

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**FELIPE GOMES LEITE PINTO
VICTOR HUGO DA SILVA
VINÍCIUS MIRANDA RIBAS
WELTON FRANKLIN GUIMARÃES E SILVA**

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS NA
CADEIRA DE LAMINAÇÃO A FRIO**

VOLTA REDONDA

2019

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS NA
CADEIRA DE LAMINAÇÃO A FRIO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Mecânica do UniFOA como requisito à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica

Alunos:

Felipe Gomes Leite Pinto

Victor Hugo da Silva

Vinícius Miranda Ribas

Welton Franklin Guimarães e Silva Bueno

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Coorientador:

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

VOLTA REDONDA

2019

FOLHA DE APROVAÇÃO

Alunos:

Felipe Gomes Leite Pinto

Victor Hugo da Silva

Vinícius Miranda Ribas

Welton Franklin Guimarães e Silva Bueno

Título da Monografia

ANÁLISE DE VIBRAÇÃO E DIAGNÓSTICO DE FALHAS NA CADEIRA DE
LAMINAÇÃO A FRIO

Orientador:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Coorientador:

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira

Prof. Dr. Alexandre Fernandes Habibe

Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal

DEDICATÓRIA

Dedicamos este trabalho à Deus por mais este sonho realizado, a todos aqueles que de certa forma nos ajudaram ao longo dessa caminhada, aos nossos pais, familiares, amigos, professores e todos aqueles que torceram por nós.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus por nos dar saúde e nos permitir alcançar mais esse objetivo em nossas vidas. Agradecemos também aos nossos familiares, ao nosso orientador Prof. Dr. Alexandre Alvarenga Palmeira e ao coorientador Prof. Esp. Antônio de Pádua Sobreira Leal que com autoridade, discernimento e compromisso nos orientaram da melhor forma imaginável na conclusão desta monografia.

RESUMO

Esse trabalho irá abordar uma análise com relação a um dos relevantes problemas que a indústria de laminação a frio enfrenta na atualidade, as vibrações mecânicas, que influenciam diretamente na ocorrência do fenômeno *chatter* no decorrer do processo. Condições como alta produtividade e tiras com espessura cada vez mais finas fazem com que as vibrações se encontram presente a todo instante no decorrer da laminação. Essas condições também levam a indústria para a evolução tecnológica e assim trazer desafios da operação de um equipamento mais desenvolvido e potente. Tem como finalidade estudar as forças que ocasionam vibrações de ocorrência de *chatter* no decorrer do processo de laminação, pois se pretende detectar as causas dessas forças vibracionais para que se consiga anulá-las ou ao menos conter sua intensidade, para impedir que danos aconteçam no laminador e assegurar a qualidade do produto ao cliente. Com isso será usados instrumentos preparados para registrar e arquivar as vibrações que acontecem no decorrer do processo de laminação. Com essas informações poder-se verificar as características das vibrações e agir em sua eliminação. No final do trabalho espera-se mostrar o quanto é importante a análise do engenheiro sobre os gráficos associada aos cálculos da frequência natural de vibração. Com essas ferramentas será possível acrescentar na produtividade do laminador e trabalhar de forma preventiva em manutenções, aumentando o seu desempenho, eficiência e reduzindo seu tempo de parada.

Palavras-chave: *Chatter*; laminação; espessura, vibrações mecânicas.

ABSTRACT

This work will address an analysis of one of the relevant problems that the cold rolling industry faces today, the mechanical vibrations, that directly influence the occurrence of the chatter phenomenon during the process. Conditions such as high productivity and ever thinner thin strips mean that vibrations are always present during the rolling process. These conditions also lead the industry to technological evolution and thus bring challenges to the operation of more developed and powerful equipment. Its purpose is to study the forces that cause vibrations of chatter occurrence during the lamination process, because it is intended to detect the causes of these vibrational forces so that they can be annulled or at least contain their intensity, to prevent damages from happening in the laminator and ensure the quality of the product to the customer. This will use instruments designed to record and archive the vibrations that occur during the rolling process. With this information one can verify the characteristics of the vibrations and act on their elimination. At the end of the paper, it is expected to show how important the engineer's analysis of the graphs associated with natural vibration frequency calculations is. With these tools you can add to the productivity of the mill and work preventively on maintenance, increasing its performance, efficiency and reducing your downtime.

Keywords: *Chatter*; lamination; thickness, mechanical vibrations.

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	19
1.1 - Justificativa.....	20
1.1 - Objetivos	21
1.2 - Estrutura do Trabalho.....	21
1.3.1 - Capítulo 2: revisão bibliográfica.....	21
1.3.2 - Capítulo 3: caracterização do problema	21
1.3.3 - Capítulo 4: metodologia da análise.....	22
1.3.4 - Capítulo 5: conclusão	22
1.3.5 - Referências.....	22
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	23
2.1 - Processo de Laminação	23
2.1.1 - História	23
2.1.2 - Tipos de laminadores.....	23
2.1.3 - Mecanismo da laminação.....	26
2.2 - Vibrações	30
2.2.1 - Histórico da vibração	30

2.2.2 - Definição e conceitos.....	32
2.3 - Metodologia de Análise por Vibração.....	39
2.3.1 - Definição.....	39
2.3.2 - Formas básicas de monitoração.....	39
2.3.2.1 - Monitoração de segurança	39
2.3.2.2 - Monitoração preditiva	40
2.3.2.3 - Monitoração de performance	40
2.3.3 - Principais técnicas de monitoração	40
2.3.3.1 - Acompanhamento de medidas de vibração.....	40
2.3.3.1.1 - Acompanhamento dos picos.....	40
2.3.3.1.2 - Pico a pico	40
2.3.3.1.3 - Pico pico	41
2.3.3.1.4 - Médio retificado	41
2.3.3.1.5 - Análise de tendências.....	41
2.3.3.1.6 - Rms (root mean square)	41
2.3.3.1.7 - Monitoração adaptativa	41
2.3.4 - Registro das vibrações	41

2.4 - Especificações de Análise de Vibrações	42
2.4.1 - Norma ISO 10816/95 (vibração mecânica – avaliação da vibração da máquina através de medições em peças não rotativas	42
2.5 - Análise de Vibrações em Laminadores	45
2.5.1 - Composição básica do sistema de monitoração contínua...	47
2.6 - Falhas em Laminadores.....	48
2.6.1 - Frequência natural ressonância.....	50
2.6.2 - Frequência de <i>chatter</i>	51
2.6.2.1 - <i>Chatter</i> torcional	51
2.6.2.2 - <i>Chatter</i> de 3ª oitava	51
2.6.2.3 - <i>Chatter</i> de 5ª oitava	53
2.6.3 - Amortecimento.....	54
2.6.4 - Formas de evitar o desenvolvimento de vibração no laminador	55
3 – METODOLOGIA	58
3.1 - Seleção da Cadeira.....	58
3.1.1 - Laminador quádruplo contínuo	59
3.2 - Falhas Ocorridas	59

3.2.2 - Desvio de qualidade classificado como MB (<i>chatter</i> 3ª oitava)	60
3.2.3 - Consequências	61
3.3 - Metodologia Utilizada	62
4 – ESTUDO DE CASO	64
4.1 - Experimento Industrial.....	64
4.2 - Monitoramento de vibração <i>on-line</i>	64
4.3 - Especificação técnica do sistema de monitoramento:.....	65
4.3.1 - Modulo xm-120	65
4.3.2 - Sensor piezoelétrico	66
4.4 - Caracterização das Frequências Naturais	66
4.4.1 - Frequência natural do cilindro de trabalho.....	67
4.4.2 - Frequência natural do cilindro de encosto	68
4.4.3 - Frequência natural do cilindro de trabalho.....	68
4.5 - Definição das Bandas ou Faixas de Frequências a Serem Analisadas	69
4.6 - Caracterização da Frequência de <i>Chatter</i>	70
4.7 - Mapeamento dos Valores de Aceleração Vibracional e Seus Efeitos no Processo	71

4.7.1 - Processo de laminação sem registro de ocorrências	71
4.7.2 - Ocorrência de <i>chatter</i> de 3ª oitava	72
4.7.3 - Ocorrência de <i>chatter</i> de 5ª oitava	73
4.7.4 - Comparação de severidade.....	75
4.7.5 - Diagnóstico e análise das falhas/ocorrências	76
4.8 - Análise Crítica e Recomendações	78
4.8.1 - Vibração inadequada (ocorrência de ressonância nas faixas de 3ª, 5ª oitava e torcional).....	79
4.8.2 - Excesso de folga e/ou desgaste dos <i>liners</i>	79
4.8.3 - Excesso de folga/desgaste das trancas(travas) dos conjuntos de cilindros.....	80
4.8.4 - Suporte da transmissão.....	80
4.8.5 - Sistemas e componentes internos da cadeira	80
4.8.6 - Geometria inadequada da cadeira.....	81
4.8.7 - Sincronismo de velocidade inadequada entre as cadeiras..	81
4.8.8 - Dureza inadequada dos cilindros.....	81
4.8.9 - Resíduo de amortecimento negativo – instabilidade do processo (deslocamento da força de laminação para saída)	81
4.8.10 - Excentricidade cilindro de encosto	81

4.8.11 - Falta de rigidez da cadeira	81
4.8.12 - Folga das cruzetas dos <i>cardans</i>	81
4.8.13 - Óleo contaminado ou viscosidade inadequada do <i>morgoil</i> (excesso temperatura)	82
4.8.14 - Falha do mancal deslizamento cilindros de encostos	82
4.8.15 - Falha do rolamento do cilindro de trabalho.....	82
4.8.16 - Falhas de pessoas, padrão e processo	82
4.8.17 - Recomendações de segurança	83
5 - ANÁLISE DE RESULTADOS E ESTUDO ECONÔMICO DE RETORNO	84
5.1 - Motivação.....	84
5.2. - Resultado	85
5.3 - Resultado/Retorno Financeiro.....	86
6 - PLANO DE AÇÃO	88
7 - CONCLUSÃO	90
8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Laminador modelo Duo	24
Figura 2 - Laminador modelo Trio	25
Figura 3 - Laminador modelo Quádruo	25
Figura 4 - Laminadores modelo, <i>6-high</i> , <i>12-high</i> , <i>20-high</i>	26
Figura 5- Representação do processo de laminação	26
Figura 6 - Interpretação esquemática do processo de laminação	28
Figura 7 - Área de deformação e ângulos de contato durante a laminação	29
Figura 8 - Representação das forças atuantes no instante do contato do metal com os cilindros do laminador.....	29
Figura 9 - Primeiro sismógrafo da humanidade.....	31
Figura 10 - Forma de onda senoidal no tempo.....	33
Figura 11 - Onda no tempo com as diferentes leituras para amplitude	34
Figura 12 - Diferenças em um domínio temporal	34
Figura 13 - Demonstração da alteração da amplitude conforme a relação frequência do sistema sobre a frequência natural	35
Figura 14 - Modelo de onda com baixa amplitude.....	36
Figura 15 - Modelo de onda com alta amplitude e frequência.....	37
Figura 16 - Superposição das duas ondas anteriores	37
Figura 17 - Batimento modulado (acima), elevação da amplitude da frequência (abaixo)	38
Figura 18 - Domínio com modulação de frequência	38
Figura 19 -Grandezas de medidas	44
Figura 20 - Formação do sistema de monitoração contínua	48
Figura 21 - Modos de vibração	49

Figura 22 - Influência do amortecimento na resposta do laminador.....	54
Figura 23 - Diagrama de esforços de laminação.....	58
Figura 24 - Trem de laminação de um laminador de tiras a frio Quádruo Contínuo..	59
Figura 25 - Visão superior e visão lateral da folha metálica com VX.....	60
Figura 26 - Visão superior e visão lateral da folha metálica com MB	61
Figura 27- Consequências dos desvios provocado por vibração nas tiras metálicas	62
Figura 28 - Esquema de instalação do sistema de vibração na laminação de tiras frio	64
Figura 29 - Modelo xm -120 e xm - 940	65
Figura 30 - Sensor piezoelétrico modelo 9200	66
Figura 31 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de trabalho + encosto.....	67
Figura 32 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de encosto	68
Figura 33 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de acionamento ..	69
Figura 34 - Demonstração da distância entre as marcas - dm	70
Figura 35 - Gráfico das bandas de frequências nas faixas de 3 ^a e 5 ^a oitavas.....	72
Figura 36 - Gráfico de ocorrência de chatter de 3 ^a oitava	73
Figura 37 - Espectro aceleração x frequência	74
Figura 38 - Espectro aceleração x frequência tipo cascata.....	74
Figura 39 - Resultado da análise de vibração para o chatter de 5 ^a oitava	75
Figura 40 - Gráfico de comparação de severidade	76
Figura 41 - Valores de alarmes de prevenção de desvios de qualidade	77
Figura 42 - Falhas de pessoas, padrão e processo	78
Figura 43 - Parâmetros para orientação de configuração de alarmes para alertas de vibrações em níveis prejudiciais ao processo.	79

Figura 44 - Exemplo ilustrativo de perdas de 2016	84
Figura 45 - Resultados de perdas dos 2016, 2017 e 2018.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixa de frequência e o tipo de <i>chatter</i>	50
Tabela 2 - Faixa de distância e o tipo de <i>chatter</i>	50
Tabela 3 - Peso desviado x custo x prejuízo	85
Tabela 4 - Resultado do retorno financeiro	87
Tabela 5 - Ganhos econômicos.....	87

LISTA DE SIGLAS

CPM - Ciclos Por Minuto

RPM - Rotações Por Minutos

RMS - Root Mean Square

VM - Monitor de Vibração

CVM - Monitor Central de Vibração

HAGC - Hydraulic Automatic Gage Control

MB – Marca de Vibração “*chatter* de 3^a oitava”

VX - Marca de Vibração “*chatter* de 5^a oitava”

SP - Segundo Passe

AP - Aproveitamento

Hz - Hertz

NOK – Não Ok

N/A – Não Aplicável

1 - INTRODUÇÃO

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

O processo é 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 exige que a chapa se encontra à temperatura aproximada à 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.

Existem vários tipos de laminadores que podem ser empregados na indústria, cada um com suas vantagens e desvantagens. Dentre os principais laminadores destacam-se o laminador duo, que é composto por dois rolos, um sobre o outro e a chapa a ser laminada se desloca entre eles. Duo reversível, que permite que a direção do giro dos rolos seja invertida, isso possibilita que a chapa “vá e volte” no mesmo laminador. Há também laminadores quádruplos, os quais contam com dois cilindros de apoio situados 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, existem laminadores agrupados, que 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.

Um laminador é formado por várias estruturas mecânicas interligadas entre si, como os cilindros de laminação, mancais, 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 possuem 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 a outra necessita de forças externas para ocorrer.

Quando a frequência de excitação se iguala a frequência natural, acontece o fenômeno chamado como ressonância, que é descrito pela produção de vibrações de grande amplitude, sendo capaz de levar a estrutura ao colapso. Em um processo crucial como 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 ocasionam 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. Para indústria da laminação isso não é diferente, pois 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.

1.1 - Objetivos

A finalidade deste trabalho é estudar um laminador a frio do tipo quádruo, 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.

1.2 - Estrutura do Trabalho

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

1.3.1 - Capítulo 2: revisão bibliográfica

Este capítulo aborda os principais fatores que ocorrem e devem ser analisados 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 estudas para cada nível de classificação: *chatter* torsional, *chatter* de terceira oitava e finalmente *chatter* de quinta oitava, com um enfoque especial nas duas últimas.

1.3.2 - Capítulo 3: caracterização do problema

Neste capítulo é apresentada uma situação real vívida por uma empresa de laminação, onde acontecia níveis indesejáveis de vibração. E esses níveis de vibração geravam desvios de qualidade por variação de espessura, arrebatamento, marcas horizontais impressas ao longo da folha metálica.

1.3.3 - Capítulo 4: metodologia da análise

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 obtido.

1.3.4 - Capítulo 5: conclusão

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

1.3.5 - Referências

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

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Processo de Laminação

2.1.1 - História

No final do século 15 foi concedido a Leonardo da Vinci a seus desenhos feitos os principais registros do desenvolvimento da técnica de laminação. Porém não há evidência de que um tipo de laminador tenha sido produzido nessa época. No meio do século 16 é que se tomou relevância a construção de laminadores.

Eram laminados ouro e prata com o intuito de fabricar moedas, e chumbo para gerar telhados e calhas de casa no final do século de 16; esses materiais eram laminados à temperatura ambiente.

Iniciam-se, no meio do século 17, os primeiros registros de produtos laminados a quente, nos quais eram usados laminadores do modelo duo. No final do século, o sueco Christopher Polhem apresenta a definição de laminadores quádruplos. Porém apenas no século 19, através da revolução industrial, se criou um grande consumo de produtos laminados, com isso dando força ao avanço da indústria.

Foram produzidos a mão os primeiros laminadores, por meio de aplicação de trabalho mecânico e manivelas. Porém com esse limite de potência, somente materiais leves conseguiam ser laminados, tendo como exemplo o chumbo, ouro e prata. Em seguida passaram a usar laminadores movidos a motores a vapor ou rodas d'água, aumentando sua eficiência em torno de 4.000 HP. Contudo, as máquinas a vapor até então reproduziam um vasto gasto com objetivo de sua produção e o custo não eram vantajosos. Até que foi desenvolvido laminadores voltados a motores elétricos acrescentando eficiência e transmissão de torque. Todos os laminadores passaram a ser construídos com motores elétricos a partir de 1940.

2.1.2 - Tipos de laminadores

Os tipos de laminadores são classificados pela a importância de qual tipo de liga será gerado e qual a espessura que se planeja atingir. Laminadores *Breakdown* são empregados no lugar em que deseja conseguir grandes reduções na seção transversal, para esse fim a matéria prima necessária deve ficar em temperatura alta

e esse modelo de laminador é usado na laminação a quente.

Os laminadores acabadores são utilizados para fazer chapas com o tamanho requerido, qualidade superficial e propriedades mecânica solicitados pelo cliente, por essa razão são empregados na laminação a frio. Existem laminadores de folhas finas, nos quais são produzidas folhas de alumínio com espessuras menores do que as fabricadas nos laminadores acabadores, elas podem ter espessuras de fato muito pequenas na ordenação de poucos microns.

Considerar a quantidade de cilindros empregados para laminação é outra possibilidade de classificar os modelos de laminadores. O laminador *2-high* ou duo é composto por dois cilindros que se movimentam em sentido opostos, no meio dos cilindros é aonde passam as chapas a serem laminadas. A aplicação desse laminador na indústria é limitada pois devido a carga de laminação ser muito alta, podendo atingir facilmente milhares de toneladas, os cilindros tendem a flexionar, o que acaba obrigando a reduzir a carga de laminação. Esse laminador pode ser não reversível, no qual não pode ser invertido a direção de giro do cilindro, ou reversível, onde o sentido do giro dos cilindros pode ser possível inverter, conforme Figura 1.

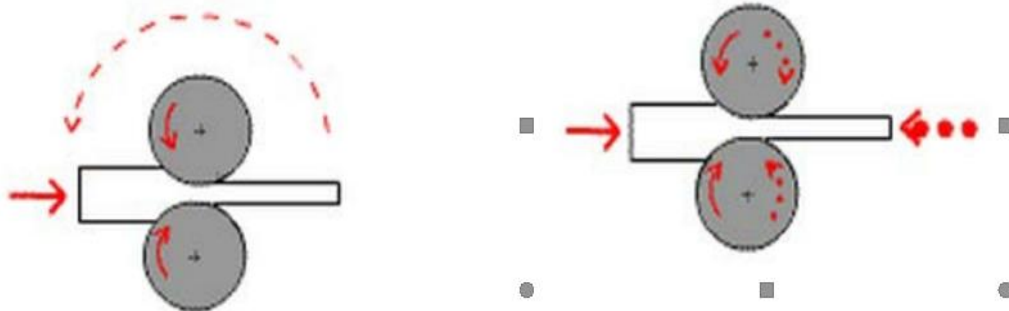


Figura 1 - Laminador modelo Duo

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

Há também outro tipo de laminador utilizado, o *3-high* ou trio, que é constituído através dois cilindros de diâmetros maior e um de diâmetro menor. Por ter um cilindro com diâmetro menor ele se adapta mais acertado às forças usadas na laminação, reduzindo os impactos provocado pela flexão dos cilindros. Esse laminador emprega-se com bastante regularidade na laminação a quente, não havendo a inversão da

rotação dos cilindros, no entanto é possível, para elevar seu rendimento fazer com que a chapa passe no meio de um par de cilindros e volte por outro par conforme visto na Figura 2.

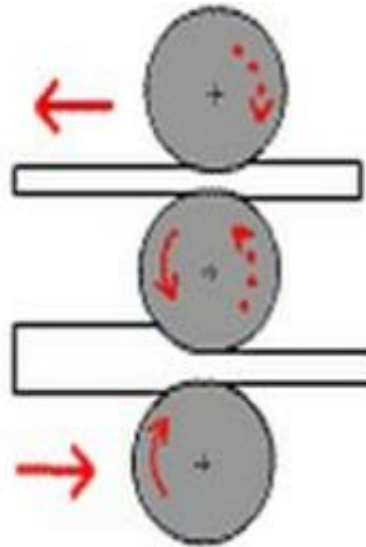


Figura 2 - Laminador modelo Trio

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

Outro laminador é *4-high* ou quádruo, que é o mais comum na laminação a frio, no qual é formado por dois cilindros de diâmetro maior atuando como cilindros de apoio e dois cilindros de diâmetro menor os quais atuam como cilindros de trabalho. Essa configuração possibilita que cargas maiores sejam usadas no processo de laminação, proporcionando que reduções maiores e mais primordiais sejam alcançadas, elevando a produtividade de acordo com a Figura 3.

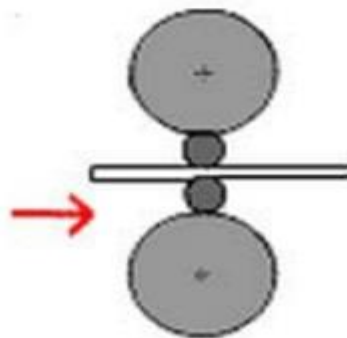


Figura 3 - Laminador modelo Quádruo

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

Existem na indústria outros laminadores que são os tipos Sendzimir, *6-high*, *12-high*, *20-high*. Esses tipos laminadores ostentam maior quantidade de cilindros assentados em cima de outros, fazendo que os resultados da curvatura causadas pelas grandes cargas de laminação sejam reduzidos, permitindo que as folhas finas sejam alcançadas com qualidade, Figura 4.

