

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ESTUDO DO EFEITO DAS VIBRAÇÕES NA  
MICROESTRUTURA DE ROLOS FUNDIDOS EM MÁQUINAS  
CENTRIFUGAS INDUSTRIAIS**

**Lucas Maturano da Silva**

**Mateus Maia de Oliveira**

**Pindamonhangaba - SP  
2023**

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

**ESTUDO DO EFEITO DAS VIBRAÇÕES NA  
MICROESTRUTURA DE ROLOS FUNDIDOS EM MÁQUINAS  
CENTRIFUGAS INDUSTRIAIS**

**Lucas Maturano da Silva**

**Mateus Maia de Oliveira**

Projeto de pesquisa apresentado à Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba como exigência para a conclusão da disciplina de Projeto de Trabalho de Graduação, no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial .

Orientador(a): Me: Amir Rivaroli Junior

**Pindamonhangaba - SP  
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

**Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba**

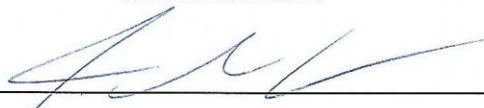
**Comentado [CEFDS1]:** Colocar os nomes dos avaliadores da banca

**“ESTUDO DO EFEITO DAS VIBRAÇÕES NA  
MICROESTRUTURA DE ROLOS FUNDIDOS EM  
MÁQUINAS CENTRIFUGAS INDUSTRIAIS”.**

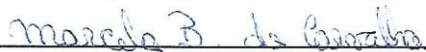
**Lucas Maturano da Silva  
Mateus Maia de Oliveira**

Monografia apresentada à Faculdade de  
Tecnologia de Pindamonhangaba, para  
graduação no Curso Superior de  
Tecnologia em Manutenção Industrial.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior



Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho



Membro – Prof. Me. Carlos Eduardo Figueiredo dos Santos

**Pindamonhangaba, 23 de junho de 2023.**

## DEDICATÓRIA

**Comentado [ARJ2R1]:** Substituir pela folha de assinatura recebida da banca na apresentação do tg.

Lucas maturano da Silva

Dedico este trabalho aos meus professores. Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados, pela paciência com as minhas dificuldades e por todo amor que sentem ao ensinar. Vocês são as minhas inspirações e a base da minha carreira profissional.

Mateus Maia de Oliveira

Dedico a Deus o resultado deste trabalho. Gratidão por me permitir ter saúde e força para viverem todas as experiências nos últimos anos e por ser essencial na minha vida ao guiar todos os meus passos.

## AGRADECIMENTO

Lucas Maturano da Silva

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho. Aos meus pais Itamar José da Silva e Marli Aparecida Maturano da Silva que proporcionaram toda condição necessária para a conclusão desta faculdade.

Ao professor Amir, pelo inestimável apoio na orientação deste trabalho.

Aos colegas de classe, com quem nesses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

**Comentado [ARJ3]:** Colocar nomes completos nos agradecimentos.  
Verificar o nome do seu pai e os nomes dos irmãos.

Mateus Maia de Oliveira

Este trabalho é dedicado aos meus pais. Sem a força, exemplo e apoio de vocês, eu nada seria. Agradeço por todo o suporte que me deram durante a caminhada, pelas palavras de conforto nos dias mais difíceis e por nunca terem me deixado desistir de tudo o que sempre sonhei. Aos colegas de classe, com quem esses anos de estudo tive a felicidade de conviver.

GRAÇAS, A. A.; BORGES, J. L. C. Influência da formação técnica nos alunos que ingressam no curso de Tecnologia em Manutenção Industrial. 2013. 67p. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

### **RESUMO**

O estudo sobre o efeito da vibração na microestrutura de rolos fundidos por centrifugação. O processo de manutenção é crucial para assegurar o funcionamento confiável de máquinas e equipamentos, evitando quebras inesperadas e perdas de produção. O estudo focou na análise dos parâmetros de projeto e nas montagens realizadas para a fundição na máquina centrífuga semi horizontal. A metodologia incluiu a medição e análise da vibração durante o processo de fabricação dos rolos, visando entender seu impacto na microestrutura. Os resultados obtidos evidenciam que a manutenção preventiva efetiva, além de beneficiar as partes mecânicas, também tem influência positiva na microestrutura das peças fundidas. Através deste estudo, foi possível compreender a importância da manutenção preventiva e controle da vibração na fabricação de rolos fundidos por centrifugação. A implementação de diretrizes e práticas de manutenção apropriadas contribui não apenas para a confiabilidade dos equipamentos, mas também para a melhoria da microestrutura das peças produzidas.

**Palavras-chave:** Vibração, manutenção preditiva, falha.

GRAÇAS, A. A.; BORGES, J. L. C. **The Influence of technical educating on students who joined the Tecnology in Industrial Maintenance course.** 2013. 67p. Graduation Project (Industrial Maintenance course). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2023.

#### **ABSTRACT**

This abstract presents a study on the effect of vibration on the microstructure of centrifugally cast rolls. The maintenance process is crucial to ensure the reliable operation of machinery and equipment, preventing unexpected breakdowns and production losses. The study focused on analyzing design parameters and assemblies used in the centrifugal casting process with a semi-horizontal centrifuge machine. The methodology included measuring and analyzing vibration during the roll manufacturing process to understand its impact on the microstructure. The obtained results highlight that effective preventive maintenance not only benefits mechanical components but also positively influences the microstructure of the cast pieces. Through this study, it was possible to comprehend the importance of preventive maintenance and vibration control in the manufacturing of centrifugally cast rolls. Implementing appropriate maintenance guidelines and practices contributes not only to equipment reliability but also to the enhancement of the microstructure of the produced pieces

**Keywords:** Vibration, predictive maintenance, failure.

## LISTA DE QUADROS

|                                                   |    |
|---------------------------------------------------|----|
| Quadro 1 - Parâmetros x Natureza das Falhas ..... | 19 |
| Quadro 2 - Inspeção por tipos de manutenção.....  | 20 |

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                           |    |
|---------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Onda senoidal de vibração .....                                | 22 |
| Figura 2 - Análise vibracional de máquina.....                            | 22 |
| Figura 3 - Movimento harmônico.....                                       | 23 |
| Figura 4 - Curva de tendência.....                                        | 24 |
| Figura 5 - Gráfico da função FC .....                                     | 25 |
| Figura 6 - Análise de vibração do equipamento .....                       | 26 |
| Figura 7 - Movimento vibracional geral .....                              | 27 |
| Figura 8 - Espectro vibracional .....                                     | 29 |
| Figura 9 – Falha no desbalanceamento .....                                | 29 |
| Figura 10 - Análise espectral de sinal de vibração radial .....           | 30 |
| Figura 11 - Espectro de vibração de sinal modulado .....                  | 31 |
| Figura 12 - Monitoramento da posição do rolamento .....                   | 35 |
| Figura 13 – Módulo de interface de sensor de vibração .....               | 39 |
| Figura 14 – Sensor para detectar vibração .....                           | 40 |
| Figura 15 – Transdutor de vibração .....                                  | 42 |
| Figura 16 - Acelerômetro de compressão .....                              | 45 |
| Figura 17 – Processo de fundição centrífuga.....                          | 46 |
| Figura 18 - Molde de centrífuga.....                                      | 50 |
| Figura 19 - Análise vibracional no mancal.....                            | 51 |
| Figura 20 – Máquina centrífuga semi-horizontal. ....                      | 54 |
| Figura 21 – Esquematização de uma fundição centrífuga .....               | 55 |
| Figura 22 - Região da peça que apresenta defeito.....                     | 56 |
| Figura 23 - Região com defeito estrutural .....                           | 57 |
| Figura 24 - Região com defeito estrutural.....                            | 57 |
| Figura 25 - Região da peça que apresenta defeito .....                    | 58 |
| Figura 26 - Região próximo ao final da casca com segregação de carbonetos | 59 |
| Figura 27 - Posição de retirada da amostra para análise .....             | 60 |
| Figura 28 - Região rica em carboneto tipo MC ..                           | 60 |
| Figura 29 - Rolo, com defeito micro estrutural .....                      | 61 |
| Figura 30 – Material laminado com mancha .....                            | 61 |

## SUMÁRIO

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>                                              | <b>12</b> |
| <b>1.1 PROBLEMA.....</b>                                              | <b>13</b> |
| <b>1.2 OBJETIVOS.....</b>                                             | <b>13</b> |
| 1.2.1 Objetivo Geral.....                                             | 13        |
| 1.2.2 Objetivos específicos.....                                      | 13        |
| <b>1.3 JUSTIFICATIVA.....</b>                                         | <b>13</b> |
| <b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>                                  | <b>14</b> |
| <b>2.1 MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS.....</b>                            | <b>14</b> |
| 2.1.2 Manutenção Corretiva.....                                       | 15        |
| 2.1.3 Manutenção preditiva.....                                       | 16        |
| 2.1.4 Manutenção preventiva.....                                      | 17        |
| <b>2.2 VIBRAÇÕES.....</b>                                             | <b>21</b> |
| 2.2.1 Métodos de análise.....                                         | 38        |
| <b>2.3 MÁQUINA CENTRÍFUGA DE FUNDIÇÃO.....</b>                        | <b>45</b> |
| <b>3. METODOLOGIA.....</b>                                            | <b>54</b> |
| <b>3.1 ANÁLISE DE VIBRAÇÃO.....</b>                                   | <b>54</b> |
| <b>3.2 EQUIPAMENTOS.....</b>                                          | <b>54</b> |
| <b>3.3 DEFEITOS.....</b>                                              | <b>55</b> |
| <b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....</b>                  | <b>56</b> |
| 4.1 Rolo em aço especial com defeito.....                             | 56        |
| 4.1.1 Exame Microestrutural do rolo em aço rápido.....                | 56        |
| <b>4.2 ROLO EM FERRO FUNDIDO LIGADO COM DEFEITO.....</b>              | <b>57</b> |
| 4.2.1 Exame microestrutural do rolo em ferro fundido microligado..... | 58        |
| 4.3 Rolo em aço rápido especial.....                                  | 59        |
| 4.3.1 - Exame Microestrutural do rolo em aço rápido especial.....     | 60        |
| 4.4 – Rolo em Aço Rápido com defeito no cliente.....                  | 61        |
| <b>5. CONCLUSÃO.....</b>                                              | <b>62</b> |
| <b>REFERÊNCIAS.....</b>                                               | <b>63</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

O processo de manutenção inclui todas as atividades técnicas e organizacionais que garantem que as máquinas e equipamentos funcionem de maneira geral dentro da confiabilidade esperada. O trabalho de manutenção e reparo que segue certas diretrizes básicas reduz a possibilidade de quebras inesperadas e consequente perda de produção, tempo e custos desnecessários. Em casos mais críticos, falhas de processo podem causar sérios danos e até mesmo colocar vidas humanas em risco. Podem ser citadas três formas de manutenção: corretiva, preventiva e preditiva.

As máquinas são elementos mecânicos complexos e articulados. Partes excitadas podem oscilar e as oscilações são transmitidas através das juntas para outros elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequência que caracteriza o sistema. Cada vez que uma peça muda suas características mecânicas devido ao desgaste ou rachadura, o componente de frequência do sistema muda. Se houver uma mudança no acoplamento entre as partes, o coeficiente de transferência de sinal entre as partes muda e, conseqüentemente, a forma de frequência global do sistema. Folga, defeitos ou desalinhamento de rolamentos ou rolamentos em máquinas rotativas são refletidos em mudanças de frequência ou no aparecimento de novas frequências. O desbalanceamento do rotor é transmitido pelo rolamento. Forças centrífugas, alternadas e de atrito que atuam em diferentes elementos da máquina em operação provocam vibrações mecânicas proporcionais, que se manifestam nos mancais. Devido a isso, medindo as vibrações nos mancais, é possível detectar e determinar os esforços presentes em qualquer componente da máquina, determinando possíveis anormalidades no funcionamento. Em geral, a medição de vibração deve ser feita nos mancais, pois é um dos pontos válidos pelas normas utilizadas para avaliar o desempenho das máquinas (MARÇAL 2007).

A premissa básica na qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é que cada componente ou cada tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de frequência específica que, em condições normais de operação, atinge uma certa amplitude máxima. Desta vez, medindo e analisando a vibração, é possível determinar sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha e defeito que a

gera, além de avaliar a condição mecânica do componente que é produto ou peso do o defeito detectado (SAMPAIO, 2009).

## 1.1 PROBLEMA

Determinar a importância da análise de vibrações em máquinas rotativas, onde a falta de um controle mais efetivo pode gerar perdas defeitos microestruturais e catastróficas juntos a componentes, gerando grandes prejuízos para a produção e manutenção.

## 1.2. OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo Geral

Estudar o efeito das vibrações nas microestruturas em máquinas industriais rotativas de equipamentos para fundição.

