de quinta oitava. Tiras escuras e claras perpendiculares a direção de laminação são impressas tanto na superfície superior da chapa quanto na superfície inferior (ROBERTS, 1978). De acordo com a intensidade das cores dessas tiras pode-se analisar o grau de severidade do fenômeno. Esse tipo de defeito superficial é mais crítico em

laminadores de mais de uma cadeira, principalmente quando se deseja obter chapas com acabamento superficial bem específicos, para atender a necessidade de um cliente. Por exemplo, muitas vezes essas chapas são utilizadas na indústria automobilística, a qual aplica uma fina camada de tinta sobre a chapa, se a chapa possuir essas tiras, elas ficarão evidenciadas com a tinta, o que não é aceitável pelo cliente. Esse tipo de vibração também frequentemente causa danos ao cilindro de apoio, fazendo com que sua troca seja antecipada e também reduzindo sua vida útil. Marcas axiais são impressas na superfície do rolo. Essas marcas podem ser regulares ou irregulares, quando irregulares geralmente ocorrerá danos nos rolos. Os mecanismos que causam as marcas irregulares ainda são desconhecidos (HU; EHMANN, 2001).

De acordo com Roberts (1978), como as vibrações de quinta oitava são causadas devido a movimentação dos cilindros de apoio em direção aos cilindros de trabalho, um simples modelo massa mola pode ser aplicado para estudar as fontes causadoras desse tipo de vibração no laminador. Após esse modelamento, considerando as condições dos rolos e dos parâmetros de processo Roberts sugeriu várias formas para se evitar a formação de vibração de quinta oitava, são elas:

- Alterar a velocidade de laminação;

Dada a crítica relação entre o diâmetro do *backup roll*, cilindro de apoio, e a velocidade de laminação. Os *backup rolls* estarão menos propícios a desenvolverem marcas de *chatter* se a velocidade do laminador for constantemente alterada. Ou seja, caso ocorra a formação de marcas de *chatter* sob determinada velocidade de laminação, essas marcas serão sobrepostas quando alterada a velocidade de laminação, evitando assim o agravamento da situação. Considerando que geralmente consecutivas corridas de uma determinada largura são feitas nos laminadores, isto proporcionaria as condições ideais para o agravamento das marcas de *chatter* nos cilindros. Entretanto, se tomada essa pequena alteração na velocidade de laminação como medida preventiva, ela se mostra uma boa forma de prevenção ao desenvolvimento do *chatter* e pode melhorar a performance do laminador, aumento o ciclo de utilização dos *backup rolls*.

- Em laminadores com mais de uma cadeira, utilizar os *backup rolls* de maior diâmetro nas últimas cadeiras;

Roberts (1978) também percebeu que em *backup rolls* de maior diâmetro, a gravidade dos impactos causados pelo *chatter* de quinta oitava eram menores, por esse motivo ele aconselha que seja dada prioridade a esse tipo de rolo nas últimas cadeiras de laminadores do tipo *tandem*. Também é sugerido que em caso de troca dos *backup rolls* devido a vibrações

excessivas, buscar colocar rolos com diâmetros diferentes dos que foram retirados, para tentar conter a vibração no laminador.

- Evitar utilizar *backup rolls* danificados;

No *chatter* de quinta oitava pode ocorrer que os *backup rolls* venham a se danificar no processo, caso isso ocorra, é recomendado que eles sejam retirados e retificados. Em casos mais severos, onde podem ser vistos até lascamentos da superfície do *backup roll* é fundamental garantir que toda camada comprometida seja retirada antes do retorno do rolo ao laminador. Em alguns casos é até sugerido que retificas programem-se para retirada de uma camada superficial do rolo a cada três ou quatro retificas normais. Apesar de ser uma medida inicialmente cara para a empresa, pois a vida útil desses rolos será reduzida, ela pode ser satisfatória considerando os prejuízos que podem vir a ocorrer se rolos de qualidade duvidosa forem utilizados.

- Evitar vibração nos laminadores;

Geralmente, em laminadores devidamente ajustados, as vibrações não atingirão níveis alarmantes. Entretanto, caso isso esteja ocorrendo, é necessário que medidas tais como a redução da velocidade de laminação e/ou seja reduzida a redução da seção transversal da chapa laminada, para evitar o agravamento da situação.

- Evitar fontes causadoras de vibração no laminador.

Por se tratar de uma estrutura rígida, as vezes uma outra parte do laminador, como um rolamento defeituoso ou falha no acoplamento do *spindle pod*, podem causar vibrações que serão transmitidas para a chapa. O *spindle pod* é o local onde a ponta do cilindro de trabalho acopla com o eixo que transmite o torque do motor. Um acoplamento defeituoso, irá gerar forças indesejáveis que serão transmitidas por toda a estrutura do laminador.

3. ESTUDO DE CASO

3.1 METODOLOGIA DE ESTUDO

Conforme apresentado pela Figura 9, há partes do laminador que são mais propícias a vibrações mecânicas que podem ser transmitidas para a chapa levando a formação do *chatter*. O intuito das discussões que virão a seguir irão objetivar na validação dessas informações, se essas regiões realmente podem impactar ou não na transmissão de vibrações, será estudado como lidar com essas situações adversas e analisar quais foram os impactos trazidos pela identificação do problema e da forma que se decidiu atuar, para orientar futuras intervenções em equipamentos que apresentam as mesmas características. Será também analisada algumas das frequências naturais do laminador, através de estudos conduzidos em parceria com a SKF, para que se possa evitar que o laminador opere na mesma frequência que a sua natural.

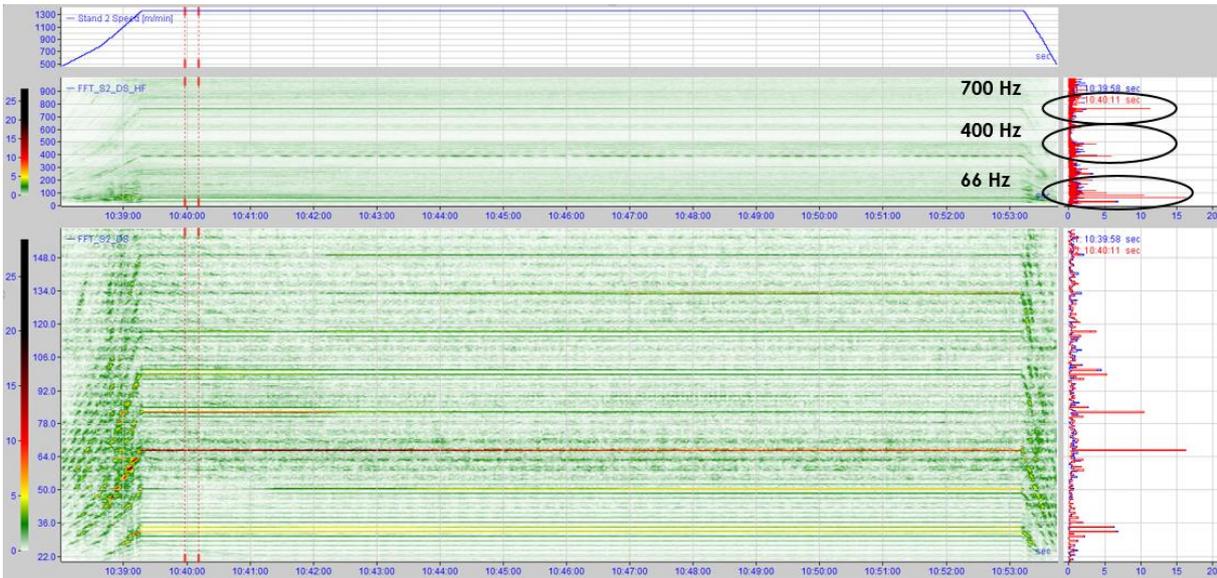
Dentre os parâmetros avaliados destacam-se:

- Levantamento do diâmetro externo dos pescoços dos *work rolls*;
- Levantamento do diâmetro interno dos *spindle pod*;
- Inspeção das engrenagens da caixa redutora da cadeira 1;
- Inspeção das engrenagens da caixa redutora da cadeira 2.

Para obtenção dos dados que registram as vibrações mecânica, acelerômetros foram instalados na parte superior do laminador, de forma a registrar as vibrações que de fato se transferem para a estrutura física do laminador. Quando vibra, o laminador desloca a ponta do acelerômetro e sinais elétricos são enviados e armazenados no CPU. Para efetuar a leitura e interpretação dos dados foi utilizado o software *IBA Analyser*.

Na Figura 11 segue os registros obtidos no laminador nos primeiros meses de pesquisa.

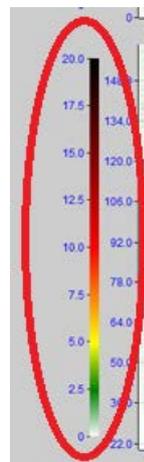
Figura 11 – Espectro de vibração 1



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

A legenda à esquerda representa a intensidade da vibração registrada, sendo que as cores claras estão associadas a amplitudes baixas de vibração enquanto que as cores mais escuras estão associadas as amplitudes mais altas, que são indesejáveis. A Figura 12 apresenta essa legenda, que se inicia em 0 mg (miligravidade) e vai até 20 mg.