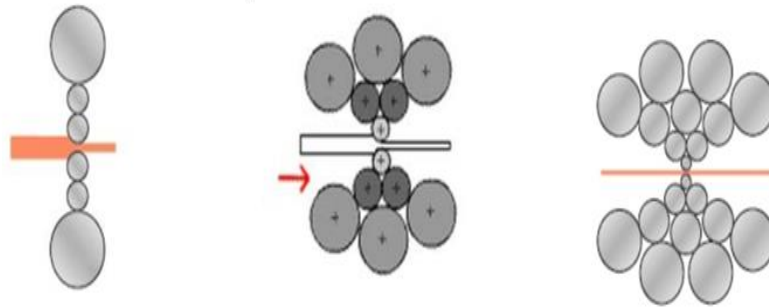


Figura 4 - Laminadores modelo, *6-high*, *12-high*, *20-high*

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

2.1.3 - Mecanismo da laminação

O processo de laminação é formado pela passagem da peça sólida no meio de dois cilindros que giram em sentidos diferentes com igual velocidade periférica, conforme Bresciani Filho et al. (2011). Ao atravessar a peça pelos cilindros ela sofre uma deformação plástica devido à altura da peça ser maior que o espaço entre os dois cilindros, diminuindo a seção transversal e aumentando sua largura e comprimento, conforme a Figura 5.

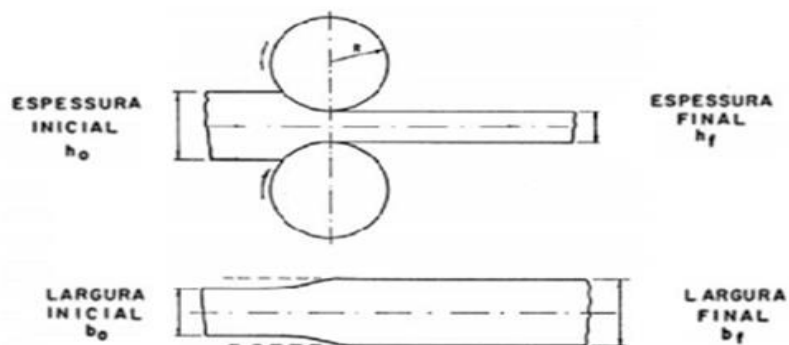


Figura 5- Representação do processo de laminação

Fonte: Bresciani Filho 2011

Através da temperatura de recristalização do material, o método de laminação é dividido entre laminação a frio e laminação a quente.

Chiaverini (1986) classificou as desvantagens e vantagens de cada processo:

- considerando-se a diminuição na seção transversal da chapa, no momento em que é executado a quente, o equipamento empregado pode ser de mais baixa capacidade, uma vez que precisará de forças menores para sua deformação;
- no decorrer do trabalho a quente, o arranjo do material é tratado, de forma a acrescentar sua tenacidade. Logo o trabalho a frio desfigura o arranjo cristalino do material, aumentando sua dureza e resistência, entretanto diminui sua ductilidade. Essas transformações podem ser importantes em algumas aplicações, se porventura não estiverem convenientes, elas podem ser reduzidas com o tratamento térmico de recozimento;
- o trabalho a quente abate as porosidades e isola as impurezas, escória e outras incorporações são reduzidas no modelo de fibra, ampliando a resistência do material numa estabelecida direção;
- o trabalho a frio permite menores retenções que o trabalho a quente, devido a constantes recristalizações que acontece na peça processada;
- no trabalho a frio possibilita a aquisição de dimensões entre as estreitas faixas de tolerâncias e um melhor acabamento superficial.

De acordo com Bresciani Filho, o procedimento de laminação pode ser rotulado como um método de compressão direta, visto que os cilindros de trabalho executam esforços de compressão na peça. Visto que o princípio da preservação da massa e que nas chapas a deformação lateral é um tanto menor do que a alteração longitudinal, podemos presumir que a diminuição ocorrida na seção transversal modifica o alongamento da chapa. De maneira que os cilindros de laminação demonstram igual velocidade periférica, pode afirmar que a chapa deixa os cilindros com velocidade superior à que entrou. Na Figura 6 podemos ver uma representação esquemática do processo de laminação.

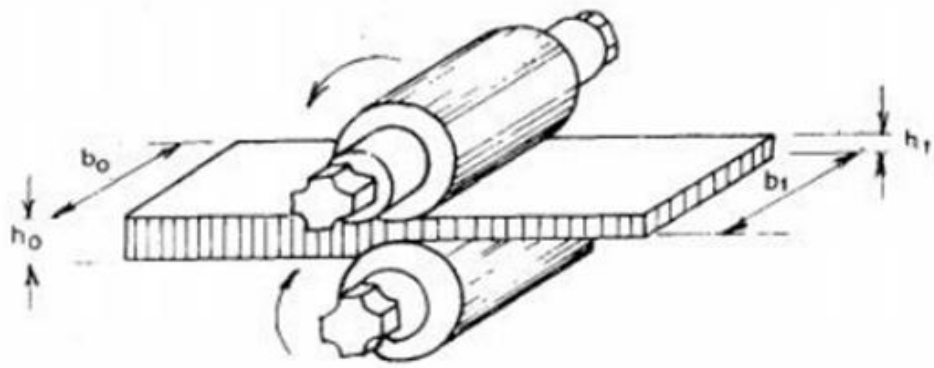


Figura 6 - Interpretação esquemática do processo de laminação

Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

A partir da Figura 6, temos:

$$b_0 = b_1 \quad (1)$$

$$v_0 \cdot h_0 \cdot b_0 = v_1 \cdot h_1 \cdot b_1 \quad (2)$$

$$v_0 < v_1 \quad (3)$$

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

No qual:

v_0 = Velocidade da chapa antes de laminar [m/s];

h_0 = Altura da chapa antes de laminar [m];

b_0 = Largura da chapa antes de laminar [m];

v_1 = Velocidade da chapa após laminar [m/s];

h_1 = Altura da chapa após laminar [m];

b_1 = Largura da chapa após laminar [m];

O cilindro entra em contacto com o metal conforme o arco AB, Figura7. Esse arco representa o ângulo nomeado de ângulo de contato e que é estabelecido pela equação (5).

Onde:

h_0 = Altura da chapa antes de laminar [m];

h_1 = Altura da chapa após laminar [m];

R = Raio do cilindro de trabalho [m];

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

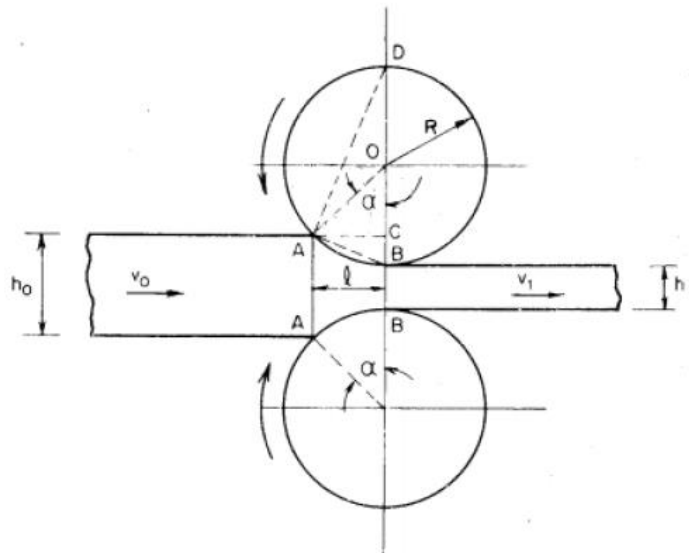


Figura 7 - Área de deformação e ângulos de contato durante a laminação

Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

A figura 8, demonstra as principais forças que agem no decorrer do processo de laminação que são a força N denominada por força radial ou normal e a força T no qual é denominada força de atrito ou tangencial.

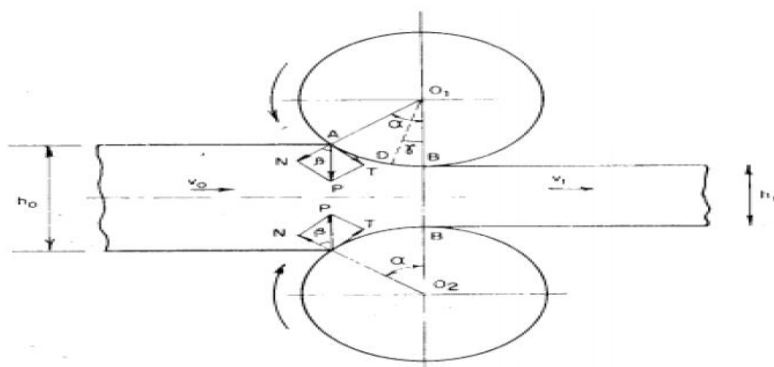


Figura 8 - Representação das forças atuantes no instante do contato do metal com os cilindros do laminador

Fonte: CHIAVERINI, V., 1986

Entre o campo de entrada AA e o ponto D, o deslocamento da placa é mais lento que o da face dos cilindros e a força tangencial age na direção de deslocar o

metal no meio dos cilindros. Ao passar o ponto D, o deslocamento é mais rápido do que a face dos cilindros. Desta forma, a direção da força tangencial altera de maneira que sua disposição é opor a saída da placa dos cilindros.

A carga de laminação P é dada pela componente vertical da força N , e é determinada 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):

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

ρ = Pressão específica de laminação [Pa];

P = Carga de laminação [N];

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

b = Largura da placa [m];

2.2 - Vibrações

2.2.1 - Histórico da vibração

Desde o princípio da humanidade a vibração e o som dos instrumentos básicos são utilizados para facilitar determinadas tarefas, como: tambores, apitos. A evolução da teoria da vibração consiste no estudo de ciências como matemática e mecânica geral.

Antigamente, para ouvir algum possível tremor de terra, usava-se um escudo coberto por uma discreta camada de bronze encostada ao solo. Dessa forma, a qualquer mudança de estado vibrante do solo, produzia uma vibração no escudo provocando um som, servindo como um alerta para tremores de terra. Na atualidade são utilizados transdutores compostos de cristais piezoelétricos, os quais convertem energia mecânica das vibrações das máquinas, em pulsos elétricos sendo elucidados como picos nos coletores de vibração.

A origem dos primeiros instrumentos de medição de vibração surgiu na Grécia e China. Ocorreu na China o primeiro sismógrafo criado pelo homem, aparelho que

detecta a intensidade dos terremotos; foi construído um sismógrafo que registrava o incidente de um tremor de terra e mostrava a vertente do seu início, conforme Figura 9.



Figura 9 - Primeiro sismógrafo da humanidade

Fonte: www.fisicafascinante.com.br

Funcionava da seguinte maneira, um pêndulo ficava dentro da jarra e era imune a movimentos pequenos na superfície, mas frágil às ondas de um terremoto. Cercavam a jarra oito cabeças de dragão, todas elas contendo uma bola. Na parte abaixo da jarra, à volta dela, estavam na vertical dos dragões oito sapos com a boca aberta. Na ocorrência de um abalo, a boca do dragão que estivesse na rota do sismo se abria e permitia a bola despencar na boca do sapo. Existem comprovativos em que o aparelho teve grande aproveitamento no reconhecimento de tremores de terra.

O estudo da vibração teve como seu precursor Pitágoras, que fez experiências com cordas, martelos e tubos. Atestou em sua experimentação com martelos, que frequências naturais são características dos sistemas e não se baseiam na magnitude da força atuante.

No entanto Galileu, reparou a ressonância entre dois corpos interligados por algum meio de transmissão de energia e combinados em uma mesma frequência natural, também estabeleceu precisamente a associação entre a dimensão de um pêndulo e o tempo de sua oscilação.

Segundo os estudos de Wallis e Sauveur sobre a movimentação das cordas vibratórias e a ocorrência de formas modais, constataram que a frequência do primeiro modo é x e a do segundo modo $2x$, a do terceiro $3x$ e assim sucessivamente. Por tal estudo for creditado a eles o termo de frequências harmônicas.

Já Frahm recomendou o absorvedor dinâmico de vibração, o qual compreende o acréscimo de um sistema massa/mola secundário afim de excluir as vibrações de um sistema importante, diminuindo a sua amplitude, atualmente conhecidos como amortecedores.

Estudos atuais na área de vibração vem sendo influenciados pela vinda de novos computadores que possibilitam a execução de grandes cálculos em um curto espaço de tempo, possibilitando a formação de modelos matemáticos para retratar maneiras de sistemas com muita exatidão.

2.2.2 - Definição e conceitos

Vibração consiste em um movimento que varia a volta de um ponto de orientação no qual se repete regular ou irregularmente após um espaço de tempo, entende-se também como resposta a uma dada excitação.

A frequência que se mede em Hertz [Hz] compreende o período de um segundo, o número de ocorrências de um período completo de um movimento. Analisando a movimentação de um período completo em um minuto, então se mede em ciclos por minutos (CPM) ou rotações por minutos (RPM).

A vibração é capaz de ser fundamentada de um simples elemento havendo uma única frequência ou vários elementos e diferentes frequências ao mesmo tempo. Tendo como exemplificação de vibração simples cita-se a corda de um violão, ou seja, uma única frequência. Já as movimentações de um motor de combustão compõem diversas frequências fazendo ao mesmo tempo no mesmo corpo, os quais apresentam com mais frequência em situações na engenharia, ocorrendo nas estruturas e elementos de máquinas, nos quais encontram-se submetidos a ações dinâmicas.

A trajetória do movimento oscilatório pode ser marcada na forma de onda, em comparação ao tempo que a mesma leva para se construir. Em uma única frequência agindo em um corpo, facilita a visualização num gráfico amplitude X tempo, onde a amplitude da vibração caracteriza e expõe a rigidez da vibração, refere-se a medida escalar de oscilação negativa e positiva de certa onda no tempo, na qual pode ser medida de várias formas: pico a pico, pico e RMS.

Na figura 10 observa-se uma forma de onda se apresentando duas vezes no tempo avaliado. O tempo da onda é cerca de 6s com frequência de 0.16 Hz e amplitude avaliada em pico.

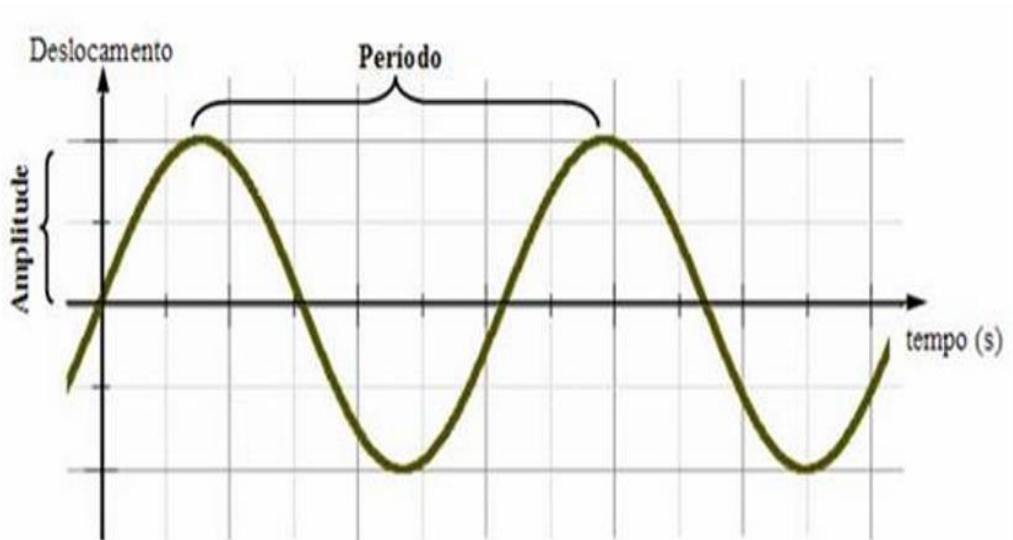


Figura 10 - Forma de onda senoidal no tempo

Fonte: www.csolutions.com.br

Para encontrar comprimento ou o período de onda, mede-se o comprimento de um pico positivo para o outro, conforme na figura 11, pode-se medir também, os picos negativos ou a distância das amplitudes mínimas, isto é, aquelas que se apresentam na parte inferior do eixo vertical do gráfico.

A figura 11, mostra a imagem da medida da amplitude do sinal de onda das inúmeras formas.

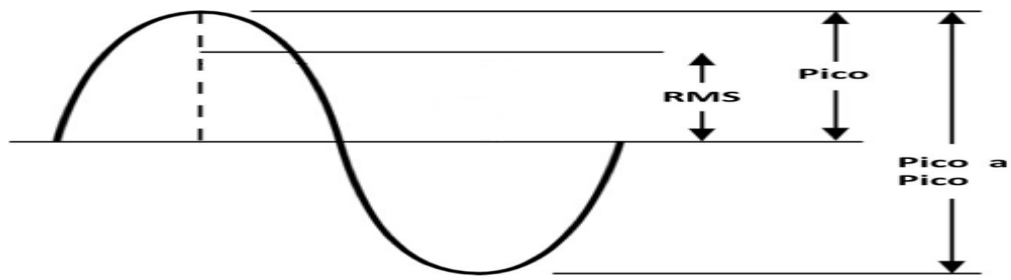


Figura 11 - Onda no tempo com as diferentes leituras para amplitude

Fonte: Forum.clubedohardware.com.br

O valor de pico-a-pico se usa no lugar em que o deslocamento vibratório da máquina corresponde a parte crítica, exemplo este consiste no turbo máquinas com mancal de deslizamento. Emprega-se o valor de pico na recomendação de falhas em elementos de alta frequência, conforme falhas em dentes de engrenagens e rolamentos. E o de RMS entende-se como uma média global da vibração, corresponde a quantidade de energia possuída em uma vibração, utilizada para vibrações de baixa frequência e média referentes a dinâmica da máquina, sendo de suma relevância definir qual modelo de amplitude de vibração está sendo relacionado, já que uma análise errada pode modificar bastante um diagnóstico final.

A frequência e a amplitude são os principais elementos da vibração, sendo a frequência está o oposto do período (tempo). Na figura 12, tem-se um gráfico apresentando as diferenças em forma de onda.

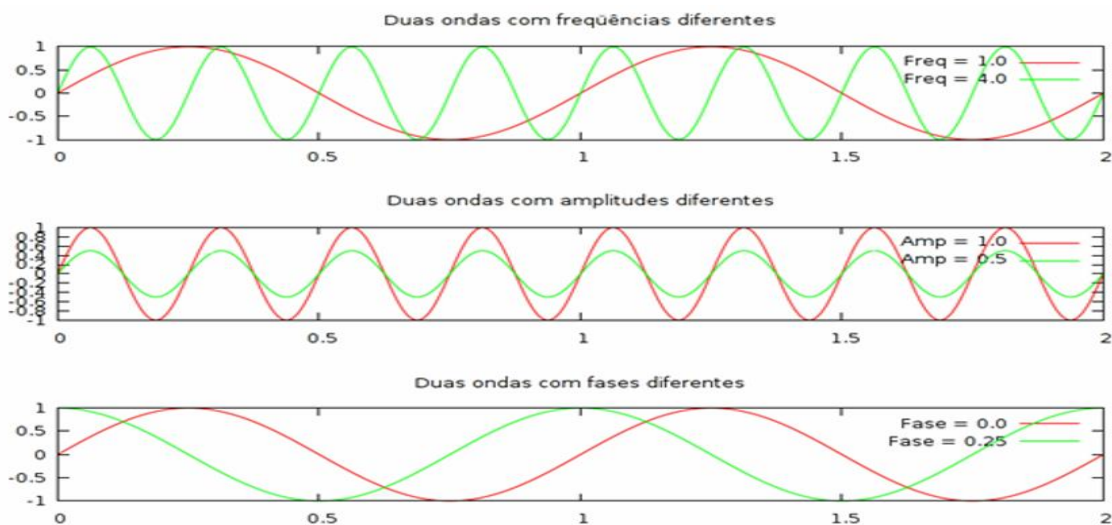


Figura 12 - Diferenças em um domínio temporal

Fonte: www.wordpress.com.br

A diferença entre a resposta no sistema e a excitação da vibração é o ângulo de defasagem. Conforme se vê na figura 13, ao passo que a onda vermelha estava iniciando o seu percurso a onda verde já estava na máxima amplitude. Isto é a explicação para a excitação no sistema da onda verde, aconteceu em seguida com a onda vermelha. A fase é um diferencial na ocasião que se estuda ondas no tempo.

O sistema possuirá uma resposta à excitação imediata conforme o grau do amortecimento. Se o amortecimento é alto, o ângulo de fase, igualmente, é alto. Assim, o ângulo de fase será pequeno para sistemas com pouco amortecimento. O amortecimento do sistema também afeta de modo direto na amplitude da vibração. Quanto maior o amortecimento indica que haverá mais perda de energia através de atrito, o que revela que o sistema não terá liberdade de vibração.

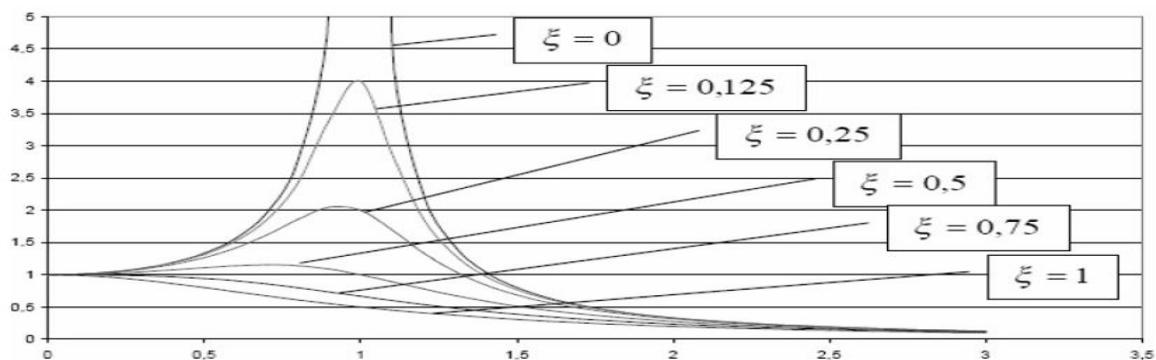


Figura 13 - Demonstração da alteração da amplitude conforme a relação frequência do sistema sobre a frequência natural

Fonte: Apostila do Instituto Superior Técnico

Um sistema massa/mola consegue vibrar sem amortecimento ou com amortecimento. A energia é dissipada através do sistema vibratório com amortecimento viscoso, simplificando a quantidade das amplitudes do sistema. A ressonância e o batimento são fenômenos que acarretam amplitudes elevadas.