Comentado [ARJ4]: Trocar analisar por estudar.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Constatar quais as principais causas de falhas nesse tipo de máquina;
- Identificar a necessidade de manutenção preditiva;
- Apresentar possíveis soluções para as falhas.

## 1.3 JUSTIFICATIVA

Em uma máquina, as vibrações são o resultado de forças dinâmicas internas não compensadas criadas por elementos rotativos, oscilantes ou em movimento aleatório. Dessa forma, observamos um grande problema que acontece na maioria das indústrias e que deve ser amplamente discutido para que se possa chegar a uma solução. Esse trabalho se justifica pela baixa quantidade de artigos que discutem acerca do assunto e pela necessidade de haver um debate científico acerca do problema para que se possa cada vez mais apresentar soluções eficazes.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS

Devido ao crescimento das atividades industriais e a necessidade de confiabilidade dos equipamentos nas unidades produtivas, o desenvolvimento de um sistema para detecção de falhas através da análise de vibração foi de grande importância. A análise de vibração é uma das ferramentas das atividades de manutenção preditiva. As indústrias estão ampliando cada vez mais esse tipo de monitoramento, pois esse tipo de manutenção minimiza as paradas dos equipamentos, reduzindo perdas no processo produtivo.

Araujo (2011), em sua dissertação de mestrado, destaca a importância e eficácia do uso da análise de vibração para prever falhas que podem ocorrer em motores assíncronos trifásicos. Diferentes métodos são utilizados dependendo dos dados analisados, mas a análise espectral tem sido a ferramenta utilizada para interpretar as situações em estudo.

Sousa (2005) apresentou uma proposta de desenvolvimento de um aplicativo para análise de vibrações em máquinas rotativas, propondo um módulo de balanceamento de rotores, com o objetivo de substituir os métodos tradicionais de análise, monitoramento e diagnóstico de máquinas. Para realizar o estudo de desbalanceamento, foi utilizado um método de balanceamento puramente estático considerando os coeficientes de influência.

Garcia (2005) trata da análise de vibração enfatizando a confiabilidade das ferramentas nas atividades de manutenção preditiva. Na sua dissertação aborda a detecção e diagnóstico de avarias em sistemas mecânicos rotativos através da análise espectral, juntamente com o estudo das variações de amplitude dos sinais característicos das avarias introduzidas. O autor mantém seu foco nos defeitos mais comuns que ocorrem em aplicações industriais.

Almeida (2007) desenvolveu uma pesquisa em sua tese de doutorado para investigar se variações de parâmetros como rotação, carga e lubrificação ou sua combinação são significativas nas respostas vibratórias e quais desses parâmetros afetaram mais significativamente a amplitude do sinal de vibração. Também foi analisado quais técnicas de medição como RMS, Peak, Defect Factor, Crest Factor, Factor Shape Factor, Clearance Factor, Kurtosis são mais sensíveis à variação de

rotação e carga, o que foi necessário para definir a aplicação da técnica Pattern. Reconhecimento, para reconhecimento automático de falhas.

No campo da engenharia, a instrumentação é utilizada para medir, registrar e controlar o comportamento de grandezas físicas (temperatura, força, deslocamento, torque, tempo, velocidade, aceleração, pressão, etc.) que intervêm em um determinado processo ou "sistema". É, neste contexto, o objeto de estudo: um ser vivo, uma planta industrial, uma parte de uma planta industrial, uma máquina ou mesmo uma pequena parte dela. Portanto, a instrumentação pode ser definida como : um conjunto de dispositivos e técnicas utilizadas para aquisição, processamento, indicação, registro e controle das variáveis que definem o comportamento de um sistema termodinâmico. Atenção especial deve ser dada aos elementos externos ao computador: sensores e atuadores. Esses elementos explicam a qualidade das informações trocadas com o processo. Atuadores que respondem a comandos de computador e controlam variáveis de processo. Da mesma forma, os sensores detectam as variáveis do processo a serem avaliadas, convertendo-as em sinais apropriados para posterior processamento, fornecendo ao computador informações básicas sobre o processo (ALVES, 2020).

Na sociedade industrial atual, a teoria e aplicação do controle tem sido uma das tecnologias mais importantes, desde os níveis primários de processos movidos por motores a vapor, até o estado atual onde há uma profunda interação com sistemas de informação e processos de produção. Esta constatação fundamental levou a um novo foco na teoria dos processos industriais (complexos) onde o conceito de "inteligência artificial", através da emulação das características do comportamento humano no controle do processo, apareceu como uma alternativa ao controle e modelagem. Um fato importante nesta abordagem é que a tarefa de modelagem matemática de plantas ou processos industriais tem cedido lugar a uma modelagem que permita a manipulação de variáveis de controle para alcançar os resultados desejados (FERREIRA, 2019).

De acordo com a NBR5462 (1994), a manutenção é definida como uma combinação de todas as ações técnicas e administrativas destinadas a manter ou devolver um item a um estado em que possa desempenhar a função requerida.

A manutenção é classificada de acordo com as características da intervenção.

#### 2.1.2 Manutenção corretiva

KARDEC e NASCIF (2009) A Manutenção corretiva é a que se realiza sobre uma máquina que esteja com o funcionamento comprometido ou tenha parado de funcionar, devido a alguma falha. Esta máquina sofrerá uma intervenção com a finalidade de ser consertada e ser colocada novamente em serviço. É o tipo de manutenção que ocorre após a quebra do equipamento. Atua somente após a ocorrência da falha, o objetivo deste tipo de intervenção é permitir que um equipamento ou sistema retorne à normalidade.

### 2.1.3 Manutenção preditiva

Da Costa (2006) A manutenção preditiva ocorre quando se observa uma tendência de falha de um determinado equipamento. Este tipo de manutenção indica as reais condições de trabalho das máquinas com base em dados que informam sobre o processo de desgaste ou degradação das mesmas, assim é possível prever a vida útil dos componentes de máquinas e equipamentos e aproveitar bem as condições dessa vida útil período.

Com base no conhecimento e análise do fenômeno, torna-se possível prever eventuais quebras ou mau funcionamento de máquinas e equipamentos. A manutenção preditiva, após analisar o fenômeno, adota dois procedimentos para trabalhar com os problemas detectados: Diagnostica e realiza análise de tendências. O diagnóstico indica a origem e a gravidade do defeito encontrado. A análise de tendência de falha prevê falha ou quebra com antecedência, usando dispositivos que estão constantemente alertas, antecipando a necessidade de reparo (FERREIRA, 2019).

A manutenção preditiva adota diversos métodos de pesquisa para poder intervir em máquinas e equipamentos. Dentre os diversos métodos, destaca-se o Estudo de Vibrações; Análise de óleo; Análise do estado da superfície e análise estrutural de peças.

Segundo Gomes (2018, p.25) ao realizar atividades de manutenção preditiva, espera-se o seguinte:

- Determinar com antecedência a necessidade de serviços de manutenção em um determinado equipamento;
- Elimina desmontagens desnecessárias para inspeção;
- Aumentar o tempo de disponibilidade dos equipamentos;
- Redução de obras emergenciais não planejadas;
- Prevenir danos aumentados;
- Aproveitar a vida útil total dos componentes e equipamentos;

- Aumentar o grau de confiança no desempenho do equipamento ou linha de produção;
- Programação das atividades de manutenção com base no diagnóstico.
- Redução dos custos de manutenção e aumento da produtividade.

A manutenção preditiva consiste no controle da máquina em operação, realizado por meio de instrumentos de medição, com o objetivo de antecipar irregularidades ou detectar variações nas condições operacionais que exijam tarefas de manutenção. Basicamente, a manutenção preditiva é realizada em uma máquina em serviço normal de produção, e as tarefas de inspeção são realizadas por meio de medições que não interferem no funcionamento da máquina ou equipamento. A vantagem que esta modalidade pode representar não significa, porém, que a sua adoção elimine a aplicação de outras modalidades de manutenção. A escolha de um ou outro dependerá do tipo de serviço que a máquina irá realizar, seu grau de importância no processo produtivo, suas características construtivas, etc. Em suma, existem razões técnicas e econômicas que justificam a adoção de uma dessas três modalidades para cada máquina ou indicam uma mistura delas (LIMA, 2017).

#### 2.1.4 Manutenção preventiva

Pereira (2009) Trabalha com intervenções planejadas com base em estudos estatísticos e informações de fabricantes de equipamentos. Seu principal objetivo é reduzir o número de falhas dos equipamentos, evitando paradas por quebra. Em algumas situações, este tipo de manutenção pode não ser aconselhável, pois gera altos custos e intervenções desnecessárias, pois não avalia o real estado da peça ou a necessidade daquela intervenção, razão pela qual pode haver a possibilidade de inserir uma falha que não estava anteriormente na máquina.

A manutenção preventiva é aquela realizada colocando a máquina fora de uso, obedecendo a um programa de manutenção pré-determinado, a fim de inspecionar e substituir componentes, garantindo seu funcionamento por um determinado período de tempo. Este período representa a confiabilidade da máquina com base nos fundamentos técnicos. A adoção de um programa aplicativo de manutenção preditiva, para selecionar a máquina a ser incluída, deve estar de acordo com os critérios definidos considerando sua relevância no processo

produtivo. Em uma fábrica, nem todos os equipamentos precisam participar de um plano de manutenção previsível (MARTINS, 2016).

A escolha pode seguir, dentre diversos critérios, aqueles que melhor se adequam às especificidades da empresa, através da classificação do equipamento:

- a) Críticos: aqueles que, em caso de falha, causam perda significativa de produção, um alto custo de reparo e um risco de segurança.
- b) Não críticos: aqueles em que, em caso de falha, a perda de produção é aceitável ou insignificante, os custos de manutenção resultantes são moderados e não representam risco à segurança.
- c) Auxiliares: equipamentos que se encontram duplicados ("stand-by") ou que podem ser substituídos por equipamentos similares já instalados, capazes de eventualmente absorver mais carga sem prejudicar o processo ou causar perda de produção, até que a falha seja sanada.
- d) Falha periódica: são aquelas que representam desgaste progressivo, cuja falha é previsível ou ocorre em intervalos regulares diretamente proporcionais ao tempo de operação.
- e) Com alto custo de inspeção: aqueles cuja desmontagem para inspeção interna demanda alto tempo e custo de mão de obra (OLIVEIRA, 2015).

Os parâmetros a serem medidos devem fornecer informações que permitam a inspeção de elementos específicos da máquina ou tipos de falha. A opção pelo parâmetro e a forma de pesquisa mais adequada, que reflita com mais precisão o que está sendo pesquisado, são fatores relevantes e decisivos (pequenos mecanismos podem alterar a vibração quando em contato com os sensores). Com os dados obtidos é possível realizar uma análise técnica, onde os resultados desta análise indicaram a natureza da falha; o que esperar; e determinar quais são os elementos críticos do sistema (PEREIRA, 2014).

Pode-se, ainda, montar um histórico do equipamento, que permitirá estabelecer quais são os elementos de falha mais frequentes. Conforme (Quadro 1 e 2).

Quadro 1 - Parâmetros x Natureza das Falhas

| <b>PARÂMETRO A SER MEDIDO</b>         | <b>NATUREZA DA FALHA OU DEFEITO A SER DETECTADO</b>                                                                                                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Amplitude de deslocamento da vibração | Desbalanceamento, desalinhamento, jogo excessivo, falta de rigidez, acoplamento defeituoso, correias frouxas ou gastas, eixos deformados, desajustes, turbulência,... |
| Amplitude de velocidade da vibração   | Mancais ou engrenagens deterioradas,...                                                                                                                               |
| Amplitude de aceleração da vibração   | Estado mecânico dos rolamentos, atrito excessivo entre componentes, falta de lubrificação, instabilidade do filme de óleo em mancais de deslizamento,...              |
| Frequência da vibração                | Dado complementar à medição de qualquer característica da vibração, indispensável na determinação de qualquer problema detectado,...                                  |
| Fase da vibração                      | Desbalanceamento dinâmico, folga excessiva, partes frouxas ou soltas,...                                                                                              |
| Nível de ruído                        | Rolamentos ou engrenagens deterioradas, desgastes, cavitação, turbulência, aumento do atrito,...                                                                      |
| Fugas                                 | Deterioramento de selos, juntas e gaxetas, perdas de pressão,...                                                                                                      |
| Espessura                             | Corrosão ou erosão em tanques e tubulações,...                                                                                                                        |
| Temperatura                           | Lubrificação inadequada, engrenamento, aumento do atrito, sobrecarga, desalinhamento de mancais, produção excessiva de calor em componentes elétricos,...             |
| Pressão                               | Deterioramento de rotores, bloqueio de tubulações, válvulas travadas,...                                                                                              |

Fonte: Smith, 2022

Quadro 2 - Inspeção por tipos de manutenção

|                                       | <b>Manutenção Corretiva</b> | <b>Manutenção Preventiva</b>                        | <b>Manutenção Preditiva</b>     |
|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------------------|---------------------------------|
| Estado de funcionamento da máquina    | fora de serviço             | fora de serviço                                     | em serviço ou fora              |
| Motivo da intervenção                 | Falha                       | inspeção programada                                 | controle programado ou contínuo |
| Tarefas a serem realizadas na máquina | troca de componentes        | desmontagem para inspeção e troca de componentes    | medições                        |
| Objetivo da intervenção               | retorno ao serviço          | garantir o funcionamento por um determinado período | predizer e detectar falhas      |

Fonte: Smith, 2022.