Figura 12 – Escala de vibração



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Os três gráficos no centro da Figura 11 representam a velocidade de laminação e o espectro de vibração registrado, iniciando na frequência de 0 Hz e medindo até 1000 Hz. Na parte inferior é aplicado uma ampliação no espectro evidenciando os níveis de energia registrados na frequência de 0 até 150 Hz.

O valor registrado no acelerômetro é traduzido para interpretação nos gráficos localizados a direita da Figura 11, onde está apresentada a amplitude da vibração. Para o caso apresentado nessa Figura, observa-se que amplitudes mais altas estão associadas a região de 700 Hz, 400Hz e 66Hz, essas regiões serão estudadas mais a fundo nesse capítulo.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, toda estrutura que possui massa irá apresentar ao menos uma frequência natural de vibração. Deve-se portanto, buscar operar um equipamento em uma zona de conforto, ou seja, fora das frequências naturais do equipamento.

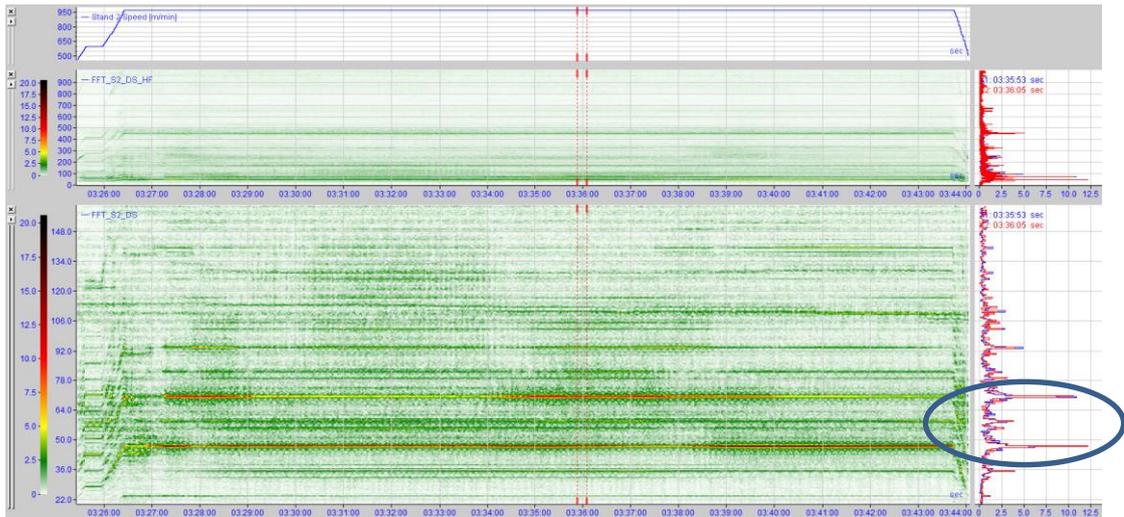
Por se tratar de equipamentos rotativos, como eixos e engrenagens, teremos também as frequências fundamentais de cada elemento, essas frequências irão variar conforme a velocidade de laminação aumenta ou diminui, essas frequências irão gerar componentes dinâmicas no laminador.

Para evitar que o conjunto entre em ressonância ou cause marcas de *chatter* é essencial que as frequências fundamentais não coincidam com as frequências naturais do laminador. O Anexo A, apresenta o cálculo para a determinação das frequências fundamentais do eixo de alimentação da caixa redutora, do trem de engrenagens, do eixo de saída da caixa redutora, dos cilindros de trabalho e dos cilindros de apoio, para as cadeiras 1 e 2 do laminador. Com base nesses cálculos e as vibrações registradas no software atuou-se de forma a controlar e reduzir seus impactos.

3.2 REGIÃO DE CONTATO CILINDRO DE TRABALHO E SPINDLE POD

Na Figura 13, observa-se a faixa de frequência de 0 até 150 Hz onde são identificados vários picos de energia, cuja a intensidade chega a ultrapassar 10 mg.

Figura 13 – Espectro de vibração 2



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

A Figura 14 representa uma situação crítica, esquerda, em contraposição com uma situação boa, direita.

Figura 14 – Espectro de vibração bom x ruim



Bom

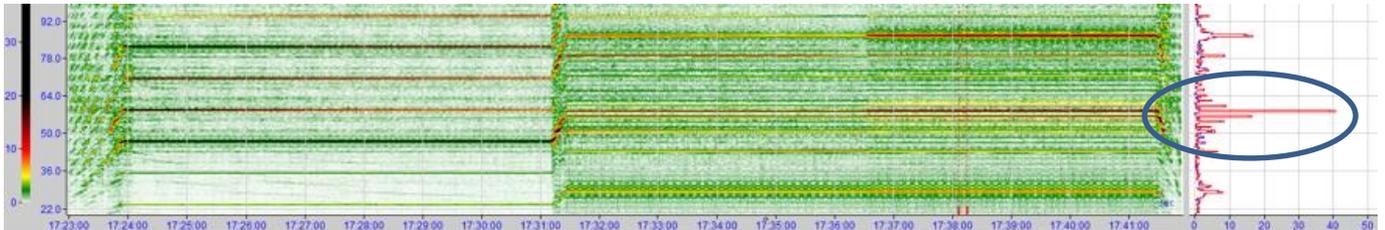
Ruim

Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Esse mesmo perfil de vibração foi observado em várias bobinas, sendo que para este caso específico a chapa laminada estava na velocidade de 950 [m/min], em outros casos

também analisados a amplitude de vibração chegava a atingir níveis ainda mais altos, como 40 [mg], Figura 15.

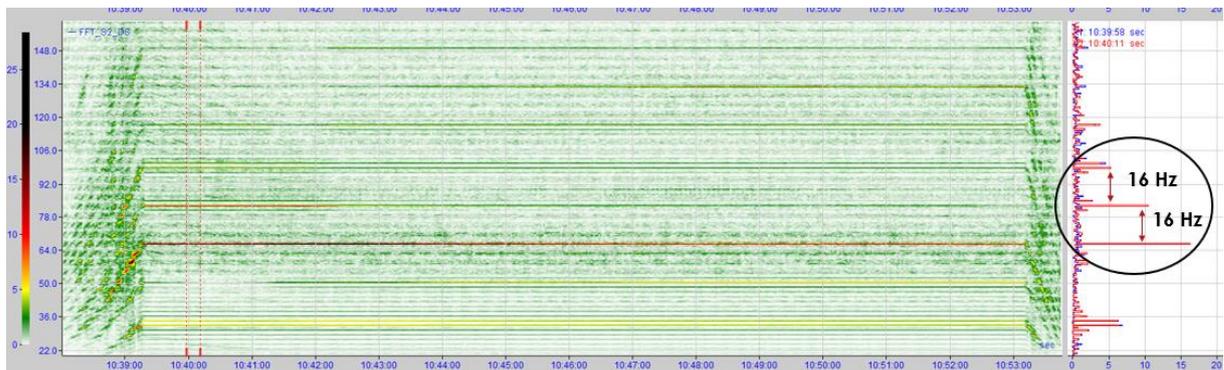
Figura 15 – Espectro de vibração 3



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Iniciando a análise pela região de 0 até 150 Hz, onde o problema é mais crítico, identifica-se que o espaçamento entre as bandas laterais de vibração ocorrem a cada 16 Hz, Figura 16. De acordo com os cálculos efetuados no Anexo A nos direciona para problemas na região do *work roll*.

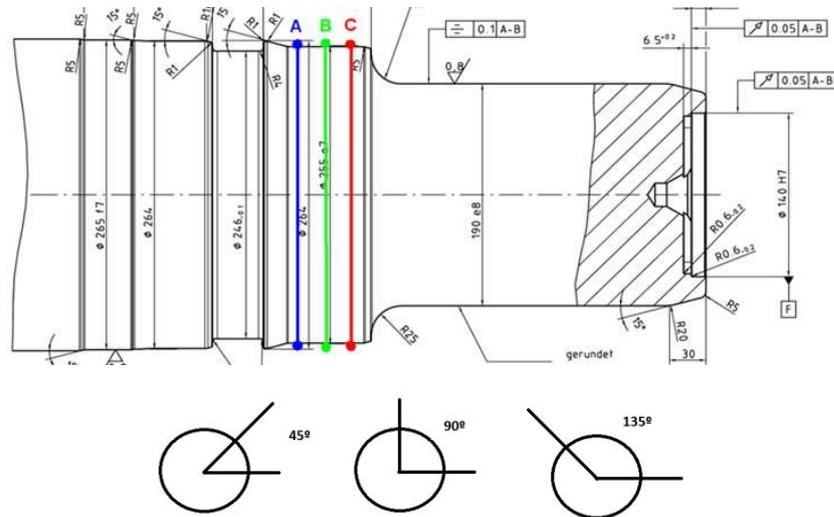
Figura 16 – Espectro de vibração 4



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Essa análise também vai ao encontro com a teoria apresentada na Figura 9 onde foi afirmado que a dimensão inadequada do pescoço do cilindro de trabalho pode causar incitações que fazem o laminador vibrar, validando a hipótese de que algo realmente pode estar errado no cilindro de trabalho.

Em etapa inicial foi efetuada a medição do pescoço de todos os cilindros de laminação utilizados no laminador.