Um fenômeno chamado ressonância mecânica ocorre quando um sistema físico adquire energia através de excitações de frequência similar a suas frequências naturais de vibração. Desta maneira, as amplitudes do sistema físico se tornam maiores.

Todo sistema físico apto a vibrar contém uma ou mais frequências naturais, ou

seja, que são atributo do sistema, mais diretamente da maneira como este é produzido. A frequência natural quanto mais alta for, mais energia estará sendo solicitada para produzir uma amplitude de vibração. Tendo como exemplo, uma ponte de pedestres acima de uma movimentada rodovia, cordas de violão, um pêndulo ao ser distanciado do ponto de equilíbrio. Todos eles contêm frequências naturais. No momento que ocorre excitações sobre o sistema, um exemplo, é quando o vento sopra com regularidade sobre uma ponte no decorrer de uma tempestade, ocorre um acontecimento de superposição de ondas que modificam a energia do sistema, mudando sua amplitude.

Caso a frequência natural do sistema e as excitações uniformes sobre ele fiquem com igual frequência, a energia do sistema aumentará, produzindo vibrações com amplitudes maiores.

Um exemplo deste fenômeno foi um fato ocorrido em novembro de 1940 nos Estados Unidos, que foi a ruptura da ponte Tacoma Narrows. Em um certo momento o vento iniciou a soprar com frequência natural igual à de oscilação da ponte, aumentando a amplitude de suas vibrações ocasionando o rompimento da sua estrutura.

O acontecimento da ponte Tacoma Narrows é visto como falha humana, em razão do vento que soprava, que teria uma frequência característica da região onde a ponte foi construída, houve falha na análise das características da região pelos engenheiros responsáveis por sua construção.

Uma ponte suspensa tem a seguinte frequência de oscilação natural conforme Figura 14.

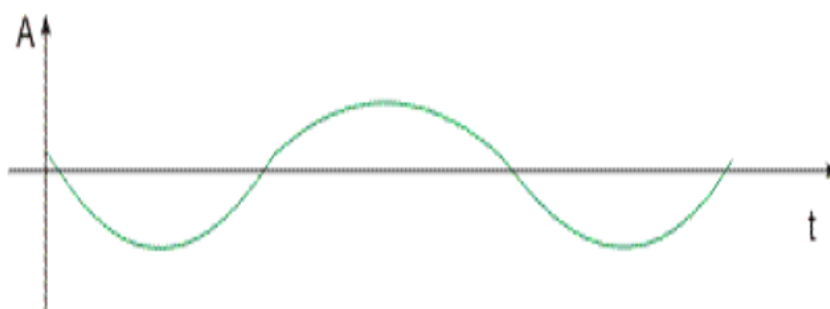


Figura 14 - Modelo de onda com baixa amplitude

Fonte: www.sofisica.com.br

Esta mesma ponte excitada periodicamente por um vento, tem a seguinte frequência conforme Figura 15.

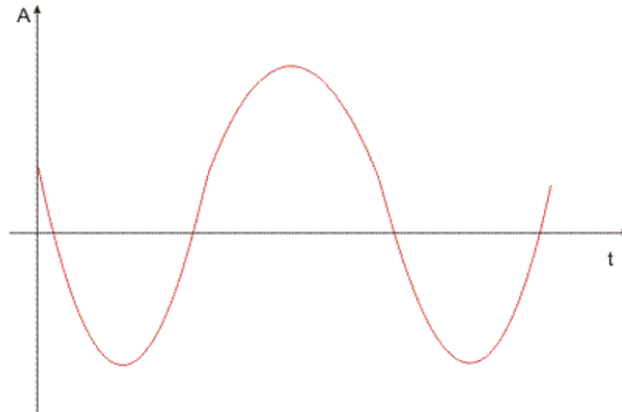


Figura 15 - Modelo de onda com alta amplitude e frequência

Fonte: www.sofisica.com.br

A nova amplitude de oscilação da ponte, pode ser dada através do somatório das duas ondas conforme Figura 16.

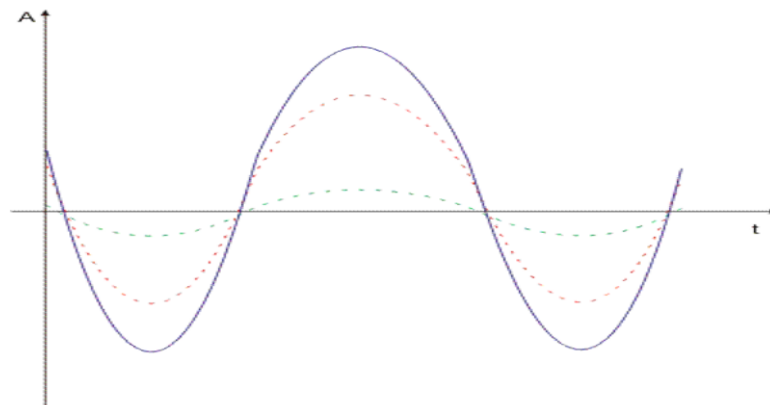


Figura 16 - Superposição das duas ondas anteriores

Fonte: www.sofisica.com.br

O batimento é um fenômeno que causa elevação de amplitude, ele acontece quando no momento em que possui a interferência de ondas de frequências próximas. O somatório das ondas com frequências próximas, resulta em uma onda com frequência igual à média das duas frequências de ondas. O batimento ocorre com uma vibração de amplitude modulada, diferenciando sua amplitude, no qual fornecerá uma aparência de pulsação como visto na Figura 17.

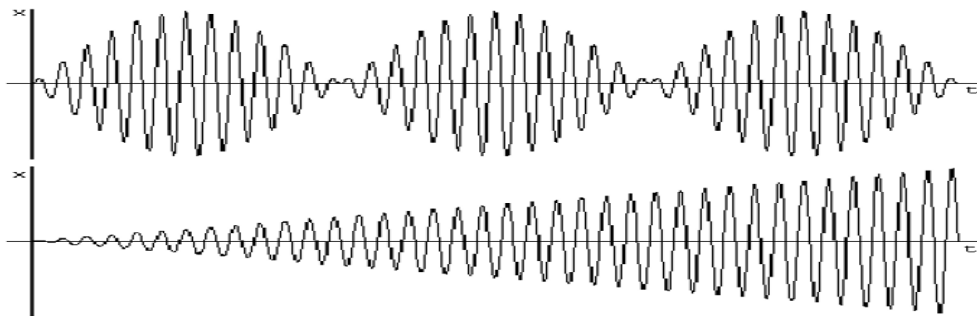


Figura 17 - Batimento modulado (acima), elevação da amplitude da frequência (abaixo)

fonte: www.kdataserv.fis.fc.ul.pt

A circunstância de as frequências das ondas serem diferentes uma da outra, acarreta que existirá momentos de interferência onde a amplitude resultante será somada e momentos de interferência onde a amplitude será subtraída.

Com a proximidade dessas frequências, fica trabalhoso de reconhecer a verdadeira origem, e por essa razão é necessário se adquirir um gráfico de amplitude versus frequência de alta resolução. Ocasionalmente a vibração é seguida de um ruído, este evento é captado pela audição se a desigualdade de frequências não for reduzida, conforme Figura 18.

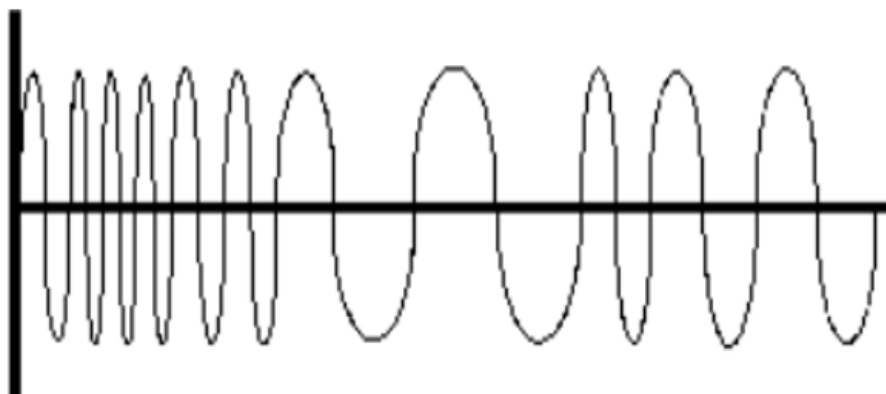


Figura 18 - Domínio com modulação de frequência

Fonte: www.wordpress.com

Na modulação de frequência o modelo de onda possui a amplitude constante, contudo o seu período varia continuamente, e pode ser ocasionada por mudanças rápida na velocidade do eixo devido a variações de torque.

2.3 - Metodologia de Análise por Vibração

2.3.1 - Definição

Vibração é um movimento à volta de um ponto de referência, sendo uma ocorrência cotidiana. A vibração é um processo destrutivo, que provoca danos por fadiga nos elementos de máquinas. O deslocamento vibratório de uma máquina é consequência das forças dinâmicas que a estimulam. Essa vibração se espalha por todos os lugares da máquina, e nas estruturas interligadas. Em geral a máquina vibra inúmeras frequências e amplitudes iguais. Os resultados de uma vibração severa resultam na fadiga e no desgaste, que com certeza é responsável por quebras dos equipamentos em definitivo.

A análise de vibração é entre as técnicas de manutenção preditiva que atinge a maior dimensão do diagnóstico para erros mecânicos. A vibração é o indicativo mais primordial da saúde da máquina, emprega a compreensão dos dados para constatar antecipadamente imperfeições ou falhas e desta forma preservar a performance dos equipamentos, de forma a coibir a evolução das não conformidades.

Consegue-se realizar o acompanhamento da vibração de modo *online* ou *off-line*. O acompanhamento *online* demanda um sistema aplicado no equipamento, de forma que a obtenção de dados sucede em intervalos definidos através de sensores fixos. No recurso *off-line*, um profissional encarrega-se por fazer a coleta das informações por meio de um coletor portátil, que pode ser modelado para operar uma rota de coletas. Nos dois casos, as informações são averiguadas e consegue-se, uma análise sobre o equipamento em estudo.

2.3.2 - Formas básicas de monitoração

2.3.2.1 - Monitoração de segurança

É o monitoramento contínuo, com o objetivo de reconhecimento imediato de qualquer alteração na condição de funcionamento e/ou operação da máquina e que possa gerar riscos para os equipamentos e para as pessoas envolvidas na atividade; compara-se continuamente valores de fácil medição, como por exemplo parâmetros globais de vibração do modelo RMS, com limites pré-estabelecidos, cuja violação

pode ativar um alarme ou mesmo desligar um equipamento.

2.3.2.2 - Monitoração preditiva

O monitoramento analítico e detalhado, com objetivo de detectar de forma precoce de qualquer mudança nas condições de funcionamento da máquina e que possa indicar o desenvolvimento de um defeito. A mesma inclui uma análise de tendências (*trend for casting*) e o exame aprofundado dos componentes do *cepstrum* do sinal e do espectro, além disso pode dispor de informações de variáveis de processo para acesso completo às condições de operação. Esse modelo de monitoração ainda pode ser complementado por um pacote de programas que realiza diagnóstico automático.

2.3.2.3 - Monitoração de performance

É realizada com base em um banco de dados de desempenho que se adapta a máquinas específicas e, por comparação com os sinais captados, analisa o seu desempenho visando maximizar a eficiência e produtividade do equipamento.

2.3.3 - Principais técnicas de monitoração

2.3.3.1 - Acompanhamento de medidas de vibração

Usa-se o acompanhamento de medidas globais de vibração para o monitoramento de segurança e é apresentada na forma de gráficos históricos (medida x tempo). A medida global mais utilizada é o RMS.

2.3.3.1.1 - Acompanhamento dos picos

Acompanhamento dos picos no espectro são: usados geralmente na monitoração preditiva como informação base/útil para diagnóstico.

2.3.3.1.2 - Pico a pico

Segundo a ISO 2372 o Valor Pico a Pico aponta o curso máximo da onda, e consegue ser usado para indicar em que parte da máquina o deslocamento vibratório é mais sério para a folga mecânica ou tensão máxima.

2.3.3.1.3 - Pico pico

Segundo a ISO 2372 o Valor de Pico é utilizado particularmente para indicar choque de pequena duração, entretanto indica somente a ocorrência do pico, e não leva em conta o histórico no tempo da onda.

2.3.3.1.4 - Médio retificado

Considera o histórico no tempo da onda, porém a sua aplicação é considerada limitada em aplicações práticas, por esta razão está relacionado de modo direto com qualquer quantia física útil.

2.3.3.1.5 - Análise de tendências

Usada para prever quando uma determinada medida irá ultrapassar um limite pré-definido. Excitam as frequências naturais de diferentes peças da estrutura, fazendo com que sejam aumentadas, tornando-se em vibrações e ruídos.

2.3.3.1.6 - Rms (root mean square)

Medida de maior importância, pois a mesma considera o histórico no tempo da onda e oferece um valor de nível que está exatamente relacionado à energia contida, logo, à capacidade destrutiva da vibração.

2.3.3.1.7 - Monitoração adaptativa

Ajusta os níveis de referência e alarme às condições de operação da máquina, inclusive a variação de rotação e velocidade.

2.3.4 - Registro das vibrações

É um apanhado mediante a sensores instalados em locais estratégicos e equipamentos que transformam em sinais elétricos a energia mecânica de vibração. Por esses motivos os sinais elétricos são conduzidos para os aparelhos medidores de vibrações ou aparelhos analisadores de vibrações. Através dos dados armazenados nos medidores e nos analisadores, os especialistas interpretam, assim podendo obter uma confiável radiografia das partes de um equipamento ou máquina.

2.4 - Especificações de Análise de Vibrações

Existem algumas normas internacionais relacionadas a sinais de vibração, entretanto a avaliação de condição de máquina rotativa baseada em sinais de vibração está relacionada basicamente em duas delas: a ISO10816 e a ISO7919.

A ISO 10816 está relacionada a avaliação de máquinas a partir dos sinais recolhidos em suas partes não rotativas.

A ISO 7919 está associada à análise de máquinas com base de sinais de vibração recolhidos em suas partes rotativas.

No entanto, no texto introdutivo da ISO10816 pode-se ler que, para a maioria das máquinas, as medidas tomadas em suas partes não-rotativas são suficientes para caracterizar adequadamente as suas condições de funcionamento com respeito a uma operação livre de problemas, embora na continuação do seu texto ela faz um alerta de que existem umas máquinas, como as que possuem rotores flexíveis, para as quais medidas em partes não-rotativas podem não ser plenamente adequadas. Para esses casos, pode ser necessário monitorar a máquina fazendo medições tanto em suas partes rotativas quanto em partes não rotativas, ou somente em suas partes rotativas.

2.4.1 - Norma ISO 10816/95 (vibração mecânica – avaliação da vibração da máquina através de medições em peças não rotativas)

A norma ISO10816 estabelece as condições gerais e o procedimento para se efetuarem as aquisições dos sinais e a avaliação de vibração, realizando as medidas nas partes não rotativas da máquina. Ela substitui e amplia a abrangência da antiga ISO2372/74, que se restringia às máquinas com velocidades de operação de 10 a 200 rot/s, ao mesmo tempo que a ISO10816 envolve praticamente todas as rotações constatadas pelas máquinas mais utilizadas na indústria. A ISO2372 estabeleceu o conceito de severidade de vibração, ou melhor, uma medida de características simples e compreensível, capaz de ser usada como base para se classificar o estado de vibração de um equipamento. Estabeleceu também que, com base em considerações teóricas e experiência prática, o RMS global da velocidade de vibração, entre 10Hz e 1000Hz, deveria ser a medida utilizada para indicar a severidade de vibração. A ISO10816 usa os mesmos conceitos básicos da norma anterior, mas sugere que

outros valores globais, além do RMS da velocidade na banda acima apontada, podem ser empregados, conforme a máquina a ser avaliada. Contudo a ISO 10816 mantém que, para a maioria dos casos, o valor global, de 10Hz a 1000Hz, do RMS da velocidade de vibração, efetuado nos mancais e suportes da máquina, é mais adequado e capaz para caracterizar o estado de funcionamento da máquina.

Enquanto a ISO2372 se ocupou em definir regras e princípios capazes de determinar faixas de classificação de severidade de vibração, fornecendo uma tabela de classificação somente a título de exemplo, a ISO 10816 parte daqueles princípios e define o funcionamento de máquinas em quatro zonas de estados ao mesmo tempo dependendo do tipo de máquina, quantifica os limites destas zonas. Desta forma a ISO10816 estabelece dois critérios de avaliação da severidade de vibração para vários tipos de máquinas:

Critério 1: Magnitude de vibração

Ela define os limites que limitam as quatro zonas de classificação de estados de vibração de máquinas. Os limites se aplicam a valores de RMS globais da velocidade de vibração numa banda que vai de 10Hz a 1000Hz, e as zonas são:

Zona A: vibração de máquinas recém comissionadas e novas;

Zona B: máquinas com vibração entre essa zona são consideradas aptas a operar sem restringimento por amplos períodos.

Zona C: máquinas com vibração nessa zona são consideradas não aptas a operar sem restringimento por amplos períodos. Geralmente podem operar por tempo limitado até que surja uma chance de se ocorrer uma ação corretiva.

Zona D: vibrações que caem dentro desta zona normalmente são consideradas de gravidade bastante para causar avarias à máquina.

Limite das zonas A e B - RMS= 1,4mm/s;

limite das zonas B e C - RMS= 2,8mm/s;

limite das zonas C e D - RMS= 4,5mm/s.

Critério II - Mudança na magnitude de vibração

Fornece uma avaliação da mudança da magnitude de vibração desde um valor de referência pré-estabelecido. Ele diz que, no momento em que uma variação na magnitude de vibração ultrapassar 25% do valor limite da zona B, para a máquina em questão, tal mudança deve ser considerada significativa, principalmente se ela for rápida. Assim sendo, precisaria ser iniciada uma investigação para se encontrarem as causas da mudança na vibração e se determinar as decisões a serem tomadas.

Grandezas medidas no acompanhamento de vibrações mecânicas:

de deslocamento

Unidade: micrometro (mm) ou milésimos de polegada (mils);

de velocidade

Unidade: metros por segundo (m/s) ou polegadas por segundo (ips);

de aceleração

Unidade: metros por segundo ao quadrado (m/s²) ou aceleração da gravidade (g).

Seja qual for a grandeza determinada, o período de vibração e a forma permanecem iguais, o que muda é a presença de uma desigualdade de fase entre eles, conforme Figura 19.

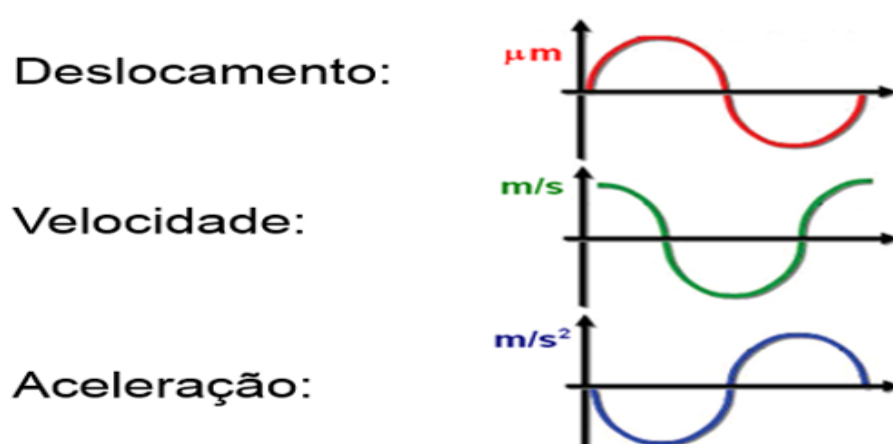


Figura 19 -Grandezas de medidas

Fonte: www.wordpress.com

2.5 - Análise de Vibrações em Laminadores

A tecnologia existente para monitoramento de vibração industrial, encontrada nos catálogos de equipamentos e sistemas de monitoração de vibração oferecidos no mercado nos mostra que existe uma padronização nos equipamentos e nas formas de monitoramento. Na maioria dos casos o conjunto de equipamentos e *softwares* são vendidos em pacotes únicos e vinculados divididos em equipamentos de monitoração fixos e portáteis, porém em quase todos os casos encontramos os *hardwares* completamente vinculados aos *softwares* específicos que os tornam funcionais. Desta maneira, verificamos que os sistemas de monitoração industriais funcionam como verdadeiras caixas pretas, na medida em que eles são inacessíveis a um entendimento que possibilite a sua utilização de uma forma diferente da qual foram projetados e fornecidos.

São classificados em três níveis os sistemas de instrumentação para monitoração periódica.

- **Medidor de vibração com análise de frequência (com filtro)**

É um medidor de vibração simples que verifica o nível de vibração global com relação a uma faixa ampla de frequência. O nível avaliado representa o nível de vibração dos itens de frequência principais do espectro, que são os itens mais significativos para serem monitoradas.

- **Medidor de vibração de nível global (sem filtro)**

É um instrumento capacitado a verificar o valor global de vibração em uma ampla faixa de frequência, que necessita dos padrões e normas.

- **Analisadores de frequência**

A cerca de situações onde deseja realizar uma diagnóstico sobre um sinal transiente (choques) ou análise de frequência, com filtro de larguras muito estreita, é fundamental a aplicação de um sistema preparado a fazer a Transformada de Fourier do sinal, no qual é uma ferramenta matemática apta a modificar um sinal randômico, transitório ou periódico, em uma série de Fourier semelhante, chamado de Espectro

de Frequência.