Em geral, a probabilidade de falha e a velocidade de seu desenvolvimento são as primeiras considerações ao escolher o intervalo ideal entre as medições. Essa faixa depende em grande parte do tipo de equipamento e aplicação. A maioria das organizações padronizou o intervalo entre as medições para um mês. Porém, conhecendo a condição do equipamento e sua criticidade para a planta, o intervalo pode ser reduzido, até uma semana. Um exemplo é o plano de manutenção preditiva da Refinaria Alberto Pasqualini - REFAP. O critério adotado é a criticidade do equipamento, ou seja, equipamento que não esteja duplicado ou que sua parada acarretasse perda de produção. Foi adotado um período de monitoramento a cada 15 dias para eles.

As leituras em outros equipamentos são feitas em intervalos de 30 dias. Para aqueles com baixa taxa de utilização e baixa criticidade, adota-se uma rotina de medição a cada 90 dias. Em conclusão, um plano de manutenção pode ser elaborado e implementado para atender aos requisitos operacionais da organização. Pode conter detalhes específicos sobre a periodicidade e os métodos de pesquisa. Do ponto de vista qualitativo, várias técnicas de medição podem ser utilizadas, sendo a medição de vibração uma das muitas aplicações possíveis. Comprovou-se que a utilização da análise de vibração no setor industrial permitiu que esta

modalidade de manutenção se apresentasse como um programa eficaz para controlar o funcionamento de máquinas industriais (JOHNSON, 2020).

## 2.2 VIBRAÇÕES

As vibrações mecânicas são, em geral, movimentos oscilatórios de uma massa (ou massas) em torno de uma posição de referência. Em uma máquina, as vibrações são o resultado de forças dinâmicas internas não compensadas criadas por elementos rotativos, oscilantes ou em movimento aleatório. Os movimentos podem ser caracterizados como: 1. Deslocamento: é a distância que a massa se afasta de sua posição natural em metros (m). 2. Velocidade: é a derivada (velocidade de mudança de distância) com que a massa se move, em metros por segundo (m/s). 3. Aceleração: taxa de variação da velocidade da massa, em metros por segundo ao quadrado ( $m/s^2$ ) (ALVES, 2022).

A medição e análise dos sinais de vibração no sistema permite a identificação de falhas antes que elas falhem. A análise do sinal de vibração pode ser realizada por meio de diversas técnicas que indicam o nível de vibração da máquina pela amplitude do sinal e a componente que representa a falha com base nas características de frequência. Todas as máquinas em operação produzem vibrações que sofrem um processo de degradação ao longo do tempo, causado pela modificação da distribuição de energia vibratória do conjunto de elementos que compõem a máquina. Observando a evolução do nível de vibração, é possível obter informações sobre o estado da máquina (ALVES, 2022).

O movimento harmônico, expresso em termos de deslocamento, é a forma mais simples de vibração. Quando analisado em função do tempo, é representado por uma função senoidal.

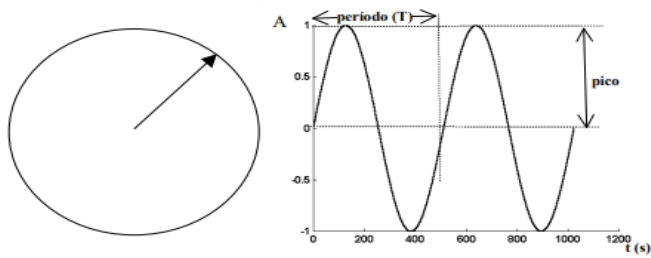
O movimento instantâneo de um corpo vibrando em torno de uma posição de referência pode ser descrito matematicamente pela equação 1:

$$x(t) = X \sin \omega t$$

Onde:  $x(t)$  é o valor instantâneo do movimento;  $X$  é a amplitude máxima do movimento e  $\omega$  é a velocidade angular. Considerando-se que  $X$  representa o máximo valor que a função  $x(t)$  pode alcançar em qualquer intervalo de

tempo é conveniente chamar  $X$  de amplitude de pico. Conforme (Figura 1).

Figura 1. Onda senoidal de Vibração.

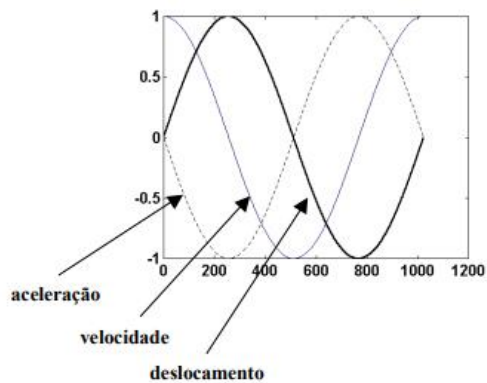


Fonte: Os autores, 2023.

$T$  é chamado período e é o tempo entre dois pontos consecutivos e repetitivos na forma de onda.  $f$  é a frequência e é igual ao inverso do período ( $1/T$ ), que também é igual a  $\omega/2\pi$ .

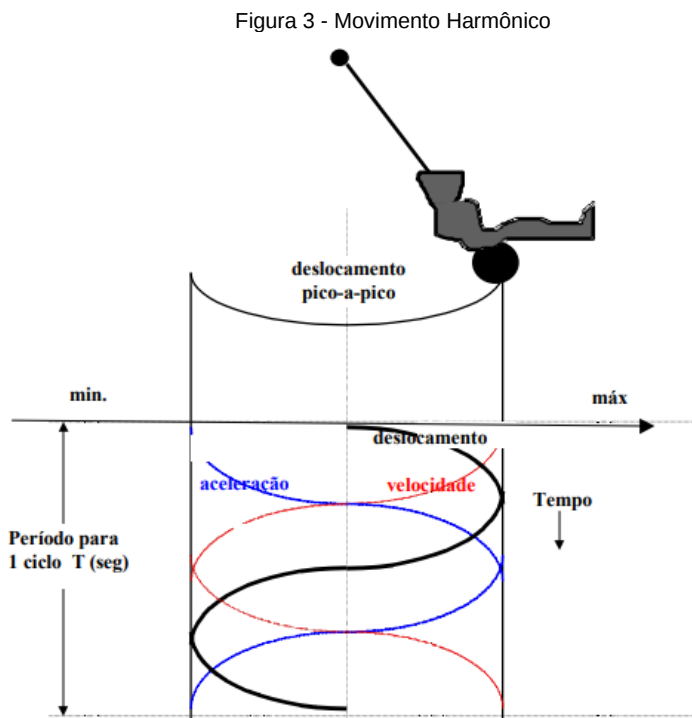
De fato, o movimento harmônico tem outras duas propriedades usadas na análise vibracional de máquinas: velocidade e aceleração, sendo a aceleração é a taxa de variação da velocidade em relação ao tempo ou a segunda derivada no tempo do deslocamento. Conforme (Figura 2).

Figura 2. Análise vibracional de máquinas.



Fonte: Os autores, 2023.

No caso específico do movimento harmônico, e somente neste caso, a relação entre deslocamento, velocidade e aceleração é simplificada. Conforme (Figura 3).



Fonte: Os autores, 2023.

Essa variação dos valores de velocidade e aceleração com a frequência é extremamente importante para formar a base para critérios de análise de vibração mais rigorosos. Também serve para orientar a seleção da variável que será mais representativa para a detecção e análise de uma determinada falha. No entanto, deve-se notar que as falhas do equipamento podem ocorrer sem sinais de vibração anormal.

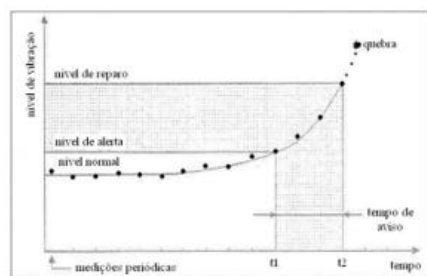
Segundo Antonioli (1999), mede-se o valor efetivo ou valor RMS (root mean square) do sinal enviado pelo sensor que monitora as vibrações. A análise é realizada periodicamente para que se possa avaliar o comportamento

do equipamento durante sua utilização.

Essa técnica não indica o tipo de falha que o equipamento está apresentando, mas apenas sinaliza que existe um problema que precisa ser investigado.

A análise nessa técnica é feita por meio de curvas de tendência, que orientam as conclusões básicas de funcionamento normal, estado de atenção e reparo. A Figura abaixo representa um exemplo deste tipo de curva para análise de nível global. Conforme (Figura 4)

Figura 4. Curva de tendência.



Fonte: Os autores, 2023.

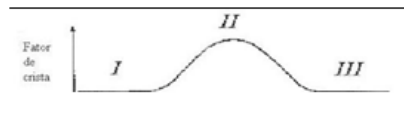
Para ANTONIOLLI (1999) esta técnica apresenta a relação entre o valor de Pico ( $V_p$ ) e o valor RMS ( $VRMS$ ) do sinal de vibração, conforme mostra a equação 2.

$$FC \propto V_p \propto RMS$$

Equação 2.

Para que o gráfico de FC em função do tempo possa ser obtido para esta técnica de análise, medições periódicas devem ser realizadas. Conforme (Figura 5).

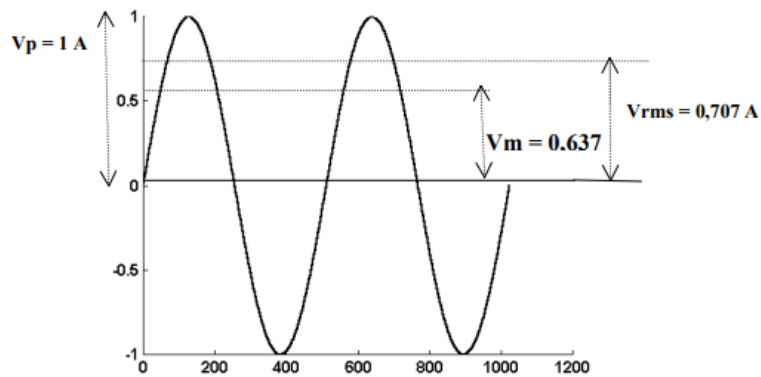
Figura 5 - Gráfico da Função FC.



Fonte: Os autores, 2023.

Analisando o gráfico obtido pelas medições, deve-se conduzir a análise por etapas, no primeiro estágio considera-se que o equipamento avaliado está em sua condição ótima funcionamento, pois o nível de vibração ( $V_p$ ) é baixo e VRMS também é pequeno, mantendo o FC constante. No segundo estágio o nível de vibração se altera, aumentando  $V_p$ , fazendo com que o FC aumente, pois VRMS permanece estável, esta alteração indica as primeiras falhas apresentadas. O terceiro estágio o FC volta a diminuir, porém esta transição significa que o equipamento está atingindo o fim de sua vida útil, visto que além do aumento de  $V_p$  em função da falha existente, por esta estar em um nível avançado o VRMS também aumenta, e a relação entre os dois diminui. Diferentes valores numéricos podem ser usados para caracterizar o movimento, conforme ilustra a (Figura 6).

Figura 6. Análise de vibração do equipamento.



Fonte: Os autores, 2023.

Sendo:  $V_p$ : o valor da amplitude do movimento;  $V_{pico-a-pico}$ : a diferença entre os valores máximos positivo e negativo do movimento;  $V_m$ : o valor médio que é definido pela equação 3.

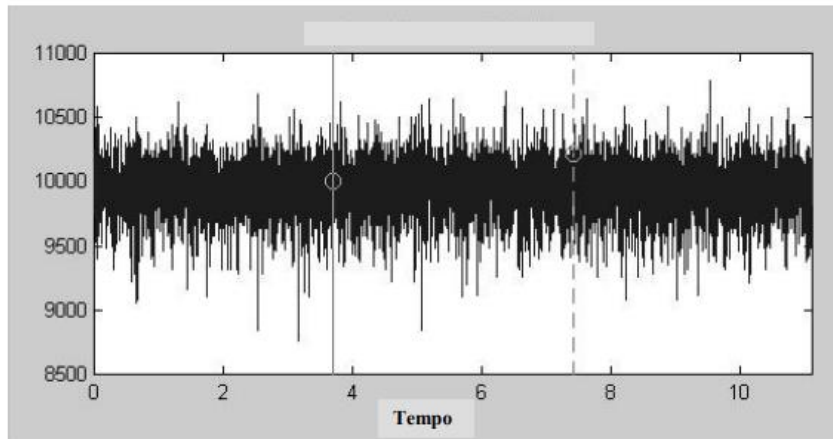
$$V_m = 1/T \cdot \int_0^T x(t) dt$$

Equação 3.