Figura 17 – Pescoço do *work roll*

Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

De acordo com o desenho do cilindro de trabalho, a medida do pescoço que entra em contato com o *spindle pod* deve possuir a dimensão de $255e7$, o que de acordo com a NBR 6158 Sistemas de tolerâncias e ajustes nos dará as cotas de 254,890 e 254,828, para limites superior e inferior respectivamente.

Então com a utilização de um micrômetro, Figura 18, foram medidos o pescoço do cilindro em 9 diferentes pontos, variando entre as posições A, B e C, e os ângulos de 45°, 90° e 135°, representados na Figura 17. Parte dos dados obtidos são apresentados na Tabela 1.

Figura 18 - Micrômetro



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

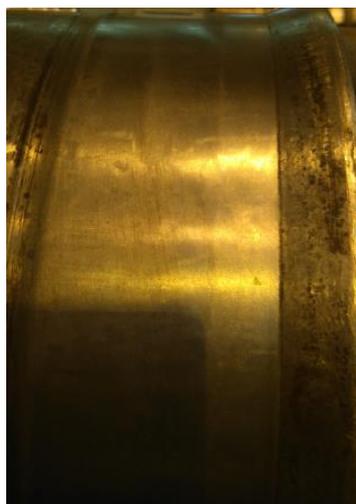
Tabela 1 – Medidas do pescoço dos cilindro de trabalho.

Cilindros	D1 - 90°				D2 - 135°				D3 - 45°				Média do WR	Média do par
	A	B	C	D1	A	B	C	D2	A	B	C	D3		
104929	254,88	254,90	254,90	254,900	254,88	254,88	254,89	254,885	254,83	254,83	254,83	254,830	254,872	254,884
104928	254,89	254,91	254,90	254,905	254,90	254,91	254,88	254,895	254,90	254,90	254,88	254,890	254,897	
100290	254,91	254,83	254,83	254,830	254,87	254,86	254,86	254,860	254,86	254,86	254,85	254,855	254,848	254,841
100289	254,85	254,81	254,81	254,810	254,85	254,83	254,84	254,835	254,85	254,86	254,85	254,855	254,833	
104920	254,87	254,85	254,85	254,850	254,88	254,88	254,86	254,870	254,89	254,85	254,85	254,850	254,857	254,847
104921	254,86	254,82	254,85	254,835	254,91	254,83	254,84	254,835	254,94	254,84	254,84	254,840	254,837	
116103	254,86	254,84	254,85	254,845	254,84	254,84	254,84	254,840	254,85	254,84	254,84	254,840	254,842	254,847
112653	254,87	254,85	254,85	254,850	254,84	254,84	254,85	254,845	254,87	254,86	254,86	254,860	254,852	

Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Como pode-se observar, os dados coletados ainda estão dentro dos valores previstos no projeto. Inspeções visuais nos cilindros também confirmam que eles estão em boas condições superficiais, Figura 19.

Figura 19 – Pescoço do cilindro de trabalho



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Concluindo que o desgaste não estava partindo dos cilindros de trabalho, partiu-se para a análise da peça na qual o cilindro se encaixa dentro do laminador, o *spindle pod*. Com a utilização de um micrômetro tubular, Figura 20, o procedimento medição foi executado.

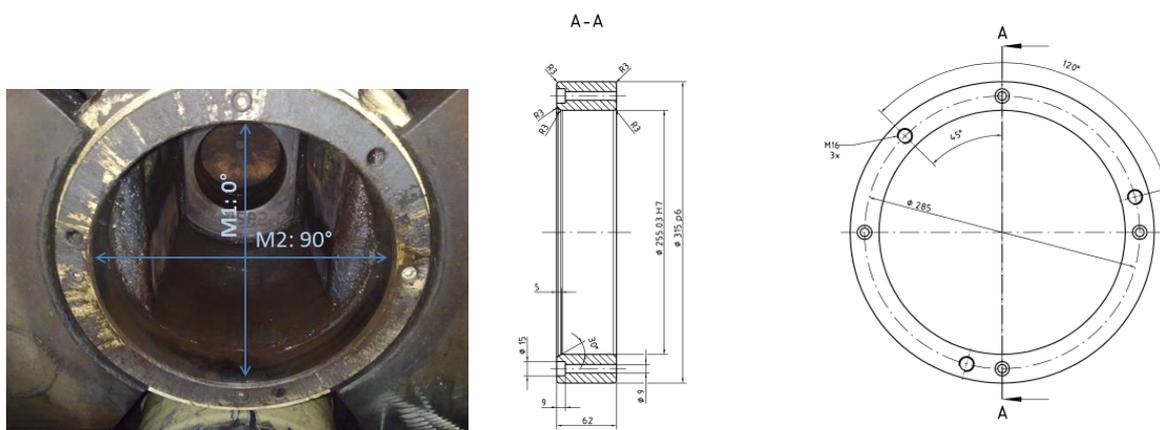
Figura 20 – Micrômetro tubular



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

A Figura 21 representa as dimensões da região do *spindle pod* que entra em contato com o cilindro de laminação. O diâmetro da região de contato é 255,03H7 o que segundo a NBR 6158 nos dará as tolerâncias 255,082 e 255,030, para os limites superior e inferior respectivamente.

Figura 21 – *Spindle pod*



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Com a utilização de um micrômetro tubular, foi executada a medição da região interna do *spindle pod*, nas posições M1 e M2, conforme representado na Figura 21. Os valores obtidos estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 – Medida do *spindle pod*

	M1: 0°	M2: 90°
SUPERIOR	255,500	255,040
INFERIOR	255,460	254,960

Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

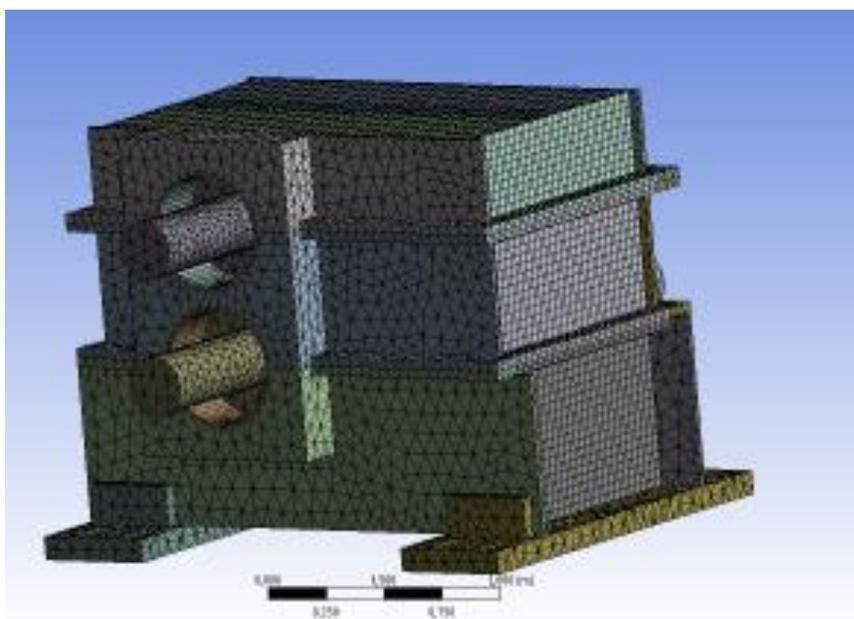
Como pode ser observado está nítido o desgaste do *spindle* na posição M1, vertical, com isso a cada rotação do cilindro de trabalho uma força vertical é gerada, causando uma componente de força que é transmitida para o laminador.

A medida tomada para atuar nesse problema foi a troca da peça da região de contato entre o pescoço do cilindro de trabalho e o *spindle pod*. Os resultados obtidos estão apresentados no Capítulo 4.

3.3 CAIXA REDUTORA CADEIRA 2

Através de um estudo conjunto desenvolvido junto a SKF foi determinado a frequência natural de vibração da caixa redutora. O modelo discretizado em 65688 elementos sólidos e 180004 nós, conforme mostrado na Figura 22.

Figura 22 – Discretização da caixa redutora



Fonte: SKF,2013

Foi efetuada a análise modal do conjunto, sendo determinado os oitenta primeiros modos do sistema. Conforme pode ser observado na Tabela 3.

Tabela 3 – Frequências naturais dos oitenta primeiro modos da carcaça do redutor de acionamento da cadeira 2 do laminador.