A seguir será listado alguns exemplos dos sistemas e equipamentos de monitoração de vibração apresentados por alguns dos fornecedores no mercado:

- Vibration Penpius (SKF): aparelho portátil capaz de fazer medidas de vibração do modelo global e para faixas de altas frequências, tal como o do envelope da aceleração;
- MCT CMSS 530 (SKF): equipamento individual e autônomo de monitoração contínua de vibração, para problemas mecânicos gerais;
- VM600 (SKF): sistema modular de monitoração de segurança, capaz de provocar o desligamento automático de equipamentos;
- Microlog CMVA 60 (SKF): analisador e coletor portátil de vibração;
- CSI Model 2130 (Emerson CSI)- coletor e analisador portátil de vibração, apto a medir valores de pico e enviar mensagens de alerta;
- On-line Continuous Monitoring 4500 Series: sistema industrial de monitoramento contínuo de vibração;
- VIBROCAM 5000: sistema industrial de monitoração contínua de vibração de turbinas;
- COMPASS (Brüel & Kjaer Vibro): sistema industrial de monitoração contínua de vibração de máquinas rotativas em geral.

Os equipamentos podem ser desde um pequeno monitor portátil, como Penpius citado acima, até um sistema completo compreendendo todos os itens, como sensores, cabos, condicionadores de sinal, conversores analógico-digitais, banco de dados, unidades computacionais de processamento, softwares de monitoração. Como os recursos oferecidos e o conjunto de técnicas de monitoração a pouca diferença de um fornecedor para outro. Apresentamos a seguir as principais características dos melhores equipamentos e sistemas de monitoração de vibração que podem ser encontrados na atualidade no mercado.

Recursos oferecidos:

- intermitente (*on-line e off-line*) e monitoração contínua (*on-line*);

- interface facilitadora de comunicação com o usuário: normalmente o resultado da monitoração pode ser visto através de gráficos;
- sistemas modulares, montados de forma a atender finalidades específicas e no qual sua capacidade pode ser ampliada com o acréscimo de *hardwares* e *softwares*;
- o sinal nos sistemas de monitoração contínua, é totalmente processado em um equipamento modular que pode funcionar em conjunto ou totalmente independente de um computador central;
- armazenamento centralizado dos dados, mas com possibilidade de acesso e exibição remota dos resultados da monitoração;
- possibilidade de acúmulo de dados por detecção de eventos, esses dados só são gravados quando considerados importantes e representem uma mudança sobre aos valores anteriores;
- compressão dos dados, que possibilita o seu armazenamento para períodos de longa duração através de uma relação entre a precisão e a idade da informação;
- comunicação de sinais e de informação à distância, proporcionando a realização de uma monitoração remota;
- ultimamente muitos sistemas estão possibilitando uma interface com outros sistemas, recebendo sinal ou informação e incorporando-os ao seu processo; alguns sistemas já proporcionam a realização automática de diagnósticos;
- na função de monitoração de segurança, os sistemas podem tanto enviar alarmes quanto ligar relés que ocasionam o desligamento automático dos equipamentos monitorados;
- execução de análises de tendências;
- estratégias adaptativas de monitoração para condições diversas de operação;
- realização de auto-testes de confiabilidade e fornecimento de informações sobre o estado e desempenho dos componentes do equipamento;

2.5.1 - Composição básica do sistema de monitoração contínua

A Figura 20 ilustra a composição básica de um sistema de monitoração contínua: o Monitor de Vibração (VM), responsável pelas operações essenciais á monitoração, e o Monitor Central de Vibração (CVM) que possibilita a interface com o

usuário e o armazenamento dos dados. Tanto o VM quanto o CVM estão montados em um dos armários instalados na sala de controle do Reator.

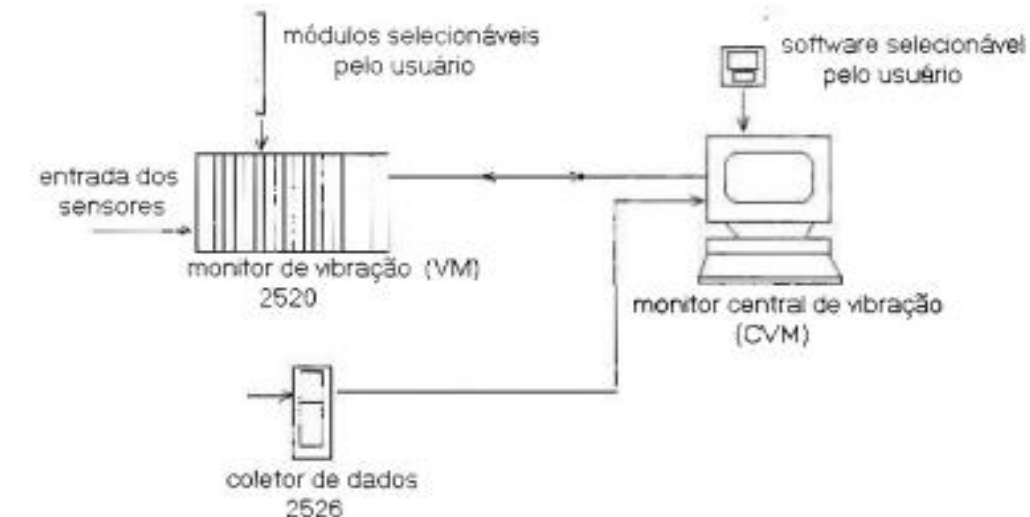


Figura 20 - Formação do sistema de monitoração contínua

Fonte: <http://tecnologiamm.com.br>

2.6 - Falhas em Laminadores

O processo de laminação a frio é o mais importante para produção de chapas planas para o mercado. As empresas tendem, para aumentar a produtividade, a laminar as chapas metálicas com a máxima redução possível e na maior velocidade do processo. Porém, essas características estão diretamente associadas com as forças que acarretam o aumento das vibrações nos laminadores.

Ocorrendo isso, as vibrações podem chegar a gerar variações de qualidade superficial do produto laminado e na espessura. Com finalidade de ampliar os lucros, a produtividade e assegurar a qualidade do produto final concedido, torna-se fundamental que pesquisas sejam seguidas para que seja possível compreender com mais facilidade as vibrações que acontecem dentro dos processos dinâmicos.

As vibrações mecânicas que acontecem no processo de laminação são consequência das interações entre o processo de laminação e a estrutura do laminador. As forças dinâmicas implicadas no decorrer do processo de laminação que causam deformações na estrutura e causam o deslocamento entre os cilindros e a

folha metálica. As variações provocam distorções nas forças de laminação. As distorções associadas ao deslocamento dos cilindros e com a energia potencial do acionamento irá provocar a resultante a energia vibracional (Yun, Wilson e Meehan 1998). Na Figura 21 são mostradas as forças colocadas sobre os cilindros de laminação, segundo estudos dirigido por Meehan (1998).

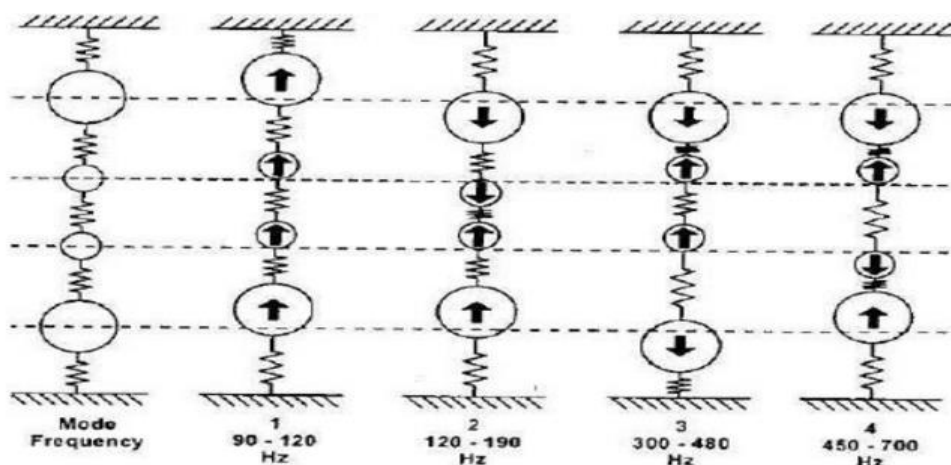


Figura 21 - Modos de vibração

Fonte: Meehan (1998)

Em um sistema de laminação encontramos uma associação de fenômenos dinâmicos que o tornam autoexcitável, o que irá ocasionar a vibração mecânica. A vibração mecânica descontrolada e/ou em níveis elevados em laminadores provoca defeitos na folha laminada que são descritos como Marca de Vibração (MB), o defeito amplamente discutido no setor siderúrgico e acadêmico é o *chatter* que provoca variação na espessura da folha laminado e também existe a Marca de Vibração descrita internamente em algumas indústrias com VX que provoca desvio de qualidade devido a marca de superfície que afeta o aspecto na folha laminada.

O controle ou eliminação de marca de vibração (Yun, (1998); Kimura (2003) e Hofmann e Aigner (1998)) no processo de laminação é de grande importância para melhorar a produtividade da unidade, reduzir custos e aumentar a qualidade do produto laminado.

E como ação para analisar e antecipar níveis indesejáveis de vibração defendemos um programa efetivo de manutenção preditiva onde trabalhamos com a

gestão da manutenção.

Robert (1978) classificou o *chatter* em três, Meehan (1998) separou por faixa ou modo de frequência, conforme Tabela 1.

Tabela 1- Faixa de frequência e o tipo de *chatter*

ITEM	FAIXA DE FREQUÊNCIA	TIPO DE <i>CHATTER</i>
a)	5 – 20 Hz	<i>Chatter</i> Torcional
b)	128 – 256 Hz	Terceira Oitava
c)	500 – 700 Hz	Quinta Oitava

Fonte: Autor

Observação: o tipo de *chatter* pode ser identificado através da medida das distâncias entre as marcas impressa na tira, conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Faixa de distância e o tipo de *chatter*

ITEM	FAIXA DE DISTÂNCIA	TIPO DE <i>CHATTER</i>
a)	75 a 125 mm	<i>Chatter</i> Torcional
b)	6 a 60 mm	<i>Chatter</i> De Quinta Oitava

Fonte: Autor

2.6.1 - Frequência natural ressonância

Todo corpo possui uma frequência natural devida agitação interna de suas moléculas que é a frequência exclusiva de um corpo em vibração livre, definida pelo tamanho, forma e composição. Uma estratégia para identificar consiste em acertar o objeto de análise e assim motivar sua frequência de ressonância ou podemos calcular através da equação 7.

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

Onde:

F_n = frequência natural;

k = rigidez;

m = massa.

Quando ocorre uma vibração forçada em um corpo, sua frequência é igual a natural, ocorrendo o fenômeno chamado ressonância. Assim sendo, uma vibração relativamente fraca pode gerar vibrações mais intensas, modificando assim a amplitude da onda e podendo provocar danos estruturais.

2.6.2 - Frequência de *chatter*

De acordo Remn-Min (1993), calcula-se a frequência de *chatter* utilizando-se:

2.6.2.1 - *Chatter* torcional

Conforme Yun (1998), este modo de vibração produz tipos de flutuação na espessura e alteração na refletividade da superfície da tira. O mesmo é provocado pelo sistema de acionamento ou pelo controle do motor.

2.6.2.2 - *Chatter* de 3ª oitava

O *chatter* de 3ª oitava, é uma condição vibracional que flexiona a estrutura do laminado, causando uma variação da distância entre os cilindros e as folgas entre os *liner's* da estrutura. Esta oscilação amplifica e provoca um aumento da força de laminação e em seu estado inicial provoca variação de espessura da tira. Porém existe uma condição de ressonância no sistema, que proporciona a interação entre o processo de laminação e a estrutura do laminador. Esta situação de interação leva a instabilidade do processo (Yun (1998)).

O *chatter* de 3ª oitava é identificado de forma audível ou sistema de monitoramento de vibração e pode ser diminuído através da redução da velocidade de laminação ou alterações dos parâmetros do processo de laminação.

A incidência do evento ocorre de forma instantânea e estão relacionados com a excitação da frequência natural do cilindro de encosto o que provoca ressonância.

Devido ao rápido e repetido aparecimento do *chatter* de 3ª oitava indica que este fenômeno é auto excitado em função dos parâmetros do próprio processo de laminação, mais do que as excitações externas (Tamiya, (1980)). Esta condição causa oscilações de maneira desordenada e sem sincronismo nos cilindros de trabalho, provocando assim uma espécie de choque entre os mesmo e chapa, degradando a superfície da tira e em alguns casos, sendo capaz de levar a ruptura da mesma (Yarita (1978), Luc Chefneux (1984) e Paton (1984)).

Em trem de laminação (cadeira de laminação em série), isto é, inúmeras cadeiras, o *chatter* pode ser provocado também pelo amortecimento negativo. Este fenômeno é necessário as variações de tensões provocadas pela vibração dos cilindros, que promovem forças indesejadas no processo e que irão provocar excitações nas cadeiras de laminação seguintes (Pei-Hua Hu (2001)).

Os arrebatamentos provocados pelo modo de vibração (*chatter* de 3ª oitava) pode danificar o equipamento de acordo com Ehmann (1995). O mesmo está associado à alta velocidade e grandes reduções que são fatores relevantes para uma alta produtividade.

De acordo com Tamiya (1980) a formação do *chatter* de 3ª oitava (auto excitável), pode ser facilitada por uma da combinação de fatores tal como:

- espessura finas;
- instabilidade na aplicação de solução;
- velocidade alta;
- tensão nas cadeiras inadequada;
- redução extremamente alta ou baixa;
- variação abruptas no processo.
- coeficiente de atrito baixo ou alto;

As condições citadas foram debatidas por Luc Chefneux (1984) e Roberts (1987), onde recomendam que o processo de laminação é sensível à força de laminação, à quantidade de redução da tira, à condição imprópria do coeficiente de atrito e etc. E os dois concluíram que a melhoria dos padrões operacionais, pode

diminuir a ocorrência do *chatter* de 3ª oitava. Os laminadores são vulneráveis a fatores externos de excitação como:

- padrões de desgaste nos cilindros;
- instabilidade do sistema de acionamento (torcional);
- folgas no acionamento;
- folgas nos *liners*;
- folgas em outros componentes mecânicos.

Logo, qualquer vibração externa que corresponda com a frequência do *chatter* de 3ª oitava, irá provocar o efeito de ressonância provocando assim distúrbio ao laminador (Remn-Min Guo (1993)).

2.6.2.3 - *Chatter* de 5ª oitava

A vibração que provoca o *chatter* de 5ª oitava é a excitação da frequência natural dos cilindros de trabalho provocando o efeito de ressonância, que gera a oscilação em contraface entre os cilindros de encosto ou intermediários ((Catálogo da ASKO (1996) e Paulino (2006)). A espessura entre os cilindros de trabalho não se modifica, portanto, a espessura da tira não será afetada, porém, ocorre uma marcação dos cilindros de encosto ou intermediários, fato que imprime na folha metálica as marcas presentes nos cilindros de encosto ou intermediários, afetando assim o aspecto superficial do produto.

A impressão das marcas no produto (folha metálica) se dá de maneira gradual e seguindo um padrão. Geralmente, não é detectado imediatamente a sua ocorrência, por se tratar de ruído de alta frequência. Podemos fazer o monitoramento para o controle do *chatter* de 5ª oitava através de sistema de monitoramento de vibração no ponto de maior excitação, afim de evitar a degradação da qualidade da tira laminada, e através do sistema de monitoramento é possível antecipar a troca dos cilindros de encosto, baseando-se em alarmes definidos através de banda espectrais, evitando assim desvios de qualidade.

Se compararmos o *chatter* de 5ª oitava com o *chatter* de 3ª oitava, o de 5ª Oitava ocorre em faixa de frequência maior do que o *chatter* de 3ª oitava. Esse fenômeno acontece com mais frequência em laminadores *temper*, *skin pass mill* e em

laminação a tira frio.

A severidade *chatter* de 5ª oitava é menor do que a do *chatter* de 3ª oitava, porém, o mesmo pode ser fonte excitante do mecanismo do *chatter* de 3ª oitava.

O *chatter* da 5ª oitava é mais simples de se eliminar do que *chatter* da 3ª oitava. No entanto, o mesmo precisa de algumas ações relacionados à qualidade da manutenção do equipamento como:

- trocas dos cilindros de forma precoce;
- diminuição da velocidade de laminação;
- inspeção perfeita dos cilindros.

Essas ações afetam a produtividade do laminador.

2.6.3 - Amortecimento

De acordo com Remn-Min Guo (1991) o amortecimento no laminador é composto por:

- amortecimento viscoso de sistemas hidráulicos;
- resistência a deformação plástica (mordida);
- filme do óleo dos mancais hidrostáticos do cilindro de encosto e etc.

Utilizando-se o método de elementos finitos, identificou-se que no laminador a resposta vibracional é inversamente proporcional ao amortecimento, conforme Figura 22.

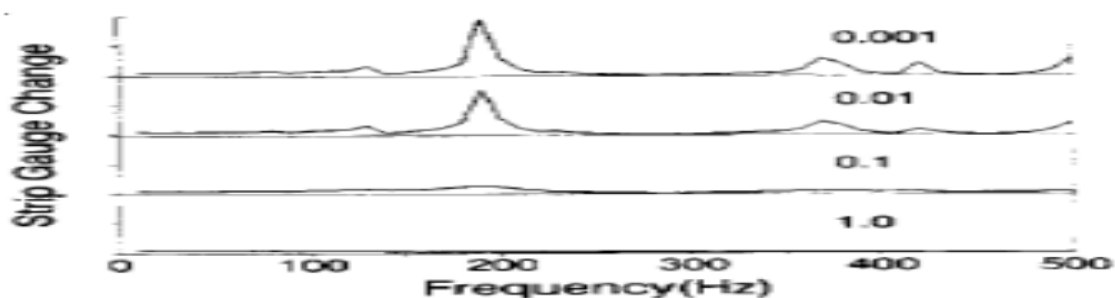


Figura 22 - Influência do amortecimento na resposta do laminador

Fonte: Remn-Min Guo (1991)

Para aumentar o amortecimento Remn-Min Guo (1991), Luc Chefneux (1984) e Yarita (1978); sugerem três ações:

- cápsula hidráulica HAGC (*Hydraulic Automatic Gage Control*);

- calços hidráulicos (*housing liners*);
- aumento do arco de contato do cilindro de trabalho.

Observação: para laminadores mais modernos os fabricantes desenvolveram amortecedores ajustáveis para a frequência específica (*tuned dampers*), que são instalados sobre os cilindros de encosto, evitando o *chatter* da 3ª oitava.

O amortecimento no interior do laminador ocorre na mordida dos cilindros, devido à deformação plástica da chapa e sua interação dinâmica. De acordo com Tamiya (1980), alterações periódicas na velocidade de laminação, resultam em variações entre cadeiras, produzindo amortecimento. Dinamicamente, o arco de contato e a variação de tensão na entrada da tira, ocasionam uma perturbação na velocidade de saída. Tlusty (1982) propôs que ambos os amortecimentos, positivo e negativo, existem simultaneamente na mordida dos cilindros. O amortecimento negativo do material promove vibrações na estrutura, enquanto o amortecimento positivo atenua a vibração.

A eficiência do amortecimento em laminadores foi atingida através das seguintes ações:

- aumento do diâmetro dos cilindros de trabalho;
- reduções mais severas;
- diminuição da velocidade de laminação;
- implementação de dispositivos que aumentam área de contato para dissipar a energia vibracional (Lou (1999); (ASKO (1996))).

2.6.4 - Formas de evitar o desenvolvimento de vibração no laminador

Após o modelamento, observando as situações dos cilindros e dos padrões de processo Roberts (1978) sugeriu algumas maneiras de se evitar e/ou eliminar o desenvolvimento de vibração no laminador que são:

- **alterar a velocidade de laminação**

Devido à crítica ligação entre o diâmetro do *backup roll*, cilindro de apoio, e a velocidade de laminação, os *backup rolls* estarão menos pertinentes a desenvolver marcas de *chatter* se a velocidade do laminador for frequentemente modificada. Ou

seja, caso aconteça a criação de marcas de *chatter* sob determinada velocidade de laminação, elas serão sobrepostas ao alterar a velocidade, deixando o agravamento da situação. Normalmente com constantes corridas de uma definida largura que são feitas nos laminadores, podem proporcionar circunstâncias ideais para as marcas de *chatter* nos cilindros.

Contudo, se decidida por essa pequena mudança na velocidade de laminação como uma medida preventiva, mostra-se uma boa forma cautela a progressão do *chatter* e consegue aprimorar o desempenho do laminador e o aumento o ciclo de uso dos *backup rolls*.

- **nos laminadores com mais de uma cadeira, fazer o uso dos backup rolls de maior diâmetro nas últimas cadeiras**

Roberts (1978) também observou que em *backup rolls* de maior diâmetro, a proporção dos impactos provocados pelo *chatter* de quinta oitava era menor, por isso aconselha que seja dada preferência a esse modelo de rolo nas últimas cadeiras de laminadores do modelo *tandem*. Do mesmo modo é aconselhado, caso haja troca dos *backup rolls* por vibrações excessivas, procurar colocar rolos com diâmetros diferentes, para buscar conter a vibração no laminador.

- **evitar usar *backup rolls* desgastados**

No *chatter* de quinta oitava pode acontecer que os *backup rolls* se danifique no processo, por esse motivo, é aconselhado que eles venham ser retirados e retificados. Nos casos mais graves, onde ocorre até lascamentos da face do *backup roll*, é essencial assegurar que toda camada danificada seja retirada antes da volta do rolo ao laminador. É recomendada em alguns casos que retíficas planejam-se para retirada de uma camada superficial a cada três ou quatro retíficas habituais, ainda que seja uma medida a princípio cara para a empresa, ela reduzirá a vida útil desses cilindros, e ela pode ser propícia considerando os prejuízos que podem acontecer se os rolos de qualidade suspeita sejam usados.

- **evitar vibração nos laminadores**

Normalmente, em laminadores corretamente ajustados, as vibrações não

alcançarão níveis preocupantes. Porém, caso esteja acontecendo, é necessário que medidas como a diminuição da velocidade de laminação, sejam usadas para impedir a agravamento da situação.

- **impedir fontes causadoras de vibração no laminador**

Por se uma estrutura rígida, de vez em quando outra parte do laminador, como falha no acoplamento do *spindle pod* ou rolamento defeituoso, podem provocar vibrações que serão conduzidas para a chapa. O *spindle pod* é o ponto onde a ponta do cilindro de trabalho conecta com o eixo que transmite o torque do motor. Com um acoplamento ruim, irá produzir forças indesejáveis que transmitir por toda a estrutura do laminador.