Para o movimento harmônico puro, todos esses valores estão relacionados pela amplitude e podem ser determinados entre si. As vibrações reais encontradas na análise da máquina raramente são puramente harmônicas. A vibração é geralmente uma combinação de vários movimentos harmônicos, de diferentes amplitudes e frequências, e movimentos aleatórios (aqueles cujos valores instantâneos não podem ser descritos por uma equação matemática e onde apenas suas propriedades estatísticas são conhecidas). A figura 7 ilustra o movimento vibracional geral. Em um sinal dessa natureza, a escolha do valor numérico a ser utilizado para determinar suas características pode implicar em grandes diferenças. Por exemplo, o valor de pico do sinal ( $V_p$ ) não leva em consideração o histórico da onda naquele intervalo de tempo que gerou tal pico. Já o valor médio ( $V_m$ ) e o valor rms ( $V_{rms}$ ), ambos levam

em consideração o histórico da onda. Conforme ilustra a (Figura 7).

Figura 7. Movimento vibracional geral.



Fonte: Os autores, 2023.

O valor RMS (ou valor rms) do sinal fornece uma estimativa da energia contida na vibração, por isso é preferível ao valor médio. É um parâmetro amplamente utilizado para avaliar a intensidade de vibrações em estruturas de máquinas ou medições externas. O RMS requer um detector RMS. Uma conversão simples a partir do resultado do detector de valor médio (ou seja, multiplicar por 1,11) leva a resultados errados, quando o sinal de entrada não é uma onda senoidal. O valor de pico é vantajoso quando é necessário determinar se a vibração é de natureza impulsiva, como aquela proveniente de engrenagens ou rolamentos. O valor de pico deve ser medido com um detector de valor de pico, evitando também, ao escalonar o resultado obtido com o detector de valor efetivo (multiplicando por 2), que seja subestimado ou que seja obtida uma análise errada do valor real. O valor pico a pico pode ser usado ao medir o deslocamento relativo do eixo dentro do rolamento. Nesse caso, o valor pico a pico representa o deslocamento do eixo e pode ser comparado diretamente com a folga do mancal. Novamente, deve-se tomar cuidado para obter o valor pico a pico e não apenas multiplicar um dos valores de pico por 2. Uma boa regra é sempre plotar o valor da amplitude em função do tipo do seu detector, seja rms, pico ou pico para cima.

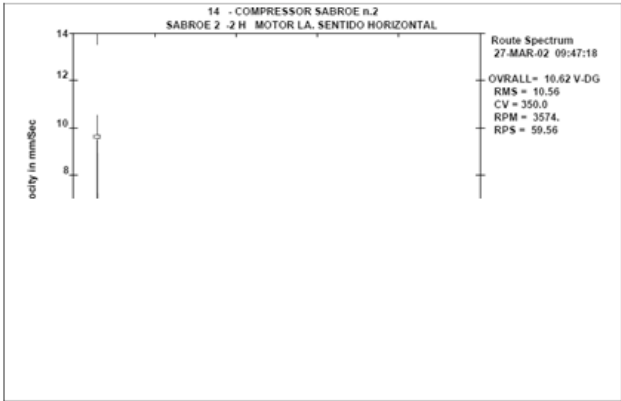
Portanto, frequência é a taxa de repetição de um evento periódico, geralmente expressa em revoluções (ou ciclos) por segundo, Hz; rotações por minuto, rpm; ciclos por segundo, cpm ou múltiplos de velocidade de rotação, harmônicos. Harmônicos são comumente referidos como rotação 1x, rotação 2x, rotação 3x, etc. Condições como: instabilidade, desequilíbrio, desalinhamento, alterações de ajuste, desgaste e até fadiga de seus componentes geram vibrações específicas e características. A vibração característica mais comum ocorre na frequência de rotação da máquina. A vibração na frequência de rotação da máquina é geralmente o componente com a maior amplitude medida pela velocidade ou deslocamento (MARTINS, 2016).

Usando o método de análise de frequência, baseado no teorema de Fourier, determina-se que toda função periódica pode ser decomposta em uma série de ondas senoidais puras de diferentes frequências e múltiplos harmônicos da frequência fundamental. Esses componentes compõem o espectro de frequência das vibrações. Quando transdutores de sensores (acelerômetros) são usados para a aquisição de tal parâmetro e posterior análise, o espectro de vibração do sistema pode ser aumentado. Observando as amplitudes dos picos em determinadas frequências e relacionando as amplitudes observadas com as amplitudes da frequência base do sistema (rotativo), pode-se chegar a um diagnóstico do estado de funcionamento do sistema ou da variabilidade do fluxo (BROWN, 2021).

Esta técnica realiza a análise a partir do espectro de frequências, o sinal de vibração obtido no domínio do tempo é convertido através de uma transformada rápida de Fourier (FFT), que resulta em um espectro representando a amplitude e as frequências importantes para a análise.

Avaliando esses dois parâmetros, é possível saber a gravidade do problema pela amplitude do sinal, quanto maior a amplitude, mais grave o problema, e pela frequência do componente em falha ou o tipo de falha. De acordo com o artigo disponível em confiabilidade manutenção preditiva, a Figura abaixo representa um exemplo de espectro de vibração, que indica a falha de desbalanceamento, no qual é possível verificar que um harmônico está presente na frequência de rotação do equipamento que está sendo avaliado. Conforme (Figura 8).

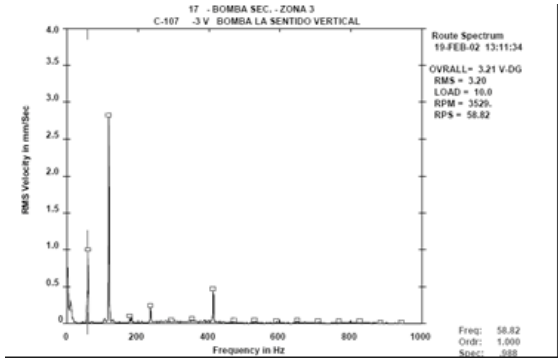
Figura 8. Espectro de vibração.



Fonte: Johnson, 2020

O sinal de vibração axial analisado através do espectro, representado na Figura, indica uma falha de desalinhamento, que tem como característica apresentar a amplitude maior no 2º harmônico podendo ainda apresentar valores relevantes no 1º e no 3º harmônico. Conforme (Figura 9).

Figura 9. Falha no desbalanceamento.

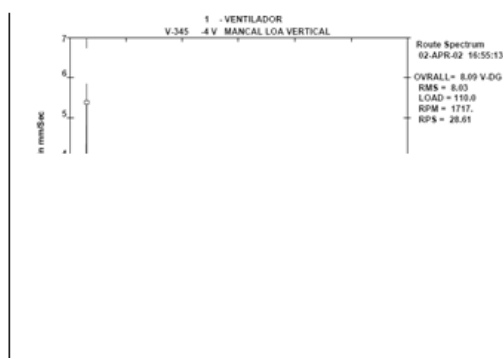


Fonte: Os autores, 2023.

Um terceiro exemplo de análise espectral do sinal de vibração radial,

que representa a falha de folga mecânica, que tem como característica uma amplitude maior no 1º harmônico, seguida de amplitudes relevantes no 2º, 3º, 4º, 5º e seguintes, dependendo do nível de vibração encontrado. Conforme (Figura 10).

Figura 10. Análise espectral de sinal de vibração radial.



Fonte: Os autores, 2023.

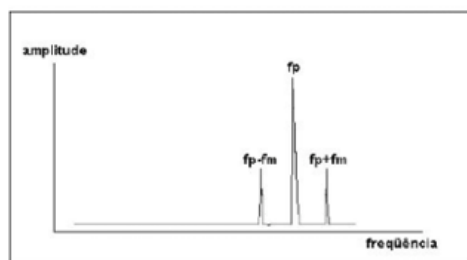
Qualquer força de excitação existente em diferentes pontos da máquina irá gerar um harmônico de vibração que determina um certo deslocamento, uma certa velocidade e uma certa aceleração; a soma de todos os harmônicos para cada variável resultará em um poliharmônico presente nos mancais. As componentes das vibrações harmônicas totais podem ser classificadas em dois grupos, delineados pelo valor da frequência de rotação do eixo (ANDERSON, 2019).

Na tecnologia de revestimento, é amplamente utilizado para detectar e diagnosticar falhas em rolamentos. Com esta técnica é possível determinar com precisão onde está a falha e qual o nível de vibração imposto ao mancal devido a esta anomalia. Através do monitoramento periódico do rolamento, são identificadas variações no nível de aceleração em relação ao nível inicial quando o rolamento era novo para a realização da análise (WHITE, 2018).

Vibrações causadas por falhas em mancais são analisadas por modulação de amplitude, pois esse tipo de falha causa excitação em altas

frequências naturais. É apresentado como exemplo da técnica, o espectro de um sinal modulado, que representa um pico central na frequência da portadora ( $f_p$ ) e bandas laterais distantes do valor da frequência de modulação ( $f_m$ ). Conforme (Figura 11).

Figura 11. Espectro de vibração de sinal modulado.



Fonte: Garcia, 2017

Técnica utilizada principalmente no diagnóstico de falhas em engrenagens e rolamentos. Também utiliza a modulação do sinal analisado, mas se baseia em famílias de picos com o mesmo espaçamento de frequência na análise e direciona o diagnóstico através dessas frequências. A análise de vibração, através das técnicas apresentadas, permite definir a origem e a intensidade das vibrações em equipamentos rotativos decorrentes de desbalanceamento, desalinhamento, folga, falta de rigidez mecânica, falha de rolamento, entre outras falhas, e selecionar parâmetros adequados para cada tipo de falha possível. Consegue controlar e atuar para aumentar a vida útil dos equipamentos (WILSON, 2016).

As máquinas são elementos mecânicos complexos e articulados. Partes excitadas podem oscilar e as oscilações são transmitidas através das juntas para outros elementos acoplados. O resultado é um complexo de frequência que caracteriza o sistema. Cada vez que uma peça muda suas características mecânicas devido ao desgaste ou rachadura, o componente de frequência do sistema muda. Se houver alteração no acoplamento entre as partes, altera-se o coeficiente de transferência de sinal entre as partes e, conseqüentemente, a

forma de frequência global do sistema. Folga, defeitos ou desalinhamento de rolamentos ou rolamentos em máquinas rotativas são refletidos em mudanças de frequência ou no aparecimento de novas frequências. O desbalanceamento do rotor é transmitido pelo rolamento. Considerando os graus de liberdade dos acoplamentos, movimentos complexos (no espaço - três eixos) podem ser parcialmente transmitidos (THOMAS, 2015).

A detecção de vibrações no tempo e no espaço, por outro lado, pode fornecer informações adicionais. Isso requer, no entanto, a decomposição do movimento por meio de sensores que detectam quantidades físicas em direções específicas. A premissa básica na qual se baseia a análise de vibração como técnica aplicada à manutenção industrial é: "Todo componente ou todo tipo de deficiência mecânica de uma máquina em operação produz uma vibração de certa frequência que, em condições normais de operação, atinge no máximo uma certa amplitude" (THOMAS, 2015).

Desta vez, medindo e analisando a vibração, é possível determinar sua origem, identificar cada componente da máquina e o tipo de falha que a gera, além de avaliar a condição mecânica do componente que produz ou pesar o defeito detectado. A metodologia básica recomenda: 1) Medição de frequência para identificar a origem da vibração; O conhecimento da frequência permite identificar o componente da máquina ou a natureza da avaria que produz a vibração 2) Medir a amplitude para avaliar a vibração e conseqüentemente o funcionamento normal ou anormal do sistema; A medição da amplitude permite avaliar, por comparação com os valores limite previamente determinados, se a vibração corresponde a um funcionamento normal ou anormal e o grau de importância do erro detectado (RUSELL, 2014).

Como vimos, Frequência é a taxa de repetição de um evento periódico, geralmente expressa em revoluções (ou ciclos) por segundo, Hz; rotações por minuto, rpm; ciclos por segundo, cpm ou múltiplos de velocidade de rotação, harmônicos. Harmônicos são comumente referidos como rotação 1x, rotação 2x, rotação 3x, etc. Todo equipamento giratório que possui sistema de rolamento do rotor pode ser avaliado através das forças dinâmicas que atuam sobre ele quando em operação. Condições como instabilidade, desequilíbrio, desalinhamento, alteração de configurações, desgaste e até mesmo fadiga de seus componentes geram vibrações específicas e características. A vibração

característica mais comum ocorre na frequência de rotação da máquina. A vibração na frequência de rotação da máquina é geralmente o componente com a maior amplitude medida pela velocidade ou deslocamento. Seguem os harmônicos da frequência de rotação. Eles podem ser gerados de pelo menos duas maneiras. Primeiro, por um evento que se repete várias vezes durante cada revolução, como a ação de ajustar uma embreagem desalinhada. Em segundo lugar, distorcendo ou deslocando uma onda senoidal pura na frequência fundamental ou rotacional da máquina (MORGAN, 2013).