Modo	Frequência (Hz)	Modo	Frequência(Hz)	Modo	Frequência(Hz)
1,	104,94	28,	505,62	55,	758,72
2,	131,38	29,	526,88	56,	767,95
3,	164,89	30,	528,98	57,	771,13
4,	203,93	31,	548,37	58,	778,8
5,	210,72	32,	559,69	59,	787,77
6,	216,26	33,	570,93	60,	792,31
7,	308,92	34,	575,12	61,	799,17
8,	333,77	35,	602,04	62,	801,21
9,	336,51	36,	605,23	63,	806,75
10,	339,99	37,	630,57	64,	814,51
11,	355,34	38,	632,27	65,	822,63
12,	373,6	39,	646,95	66,	825,46
13,	395,71	40,	657,23	67,	839,15
14,	408,05	41,	667,68	68,	853,32
15,	410,86	42,	669,2	69,	858,71
16,	417,27	43,	671,81	70,	868,96
17,	424,55	44,	674,75	71,	880,88
18,	430,88	45,	678,04	72,	896,67
19,	436,21	46,	686,42	73,	905,4
20,	454,72	47,	697,4	74,	915,44
21,	458,87	48,	712,8	75,	921,02
22,	464,81	49,	716,71	76,	924,74
23,	470,38	50,	723,7	77,	940,76
24,	474,24	51,	733,7	78,	941,68
25,	488,42	52,	743,11	79,	944,68
26,	491,32	53,	744,84	80,	950,03
27,	495,67	54,	747,36		

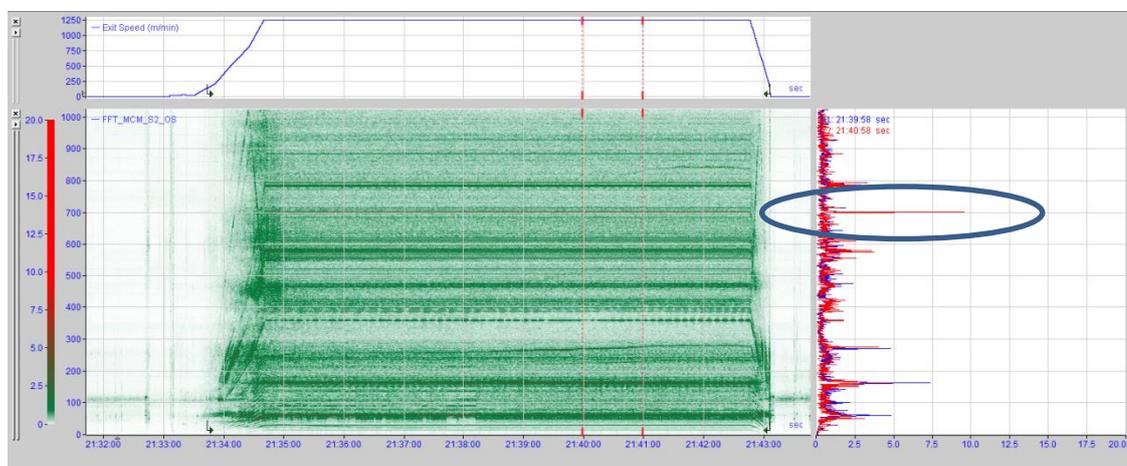
Fonte: SKF, 2013

De acordo com os dados apresentados na Tabela 3, observa-se que a partir do 48º até o 61º modo de vibração, apresentam frequência natural na região entre 700 e 800Hz. As quais estão muito próximas das frequências de engrenamento da cadeira 2, conforme calculado no Anexo A. Quando o sistema opera nessa frequência, geralmente entre as velocidades de 1200 até 1400 metros por minuto. O equipamento pode ser excitado e criar assim uma situação de ressonância no laminador.

O software também indica a vibração na frequência de 700 Hz na velocidade de 1250 m/min, conforme pode ser observado na Figura 23 e na Figura 24, Observa-se que a amplitude dessa região é mais elevada do que em regiões vizinhas, indicando que o sistema está vibrando naquela frequência.

Como essa gama de velocidade é muito utilizada para que seja atingida a produtividade requerida, torna-se necessário analisar os impactos que atuar nessa velocidade podem causar ao processo.

Figura 23 – Espectro de vibração 5



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 24 – Espectro de vibração região de 700 Hz



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

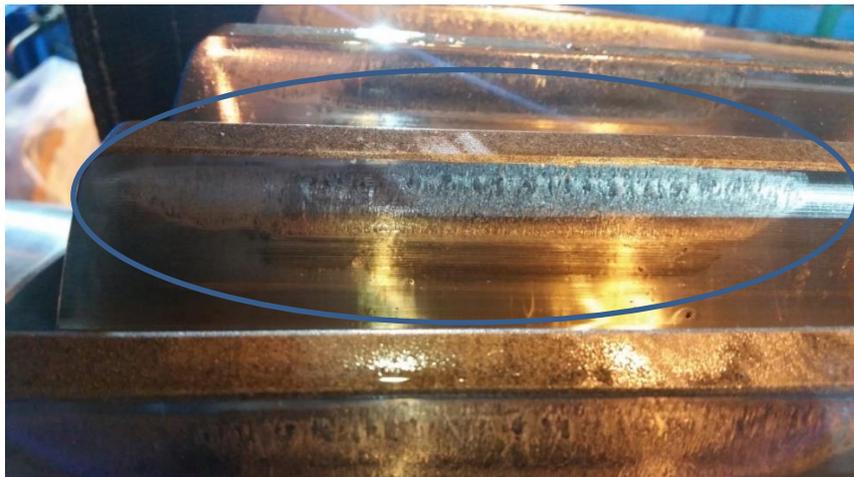
Abrindo a caixa redutora para inspecionar as engrenagens, observou-se que elas estavam apresentando desgaste no primeiro engrenamento. Conforme pode ser evidenciado em: Figura 25; Figura 26; Figura 27.

Figura 25 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 1



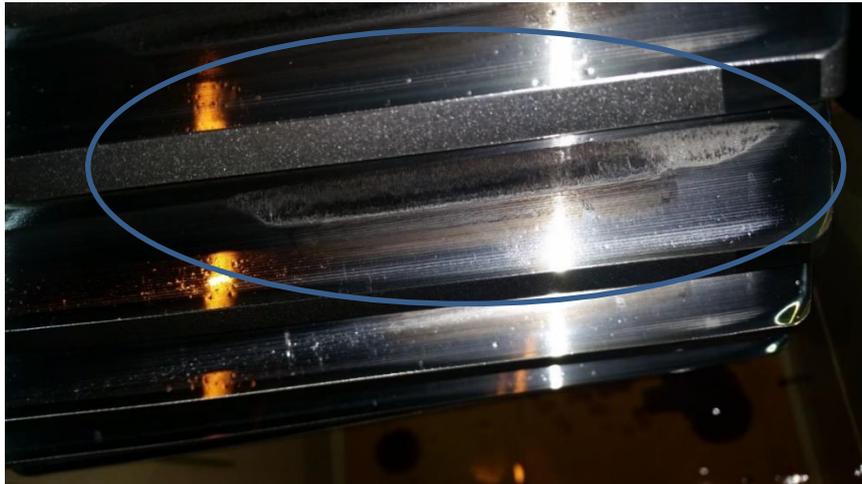
Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 26 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 2



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 27 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 2 – Imagem 3



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Com isso ficou comprovado que atuar nessa velocidade de laminação danos mais severos poderiam ocorrer nas engrenagens da caixa redutora.

3.4 CAIXA REDUTORA CADEIRA 1

Semelhante ao problema observado na cadeira 2. Foi detectado durante uma inspeção preventiva nas caixas redutoras um desgaste severo nos dentes das engrenagens da cadeira 1, conforme Figura 28; Figura 29; Figura 30; Figura 31.

Figura 28 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 1.



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 29 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 2.



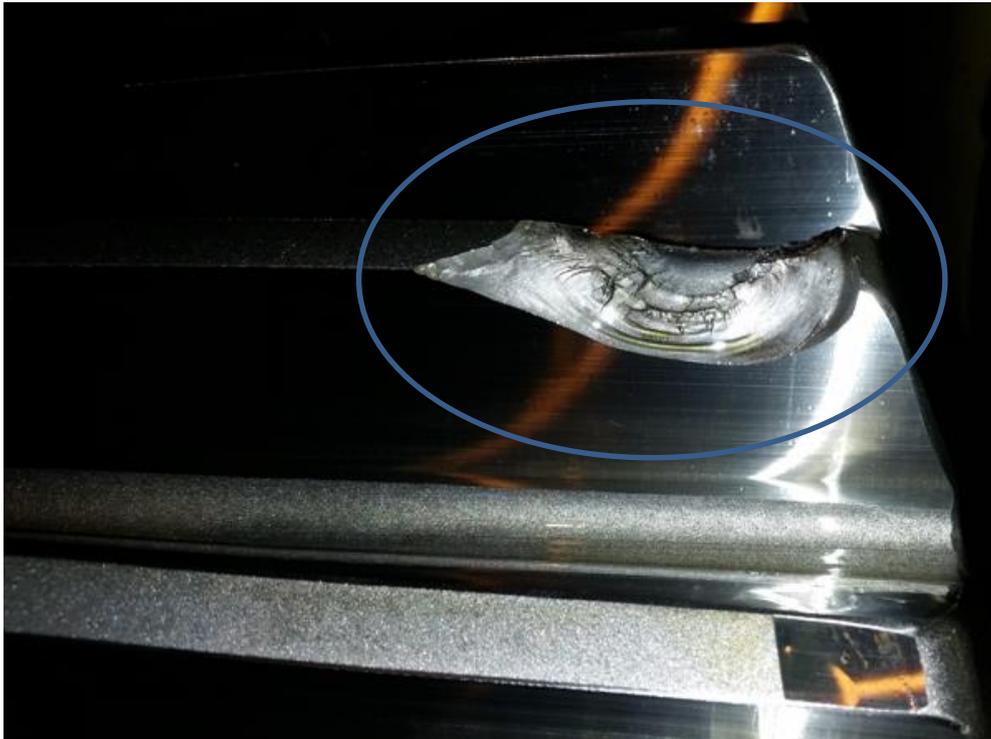
Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 30 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 3.