3 – METODOLOGIA

O processo de laminação a frio consiste em um processo de deformação plástica que envolve fatores como atrito e esforços dinâmicos (rotação, compressão, tração etc.), conforme mostrado na Figura 23, que criam um cenário propício a ocorrência de níveis indesejáveis de vibração. E esses níveis de vibração em valores elevados podem gerar desvios de qualidade por variação de espessura, arrebatamento, aspecto deficiente (marcas horizontais impressas ao longo da folha metálica).

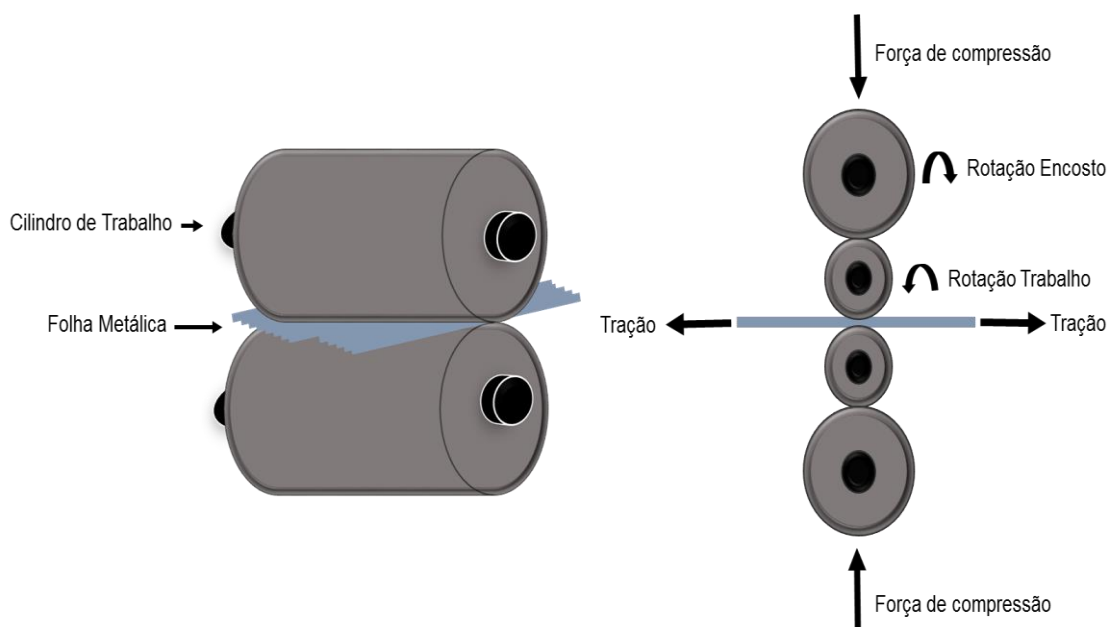


Figura 23 - Diagrama de esforços de laminação

Fonte: Autor

3.1 - Seleção da Cadeira

Em um processo de laminação existem vários tipos de laminadores, porém, o laminador do estudo é do tipo *quádruplo contínuo*, que é composto por uma estrutura (cadeira) que recebe os cilindros. Existem vários modelos de montagem, com uma ou diversas cadeiras. Neste último tipo de montagem, o propósito é dividir a redução requerida entre as cadeiras.

3.1.1 - Laminador quádruo contínuo

O laminador é *4-high* ou *quádruo*, é o mais comum na laminação a frio, o qual é constituído por dois cilindros de diâmetro maior que atua como cilindros de apoio (encosto) e dois cilindros de diâmetro menor, que atua como cilindros de trabalho. Essa configuração possibilita que cargas maiores sejam aplicadas no processo de laminação, proporcionando que reduções maiores e mais primordiais sejam alcançadas, elevando a produtividade de acordo com a Figura 24.

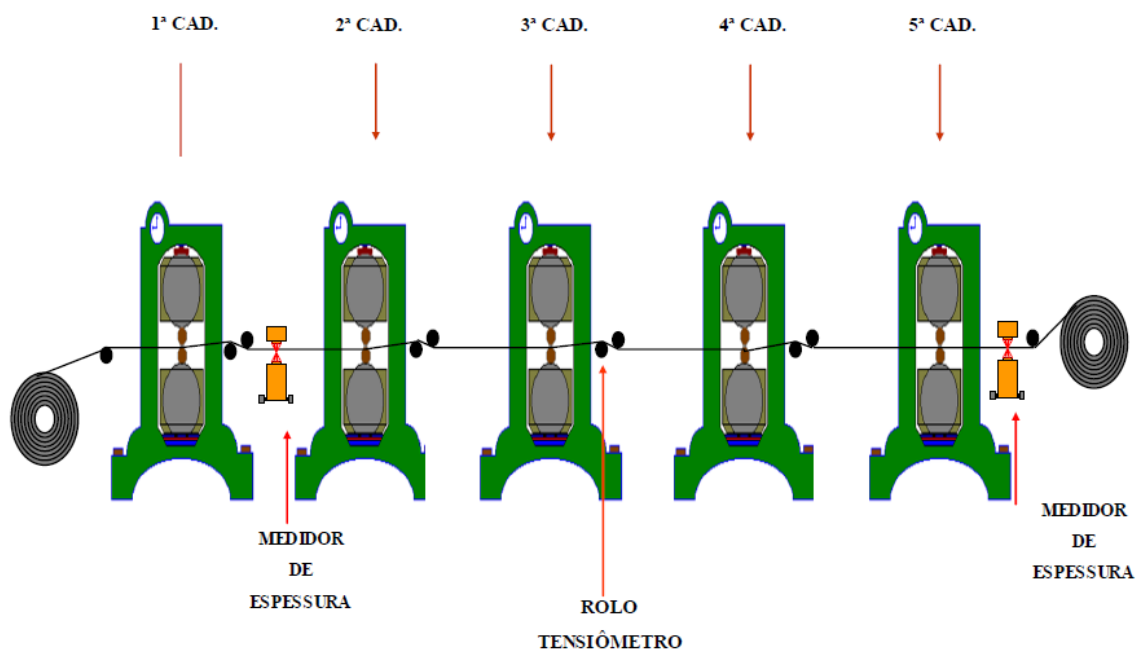


Figura 24 - Trem de laminação de um laminador de tiras a frio Quádruo Contínuo

Fonte: Gomes, 2007

3.2 - Falhas Ocorridas

Em um sistema de laminação encontramos uma associação de fenômenos dinâmicos que o tornam autoexcitável, o que irá ocasionar a vibração mecânica. E este em níveis elevados e/ou descontrolados, provoca a instabilidade do processo que por sua vez gera defeitos na folha laminada descritos como marca de vibração que é amplamente discutido no setor siderúrgico e acadêmico como *chatter* e no setor siderúrgico podem ser classificados com os códigos de MB e VX.

As marcas de vibrações são o resultado de algumas condições de vibração indesejáveis durante o processo de laminação, que criam uma instabilidade no mesmo

e este por sua vez irá degradar a qualidade superficial da tira e/ou afetar a espessura da tira provocando desvios de qualidades e, dependendo da severidade que os níveis de vibração atingirem, pode acontecer o comprometimento da integridade de alguns componentes do equipamento.

3.2.1 - Desvio de qualidade classificado com VX (*chatter* 5ª oitava)

As tiras metálicas laminadas a frio são desviadas por marcas de vibração quando apresentam marcas horizontais e/ou transversais impressas na superfície do produto laminado, causando assim um aspecto superficial deficiente no mesmo, e se não ocorrer variação de espessura significativas, o desvio será classificado, de acordo com a literatura, como *chatter* de 5ª oitava e no setor siderúrgico pode receber a classificação de VX que é um código usado por algumas empresas. Abaixo será apresentado uma ilustração didática do desvio na Figura 25.



Figura 25 - Visão superior e visão lateral da folha metálica com VX

Fonte: Autor

3.2.2 - Desvio de qualidade classificado como MB (*chatter* 3ª oitava)

As tiras metálicas laminadas a frio são desviadas como *chatter* quando apresentam desvios significativos de espessura e marcas horizontais e/ou transversais impressas na superfície do produto laminado, causando assim

respectivamente concentração de tensão (encruamento) e um aspecto superficial deficiente no mesmo, o desvio será classificado de acordo com a literatura como “*chatter* de 3ª oitava” e no setor siderúrgico pode receber a classificação de MB que é um código usado por algumas empresas. Abaixo será apresentado uma ilustração didática do desvio na Figura 26.

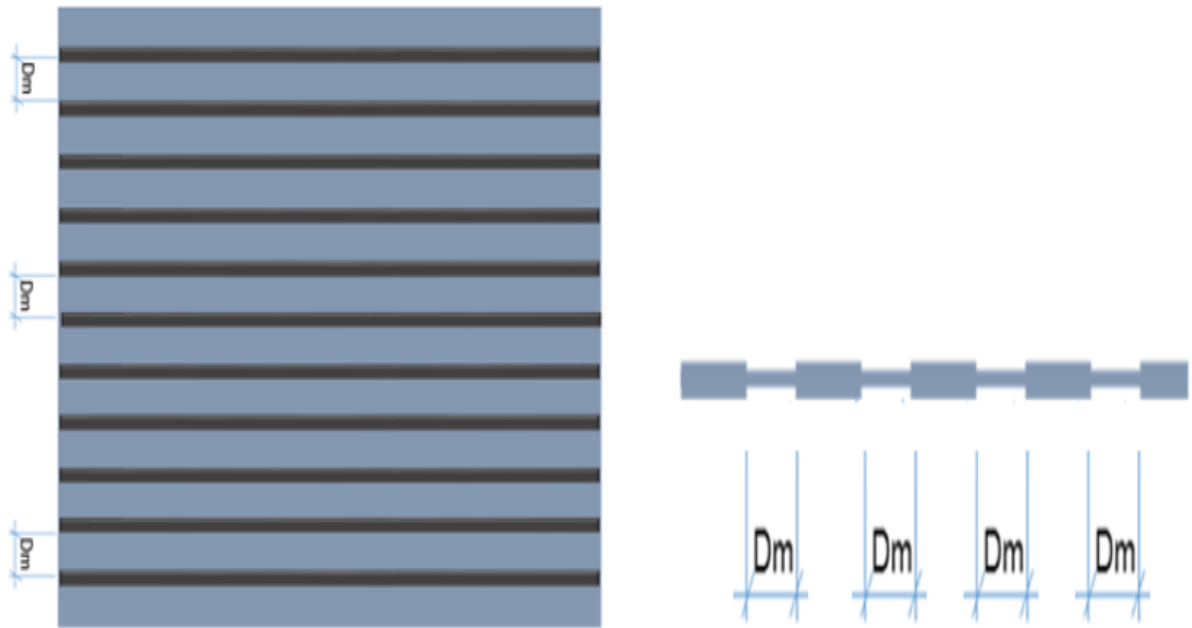


Figura 26 - Visão superior e visão lateral da folha metálica com MB

Fonte: Autor

3.2.3 - Consequências

Os principais problemas provocados por elevados níveis de vibração em um processo de laminação é a interferência das marcas superficiais na qualidade do processo de litografia e da concentração de tensão nas regiões onde ocorrem reduções de espessura excessivas, pois nestas regiões acontecem o encruamento do material, o que provoca a ruptura tira ou folha metálica durante a conformação mecânica ou até mesmo depois do final acabado, exemplo: uma lata de creme de leite se rompe nas prateleiras de um supermercado misteriosamente. A seguir será apresentado na Figura 27 as consequências dos desvios provocados por vibração nas tiras metálicas:

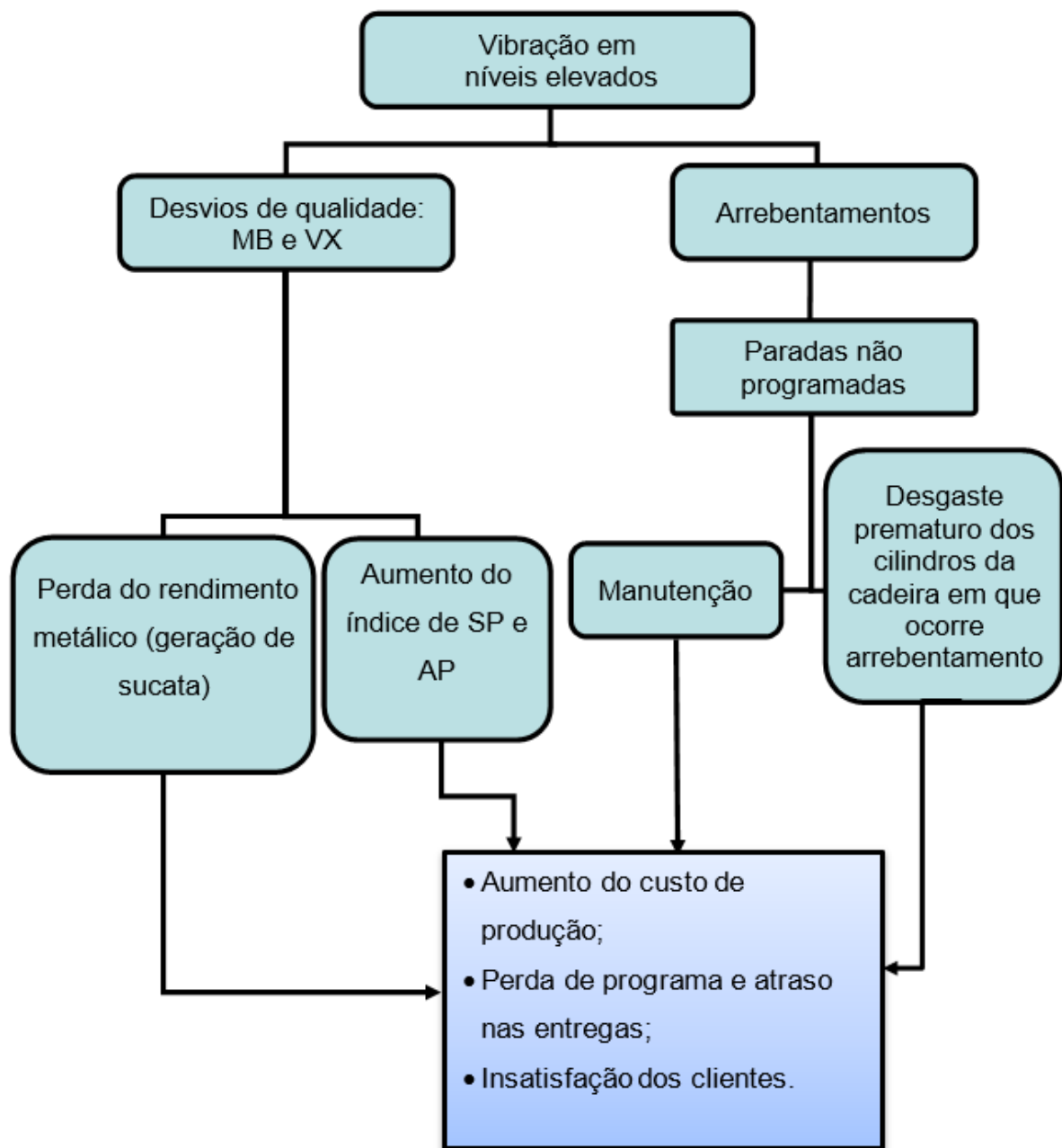


Figura 27- Conseqüências dos desvios provocado por vibração nas tiras metálicas

Fonte: Autor

3.3 - Metodologia Utilizada

O desenvolvimento deste trabalho se deu através de inspeção *In Loco*, onde ocorreu:

- 1) inspeção *In Loco* no equipamento;
- 2) configuração de *software* e montagem *hardware*;
- 3) monitoramento *on-line* de vibração;

- 4) definições de bandas de frequências naturais;
- 5) definições das frequências de *chatter*;
- 6) mapeamento dos valores de aceleração vibracional e seus efeitos no processo;
- 7) coleta e análise de dados;
- 8) estudo de defeitos que provocam desvios de qualidade por MB e VX;
- 9) elaboração de alarmes prevenção de desvios de qualidade;
- 10) elaboração do relatório.

4 – ESTUDO DE CASO

4.1 - Experimento Industrial

O propósito deste capítulo é descrever e exemplificar de maneira prática uma metodologia desenvolvida com objetivo de analisar quantitativamente os níveis de vibração em um processo de laminação com intuito de identificar e antecipar de maneira preventiva/preditiva a elevação dos valores de vibração e assim evitar os efeitos negativos que geram desvios de qualidade no processo e, para atingir os resultados desejados serão aplicados os discutidos no Capítulo 2.

4.2 - Monitoramento de vibração *on-line*

O monitoramento de vibração *on-line* consiste na coleta de dados continuamente por meio de sensor fixo instalado na base do parafuso da 5ª cadeira lado operador. O mesmo capta a vibração do equipamento durante a laminação na forma de impulsos elétricos e os enviam para o modulo xm-120 que transforma os sinais elétricos captados pelo sensor em valores matemáticos que podem ser lidos nas unidades medidas de deslocamento, velocidade e aceleração, através de um computador instalado na sala de operação, a seguir será ilustrado o esquema de instalação do sistema de monitoramento do laminador de tiras frio, conforme a Figura 28.

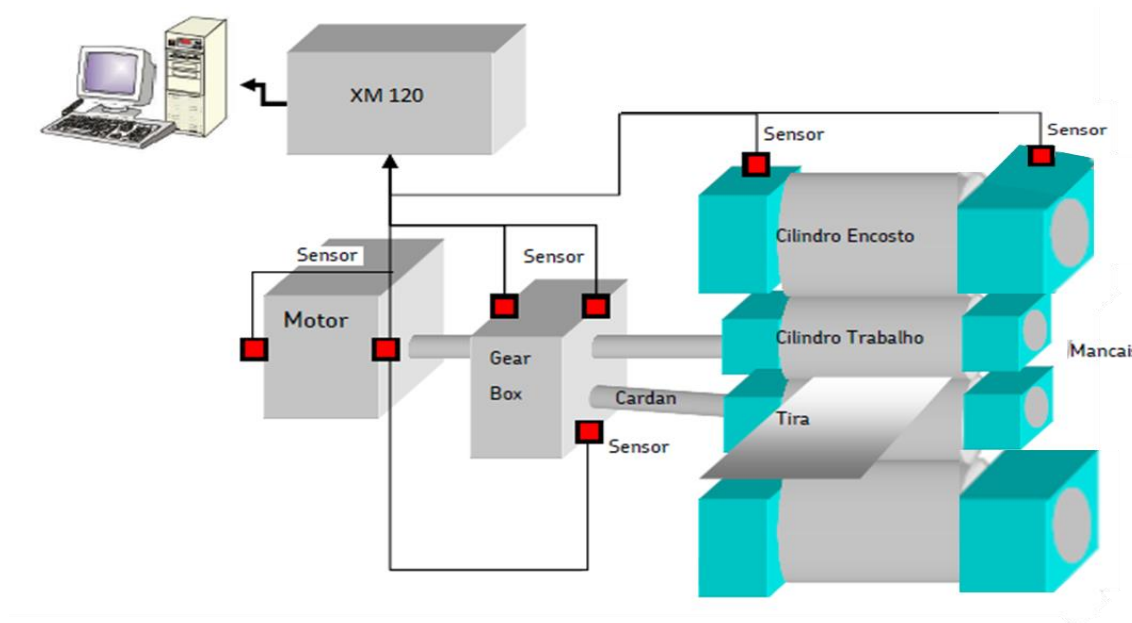


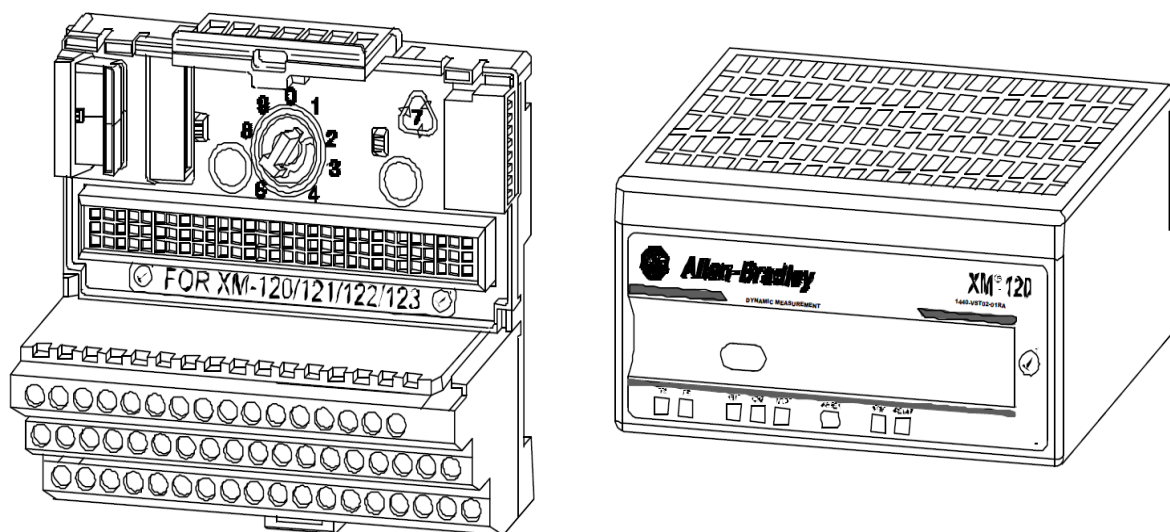
Figura 28 - Esquema de instalação do sistema de vibração na laminação de tiras frio

Fonte: <http://tecnologiamm.com.br/files/v5n4/v5n4a10.pdf>

4.3 - Especificação técnica do sistema de monitoramento:

4.3.1 - Modulo xm-120

O xm -120 consiste em uma unidade de base terminal e um instrumento módulo. O módulo de medição dinâmica xm-120 e a base do terminal de medição dinâmica xm -940 são mostrados nas Figuras 29.



XM-940 Dynamic Measurement Module
Terminal Base Unit
Cat. No. 1440-TB-A

XM-120 Dynamic Measurement Module
Cat. No. 1440-VST02-01RA

Figura 29 - Modelo xm -120 e xm - 940

Fonte: www.literature.rockwellautomation.com

O módulo de medição dinâmica xm -120 é montado na base do terminal xm - 940 através de um interruptor de chave e um conector de 96 pinos. O módulo contém a eletrônica de medição, processadores, relés e porta de interface serial para configuração local.