O método de análise de frequência, baseado no teorema de Fourier, afirma que qualquer função periódica pode ser decomposta em uma série de ondas senoidais puras de diferentes frequências e múltiplos harmônicos da frequência fundamental. Esses componentes compõem o espectro de frequência das vibrações. Quando transdutores de sensores (acelerômetros) são usados para a aquisição de tal parâmetro e posterior análise, o espectro de vibração do "sistema" pode ser aumentado passando o sinal coletado por um filtro passa-banda estreito e ajustável. Com esse filtro, a faixa de frequência pode ser deslocada, observando a amplitude dos picos em determinadas frequências. Relacionando as amplitudes observadas com as amplitudes da frequência fundamental do sistema (rotativa), pode-se chegar a um diagnóstico do estado operacional do sistema ou da volatilidade do curso (HALL, 2012).

Qualquer força de excitação existente em diferentes pontos da máquina irá gerar um harmônico de vibração que determina um certo deslocamento, uma certa velocidade e uma certa aceleração; a soma de todos os harmônicos para cada variável resultará em um poliharmônico presente nos mancais. As componentes das vibrações harmônicas totais podem ser classificadas em dois grupos, delineados pelo valor da frequência de rotação do eixo. Assim, foi estabelecida uma divisão: 1) Componentes de baixa frequência (valores de frequência até 5 vezes maiores que a rotação do eixo). 2) Componentes de alta frequência (valores de frequência superiores a 5 vezes a rotação do fuso). Cabe esclarecer que os valores acima seguem a divisão de orientações (MILLER, 2011).

A escolha do parâmetro para uma determinada medição depende da natureza da vibração e da finalidade da medição. Embora o deslocamento seja geralmente preferido para medir vibrações de baixa frequência, como

desbalanceamento da máquina e vibrações de suporte estrutural, a aceleração é escolhida para medir choques e vibrações de alta frequência, onde geralmente ocorrem os primeiros sinais de desgaste e fadiga da máquina. A velocidade, por outro lado, dá uma indicação de vibração, e o parâmetro é exibido nos programas de monitoramento da condição da máquina e manutenção preventiva (MILLER, 2011).

Os transdutores de vibração são dispositivos que convertem o movimento mecânico em um sinal elétrico dinâmico (CA). Eles geralmente requerem condicionamento eletrônico que ajusta o sinal elétrico para transmissão ou uso por instrumentos de monitoramento, analisadores, monitores e dispositivos de gravação. Os transdutores tradicionalmente usados para testes de vibração são: medidores de deslocamento sem contato (como uma "sonda de corrente parasita"); Sensores de velocidade (eletromecânicos ou piezoelétricos) e acelerômetros (PETTERSON, 2010).

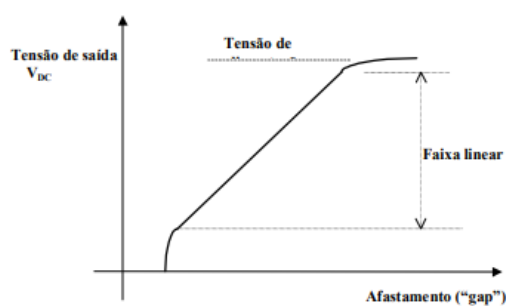
Um medidor de deslocamento é um sistema que consiste em um transdutor de deslocamento ("sonda"), um cabo de extensão e um oscilador/demodulador. O transdutor de deslocamento consiste em uma bobina de cobre montada sobre um material não condutor, plástico ou cerâmico, conectado a um corpo cilíndrico rosqueado para que possa ser fixado a um suporte. Em operação, o conversor é excitado por uma frequência de cerca de 1500 Hz, que é gerada pelo oscilador e transmitida pelo cabo de extensão. Quando a extremidade do transdutor é colocada perto do material condutor (a superfície da máquina que está sendo monitorada), correntes "eddy" são induzidas na superfície do material, extraíndo energia da excitação da "sonda" e modificando a amplitude do sinal, ou seja. amplitude modulando um sinal de 1500 Hz (ROBERTS, 2009).

Como a distância entre a extremidade do transdutor e a superfície observada, conhecida como "gap", é variável (porque vibra), o sinal modulador representa uma vibração, que se expressa na saída do demodulador como uma corrente contínua proporcional . Tensão. O conjunto completo: conversor de deslocamento, cabo de extensão, oscilador e demodulador formam um circuito ressonante em harmonia. Para estabelecer e manter a relação gap-voltagem, todo o conjunto deve ser devidamente alinhado e calibrado. O padrão 670 do American Petroleum Institute (API) fornece especificações

sobre as extremidades do sensor, diâmetro do corpo, tipos de rosca, comprimento da sonda e cabos de extensão. Esses padrões são seguidos pela maioria dos fabricantes de transdutores de deslocamento usados no monitoramento da condição da máquina. Dessa forma, garantem a intercambialidade dos componentes, eliminando a recalibração (HARRISON, 2018).

Os transdutores de deslocamento sem contato obtiveram ampla aceitação no monitoramento e proteção de máquinas industriais. Eles são eficazes para monitorar máquinas com rolamentos ou rolamentos deslizantes. Eles indicam o movimento do eixo e sua posição relativa em relação ao mancal. O deslocamento do eixo radial (valor de pico a pico) pode estar diretamente relacionado à folga radial no rolamento. O componente estático (DC) do sistema de medição de vibração de proximidade representa a posição média do eixo em relação ao transdutor de deslocamento. Comumente usado para monitorar a posição axial de um eixo, o componente estático também é importante para o monitoramento radial. Nesse caso, ele pode localizar a posição média da linha de centro longitudinal do eixo dentro do rolamento. O monitoramento da posição axial também é usado para monitorar a posição relativa do rotor em relação aos componentes estacionários da máquina. Conforme (Figura 12).

Figura 12. Monitoramento da posição de rolamentos.



Fonte: Harrison, 2018

Algumas considerações podem ser feitas dependendo da curva de

calibração: a) A sensibilidade do sistema é dada pela relação: variação da tensão de saída / variação do gap. b) Um sensor em contato ou muito próximo ao eixo em teste não produz sinal de saída do demodulador. c) Existe uma região linear onde o deslocamento do sensor da superfície observada produz uma tensão de saída proporcional. A região linear, com base nos padrões atuais da indústria, pode variar de 250  $\mu\text{m}$  a 2250  $\mu\text{m}$  em média. Tais padrões mostram uma proporcionalidade entre o intervalo ("gap") e a tensão de saída de 8 mV/ $\mu\text{m}$ . Isso significa que uma alteração no deslocamento de 250  $\mu\text{m}$  produz uma alteração na tensão de 2 V. d) Além da extremidade superior da região linear, o sistema perde a constante de proporcionalidade entre a tensão de saída e o offset. A tensão de saída se aproxima da tensão de alimentação ajustada. A inclinação da curva, a faixa linear e a saída VDC correspondente a um determinado deslocamento variarão conforme a condutividade e a permeabilidade do material mudam. Se o sensor e o demodulador forem calibrados para aço 4140 e forem usados sem recalibração adequada em outro material, como aço inoxidável ou inconel, a curva se deslocará para a esquerda. Esse deslocamento produzirá uma tensão de saída mais alta para um determinado deslocamento. Portanto, recomenda-se verificar a calibração do sistema com o material a ser utilizado (ANDERSSON, 2022).

Como limitação do uso de transdutores de movimento, pode-se apontar a dificuldade que ele tem em rastrear o eixo, que representa uma irregularidade na superfície do material, como a periferia do eixo. Este sistema não consegue distinguir entre movimento do eixo (vibração) e imperfeições em sua superfície ("guinchos"). As imperfeições podem ser crateras, poços, excentricidade do eixo, variações nas propriedades eletromagnéticas ou variações na condutividade e permeabilidade do material. Como consequência, o sinal de saída é a soma vetorial da vibração e todas as imperfeições da superfície observadas pelo sensor (ANDERSSON, 2022).

Considerando que o campo magnético produzido pelo sensor penetra na superfície do material monitorado, qualquer heterogeneidade produzirá certa distorção no sinal de saída. Isso pode alterar a configuração da forma de onda, bem como aumentar a amplitude de vibração dos harmônicos da frequência (velocidade) da máquina. O desvio total geralmente é medido em máquinas de alta velocidade (maiores que 2.500 rpm) observando o movimento do eixo em

velocidades de 300 a 600 rpm. Nessa velocidade, todas as vibrações do eixo são consideradas causadas por imperfeições. Como "saída" é um vetor, não pode ser subtraído como um valor absoluto. Deve ser minimizado a todo custo. Como regra geral, a liberação total medida não deve exceder 10% do deslocamento do eixo durante a operação (CARTER, 2021).

Os cuidados para minimizar o problema requerem cuidados na fabricação ou preparação da superfície a ser medida. Além desse detalhe, sabe-se que forças eletromagnéticas podem gerar "salientes". Portanto, pode ser de dois tipos: mecânico e eletromagnético. A eliminação pode ser feita eletronicamente, ou seja, com um compensador de "trip". Este compensador lembra o movimento de uma volta completa do eixo em relação a uma determinada posição de referência indicada por outro sensor. Este sensor serve apenas para indicar a posição do eixo durante uma revolução. Presume-se que o sinal de vibração obtido do eixo em baixa velocidade seja devido a tais defeitos ou imperfeições. Essa forma de onda ou espectro de vibração é subtraída automaticamente da forma de onda do sensor de deslocamento quando o eixo está em operação. Este procedimento gera uma forma de onda e um espectro de vibração correspondente mais representativo do movimento real do eixo. Para que o processo seja eficaz, o sensor deve visualizar a mesma superfície usada para capturar a precipitação. A qualidade da medida depende desse cuidado. A operação de subtração pode ser realizada de forma analógica ou digital se for utilizado um sistema digital (FOSTER, 2020).

Para medir a precisão, alguns cuidados devem ser observados. Como o objetivo da medição é monitorar vibrações, é necessário que o sensor esteja sólido e protegido para funcionar satisfatoriamente. Um dispositivo de suporte do sensor de deslocamento sem rigidez pode ser uma fonte de erros.

Se o suporte vibrar, ocorre uma leitura incorreta da vibração. Antes de instalar o suporte, é importante conhecer sua frequência de ressonância. Por precaução, recomenda-se que a frequência seja de no mínimo dez (10) vezes a velocidade de operação do equipamento. A interferência do campo magnético entre dois sensores colocados próximos um do outro pode ser outra fonte de interferência. As correntes parasitas geradas pela sonda irradiam um campo magnético, que pode interferir na operação da sonda adjacente. Cada tipo de demodulador é projetado para usar um comprimento de cabo e

diâmetro de ponta de prova específicos. A impedância do cabo afeta o comportamento do circuito. Comprimentos de cabo menores do que o especificado aumentam os fatores de escala que, consequentemente, indicam uma leitura de vibração maior que a vibração real. (FOSTER, 2020).

Por outro lado, uma indicação inferior à existente pode levar a situações de risco. Nesta situação, o monitor apresentará um nível de vibração aceitável e baixo, enquanto a vibração real é maior e pode até atingir níveis críticos. A curva de calibração do sensor deve sempre ser consultada e seguida para evitar tais situações. Outro detalhe a observar é o que é conhecido como vista lateral. O sensor de deslocamento irradia um campo magnético para a frente e para os lados. O material condutor próximo à sua superfície lateral limita sua sensibilidade em relação à distância do material à sua frente. Isso reduz o fator de escala e, consequentemente, há uma indicação de vibração abaixo do real. "Não deve haver nenhum material condutor dentro de um raio de duas vezes o diâmetro da ponta da sonda em torno de sua superfície" [Ritt 96]. Portanto, três pontos críticos podem ser distinguidos ao usar um sistema de medição de proximidade: a) Espaçamento inadequado. b) Interferência lateral. c) Comprimento de cabo incompatível. Todos esses problemas causam indicações excessivas ou incorretas nos monitores. Isso pode levar a falsos alarmes e perda de confiança no sistema de monitoramento (DAVIS, 2019).

#### 2.2.1 Métodos de análise

Segundo Sumathi e Surekha (2007), um sistema de instrumentação virtual utiliza um software de monitoramento e medição, controlando o dispositivo de medição fora do computador e exibindo o resultado do teste ou medição em painéis na tela do instrumento. computador. Os dados coletados pelo dispositivo externo são conectados ao computador. É importante considerar a forma como será criada a interface entre o ambiente real e virtual, para isso é necessário conhecer o componente da interface, que é o meio físico que fornecerá o sinal e o padrão de comunicação. Chama-se padrão de comunicação, ou protocolo, a definição de como os dados serão transmitidos no sistema, ou seja, a linguagem de comunicação entre os componentes que integram a instrumentação.