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

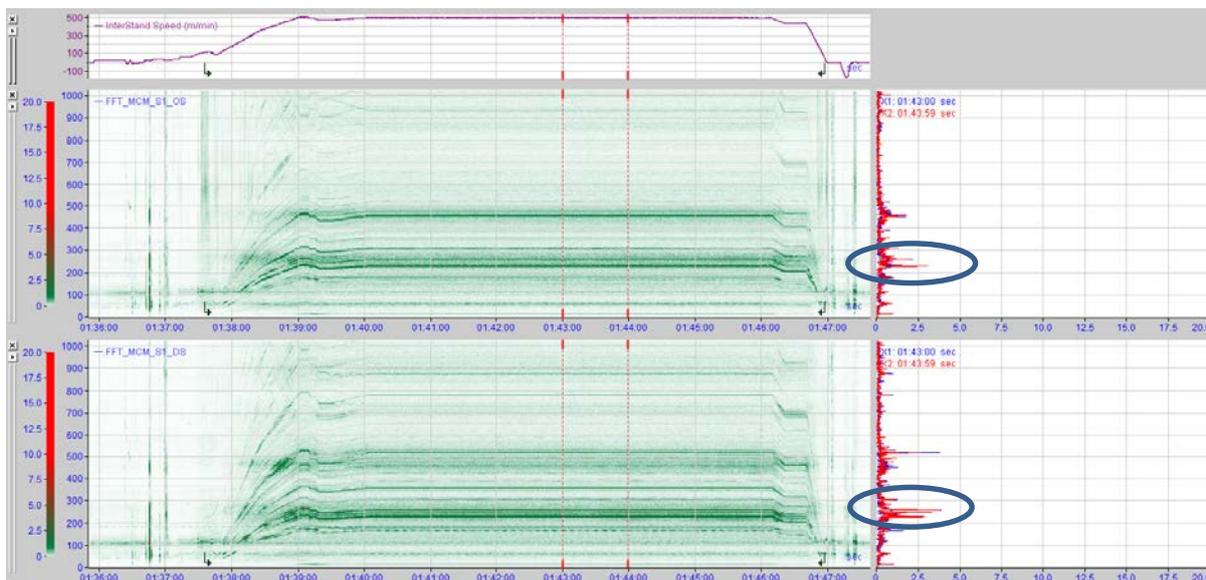
Figura 31 – Engrenagens da caixa redutora da cadeira 1 – Imagem 4.



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

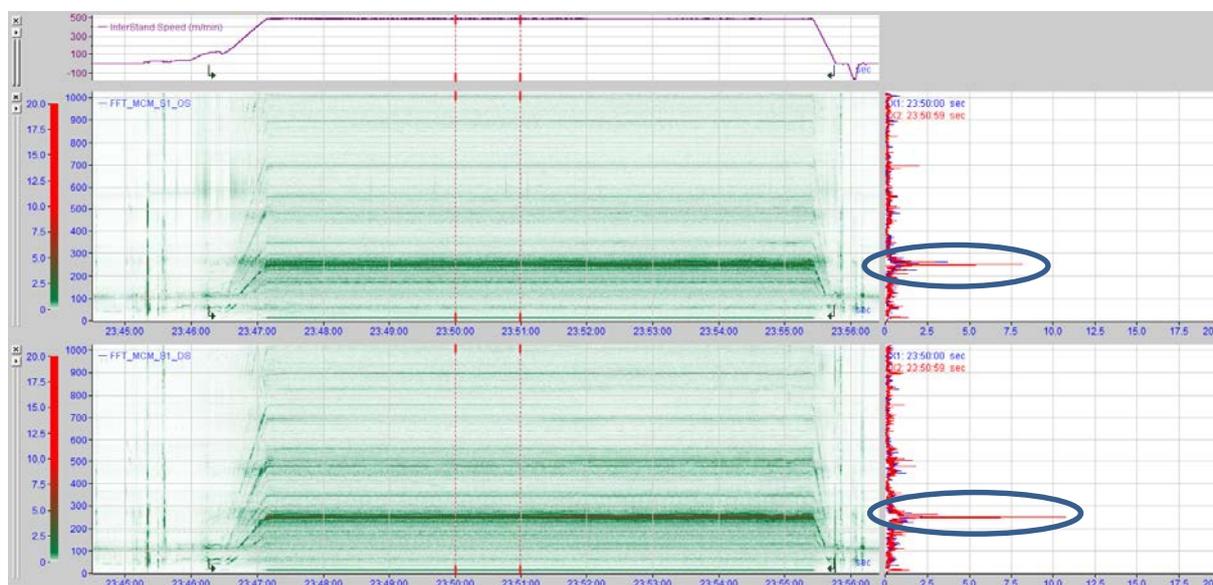
A velocidade média de operação da cadeira 1 é de 500 metros por minuto. Inserindo os parâmetros de redução da caixa e o diâmetro dos eixos, na planilha fornecida no Anexo A, obtemos uma das frequências fundamentais de engrenamento igual a 270 Hz. Fazendo o acompanhamento diário da evolução dos níveis de vibração nesta cadeira, observa-se que a situação vinha se agravando ao passar dos meses. Conforme Figura 32; Figura 33; Figura 34.

Figura 32 – Espectro de vibração 6 – 30 de agosto



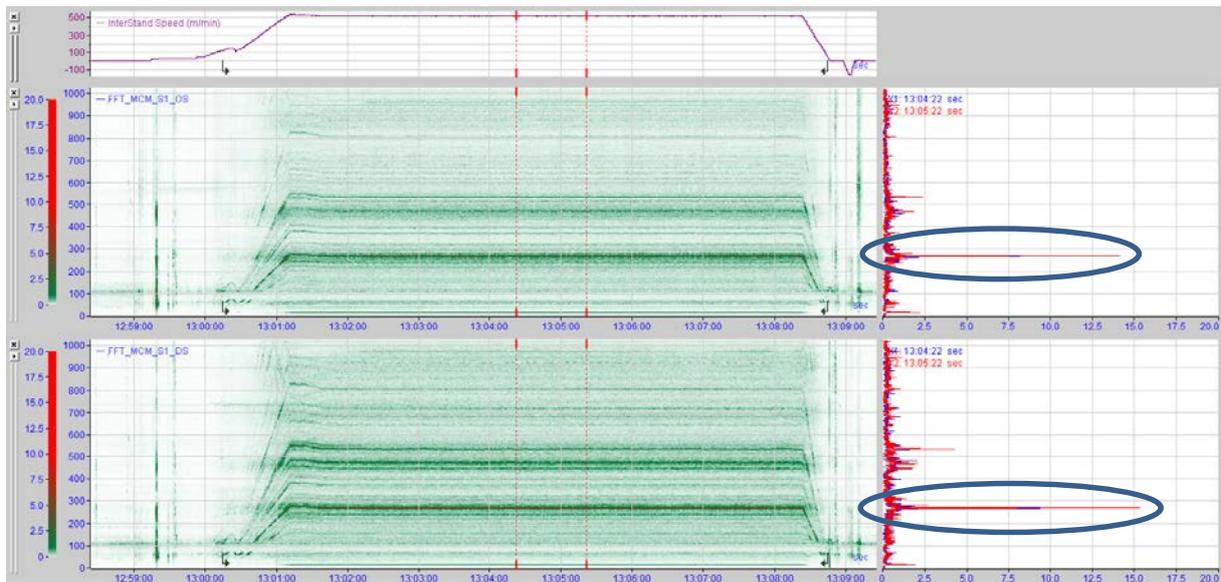
Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 33 – Espectro de vibração 7 – 30 de outubro



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 34 – Espectro de vibração 8 – 30 de novembro.



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Como o monitoramento de vibração não estava sendo efetuado diariamente nessa cadeira, os danos causados nas engrenagens tiveram tempo para se propagar. Isto evidencia mais uma vez a importância do monitoramento de vibração nos equipamentos, pois se tivesse sido identificado em fase inicial, uma medida preventiva poderia ter sido adotada de forma mais apropriada.

Observa-se na Figura 34, que as maiores amplitudes na cadeira 1 estão na faixa de frequência de 270 Hz, mesma frequência que foi obtida pelos cálculos do Anexo A para a cadeira 1.

4. RESULTADOS

4.1 REGIAO DE CONTATO CILINDRO DE TRABALHO E SPINDLE POD

Conforme foi apresentado na seção 3.1, níveis elevados de vibrações estavam ocorrendo a cada 16 Hz, o que de acordo com os cálculos efetuados no Anexo A indicam que possivelmente seria encontrado algum problema nos cilindros de trabalho. Em etapa inicial foram analisados todos os cilindros de trabalho, medindo cuidadosamente todos os pescoços em busca de informações que comprovassem o desgaste da região de contato. Entretanto, esse desgaste não foi de fato encontrado. Partiu-se então para a inspeção do local onde o cilindro de trabalho fica apoiado dentro do laminador, e nesse caso sim, foi identificado que estava ocorrendo o desgaste do anel dentro do *spindle pod*.