Base de terminais do módulo de medição dinâmica xm - 940 - trilho DIN unidade base montada que fornece terminações para a fiação de campo exigido pelo módulo de vibração xm -120.

4.3.2 - Sensor piezoelétrico

Foi utilizado o modelo 9200 de uso geral, precisão de baixo perfil, acelerômetro de estilo anelar - 100 mV / g ($\pm 5\%$), 0,4-10,000 Hz (3dB), saída lateral, conector *Mil Spec*, conforme ilustrado na Figura 30.

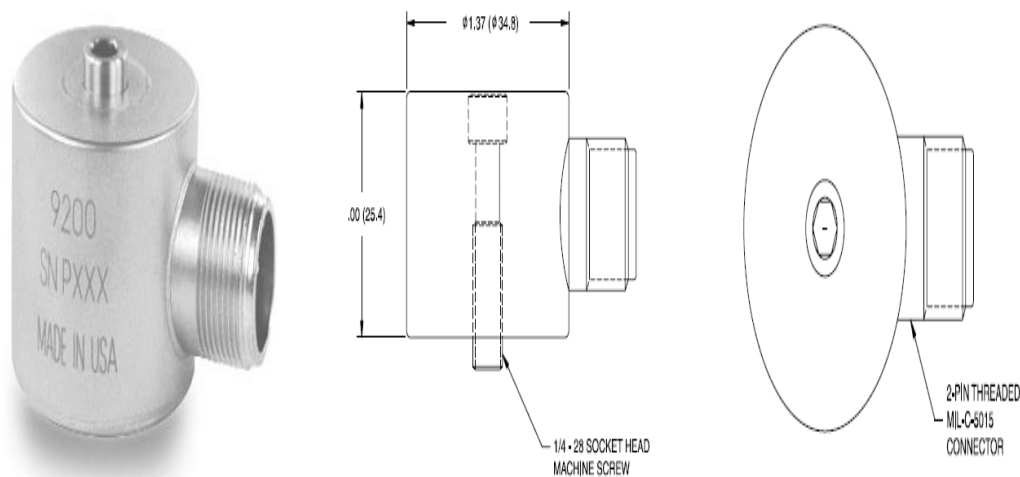


Figura 30 - Sensor piezoelétrico modelo 9200

Fonte: www.literature.rockwellautomation.com

4.4 - Caracterização das Frequências Naturais

Como vimos no capítulo 02, frequência natural é uma característica específica do sistema e/ou componente que depende diretamente de sua massa e rigidez. E quando ocorre uma excitação externa na mesma faixa da frequência natural, ocorre o fenômeno de ressonância, que provoca o aumento da amplitude da onda e conseqüentemente a elevação dos valores de vibração a níveis que podem afetar a integridade do sistema e causar prejuízos aos processos.

Para se definir a frequência natural de um sistema e/ou componente existem basicamente duas maneiras, o método matemático que constitui-se de cálculos analíticos ou modelos matemáticos computacionais, que são aptos a identificar as frequências naturais, e o método experimental que consiste em identificar as frequências naturais no próprio sistema e/ou componente montado, onde se provoca uma vibração para que o sistema observado entre em ressonância.

4.4.1 - Frequência natural do cilindro de trabalho

Para determinar a frequência natural do cilindro de trabalho foi empregado o método experimental, onde observamos a rotação do cilindro de trabalho, diâmetro e, principalmente, realizamos variações de velocidade no processo e excitações externas que provocaram a ressonância do sistema, sendo assim, observamos no caso estudado que as respostas para o teste aconteceram entre de 600 Hz a 800 Hz, porém foi verificado que devido ao contato direto entre o cilindro de trabalho e o cilindro de encosto acontece a propagação de vibração através da teoria de propagação de onda por meio sólido, sendo assim podemos dizer que pequenas falhas como por exemplo superfícies irregulares e/ou problemas nos mancais do cilindro de encosto podem gerar ressonância no cilindro de trabalho. Na Figura 31 será ilustrado o gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de trabalho + encosto.

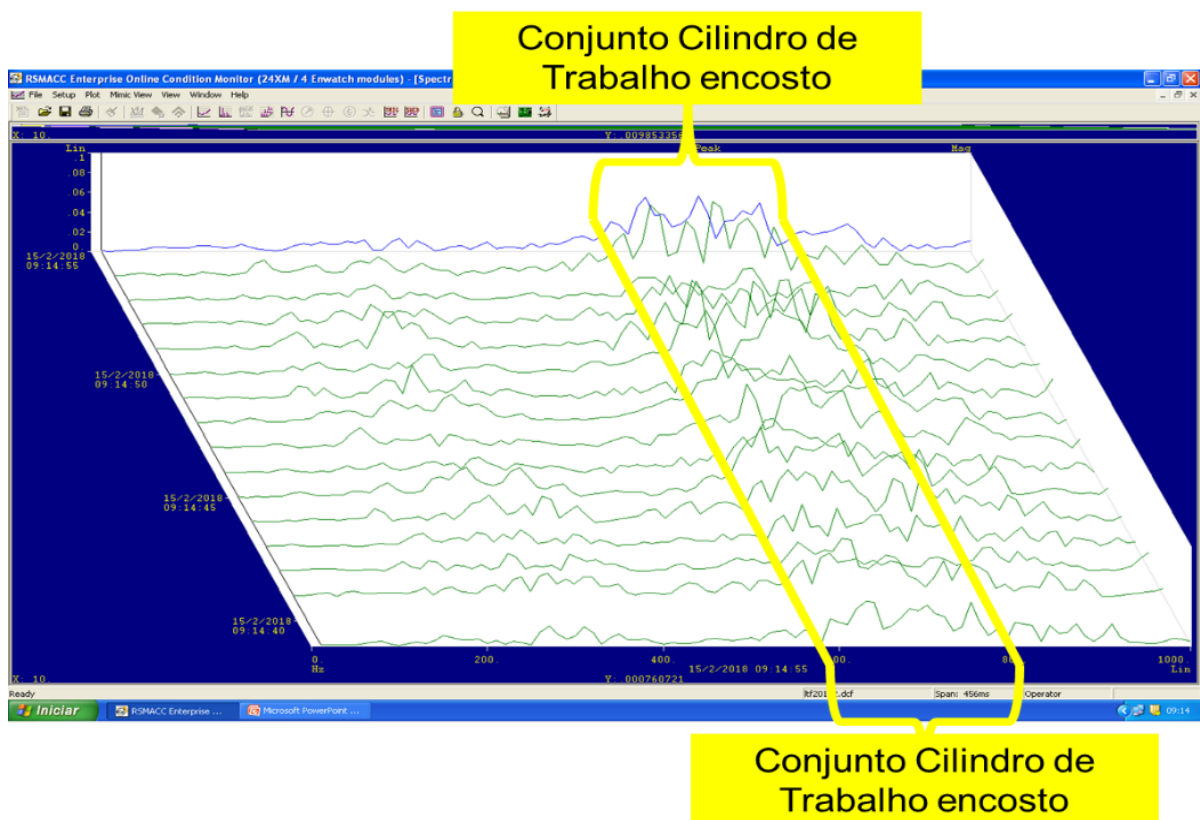


Figura 31 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de trabalho + encosto

Fonte: Autor

4.4.2 - Frequência natural do cilindro de encosto

Para definir a frequência natural do cilindro de encosto foi utilizado o método experimental, onde observamos a rotação do cilindro de encosto, diâmetro e principalmente realizamos variações de velocidade no processo e excitações externas que provocaram a ressonância do sistema, sendo assim, no caso estudado as respostas para o teste aconteceram entre a faixa de 180 Hz e 420 Hz, conforme Figura 32. Vale destacar que o efeito ressonância no cilindro de encosto é bem mais danoso ao equipamento e ao processo devido ao fato do mesmo possuir maiores diâmetros e maiores massas.

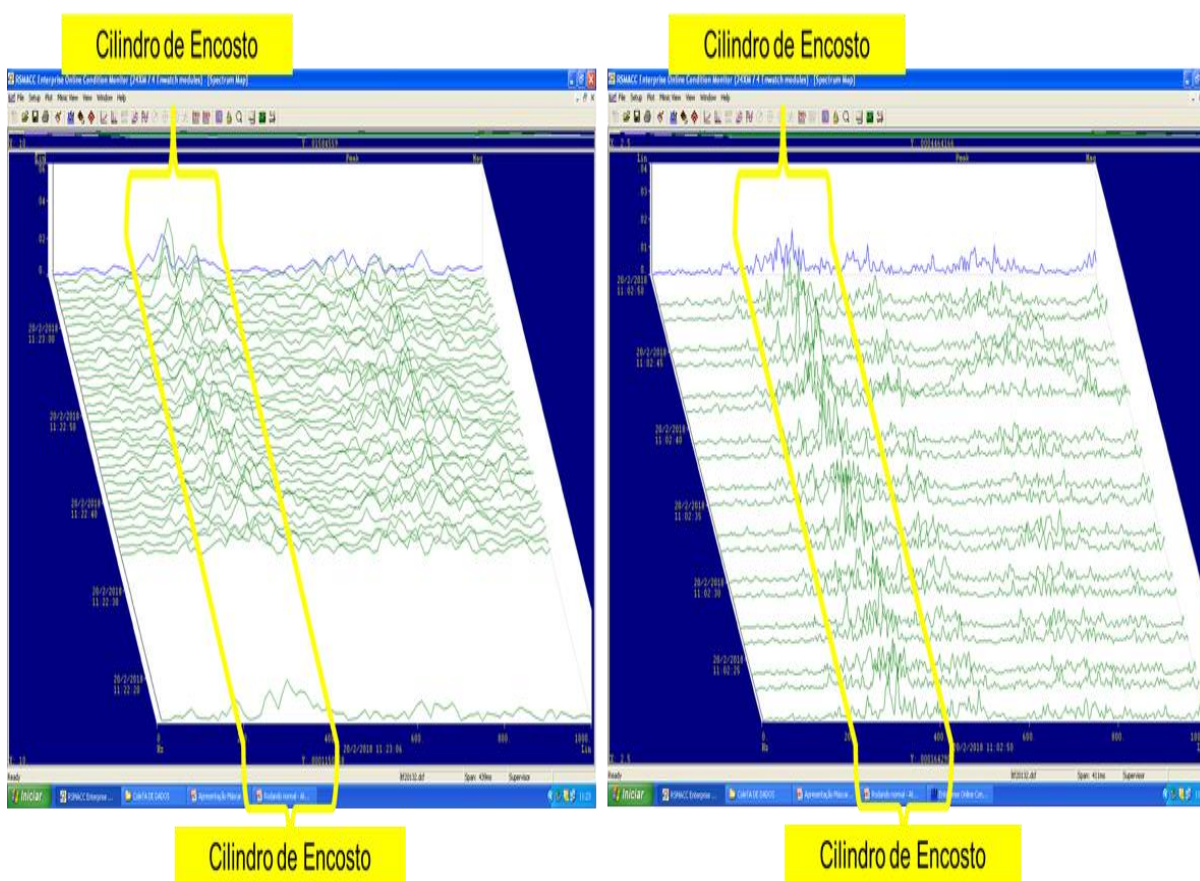


Figura 32 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de encosto

Fonte: Autor

4.4.3 - Frequência natural do cilindro de trabalho

Para definir a frequência natural do conjunto de acionamento foi utilizado o método experimental, onde observamos que as variações acontecem em frequências mais baixas, devido ao equipamento estar rompendo/vencendo a inércia e por estar

em aceleração está forçando o conjunto de acionamento e com velocidades e rotações baixas, sendo assim a as vibrações acontecem entre a faixa de 1 Hz a 100 Hz e esta mesma vibração pode gerar ressonância no sistema cilindro de trabalho + cilindro de encosto provocando assim danos ao processo. Na figura 33 será ilustrado o gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de acionamento.

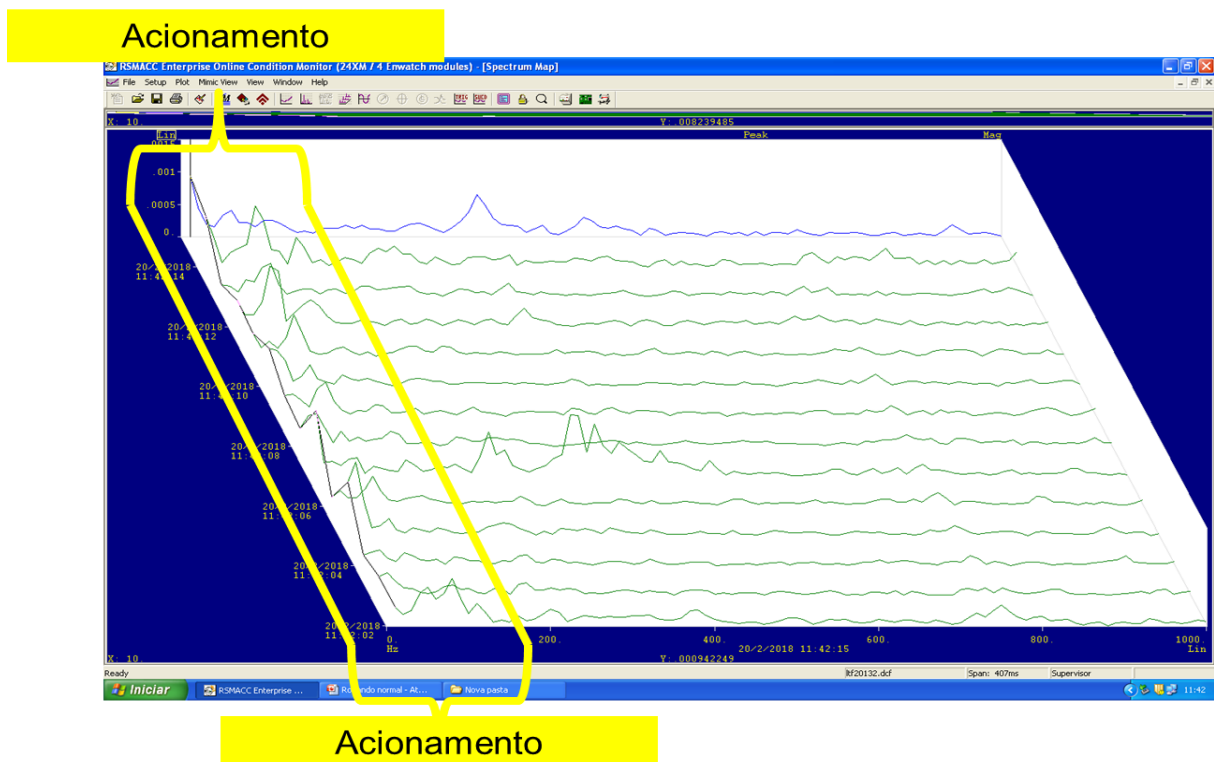


Figura 33 - Gráfico das frequências naturais do conjunto cilindro de acionamento

Fonte: Autor

4.5 - Definição das Bandas ou Faixas de Frequências a Serem Analisadas

De acordo com as observações feitas nos itens 4.4, 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3 e com os dados coletados e analisados, verificamos nos espectros de frequência que no decorrer do processo de laminação ocorra uma grande incidência de atividades vibratórias nas bandas de frequência de 150 a 450 Hz e de 600 a 800 Hz, sendo que quando surgem excitações que produzem ressonância nas faixas de 3ª e 5ª oitavas afetam diretamente a qualidade da tira metálica.

4.6 - Caracterização da Frequência de *Chatter*

Para caracterizar a frequência de *chatter* separamos 10 amostras das tiras metálicas desviadas por *chatter*-MB e por VX-marca de vibração, em seguida medimos a distância média entre as marcas horizontais nas amostras e calculamos a distância média entre as marcas para cada tipo de desvio e em seguida aplicamos a seguinte fórmula:

$$f_{chatter} = v/dm \quad (8)$$

Onde:

$f_{chatter}$ = frequência de *Chatter*;

v = velocidade;

dm = distância entre as marcas na tira

Na figura 34 consegue-se visualizar melhor o que é dm .

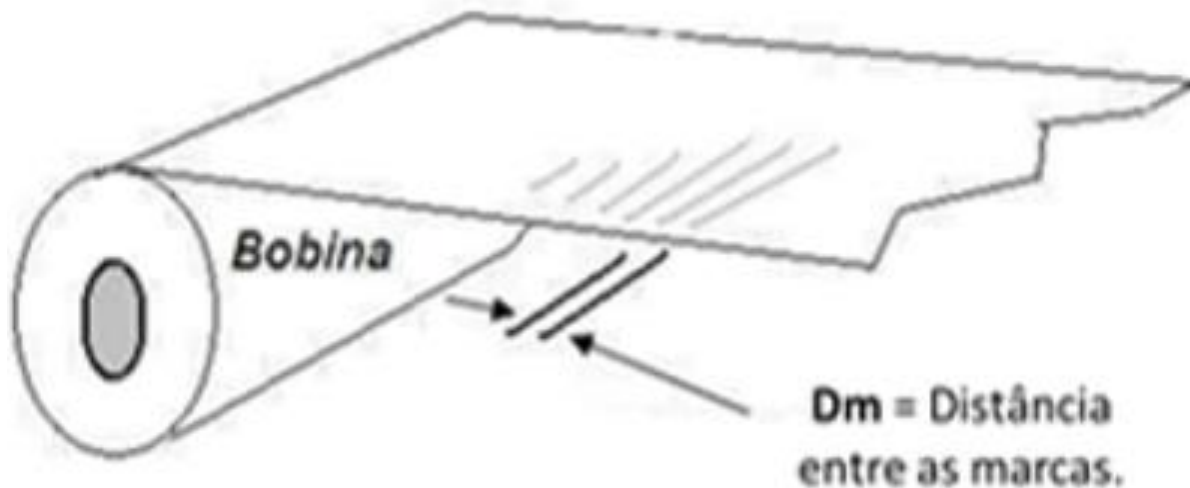


Figura 34 - Demonstração da distância entre as marcas - dm

Fonte: Autor

Para o experimento, foram feitos os cálculos conforme os dados abaixo.

Dados:

- dm (distância entre as marcas) média para *chatter* 3ª oitava = 44 mm;
- dm (distância entre as marcas) média para *chatter* 5ª oitava = 24 mm;
- velocidade média de laminação = 18 m/s.

Resultado:

- dm (distância entre as marcas) média para *chatter* 3ª oitava = 409 Hz;
- dm (distância entre as marcas) média para *chatter* 5ª oitava = 750 Hz.

4.7 - Mapeamento dos Valores de Aceleração Vibracional e Seus Efeitos no Processo

Durante a aplicação do método experimental no processo ocorreu a observação das variáveis do processo (velocidade, concentração de óleo, aperto da cadeira e tensão entre vãos), onde foram coletados dados do sistema de monitoramento *on-line* e foi feita a associação dos dados coletados com as variáveis do processo e as falhas ocorridas que se relacionavam com a elevação da energia vibracional.

4.7.1 - Processo de laminação sem registro de ocorrências

No espectro de frequência coletado e apresentado na Figura 35, verificamos uma maior incidência de atividade vibratória na banda de frequência de 3ª oitava (150 de 450 Hz) e na banda de frequência de 5ª oitava (600 a 800 Hz), sendo a que banda de 3ª oitava está de modo direto associada à frequência natural do cilindro de encosto e a de 5ª oitava está diretamente relacionada ao conjunto cilindro de encosto + cilindro de trabalho, e quando o ocorre excitações nas frequências naturais do cilindro de encosto ou do cilindro de trabalho do laminador o fenômeno de ressonância irá afetar a qualidade do processo.

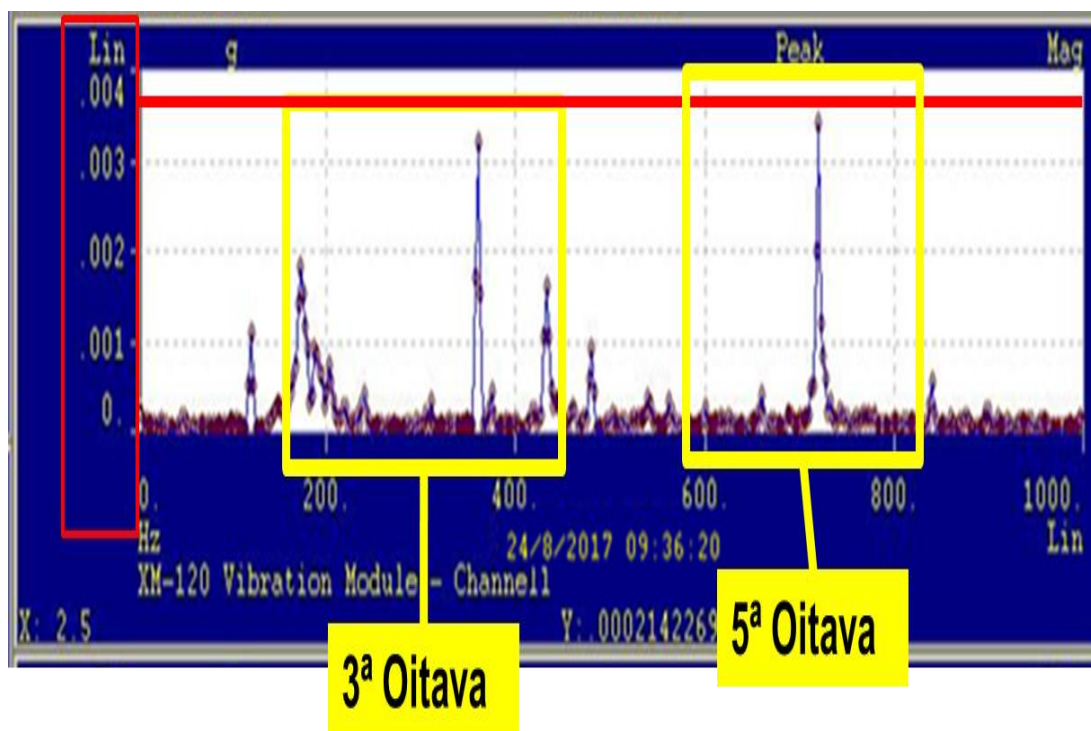


Figura 35 - Gráfico das bandas de frequências nas faixas de 3ª e 5ª oitavas

Fonte: Autor

4.7.2 - Ocorrência de *chatter* de 3ª oitava

No dia 18 de setembro de 2017 as 10h:31min o laminador apresentou de forma audível o fenômeno de *chatter*, e o espectro mostra excitação, aproximadamente, de 1.5 g na faixa de frequência entre 150 e 200 Hz e as amostras desviadas por *chatter* de 3ª oitava – MB, apresentaram uma frequência média para *chatter* 3ª oitava = 409 Hz, conforme item 4.6.