Descrevendo o sistema em geral, é correto dizer que o módulo sensor

detecta e condiciona o sinal e o transforma em formato digital para posterior manipulação. Através da interface do sensor, o módulo do sensor se comunica com o computador. Quando as informações estão em formato digital em um computador, elas podem ser processadas, convertidas, comparadas e manipuladas de várias maneiras ou armazenadas em um banco de dados. As informações podem então ser exibidas ou convertidas de volta em um sinal analógico para um processo de controle posterior (CLARK, 2015). Conforme (Figura 13).

Figura 13. Módulo de interface de sensor de vibração.

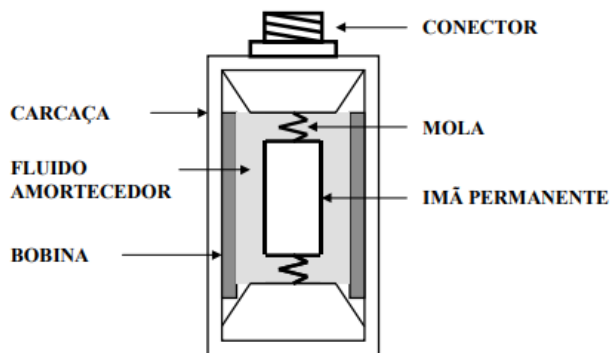


Fonte: Clark, 2015

Existem dois tipos de sensores de velocidade usados no monitoramento de máquinas: eletromecânicos e piezoelétricos.

Este sensor é composto por um ímã permanente e uma bobina de cobre, conforme mostra a figura 14. Dentro do sensor, uma bobina cilíndrica, presa ao seu corpo, envolve um ímã permanente suspenso por mola. O sistema de suporte de mola é projetado para baixa frequência natural, de modo que o ímã permanece estacionário (massa inercial) no espaço para frequências acima de 10 Hz, aprox. Geralmente, o óleo sintético é usado para amortecer a frequência natural do sistema massa-mola e reduzir sua resposta para valores abaixo de 10 Hz. Conforme (Figura 14).

Figura 14. Sensor para detectar vibração.



Fonte: Costa, 2020

O sensor é fixado na superfície onde se deseja medir as vibrações. Quando vibra, o movimento relativo entre o ímã estacionário e a bobina gera um campo magnético variável na bobina, induzindo uma tensão proporcional à velocidade absoluta da superfície. O sensor de velocidade é um mecanismo de geração automática que produz um sinal de baixa impedância. Este sinal pode ser utilizado diretamente no analisador ou equipamento de monitoramento sem a necessidade de fonte de alimentação externa. O sensor eletromecânico de velocidade possui uma curva de resposta em frequência de sensibilidade limitada em baixas frequências amortecidas pela frequência natural do sistema. A faixa de operação deste sistema é geralmente da ordem de 10 Hz a 1500 Hz. Devido à presença de fluido umectante em seu interior, a temperatura de operação deve ser mantida dentro dos padrões recomendados. No entanto, sensores especiais podem funcionar em temperaturas de cerca de 260 °C (COSTA, 2020).

Somando-se às já mencionadas limitações de frequência e temperatura,

podem ser apontadas as seguintes limitações ou advertências no uso deste tipo de sensor: a) Confiabilidade mecânica: por ser um dispositivo eletromecânico, está sujeito ao desgaste e, conseqüentemente, à diminuição precisão devido ao uso. Por possuir partes móveis, está suscetível, também devido ao uso constante, a falhas de componentes. b) Orientação: alguns modelos requerem montagem em determinados planos, horizontal ou vertical, limitando as posições de montagem na máquina. c) Uso em máquinas de baixa rotação: a sensibilidade do sensor de velocidade cai significativamente abaixo de 10 Hz (600 rpm), portanto, não é adequado para monitorar máquinas com velocidades abaixo de 500 ~ 600 rpm (FERREIRA, 2019).

Segundo Pereira (2014, p.33):

Um sensor de velocidade piezoelétrico é na verdade um acelerômetro piezoelétrico que possui um circuito interno que integra o sinal resultante, resultando em uma saída que expressa a velocidade. Comparado a um sensor de velocidade eletromecânico, apresenta algumas vantagens:

a) Maior confiabilidade e vida útil devido à ausência de partes mecânicas móveis. b) Estabilidade de fase em sua faixa de operação. c) Maior faixa de operação para baixas frequências. A faixa de atuação dos sensores de velocidade (acelerômetros) varia de aproximadamente 2 Hz (120 rpm) a 2000 Hz (1200 rpm), dependendo de sua conformação. Desta forma, você pode monitorar máquinas ou vibrações em baixas frequências.

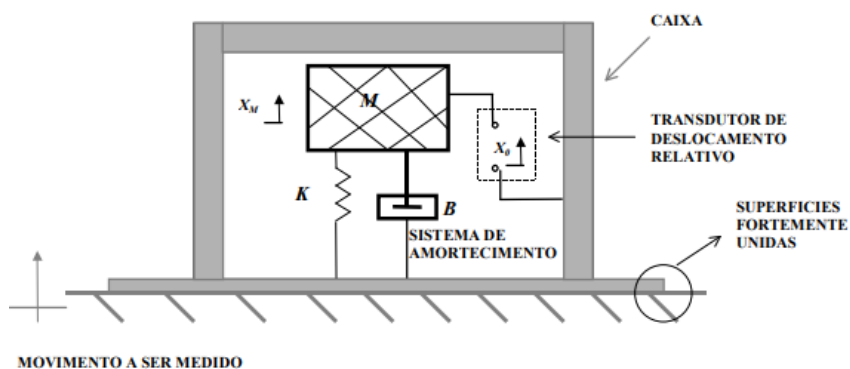
O sensor mais importante para medir vibrações, choques e movimentos é o acelerômetro. Este instrumento está disponível comercialmente em uma ampla gama de tipos e modelos, atendendo as mais diversas especificidades na área de medição. Para Ribeiro (2013, p.45), o motivo dessa popularidade são os recursos apresentados:

a) A resposta de frequência varia de vários Hz a kHz. b) Deslocamentos e velocidades podem ser facilmente obtidos por integração elétrica que é mais estável que por diferenciação. c) As medições de movimentos transitórios (choques) são obtidas melhor do que com sensores de deslocamento ou velocidade. d) As forças destrutivas nas máquinas, em geral, são expressas com mais precisão pela aceleração do que pela velocidade ou deslocamento.

O princípio de funcionamento pode ser descrito como: supondo que a aceleração  $k''$  medida seja uniforme, a massa  $M$  estará em repouso em relação à caixa. Desta forma, sua aceleração absoluta também será  $k''$ . Se a

massa  $M$  é acelerada por  $k''$ , deve haver uma força causando essa aceleração. Porém, se a massa  $M$  não se mover em relação à caixa, essa força só pode vir da mola. Como a deflexão da mola  $k_0$  é proporcional à força, que é proporcional à aceleração,  $k_0$  é uma medida da aceleração  $k''$ . Portanto, a medição da aceleração absoluta é reduzida à medição da força necessária para acelerar uma massa conhecida. Essa dependência deve levar em consideração o efeito das forças gravitacionais, principalmente em sistemas de orientação inercial, que não tem efeito em sistemas de medição de vibração. Conforme (Figura 15).

Figura 15. Transdutor de vibração.



Fonte: Alves, 2022

Um grande número de acelerômetros tem a configuração da figura, diferindo em detalhes como o elemento de mola usado, o tipo de transdutor usado para indicar o movimento relativo e o tipo de amortecimento usado. "...o amortecimento deliberado na escala de amortecimento  $\zeta = 0,6$  a  $0,7$  é geralmente usado para minimizar a resposta ressonante em transientes de baixa frequência".

Como a tensão de saída  $e_0 = K_e \cdot k_0$ , para muitos conversores de movimento a equação é dada como uma função de transferência para aceleração - tensão. Também pode ser visualizados pela equação que os acelerômetros são instrumentos de segunda ordem. A resposta de frequência varia de zero a várias frações de  $\omega_n$ , dependendo da nitidez desejada e da

atenuação utilizada. Como,  $K / \omega_n^2$ , a resposta de alta frequência deve ser controlada pela sensibilidade (FERREIRA, 2019).

Muitas vezes é necessário conhecer o desempenho geral de um sistema mecânico em termos de aceleração e massa. Isso é particularmente útil em situações em que é impossível determinar a natureza do mecanismo do sistema ou medir as forças aplicadas pelos componentes do sistema. Em aplicações onde as acelerações devem ser medidas, os acelerômetros são usados porque não requerem uma fonte de alimentação externa. A saída do acelerômetro também pode confirmar conexões em patch cables em interconexões sujeitas a movimento, como em conexões de transmissão de dados de controle de aeronaves. Outra aplicação de alta precisão é em monitores de terremotos. A tecnologia aplicada, especificidades e características resultantes do projeto de desenvolvimento podem direcionar diferentes tipos, possibilitar maior escolha e satisfazer necessidades atípicas de pesquisa. A escolha adequada do tipo de implementação deve ser baseada nas características básicas, mas importantes e decisivas para que o processo possa ser instrumentalizado para obter um resultado ótimo. Dentre as que existem na área de acelerômetros, podem ser consideradas as características básicas: sensibilidade e resposta em frequência (GOMES, 2018).

Os acelerômetros piezoelétricos são os transdutores de aceleração mais comumente usados na proteção e monitoramento de máquinas [Doeb 90]. Um acelerômetro piezoelétrico típico contém um ou mais elementos piezoelétricos, que podem ser naturais (cristais de quartzo, entre outros) ou artificiais (polímeros piezoelétricos, por exemplo). Os acelerômetros piezoelétricos são amplamente utilizados para medições de choque e vibração. Em geral, tais tipos não fornecem um sinal de saída para acelerações constantes, devido às características funcionais básicas dos transdutores de movimento piezoelétricos (MARTINS, 2016).

Os acelerômetros piezoelétricos, continuando com suas características, dão sinais de alta saída, podem ter tamanhos reduzidos, o que é um fator relevante em alguns casos de pesquisas dedicadas, ou seja, em aplicações que embutem o transdutor no meio investigado para monitoramento permanente. Podem apresentar altas frequências naturais, o que lhes permite medir o impacto. O amortecimento, nesta categoria de acelerômetros, não é

utilizado intencionalmente, sendo a histerese do material uma fonte de perda de energia a ser considerada. O fator de amortecimento não é especificado pelos fabricantes, mas para fins mais práticos pode ser assumido como zero (BROWN, 2021).

A sensibilidade característica à resposta de frequência é geralmente encontrada como uma especificação típica para esta casta: um acelerômetro de choque pode ter 0,004 pC/g e uma frequência natural de 250 kHz, enquanto uma unidade projetada para medições sísmicas de baixo nível tem 1000 pC/g e 7 kHz. Pequenas unidades foram encontradas, medindo cerca de 3 x 3 mm e pesando 0,5 g incluindo cabos de interligação. Verificou-se que dispositivos não resfriados ("não resfriados") operam em uma faixa de temperatura de -268 °C a +815 °C (-450 °F a +1500 °F), exibindo tipicamente uma alteração de sensibilidade de  $\pm 10\%$  em relação à temperatura variar. de -73 °C a +815 °C (-100 °F a +1500 °F) e pode ser projetado para operar em ambientes sensíveis à radiação, como reatores nucleares (WHITE, 2018).

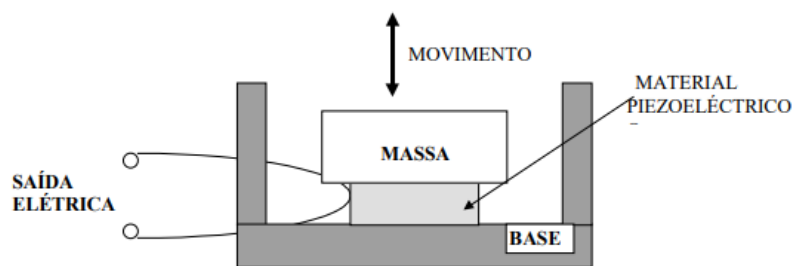
A resposta para baixas frequências é limitada pela característica piezoelétrica  $\tau D/(\tau D + 1)$ , enquanto a resposta para altas frequências é limitada pela ressonância do mecanismo utilizado na construção do acelerômetro.

A precisão é de +5% para altas frequências e -5% para baixas frequências. Resposta de frequência precisa em baixa frequência requer uma grande constante de tempo  $\tau$ , que geralmente é obtida usando amplificadores de tensão de alta impedância ou amplificadores de carga. Sistemas projetados para operar abaixo de 1 Hz e sujeitos a transientes de temperatura podem apresentar erros, pois o efeito piezoelétrico resulta em carregamento de saída em caso de variação de temperatura na entrada do conversor. Essas variações de temperatura de entrada são "percebidas" como transientes de baixa frequência. Portanto, projetos para reduzir os efeitos térmicos são comuns (CLARK, 2015).