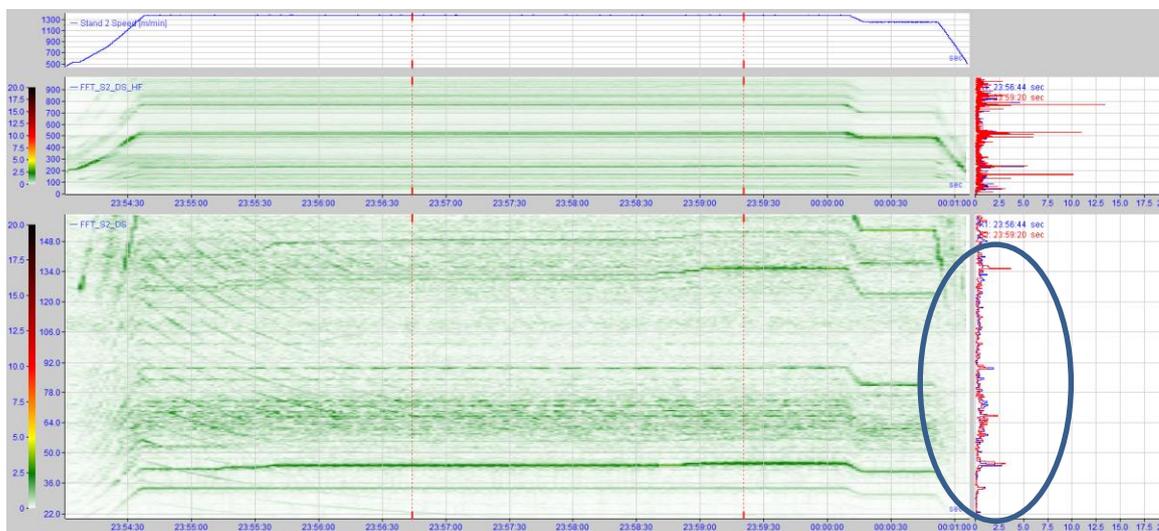
Para atuar nesse problema foram confeccionados novos anéis, Figura 35, para que fossem trocados dentro do laminador. Os resultados obtidos após essa troca estão evidenciados no espectro de vibração registrados na Figura 36.

Figura 35 – Anel *spindle pod*



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

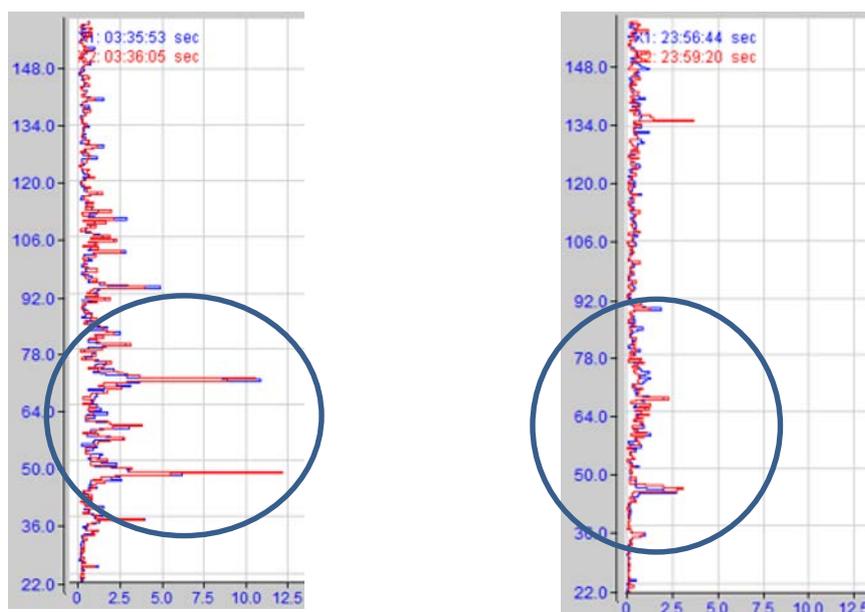
Figura 36 – Espectro de vibração 9



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Comparando os dados obtidos entre o anel antigo e o anel novo pode-se concluir que houve uma melhora significativa nas vibrações registradas, Figura 37.

Figura 37 – Espectro de vibração - Anel antigo x Anel novo



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Mesmo com a troca do anel, verificou-se que após 5 meses, esses níveis de energia com amplitudes mais altas voltavam a ocorrer. Inspeccionando novamente a região interna do *spindles*, obteve-se novamente a confirmação de desgaste na região M1, vertical. Por esse motivo torna-se fundamental que haja planos de manutenção preventiva para a inspeção dos anéis internos e a substituição dos mesmos sempre que necessário.

4.2 ENGRENAMENTO CAIXA REDUTORA DA CADEIRA 2

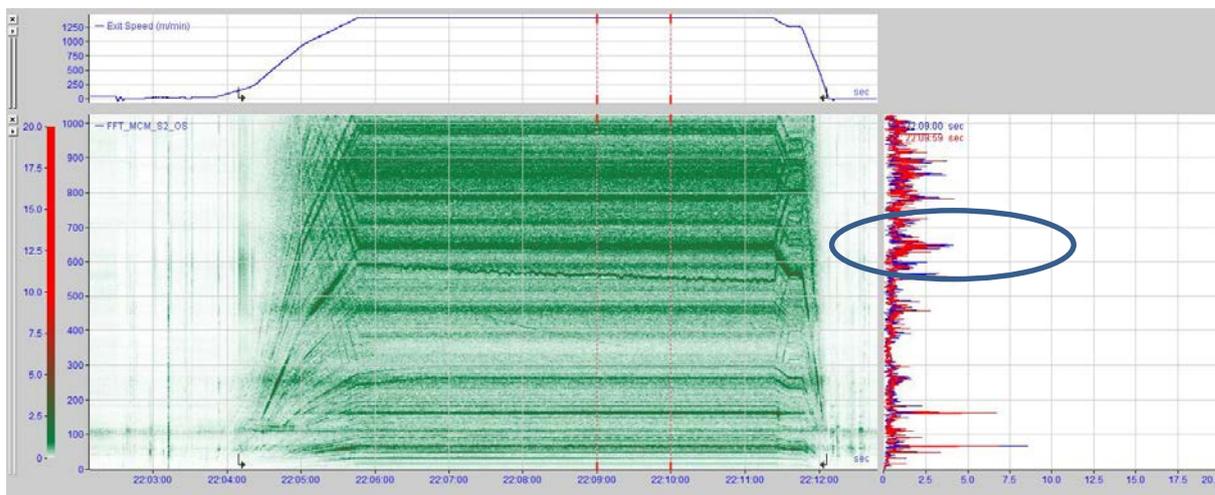
Conforme indicado no espectro de vibração e confirmado pelos cálculos realizados no Anexo A, as vibrações mecânicas na frequência de 700 Hz estavam sendo causadas devido a frequência fundamental de engrenamento estar em fase com uma das frequências naturais do laminador.

Uma solução para evitar que o sistema entre em ressonância é a limitação da velocidade de laminação, proibindo que o laminador opere acima da velocidade de 1000 m/min, nessa velocidade a frequência de engrenamento é 566 Hz, longe da frequência natural do laminador. Mas, essa solução é economicamente inviável, uma vez que a velocidade de laminação está diretamente ligada a produtividade da fábrica.

Torna-se então viável uma adaptação ao conjunto de engrenagens de modo a “mover” a frequência fundamental de engrenamento. Entrando em contato com a fabricante do sistema de redução foi elaborado um novo projeto onde se alterou o número de dentes da caixa redutora do lado do motor. Foi reduzindo z_1 de 39 dentes para 30 e z_2 de 46 para 35, mantendo o fator de redução da caixa próximo ao valor de projeto inicial, mas movendo a faixa da frequência de engrenamento para 600 Hz, conforme pode ser observado no Anexo A.

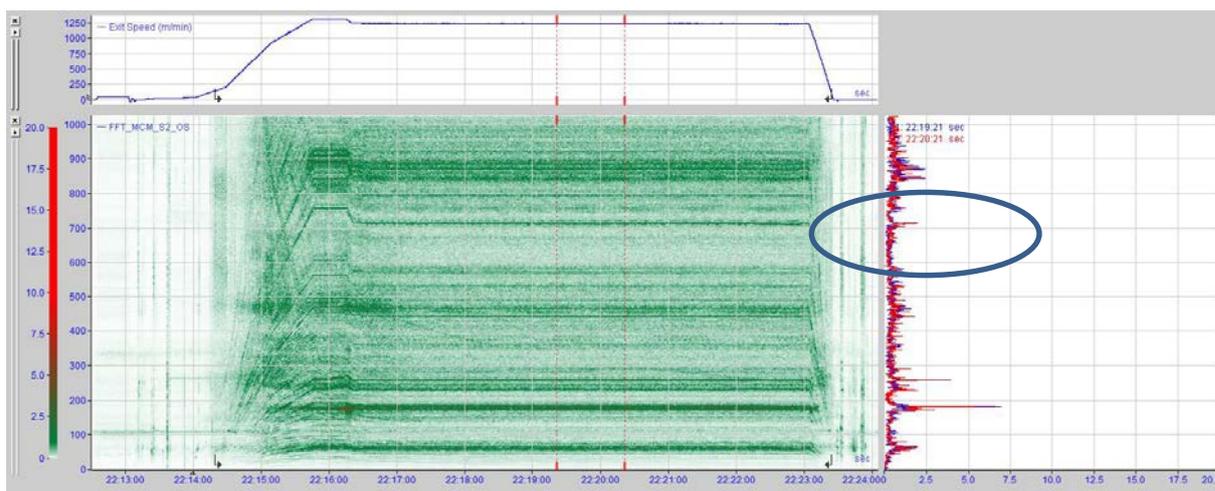
Após a troca, ficou evidenciado a melhoria no conjunto, Figura 38; Figura 39. Pois o novo par instalado não apresentou problemas de instalação e nem entrou em fase com a frequência natural do laminador.