Considerações:

- Tamiya (1980) e Roberts (1987) relacionaram o fenômeno de *chatter* de 3ª oitava com cilindro de encosto;
- Meehan (1998) determinou que Chatter de 3ª oitava acontece na faixa de 128 Hz a 256 Hz de acordo com a tabela 1 (página 48).

Na Figura 36 está ilustrando o gráfico da ocorrência de *chatter* de 3ª oitava.

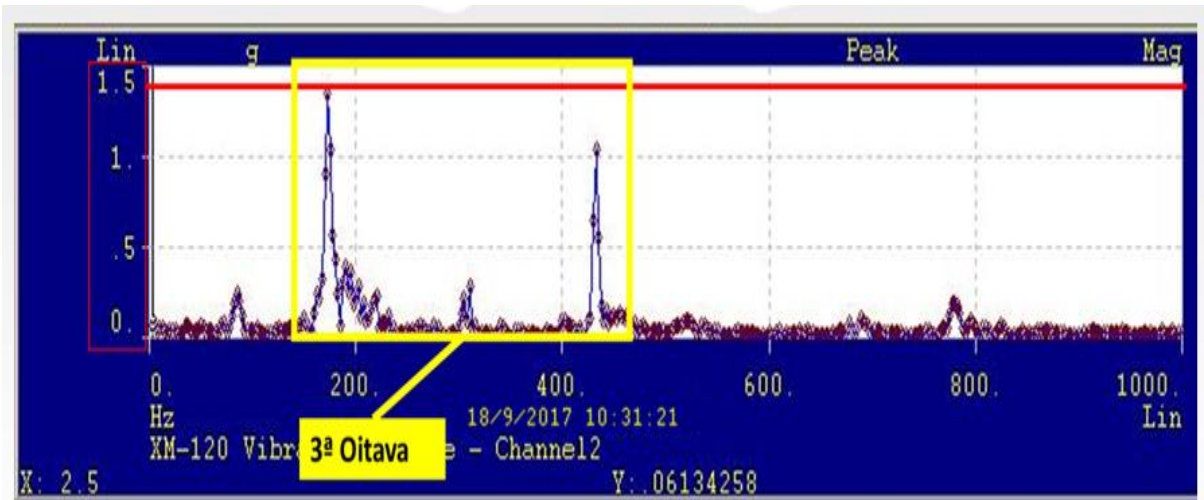


Figura 36 - Gráfico de ocorrência de chatter de 3ª oitava

Fonte: Autor

Assim, podemos dizer que as vibrações elevadas que acontecem na faixa de 110 Hz a 260 Hz geram ressonância, que por sua vez irá provocar o fenômeno do *chatter* de 3ª oitava no processo, e conforme o estudo, observa-se que a elevação dos níveis de vibrações acontecem de modo muito rápido indicando assim, ser um fenômeno auto excitável em função do sistema/processo e que ocorre entre a faixa de 110 Hz e 450 Hz e pode ser fonte geradora de ressonância no sistema.

4.7.3 - Ocorrência de *chatter* de 5ª oitava

No dia 10 de agosto de 2017 as tiras metálicas laminadas apresentaram marcas superficiais na direção horizontal e com um padrão de repetição.

Considerações:

- Meehan (1998) determinou que *chatter* de 5ª oitava acontece na faixa de 500 Hz a 700 Hz de acordo com a tabela 1 (página 48);
- a distância entre marcas superficiais para o *chatter* de 5ª oitava estão entre 6 e 60 mm;
- frequência média para *chatter* 5ª oitava = 750 Hz, conforme item 4.6.

No espectro de frequência coletado e apresentado abaixo, verificamos uma maior incidência de atividade vibratória na banda de frequência de 5ª oitava (550 a 850 Hz), sendo que esta banda está relacionada ao cilindro de trabalho que devido ao menor diâmetro trabalha em frequências maiores e não são identificadas de forma

audível, e quando ocorrem excitações nas frequências naturais dos cilindros de trabalho do laminador, ocorre o fenômeno de ressonância que irá afetar a qualidade do processo através do fenômeno de *chatter* 5ª oitava.

Quando avaliamos no espectro aceleração x frequência, Figura 37, não se consegue determinar de forma rápida e objetiva a ocorrência do fenômeno, porém no espectro de aceleração x frequência tipo cascata, Figura 38, é mais fácil observar melhor a ocorrência e/ou incidência de atividade vibratória na banda de frequência de 5ª oitava.

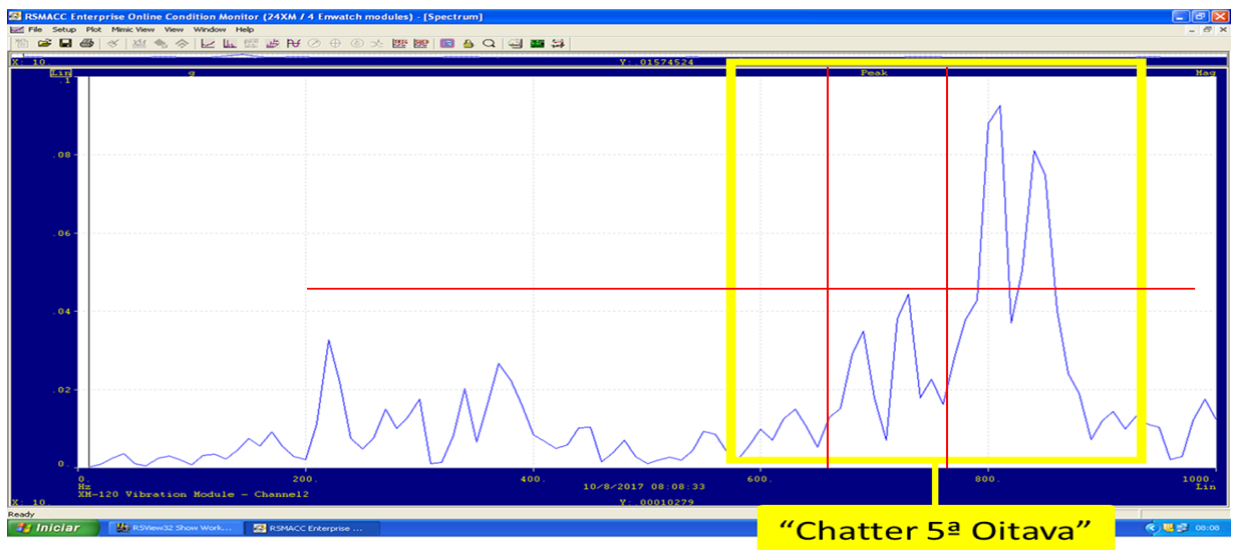


Figura 37 - Espectro aceleração x frequência

Fonte: Autor

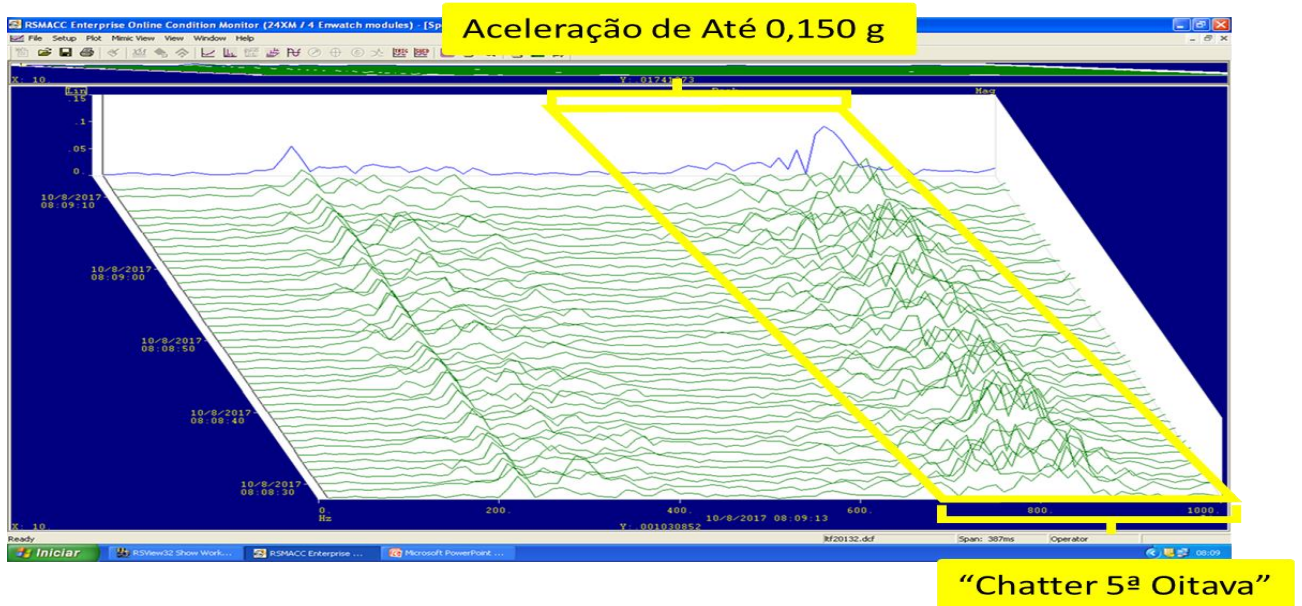


Figura 38 - Espectro aceleração x frequência tipo cascata

Fonte: Autor

Ao observar o funcionamento do laminador e a ocorrência do *chatter* de 5ª oitava, verificamos que o fenômeno está relacionado à ressonância no cilindro de trabalho e que pode ser produzida por uma simples falha na superfície do cilindro de trabalho e/ou encosto, proveniente do processo de retífica, erros operacionais e/ou arrebitamentos, falha na lubrificação do mancais, deficiência ou concentração da solução (água + óleo) fora de padrão e tensão alta entre os vãos do trem de laminação. Após observações, análises e estudos do processo identificamos uma ligação entre o aumento de energia vibracional e o defeito em questão, pois como ilustrado no espectro cascata Figura 39, o valor de vibração medido aumenta de maneira constante, o que irá ocasionar um aumento constante e gradual do nível de vibração global.

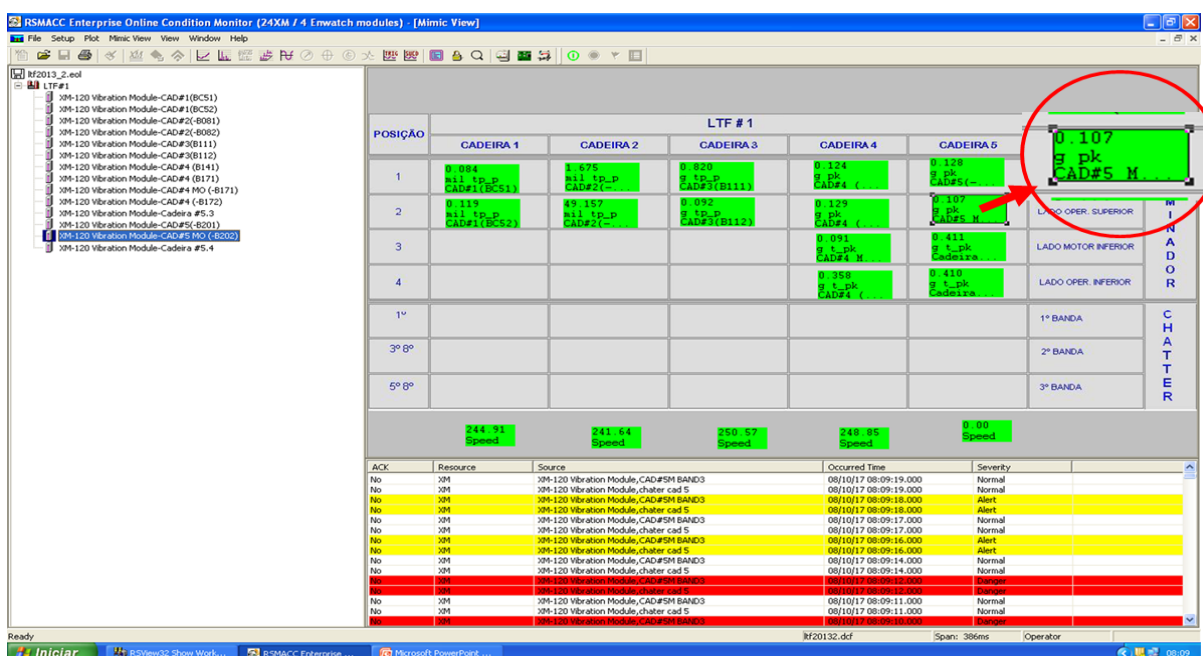


Figura 39 - Resultado da análise de vibração para o chatter de 5ª oitava

Fonte: Autor

4.7.4 - Comparação de severidade

A severidade do *chatter* de 5ª oitava é menor do que a do *chatter* de 3ª oitava, porém, o mesmo pode ser fonte excitante do mecanismo do *chatter* de 3ª oitava, conforme Figura 40.

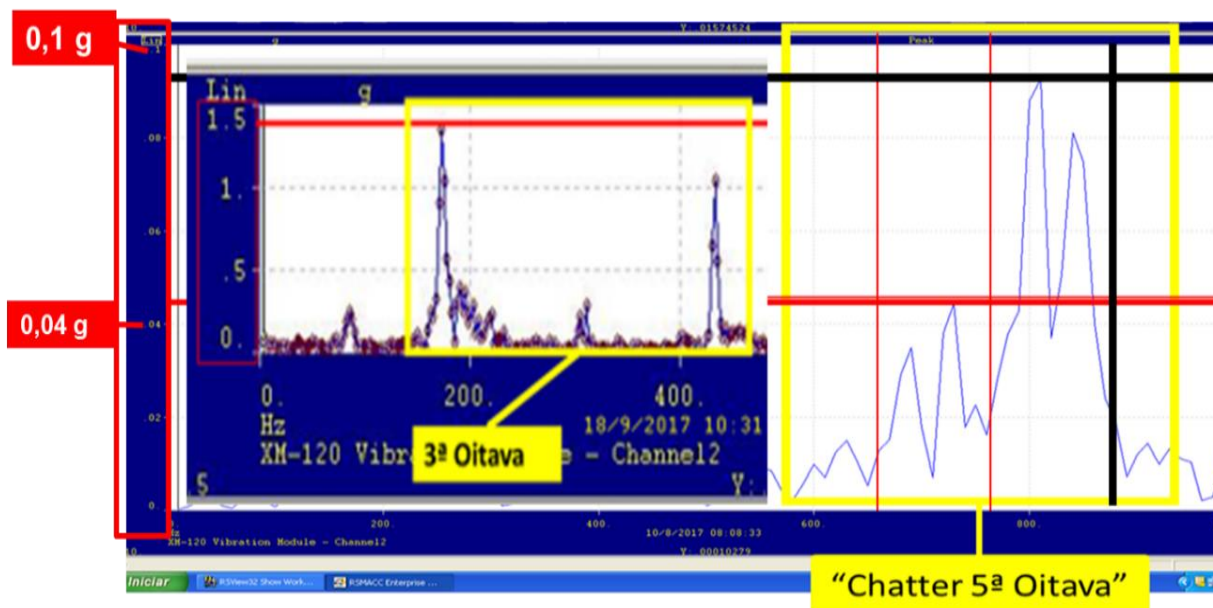


Figura 40 - Gráfico de comparação de severidade

Fonte: Autor

4.7.5 - Diagnóstico e análise das falhas/ocorrências

Foi usado, como base para identificação do problema, a classificação e divisão proposta na tabela 1 (página 48) e, durante a coleta de dados para realização deste estudo sobre o efeito de vibrações no processo de laminação de tiras a frio, foram identificados alguns eventos que geram falhas, que por sua vez interferem na eficiência e qualidade do processo. A seguir será apresentado um relatório descrevendo/detalhando as observações pertinentes deste estudo.

No estudo identificamos que as vibrações em níveis elevados podem provocar no laminador a ocorrência de um fenômeno que foi classificado com o *chatter*, e este fenômeno acontece quando são provocadas excitações externas nas frequências naturais do cilindro de encosto ou do cilindro de trabalho, provocando assim o aumento da amplitude de onda e fazendo os conjuntos de cilindros se movimentarem verticalmente e criando assim um componente de força vertical que irá afetar a qualidade superficial da tira metálica. Se for o de 5ª oitava, e se for o de 3ª oitava além, de afetar a qualidade superficial, irá provocar variação de espessura na tira metálica. Para identificar e antecipar o fenômeno foram determinados duas faixas de frequências e seus limites máximos de aceleração que devem ser monitorados. As faixas são baseadas nas frequências naturais do cilindro de encosto e do cilindro de trabalho e levam em consideração a variação de diâmetro e de velocidades usados

no processo, conforme Figura 41.



Figura 41 - Valores de alarmes de prevenção de desvios de qualidade

Fonte: Autor

No estudo também conseguiu-se identificar e relacionar algumas situações que envolvem equipamento e o próprio processo, que podem provocar e/ou agravar a ressonância nas faixas que geram o fenômeno de *chatter*, segue relação:

- o processo de laminação apresenta como características próprias de excitações nas faixas de frequência de 150 a 380 Hz e de 650 a 850 Hz, porém vibrações elevadas na faixa 650 a 850 Hz podem indicar folgas mecânicas no conjunto da cadeira em dispositivos como travas (trancas) e nos *liners* que quando desgastados permitem oscilações dos conjuntos;
- folgas no conjunto de cilindros de trabalho e/ou no acionamento dos mesmos podem provocar excitações entre 650 e 700 Hz, sendo assim, estas folgas podem provocar o *chatter* de 5ª oitava;
- de modo geral o diâmetro do cilindro irá interferir diretamente na vibração, pois quando se diminui o diâmetro, também tiramos massa do sistema, como consequência teremos o aumento da vibração;
- o controle da tensão no vão três intermediário/central do laminador se mostrou importante, pois o estudo mostrou que o aumento da tensão no vão provocou uma redução nos níveis de vibração, porém se a tensão cair e acontecer simultaneamente a diminuição da redução da última cadeira e/ou aumento da redução da primeira cadeira acontece o aumento dos níveis de vibração devido à falta de rigidez;

- associação do aumento da redução na cadeira final (5ª) com a redução/diminuição do diâmetro da cadeira anterior (4ª) provoca o aumento dos níveis de vibração, porém este aumento pode ser corrigido através do aumento da tensão no vão central (3/4);
- falhas no sistema de lubrificação dos mancais, pode elevar os níveis de vibrações entre 700 e 850 Hz.

4.8 - Análise Crítica e Recomendações

Através de avaliação crítica realizada através diagrama de Ishikawa das falhas, Figura 42, encontraram-se as seguintes oportunidades.

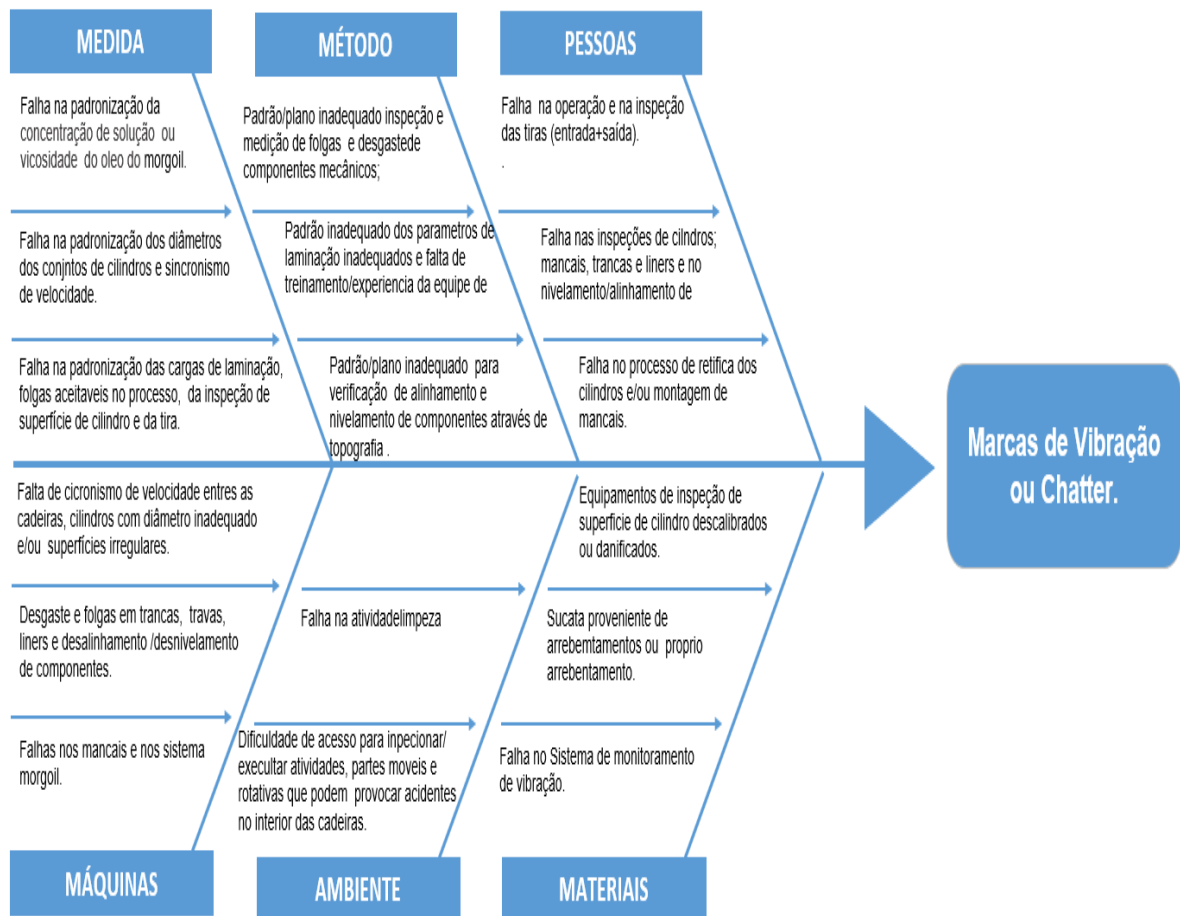


Figura 42 - Falhas de pessoas, padrão e processo

Fonte: Autor

Apresentamos abaixo uma lista de causas identificadas referentes a medida, método, pessoas, máquina, ambiente e matérias que pode potencializar efeitos das

vibrações no processo de laminação. Para cada causa identificada, seguem as recomendações para atenuar o efeito.