O projeto de acelerômetros piezoelétricos pode ser encontrado de várias maneiras, visando satisfazer as características selecionadas e o desempenho desejado para aplicações específicas. A configuração mais básica para um acelerômetro piezoelétrico pode ser especificada como compressão de material. Um acelerômetro de compressão, em sua forma mais simples, consiste em um disco de material piezoelétrico apoiado em uma base e uma

massa colocada em cima dela. Conforme (Figura 16).

Figura 16. Acelerômetro de compressão.



Fonte: Oliveira, 2015

A precisão é de +5% para altas frequências e -5% para baixas frequências. Resposta de frequência precisa em baixa frequência requer uma grande constante de tempo  $\tau$ , que geralmente é obtida usando amplificadores de tensão de alta impedância ou amplificadores de carga. Sistemas projetados para operar abaixo de 1 Hz e sujeitos a transientes de temperatura podem apresentar erros, pois o efeito piezoelétrico resulta em carregamento de saída em caso de variação de temperatura na entrada do conversor. Essas variações de temperatura de entrada são "percebidas" como transientes de baixa frequência. Portanto, projetos para reduzir os efeitos térmicos são comuns. O projeto de acelerômetros piezoelétricos pode ser encontrado de várias maneiras, visando satisfazer as características selecionadas e o desempenho desejado para aplicações específicas. A configuração mais básica para um acelerômetro piezoelétrico pode ser especificada como compressão de material. Um acelerômetro de compressão, em sua forma mais simples, consiste em um disco de material piezoelétrico apoiado em uma base e uma massa colocada em cima dela (OLIVEIRA, 2015).

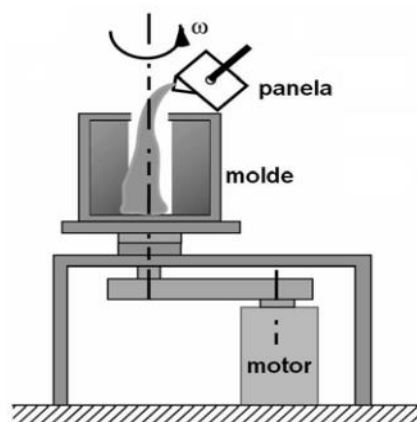
### 2.3 MÁQUINA CENTRÍFUGA DE FUNDIÇÃO

A fundição centrífuga é um processo avançado para a produção de cilindros de laminação, que permite a obtenção de produtos de alta qualidade em termos de propriedades metalúrgicas e mecânicas. Através do aumento de pesquisas nesta área, hoje o processo evoluiu significativamente, principalmente na tecnologia agregada às máquinas centrífugas.

O processo de fundição centrífuga consiste em fundir peças solidificando o metal líquido em um molde rotativo. Como pode ser visto esquematicamente na figura, no processo de fundição centrífuga, a liga metálica é depositada no centro da máquina rotativa e, através do movimento desta e do molde que gira concentricamente em relação à máquina, o metal é depositado em direção à parede do molde por força centrífuga. Devido à pressão que a força centrífuga exerce sobre o metal ao atingir as paredes do molde, os poros e depressões, comuns na fundição convencional (estática), são eliminados. Uma grande vantagem do vazamento centrífugo em relação ao vazamento convencional é a redução de gases e porosidade no produto final, o que permite melhores propriedades mecânicas (PEREIRA, 2014)

Através de tratamentos superficiais, pode-se combinar uma superfície dura com um núcleo mais dúctil. Outra aplicação da fundição centrífuga são peças bi-metálicas, com duas camadas concêntricas de materiais diferentes. Conforme (Figura 17).

Figura 17. Processo de fundição centrífuga.



Fonte: Araújo, 2011

Na centrifugação horizontal, a máquina de centrifugação tem um eixo de rotação horizontal. A força centrífuga criada pela rotação empurra o metal fundido contra a parede do molde, criando a geometria desejada. O processo de fundição horizontal é usado para produzir peças que possuem um eixo de rotação horizontal. A produção de fundidos é baseada na força centrífuga criada pela rotação de um molde cilíndrico que empurra o metal fundido contra a parede do molde para criar a geometria desejada. Inicialmente, este processo foi utilizado para produzir tubos de ferro fundido cinzento de paredes finas, ferro fundido maleável e ligas de cobre. Mais recentemente, este processo é aplicado a todos os tipos de peças cilíndricas utilizadas em inúmeras indústrias (COSTA, 2020).

No processo de centrifugação vertical, a máquina de centrifugação tem um eixo de rotação vertical. O material injetado dentro da máquina adere às paredes do molde e gira de acordo com a velocidade de rotação. Segundo o ASM Handbook (1998), o processo de fundição vertical tem uma gama mais ampla de aplicações, pois é utilizado para produzir peças não simétricas e/ou cilíndricas. Os processos de fundição vertical são divididos em três variantes: Somente fundição centrífuga. Neste processo de fundição, a forma da superfície da peça resulta da própria centrifugação, portanto é cilíndrica, sendo a espessura determinada pela quantidade de material fundido. É o caso dos tubos spin-cast, que, portanto, não necessitam de núcleo. Durante o enchimento, o material tende a permanecer imóvel devido à inércia e somente por atrito o molde transfere momento cinético. Portanto, ao despejar, a velocidade deve ser bem controlada para garantir que o metal adira imediatamente às paredes. De fato, se a velocidade de rotação for muito alta, o metal líquido, em vez de girar com o molde, flui sem acompanhá-lo na rotação (PEREIRA, 2014).

. Como em outros processos, é preciso garantir o equilíbrio na rotação, pois caso isso não aconteça, surgem vibrações que reduzem a qualidade da fundição. A condição ideal é que haja equilíbrio antes do vazamento; isto requer que os moldes sejam simétricos ou sejam moldados simultaneamente em partes iguais e simetricamente espaçados. Se isso não for possível, um

dispositivo de contrapeso é usado para equilibrar o molde. Como neste último caso não é possível equilibrar o molde vazio e o molde cheio ao mesmo tempo, então deve-se buscar o equilíbrio quando ele estiver cheio, pelo que o metal solidifica, pois assim as vibrações devem ser evitadas. Outra coisa a considerar. No caso de metais não aptos para centrifugação, o resultado obtido é caracterizado pelo fato de o interior da peça ficar mais macio. Segregações devido a diferenças de densidade podem ser um problema em ligas contendo elementos de liga imiscíveis ou pesados (CAMPOS, 2020).

Segundo Chirita (2006) o processo de fundição centrífuga é muito mais eficiente em termos de obtenção de propriedades mecânicas em comparação com o processo de fundição estática. O efeito da força centrífuga pode aumentar a resistência à fratura, a tensão de fratura e o módulo de Young da peça acabada, reduzindo gases e porosidade no metal. Outras vantagens da fundição centrífuga citadas por ASM (1998) são:

Os defeitos mais comuns na fundição centrífuga são: trincas, segregação e bandas. Trincas - As trincas de retração ocorrem na fundição centrífuga devido às altas rotações utilizadas, em torno de 1.000 rpm. A trinca longitudinal ocorre quando a contração da fundição, combinada com a expansão do molde, cria tensões circunferenciais que excedem a resistência à tração do metal em temperaturas na região solidus. De acordo com Hanguang (2008), o molde, a pintura do molde, a velocidade e temperatura do molde e a taxa de resfriamento afetam a formação de trincas em peças fundidas de cilindros de aço rápido. Segregação - Existem várias formas de segregação de constituintes menos densos em camadas afastadas do centro do material fundido. Hanguang (2008) concluiu que para cilindros fundidos de aço rápido, os principais fatores para aumentar a segregação são: velocidade de rotação, taxa de resfriamento e rede atômica característica do material. Quanto maior a rotação e menor a taxa de resfriamento, maior a segregação no produto final (SILVA, 2008).

Segregação na interface - Especialmente no caso de cilindros fundidos multicamada, pode ocorrer segregação na superfície intercamada. Bandas - Às vezes, a fusão produz segregação de constituintes de baixa fusão que possuem uma fase eutética, como sulfetos e óxidos. Várias teorias explicam essa deficiência, apontando o estado de vibração como a principal causa.

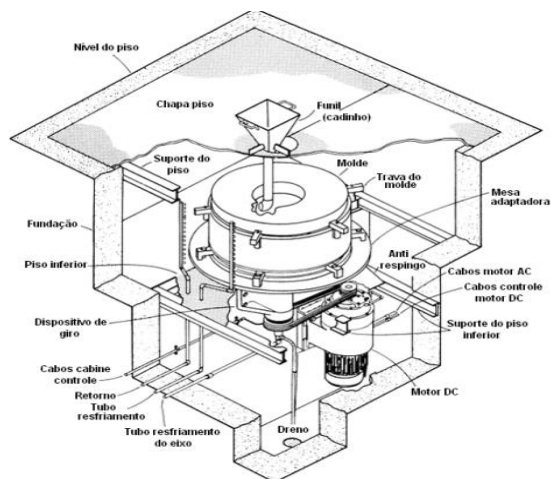
As máquinas centrífugas atuais combinam tecnologia mecânica em termos de materiais e elementos de máquinas de última geração, com avanços em eletrônica. Dessa forma, tais máquinas possuem recursos como controle de aceleração e medição de vibração em qualquer ponto da máquina, por meio de sensores instalados nos eixos X, Y e Z. novas classes de materiais, promovendo maior qualidade e durabilidade na sua utilização (ASM, 1998). Existem basicamente três tipos de máquinas de fundição centrífuga: a máquina centrífuga horizontal, a máquina semi horizontal, que trabalha com certo grau de inclinação e a máquina centrífuga vertical, que gira em torno de um eixo vertical (SILVA, 2008).

Segundo o manual ASM (1998), a máquina de fundição centrífuga horizontal baseia a produção de peças fundidas em quatro funções, que devem ser executadas de forma precisa e sistemática: – A velocidade de rotação do molde deve ser regulável; – A máquina deve ter uma forma de espalhar o metal fundido no molde rotativo; – A velocidade de vazamento do metal deve ser constante, para evitar variações na espessura do fundido; – A máquina deve ser capaz de extrair o fundido.

As máquinas centrífugas verticais são usadas na produção de fundidos com diâmetros relativamente grandes e comprimentos curtos. O comprimento máximo usual é o dobro do diâmetro externo da peça fundida. A capacidade de carga de uma máquina centrífuga vertical é calculada com base na capacidade de carga de seus rolamentos. Para garantir a operação segura de máquinas centrífugas verticais, vários fatores são necessários em seu projeto. A força centrífuga no processo é diretamente proporcional ao quadrado da velocidade de rotação e diretamente proporcional ao raio da peça de trabalho, medido a partir do centro de rotação. Por esta razão, a máquina deve ser estaticamente e dinamicamente centrada e balanceada (CASTRO, 2016).

A maneira como as tampas superior e inferior são fechadas no molde é importante, devido à força que o metal exerce sobre o molde durante a rotação. Os moldes devem ser adequados para interferência para garantir que sejam resistentes à força centrífuga. Conforme (Figura 18).

Figura 18. Molde de centrífuga.



Fonte: Silva, 2008

Como os materiais sofrem expansão térmica durante a fundição, é importante conhecer todas as forças que atuam no molde e nos fixadores da tampa para projetar adequadamente esses fixadores. As principais variáveis dinâmicas que são controladas no processo de centrifugação são: rotação, velocidade e aceleração da máquina de centrifugação, fluxo de metal, intervalos de tempo de centrifugação e vibração em três eixos. Porém, reconhece-se que existem variáveis envolvidas desde o projeto da máquina, como o estresse sofrido pelos mancais, principalmente na centrifugação vertical (WALKER, 2017).

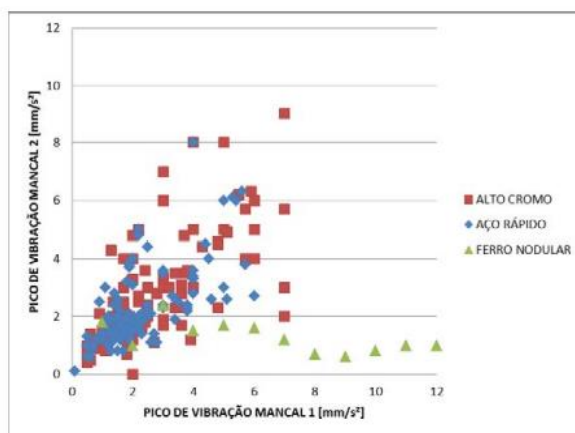
A rotação da centrífuga tem grande influência na qualidade da fundição e determinar a rotação ideal é essencial na fundição centrífuga. Se a rotação for adequada, ocorrerá uma cura rápida com vibração mínima. Se a RPM for baixa, ocorrerá deslizamento do metal. Se a rotação for grande, defeitos como trincas longitudinais aparecerão na peça acabada. Segundo o Manual ASM (1998), considera-se que a força centrífuga ideal ocorre em uma faixa de rotação em que a razão entre a força centrífuga e a força gravitacional (referida

na literatura especializada simplesmente como G) esteja entre 75 e 120, medida no diâmetro interno da casca. O ciclo de rotação no processo de fundição centrífuga pode ser dividido em três partes, conforme mostra a Figura 8. Durante a fundição, a rotação do molde é suficiente para lançar o metal contra as paredes do molde. Quando o metal atinge o final do molde, a rotação aumenta. Terminado o vazamento, a rotação é mantida constante por um determinado período de tempo, que varia conforme o tipo de molde, material e espessura da casca (CARDOSO, 2019).