Figura 38 – Espectro de vibração 10



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Figura 39 – Espectro de vibração 11



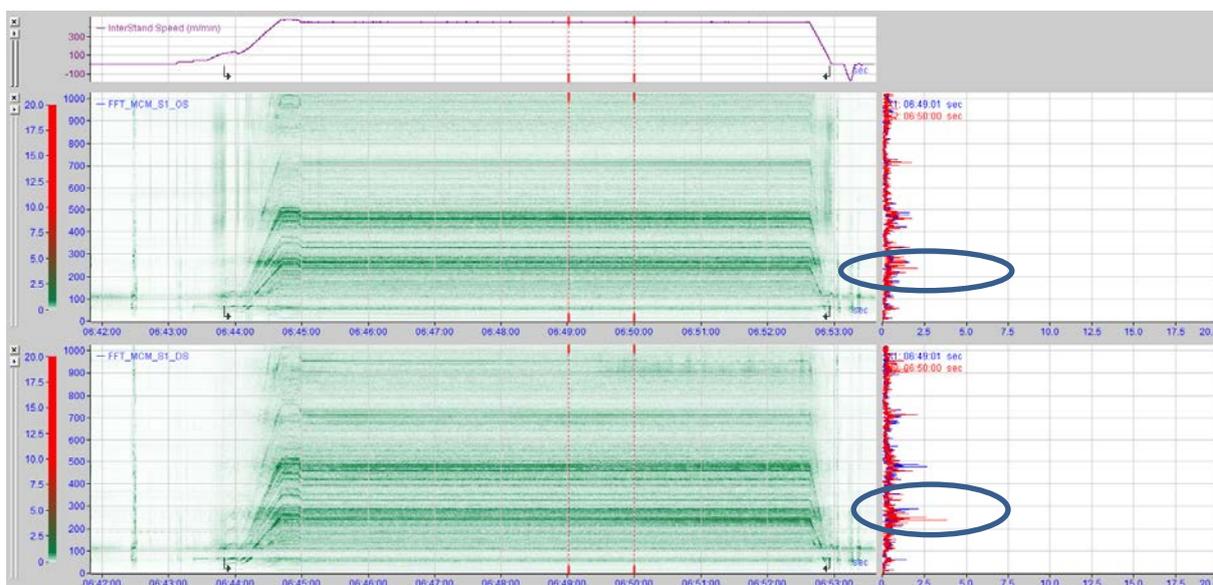
Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

4.3 ENGRENAMENTO CAIXA REDUTORA DA CADEIRA 1

Conforme apresentado na seção 3.4, o desgaste causado na engrenagem da cadeira 1 demorou para ser identificado, a causa raiz para a geração dessas lascas ainda não foi estudada a fundo e nem é o objetivo principal deste trabalho, entretanto, uma boa análise de vibração no laminador, poderia ter evidenciado essa tendência e chamado a atenção para um problema em potencial do laminador.

Como medida de contingência, a caixa redutora foi aberta e os dentes danificados foram reparados, essa ação representou uma boa redução na amplitude de vibração registrados no laminador, Figura 40.

Figura 40 – Espectro de vibração 12



Fonte: Fornecido pelo autor, 2015

Cabe agora a equipe conduzir o mesmo estudo que foi efetuado para a cadeira 2, levantando as frequências naturais de vibração do conjunto redutor e verificar se a mesma não está em ressonância com a frequência fundamental de engrenamento. Caso essa seja a situação, deverá ser novamente estudado o projeto e modificá-lo de forma a distanciar essas frequências.

5. CONCLUSÃO

Dentre as fontes causadoras de vibração no laminador, a descoberta realizada com relação o anel do *spindle pod* teve grande valor para o atendimento dos objetivos deste trabalho. Ficou evidenciado que o desgaste deste anel gerava uma pequena folga entre o pescoço do cilindro de trabalho e o *spindle pod*, criando assim, a cada revolução destes cilindros, uma componente dinâmica de força que agia na vertical, essa força era então transmitida por todo o laminador, podendo causar danos nos cilindros, na chapa laminada ou em outras partes do equipamento.

Também ficou evidenciado a importância do monitoramento das frequências naturais do laminador e das frequências fundamentais dos eixos e engrenagens. Pois quando as duas entram no estado de ressonância, os níveis de vibração atingem amplitudes elevadas, podendo colapsar o equipamento. O desgaste das engrenagens ficou evidenciado através dos estudos realizados nas caixas redutoras das cadeiras 1 e 2.

Deve-se ter em mente que vibrações fazem parte de qualquer estrutura mecânica, e que equipamentos de ponta, onde altas velocidades são impostas no processo (aproximadamente 1800 m/mim), um estudo minucioso desse assunto deve ser executado. As vibrações irão sempre existir, por esta razão, deve-se monitorar sua amplitude, para que se possa agir de forma preventiva, evitando problemas na qualidade do produto final e também contribuindo na confiabilidade do equipamento.

Finalmente, vale mais uma vez reforçar a importância do monitoramento das vibrações em equipamentos mecânicos. Pois além de garantir que o mesmo opere de forma correta, garantindo a qualidade final do produto, os dados coletados podem auxiliar na identificação de problemas que acabam passando despercebidos em manutenções preventivas, dando um alerta para que a equipe se planeje com antecedência aos grandes problemas que podem ocorrer no equipamento.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, L. A. D. **Manual de Siderurgia: transformação**. 2. ed. São Paulo: Arte & Ciência, v. II, 1997.

BRESCIANI FILHO, E. et al. **Conformação plástica dos metais**. 6. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2011.

CHIAVERINI, V., **Tecnologia Mecânica**. 2. ed. São Paulo: Mc Graw Hill, Volume II, 1986.

CIMM, **Centro de informação metal mecânica**. Disponível em <http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico>. Acesso em: ago. 2015.

DIETER, G.E., **Metalurgia Mecânica**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1981.

HU, P. H.; EHMANN, K. F. **Fifth octave mode chatter in rolling**, Northwestern University, Evanston, Illinois, 2001.

HU, P. H.; ZHAO, H.; EHMANN, K. F. **Third-octave-mode chatter in rolling, Part I: chatter model**. Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA 2006, pp 1267-1277.

MABIE, H. H., FRED, W. O., **Mecanismos e Dinâmica das Maquinas**. 2. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1980.

MACHADO, O. I., Jr. **Estudo e aplicação de diferentes métodos de resolução para problemas dinâmicos não-lineares em presença de atrito**. 2015. 57 f. Trabalho de

Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

MEEHAN, P. A. W.; JOHN, E.; GLEN A. W. **Modelling** and simulation of vibration phenomena in rolling mills. In: 7.INTERNATIONAL CONFERENCE ON STEEL ROLLING, Tokyo, Japan - October 1998.

NOVELIS ROLLING GROUP. **Novelis rolling course notes 2008**. 2008.

REMUN-MIN, G.; **Analysis of Dynamic Behaviors of Tandem Cold Mills Using Generalized Dynamic and Control Equations**. In: IAS/IEEE CONFERENCE, PHOENIX, **proceedings** AZ, Oct 9-13, 1999.

ROBERTS, W. L. **Cold Rolling of Steel**, New York: Marcel Dekker, 1978.

SKF. **Estudo do comportamento dinâmico da cadeira do laminador CM3**. 2013.

SLACK, N., BRANDON, A., JOHNSTON, R., **Operations Management**. 7. ed. Harlow: Pearson, 2013.

TAMIYA, T. F. K.; IIDA, H. **Analysis of chattering phenomena in cold rolling**. In: Proc. Int. Conf. on Steel Rolling, Tokyo (1980), pp.1191-1202.

YARITA, I.; FURUKAWA, K.; SEINO, Y. **An Analysis of Chattering in Cold Rolling for Ultra thin Gage Strip Steel**. Transactions of the Iron and Steel Institute of Japan, Vol. 19, 1978, p 1-10.

Yun, I. S.; **Chatter in rolling**. PhD Thesis, Northwestern University, Evanston, Illinois, 1995.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

HU, P. H.; ZHAO, H.; EHMANN, K. F. **Third-octave-mode chatter in rolling, Part II: stability of a single-stand mill.** Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA 2006, pp 1279-1292.

HU, P. H.; ZHAO, H.; EHMANN, K. F. **Third-octave-mode chatter in rolling, Part III: stability of a multi-stand mill.** Department of Mechanical Engineering, Northwestern University, Evanston, Illinois, USA 2006, pp 1293-1303.