4.8.1 - Vibração inadequada (ocorrência de ressonância nas faixas de 3ª, 5ª oitava e torcional)

- Implantar um sistema de monitoramento de vibração com configuração de alarme, que alerte o operador sobre a elevação dos níveis de vibração através do modelo proposto neste estudo, e que respeite os valores e configurações propostos na figura 43.

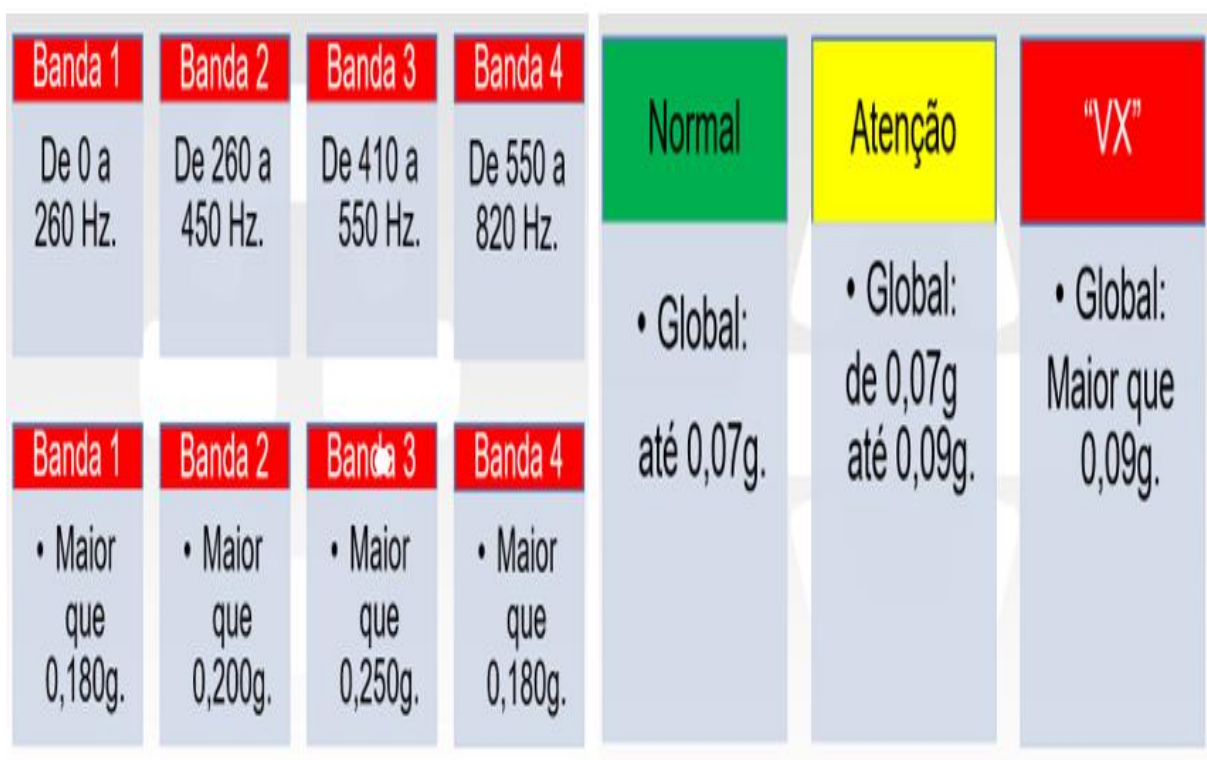


Figura 43 - Parâmetros para orientação de configuração de alarmes para alertas de vibrações em níveis prejudiciais ao processo.

Fonte: Autor

4.8.2 - Excesso de folga e/ou desgaste dos *liners*

Os *liners* são componentes mecânicos que possuem a função de eliminar folgas e servem de elementos de desgaste e devemos monitorar/acompanhar os desgastes/folgas dos *liners* dos mancais do cilindro de trabalho, cadeiras, mancais através de:

- rotina de inspeção da espessura e dureza dos liners, pois as mesmas devem atender a especificação do projeto;
- medição das distancias entre *liners* e entre *liners* e as pernas da cadeira, pois se deve atender as especificações do projeto;
- rotina de medições do dimensional externos dos mancais focado das distâncias entre as faces dos *liners*, pois se deve atender as especificações de projeto;
- implantar monitoramento *on-line* de vibração com alarme definido através dos modelos proposto durante no estudo;
- substituição de *liners* danificados.

4.8.3 - Excesso de folga/desgaste das trancas(travas) dos conjuntos de cilindros

- Rotina de inspeção/acompanhamento dos desgastes e integridade física dos conjuntos de trancas(travas);
- Substituição de trancas(travas) danificadas.

4.8.4 - Suporte da transmissão

- Rotina de inspeção/acompanhamento de alinhamento do conjunto de suporte da transmissão;
- Rotina de inspeção/acompanhamento de desgastes e integridade física do conjunto de suporte da transmissão;
- Substituição de conjunto de suporte da transmissão danificado.

4.8.5 - Sistemas e componentes internos da cadeira

- Rotina de inspeção/acompanhamento de alinhamento e nivelamento dos conjuntos de guias;
- Rotina de inspeção/acompanhamento de fixação, acionamento, desgastes e integridade física dos conjuntos de guias;
- Substituição de conjunto de guias danificado.

4.8.6 - Geometria inadequada da cadeira

- Criar rotina anual de medição topográfica dos conjuntos das cadeiras; incluindo o alinhamento do conjunto de conjunto de rolos tensor e tensiômetro.

4.8.7 - Sincronismo de velocidade inadequada entre as cadeiras

- Estudar e melhorar o sistema de acionamento dos motores.

4.8.8 - Dureza inadequada dos cilindros

- Rotina de auditoria para inspeção das durezas dos cilindros envolvendo a equipe dos laminadores e da oficina;
- Os cilindros fora da especificação deverão ser segregados do processo.

4.8.9 - Resíduo de amortecimento negativo – instabilidade do processo (deslocamento da força de laminação para saída)

- Realizar controle operacional (instrução normativa) na oficina de cilindros para não fornecer diâmetros menores do a especificação do laminador;

4.8.10 - Excentricidade cilindro de encosto

- Padronização da montagem dos conjuntos dos cilindros de encosto;
- Rotina de inspeção semestral das cunhas de ajuste dos encostos.

4.8.11 - Falta de rigidez da cadeira

- Rotina anual de medição topográfica dos conjuntos das cadeiras.

4.8.12 - Folga das cruzetas dos *cardans*

- Rotina semestral de revisão e recuperação do conjunto dos cardans envolvendo cruzetas;
- Rotina de lubrificação das cruzetas e inspeção visual.

4.8.13 - Óleo contaminado ou viscosidade inadequada do *morgoil* (excesso temperatura)

- Controle da temperatura da lubrificação do *morgoil* com alarme adequado às condições operacionais de cada laminador;
- Rotina de inspeção das vedações.

4.8.14 - Falha do mancal deslizamento cilindros de encostos

- Implantar rotina de inspeção dos mancais.

4.8.15 - Falha do rolamento do cilindro de trabalho

- Padronizar a montagem e desmontagem dos conjuntos dos cilindros de trabalho;
- Adotar tolerâncias de montagem conforme especificação de projeto;
- Aplicar graxa nas ranhuras interna do anel interno dos rolamentos dos cilindros de trabalho;
- Proteger os rolamentos contra contaminação e oxidação nas oficinas;
- Rotina de inspeção das vedações;
- Inspeção inadequada das folgas dos *liners* dos mancais dos cilindros de trabalho.

4.8.16 - Falhas de pessoas, padrão e processo

- Instrução operativa inadequada no processo de retífica;
- Padrão de inspeção inadequado dos rolamentos;
- Excesso de velocidade de processo;
- Excesso de tensão;
- Excesso redução;
- Distribuição inadequada das reduções;
- Padrão de inspeção dos mancais inadequados;
- Padrão de inspeção dos rolamentos inadequados;
- Padrão de montagem inadequado;
- Padrão de desmontagem inadequado;
- Procedimento inadequado de medição;

- Falha no padrão de manutenção dos mancais;
- Falha operacional no processo de laminação;
- Falha operacional no processo de retífica;
- Falha operacional do processo de montagem e desmontagem dos mancais;
- Variação da espessura;
- Falha na verificação da resistência do material durante o processo.

4.8.17 - Recomendações de segurança

- Somente acessar a cadeira após bloqueio elétrico e mecânico;
- Efetuar teste de eficácia dos sistemas hidráulico e pneumático;
- Efetuar o uso dos equipamentos de proteção individual.

5 - ANÁLISE DE RESULTADOS E ESTUDO ECONÔMICO DE RETORNO

Durante o processo de desenvolvimento do método para antecipação de falhas provocadas por vibrações em processos de laminação, foram feitas inúmeras pesquisas, observações e teste no processo de laminação por um período de 9 meses, onde se deu o desenvolvimento, aplicação e ajuste do método.

Para o desenvolvimento do método usamos como laboratório um laminador de tiras a frio do tipo “trem” já em operação e com toda infraestrutura montada/instalada e que possui um sistema de monitoramento *on-line*.

5.1 - Motivação

A motivação para o desenvolvimento deste método para identificação, análise, antecipação e eliminação dos desvios de qualidade e paradas indesejadas no processo de laminação a frio, onde observamos que estas falhas estavam gerando prejuízos financeiros para a empresa em questão, através da perda de material, aumento do custo de produção provocado pelo segundo passe e reaproveitamento de material e com o desgaste gerado na relação empresa/cliente pelo transtorno gerados por um produto entregue com a possibilidade de rompimento proveniente dos efeitos provocados pelo *chatter*. Como exemplo ilustrativo de perdas vamos usar o ano de 2016, conforme Figura 44.

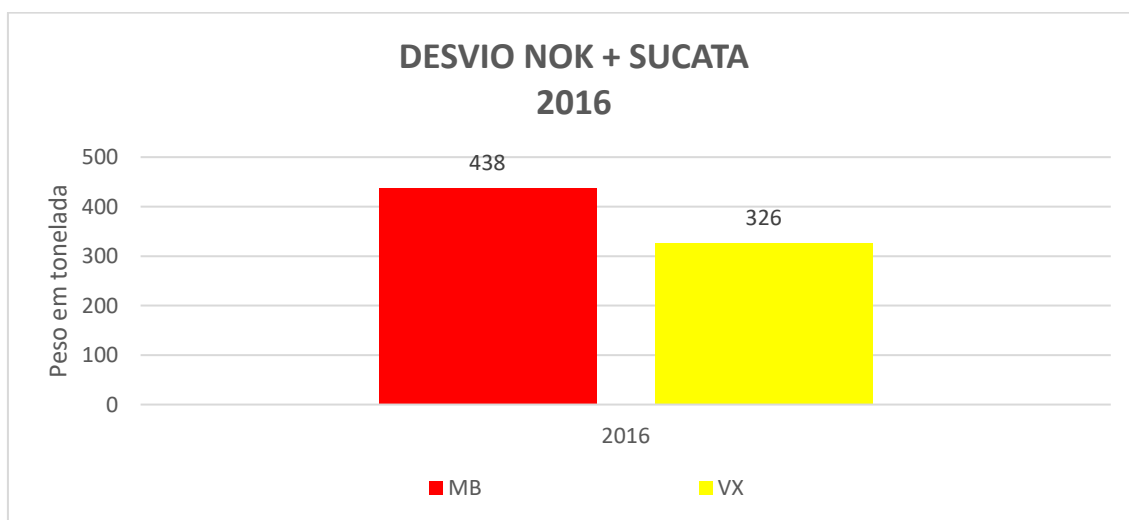


Figura 44 - Exemplo ilustrativo de perdas de 2016

Fonte: Autor

Considerando que o custo de laminação de tira a frio pode variar entre 150 reais e 200 reais, iremos usar com base de análise o valor médio de 175 reais em valores atuais (2019), conforme visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Peso desviado x custo x prejuízo

PESO DESVIADO DE MB/VX + SUCATA	CUSTO DE LAMINAÇÃO POR TONELADA.	PREJUÍZO
764 toneladas	175 reais	133,700.00 reais

Fonte: Autor

5.2. - Resultado

A metodologia ou método para identificação, análise, antecipação e eliminação dos desvios de qualidade e paradas indesejadas no processo de laminação a frio, começou a ser aplicado na segunda quinzena de abril de 2017, e durante o segundo semestre do mesmo ano a metodologia passou por ajustes em parâmetros, variáveis, configuração de alarmes e procedimentos operacionais.

E para análise de resultado, iremos comparar os dados dos três últimos anos de operação do laminador estudado, levando em conta que no primeiro ano (2016) não existia a metodologia, segundo ano contemplou o desenvolvimento mais ajuste da metodologia e treinamento dos operadores (2017) e no terceiro ano (2018) aplicação plena da metodologia. A seguir será apresentado os resultados alcançados conforme visto na Figura 45.

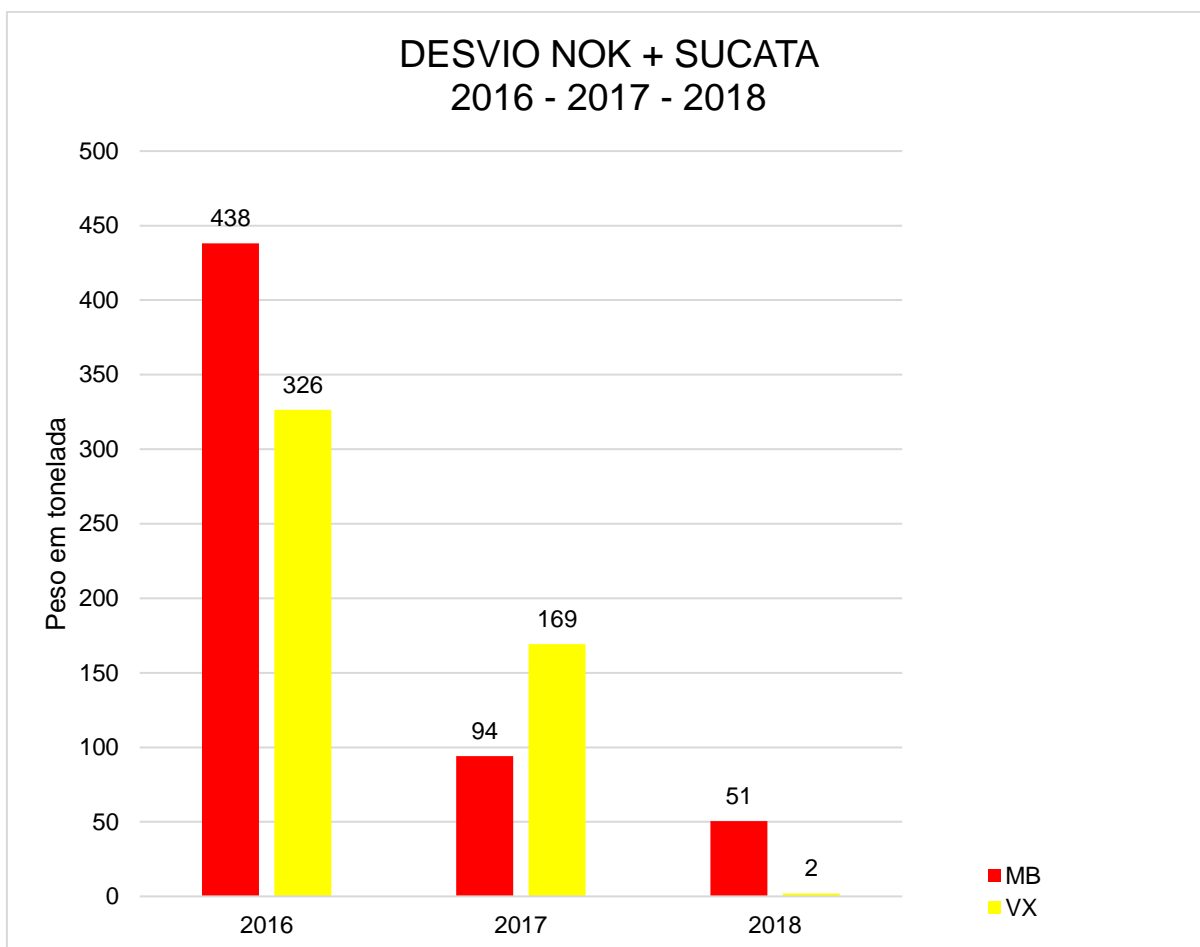


Figura 45 - Resultados de perdas dos 2016, 2017 e 2018

Fonte: Autor

Podemos verificar que desde o ano de 2017 quando ocorreu o início do desenvolvimento e aplicação da metodologia no processo de laminação, os registros de desvio NOK + sucata apresentou uma significativa tendência de melhora de resultado ao longo dos anos de 2017 e 2018.

5.3 - Resultado/Retorno Financeiro

Para se realizar um estimativa do retorno e/ou ganho financeiro obtido com a aplicação da metodologia no processo de laminação, foi usado o valor médio de 175 reais como custo médio para se processar (laminar) uma tonelada e em cima deste foi realizado uma análise para obtenção do valor de economizado pela empresa com a redução dos desvio NOK + sucata nos anos de 2017 e 2018, conforme visto na Tabela 4 e 5.

Tabela 4 - Resultado do retorno financeiro

ANO	PESO DESVIADO DE MB/VX + SUCATA	CUSTO DE LAMINAÇÃO POR TONELADA.	PREJUÍZO
2016	764 toneladas	175 reais	133,700.00 reais
2017	263 toneladas	175 reais	46,025.00 reais
2018	53 toneladas	175 reais	9,275.00 reais

Fonte: Autor

Tabela 5 - Ganhos econômicos

GANHOS ECONÔMICOS	
GANHO ENTRE 2016/2017	87,675,00 reais
GANHO ENTRE 2017/2018	36,750.00 reais
GANHO ENTRE 2016/2018	124,425.00 reais

Fonte: Autor

Os resultados mostraram que a metodologia gerou um ganho médio 120 mil reais para a empresa em dois anos de aplicação. É importante destacar que não levamos em consideração os ganhos com a redução do número de paradas e de trocas de cilindros e a melhora da qualidade do produto entregue aos clientes.

6 - PLANO DE AÇÃO

Abaixo será apresentado um *check list* cujo objetivo é verificar alguns componentes e itens críticos para prevenção de falhas para uma operação com qualidade em um processo de laminação a frio.

INSPECIONAR			
1 PESSOAS, PADRÃO E PROCESSO.	OK	NOK	N/A
Velocidade de processo			
Tensão vão			
Excesso ou distribuição inadequada das reduções			
Treinamento e habilidade da equipe de operação			
Concentração da solução			
Aperto.			
2 FOLGA E/OU DESGASTE DOS LINERS	OK	NOK	N/A
Medição de espessura e dureza dos <i>liners</i>			
Medições das distâncias entre liners e entre os liners e as pernas das cadeiras			
Medições do dimensional externo dos mancais, focado nas distâncias entre as faces dos <i>liners</i>			
3 FOLGA/DESGASTE DAS TRANCAS(TRAVAS) DOS CONJUNTOS DE CILINDROS	OK	NOK	N/A
Alinhamento e desgastes/ integridade física dos conjuntos de trancas (travas)			
4 SUPORTE DA TRANSMISSÃO	OK	NOK	N/A
Alinhamento e desgastes/ integridade física do conjunto de suporte da transmissão			
5 SISTEMAS E COMPONENTES INTERNOS DA CADEIRA	OK	NOK	N/A
Alinhamento e nivelamento dos conjuntos de guias			
Fixação da base, folgas no acionamento e desgastes nos conjuntos de guias			
6 GEOMETRIA INADEQUADA DA CADEIRA	OK	NOK	N/A

Topográfica dos conjuntos das cadeiras, incluindo o alinhamento do conjunto de conjunto de rolos tensor e tensiômetro			
7 SINCRONISMO DE VELOCIDADE INADEQUADA	OK	NOK	N/A
Sincronismo de velocidade entre as cadeiras			
8 DUREZA INADEQUADA DOS CILINDROS	OK	NOK	N/A
Durezas dos cilindros			
9 RESÍDUO DE AMORTECIMENTO NEGATIVO – INSTABILIDADE DO PROCESSO (DESLOCAMENTO DA FORÇA DE LAMINAÇÃO PARA SAÍDA)	OK	NOK	N/A
Cilindros com diâmetros = ou > maiores que 458 mm na 4ª do laminador			
10 EXCENTRICIDADE CILINDRO DE ENCOSTO	OK	NOK	N/A
cunhas de ajuste dos encostos			
11 FALTA DE RIGIDEZ DA CADEIRA	OK	NOK	N/A
Medição topográfica dos conjuntos das cadeiras.			
12 FOLGA DAS CRUZETAS DOS CARDÃS	OK	NOK	N/A
Revisão e recuperação do conjunto dos cardãs envolvendo cruzetas.			
Lubrificação das cruzetas e inspeção visual.			

7 - CONCLUSÃO

Diante de um mercado cada vez mais competitivo e exigente, as empresas possuem a difícil missão de associar a redução de custo a produtos cada vez mais sofisticados e submetidos a normas rigorosas de qualidade e segurança, a tendência é que existam cada vez mais investimento em automatização e inspeção de máquinas, equipamento e processos.

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. 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 e contribuindo na confiabilidade do equipamento.

Nesse sentido, a utilização da metodologia permite que os operadores possam monitorar os níveis de vibração em tempo real e verificar a interferência das variáveis do processo como concentração de solução, aperto, tensão, diâmetro + superfície do cilindro, velocidade e rotação nos níveis de vibração e conseqüentemente na qualidade da tira laminada. Este acompanhamento em tempo real permite que o operador atue de forma preventiva/preditiva para atenuar e/ou eliminar os efeitos das vibrações e/ou *chatter* na qualidade do processo e das tiras laminadas a frio, reduzindo assim o tempo de parada, número de trocas de cilindros, insatisfação do cliente, custo com segundo passe/ reaproveitamento, desvios NOK e sucatas.

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.

8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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: fev. 2019.

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.

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.

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

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.

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.

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.