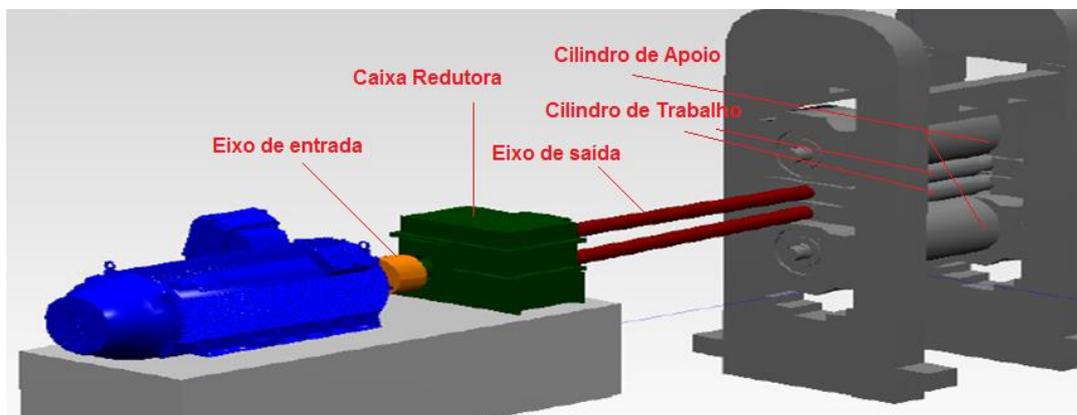
ANEXO A

Aqui será demonstrado como foi efetuado o cálculo das frequências fundamentais de partes cruciais do laminador. São elas:

- Eixo de entrada da caixa redutora;
- Engrenagens internas da caixa redutora;
- Eixo de saída da caixa redutora;
- Cilindros de trabalho;
- Cilindros de apoio.

Vale ressaltar que essas representam apenas uma pequena parcela dos equipamentos que compõem o laminador. Um estudo mais aprofundado deve englobar também os rolamentos dos mancais dos cilindros e outros eixos que fazem parte do laminador.

Figura 1 – Desenho representativo da cadeia de laminação



Fonte: adaptado, SKF, 2013

Serão demonstrados os cálculos para a determinação das frequências fundamentais desses equipamentos. Como a frequência fundamental varia de acordo com a velocidade de laminação serão demonstrados os cálculos para a obtenção da frequência sob diferentes velocidades, os resultados aqui obtidos irão auxiliar nas interpretações dos gráficos de vibração demonstrados nos capítulos 3 e 4.

CÁLCULOS PARA CADEIRA 2.

Antes de iniciar os cálculos é fundamental conhecer alguns parâmetros do laminador, como o diâmetro dos cilindros de trabalho, o diâmetro dos cilindros de apoio, fator de redução da caixa, número de dentes dos trens de engrenagem. Os dados utilizados seguem na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados da cadeira 2

Diâmetro do cilindro de trabalho	0,431 [m]
Diâmetro do cilindro de apoio	1,383 [m]
Fator de redução i	1.17
Engrenagem lado do motor z1	39
Engrenagem lado do motor z2	46
Engrenagem lado pinhão z1	29
Engrenagem lado pinhão z2	29

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

Para calcularmos a frequência fundamental dos cilindros de apoio devemos então dividir a velocidade na qual a chapa está sendo laminada pelo comprimento de uma rotação do cilindro de trabalho:

$$n_{\text{cilindro de trabalho}} = \frac{\text{velocidade de laminação}}{\pi \times D_{\text{cilindro de trabalho}} \times 60} \quad (1)$$

A mesma equação pode ser aplicada para a determinação da frequência fundamental dos cilindros de apoio, porém, ao invés de utilizar o diâmetro dos cilindros de trabalho, deve-se utilizar o diâmetro dos cilindros de apoio:

$$n_{\text{cilindro de apoio}} = \frac{\text{velocidade de laminação}}{\pi \times D_{\text{cilindro de apoio}} \times 60} \quad (2)$$

Conhecendo a frequência fundamental dos cilindros de trabalho, automaticamente sabemos a frequência fundamental dos eixos de saída da caixa redutora. Pois não ocorre nenhuma redução entre esses dois eixos, como pôde ter sido observado na Figura 1.

$$n \text{ eixo de saída} = n \text{ cilindro de trabalho} \quad (3)$$

Para determinarmos a frequência fundamental do eixo de entrada, basta multiplicarmos a frequência do eixo de saída pelo fator de redução da caixa.

$$n \text{ eixo de entrada} = n \text{ eixo de saída} * i \quad (4)$$

Finalmente, resta determinar a frequência de engrenamento, para isto devemos multiplicar a frequência de rotação do eixo pelo número de dentes da engrenagem:

$$n \text{ engrenamento 1} = n \text{ eixo de entrada} * z1 \text{ lado motor} \quad (5)$$

$$n \text{ engrenamento 2} = n \text{ eixo de saída} * z1 \text{ lado de saída} \quad (6)$$

Podemos montar uma planilha no Excel para várias velocidades de forma a facilitar a obtenção das frequências fundamentais de cada equipamento, Tabelas 2 e 3.

Tabela 2 – Dados de operação cadeira 2

Diâmetro do cilindro de trabalho [m]	0,431
Diâmetro do cilindro de apoio [m]	1,383
Fator de redução “i”	1,1795
z1 – pinhão motor	39
z2 – coroa motor	46
z1 – saída	29
z2 – saída	29

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

Tabela 3 – Planilha para cálculo da frequência fundamental de operação cadeira 2

Velocidade de laminação [m/min]	950	1000	1100	1200	1300
n cilindro de trabalho [Hz]	11,69	12,31	13,54	14,77	16,00
n cilindro de apoio [Hz]	3,64	3,84	4,22	4,60	4,99
n eixo de saída caixa redutora [Hz]	11,69	12,31	13,54	14,77	16,00
n eixo de entrada caixa redutora [Hz]	13,79	14,52	15,97	17,42	18,87
Frequência de engrenamento 1 [Hz]	537,90	566,21	622,83	679,45	736,08
Frequência de engrenamento 2 [Hz]	339,11	356,96	392,66	428,35	464,05

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

CÁLCULOS PARA CADEIRA 1

O mesmo procedimento utilizado para o cálculo das frequências fundamentais da cadeira 2 podem ser utilizados para o cálculo da cadeira 1, entretanto é fundamental que se altere os parâmetros de entrada de dados da tabela montada no Excel, como por exemplo, a velocidade de laminação, diâmetro dos cilindros de trabalho e de apoio, fator de redução da caixa redutora e o número de dentes das engrenagens, Tabela 4.

Tabela 4 – Dados de operação cadeira 1

Diâmetro do cilindro de trabalho [m]	0,42
Diâmetro do cilindro de apoio [m]	1,38
Fator de redução “i”	1,6800
z1 – pinhão motor	25
z2 – coroa motor	42
z1 – saída	29
z2 – saída	29

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

Com base nos dados apresentados e as equações já introduzidas, podemos determinar as frequências fundamentais, Tabela 5:

Tabela 5 – Planilha para cálculo da frequência fundamental de operação cadeira 1

Velocidade de laminação [m/min]	300	350	400	450	500
n cilindro de trabalho [Hz]	3,79	4,31	4,92	5,54	6,15
n cilindro de apoio[Hz]	1,15	1,34	1,53	1,73	1,92
n eixo de saída caixa redutora [Hz]	3,79	4,31	4,92	5,54	6,15
n eixo de entrada caixa redutora [Hz]	6,37	5,08	5,81	6,53	7,26
Frequência de engrenamento 1 [Hz]	159,15	198,17	226,48	254,80	283,11
Frequência de engrenamento 2 [Hz]	109,89	124,94	142,78	160,63	178,48

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

CÁLCULOS PARA CADEIRA 2, APÓS MODIFICAÇÃO DAS ENGRELAGENS.

Conforme proposto no capítulo 4, houve a modificação do par de engrenagens da cadeira 2, o sistema foi reprojeto de forma que o número de dentes da engrenagem pinhão reduziu de 39 para 30 e a engrenagem coroa reduziu de 46 para 35. Foi proposto essa redução com o objetivo de manter o fator de redução da caixa próximo ao projeto e deslocar a frequência de engrenamento para uma região mais confortável, Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 – Dados de operação cadeira 2

Diâmetro do cilindro de trabalho [m]	0,431
Diâmetro do cilindro de apoio [m]	1,383
Fator de redução “i”	1,1667
z1 – pinhão motor	30
z2 – coroa motor	35
z1 – saída	29
z2 – saída	29

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)

Tabela 7 – Planilha para cálculo da frequência fundamental de operação cadeira 2

Velocidade de laminação [m/min]	950	1000	1100	1200	1300
n cilindro de trabalho [Hz]	11,69	12,31	13,54	14,77	16,00
n cilindro de apoio[Hz]	3,64	3,84	4,22	4,60	4,99
n eixo de saída caixa redutora [Hz]	11,69	12,31	13,54	14,77	16,00
n eixo de entrada caixa redutora [Hz]	13,64	14,36	15,80	17,23	18,67
Frequência de engrenamento 1 [Hz]	409,27	430,81	473,90	516,98	560,06
Frequência de engrenamento 2 [Hz]	339,11	356,96	392,66	428,35	464,05

Fonte: Fornecido pelo autor (2015)