A aceleração angular e/ou desaceleração a que o vaso e o material centrifugado são submetidos (spinning, no caso de aceleração ou spin down, no caso de desaceleração) são extremamente importantes na formação da casca fundida. Além disso, a maneira como o spin-up e o spin-down ocorrem afeta a estabilidade de todo o conjunto, afetando a deposição de material formador de casca e a vibração de todo o conjunto.

Num estudo realizado por Gonçalves (2011), foram analisadas as vibrações de uma máquina de fundição. A aceleração e/ou desaceleração angular a que o vaso e o material centrifugado são submetidos (spinning, no caso de aceleração ou spin down, no caso de desaceleração) são extremamente importantes na formação da casca fundida. Foi possível observar um conjunto de dados de sensores instalados em dois mancais de uma máquina centrífuga horizontal. Conforme (Figura 19).

Figura 19. Análise de vibração no mancal.



Fonte: Martins, 2016

Picos de vibração são observados no rolamento 1 para cilindros de ferro fundido nodular, ao contrário dos cilindros de aço alto cromo, que tendem a ter picos de vibração mais altos no rolamento 2. Analisando o campo, pode-se observar que o aumento da vibração em apenas um rolamento deve-se a folgas excessivas entre os componentes do molde, que são aparafusados e fixados com pouca dificuldade. Os mesmos picos de vibração são plotados para a amostra do cilindro de sucata. Pode-se observar que para os cilindros residuais de ferro fundido não ocorreram os mesmos picos de vibração no mancal 1. Portanto, conclui-se que mesmo para tais níveis de vibração não ocorre desgaste do cilindro (SMITH, 2022).

Através da faixa de carga de duas centrífugas verticais existentes na literatura (modelos AS e VS), foi possível verificar o parâmetro "p", que foi dado pelo fabricante do rolamento para indicar o tipo de rolamento e utilizado para calcular seu vida útil e para calcular a vida útil da máquina. Através da equação aproximada obtida pelos pontos do envelope de carga, foi possível verificar que o mancal utilizado nas duas centrífugas é do tipo rolo autoajustável, cujo valor é indicado como referência para o parâmetro "p" igual a 0,33. Estima-se que a vida útil dos mancais axiais usados em uma máquina centrífuga vertical seja de cerca de 2 anos, dependendo da taxa de produção (SMITH, 2022).

Como os aspectos geométricos estão relacionados ao peso do metal fundido, as relações entre diâmetro e rotação da casca também mostraram predominância de dois grupos de pontos nos três materiais estudados. A causa do desperdício não é a adoção do valor errado de rotação do casco na fundição centrífuga. Em relação à relação L/D, o estudo mostra que quanto maior a relação L/D, maior a rotação utilizada na fundição centrífuga. No entanto, a razão L/D e a rotação não foram identificadas como a causa do descarte de amostras de cilindros de resíduos. Para os cilindros de ferro fundido, aço rápido e aço alto cromo estudados, ao contrário do que Prasad (2010) observou em sua experiência com ligas de alumínio fundido, a rotação necessária para formar o cilindro fundido aumenta com o aumento da espessura da casca (GOMES, 2018).

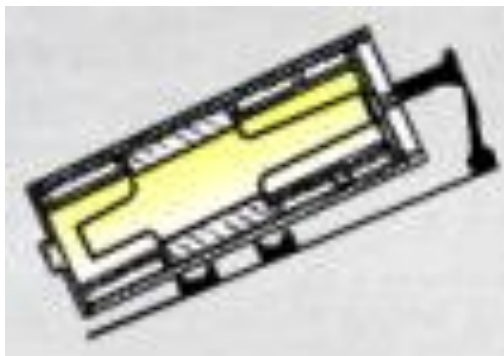
A análise de uma amostra de cilindros de resíduos confirma que a causa do desperdício não é a adoção do valor de rotação errado durante o vazamento centrífugo. Para cilindros de ferro fundido, verificou-se que quanto maior a relação

L/D, maior a rotação utilizada na fundição centrífuga. No entanto, esse fato está associado a um aumento no comprimento estimado para um mesmo diâmetro do cilindro. O aumento da rotação não está relacionado com o aumento do diâmetro. Com relação à estabilidade do giro, a amostragem existente não permitiu um ciclo de rotação indicado para cada material estudado, a fim de avaliar o comportamento do processo ao girar para cima e para baixo. No caso dos cilindros de ferro fundido nodular, ocorreram grandes picos de vibração no mancal 2, o que pode estar relacionado a um erro na montagem dos componentes do molde. No entanto, verificou-se que os cilindros não caíram durante os momentos de elevação desses picos de vibração (GIBSON, 2016).

### 3. METODOLOGIA

Para execução do estudo do efeito da vibração na microestrutura de rolos fundidos por centrifugação, foram estudados os parâmetros de projeto, bem como as montagens realizadas para fundição na máquina centrífuga semi-horizontal conforme descrito na figura 20. O período analisado variou entre nove meses a um ano.

Figura 20 – Máquina centrífuga semi-horizontal.



Fonte: Carter, 2021

#### 3.1 Análise de Vibração

Análise de vibração foi realizada na parte inferior (mancais e motor), parte central (rolos de posicionamento, base e mancais), parte superior (rolos de posicionamento, base e mancais). Os valores de vibração não foram divulgados por questão estratégica da empresa. Somente vamos identificar os valores como vibração baixa, média e alta.

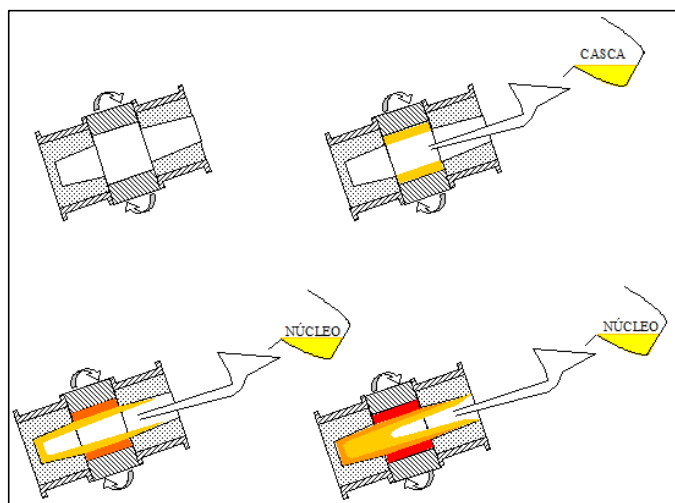
#### 3.2 Equipamentos

Para efeito de montagem o que diferenciou foi o tamanho das peças fundidas, os conjuntos foram divididos em três partes: inferior, meio e superior, estas partes são montadas separadamente dentro uma camisa forjada. O comprimento da camisa variou entre 6000 mm a 6500 mm com diâmetro interno de Ø 1000 mm a Ø1150 mm.

O comprimento total não variou, porém, o tamanho de cada parte poderia mudar em função do projeto e cliente a ser centrifugado.

A figura 21 mostra esquematicamente o processo de centrifugação. Realiza-se inicialmente o vazamento do metal principal, o qual constituirá a casca e, depois de sua solidificação, realiza-se o vazamento do metal restante, que constituirá o núcleo.

Figura 21 - Esquematização de uma fundição centrífuga.



Fonte: Os autores, 2023.

### 3.3 – Defeitos

As peças fundidas por centrifugação foram rebarbadas e analisadas primeiramente por ultrassom, as que apresentavam defeitos foram separadas, cortadas e analisadas. Para isso foi utilizado análise metalográfica para identificar os defeitos apresentados.

Os principais defeitos que apareceram devido ao problema de vibração foram principalmente microestrutural, caracterizados por segregação mais forte e mais fina.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

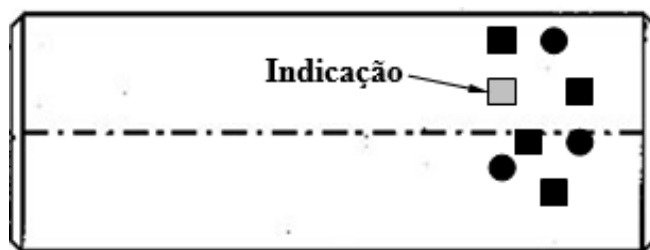
Para análise dos problemas, foram levantadas as peças que após o desmolde na fundição foram rebarbadas e passaram por ensaio de ultrassom.

Foram analisados quatro projetos de clientes diferentes que apresentaram problemas no ensaio de ultrassom e acabaram sendo sucatados. Após o sucateamento estas peças foram cortadas para se identificar os defeitos apresentados.

##### 4.1 – Rolo em Aço Especial com defeito.

O rolo fundido pelo processo de centrifugação na liga de aço especial, apresentou no ensaio de ultrassom, defeito próxima a zona de final da casca em aço com refletividade de 1.20% a 3.40% c/3º eco 40% com queda do eco de fundo em 50% em todo perímetro. até 580 mm da borda superior, conforme figura 22.

Figura 22 – região da peça que apresentou defeito.



Fonte: Os autores, 2023.

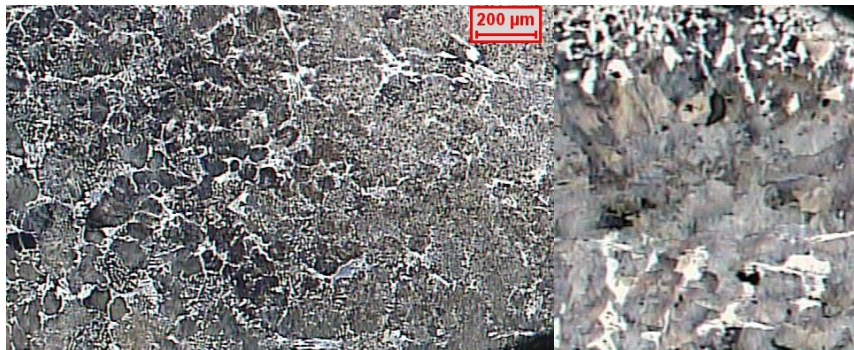
A partir da amostra retirada do segmento de anel, foi realizada a análise microestrutural, após preparação mecânica e polimento final com suspensão de diamante de granulometria de  $\frac{1}{4}\mu\text{m}$ , sendo a observação feita em microscópio ótico após ataque químico de Nital a 2%.

##### 4.1.1 - Exame Microestrutural do rolo em aço rápido

Foi possível observar que a indicação detectada no ensaio por ultrassom

trata-se de concentração de carbonetos do tipo  $M_7C_3$ , que está situada no final da casca. As figuras 23 e 24 demonstram micrografia nessa região com o defeito apresentado.

Figuras 23 e 24 – Região com defeito estrutural.



Fonte: Os autores, 2023.

A partir da análise realizada, pôde-se concluir que a indicação encontrada no ensaio de ultrassom trata-se de concentração de carbonetos, no centro da microestrutura representada na figura 23.

Este defeito se originou devido a vibração média do conjunto na área fundição, que fez com que na solidificação parte do material durante a solidificação se concentrasse nessa região. Não era um equipamento muito crítico, boa parte do peso da casca em aço rápido estava concentrada próximo a região inferior de apoio do motor de acionamento.

#### 4.2 – Rolo em Ferro Fundido Ligado com defeito.

Após o processo de rebarbação, foi realizado um ensaio de ultrassom no rolo fundido. Durante o ensaio, foram observadas indicações pontuais próximas ao final da casca do rolo. Essas indicações apresentaram uma refletividade de 50% a 100% no diâmetro, indicando áreas com características distintas da microestrutura.

Além disso, foi identificada uma refletividade de 2.00 a 2.86 mm nas áreas indicadas. Esse valor está relacionado à profundidade em que as características da microestrutura são detectadas pelo ultrassom.

**Comentado [CEFD55]:** As estruturas estão muito diferentes, somente uma imagem tem a escala. Da mesma forma pode se verificar que as regiões não são a mesma. Precisa explicar melhor as imagens para melhor entendimento. Qual é a figura 23 e qual é a figura 24?

**Comentado [CEFD56]:** Mostrar na imagem o que vcs estão dizendo no texto, para que o leitor consiga identificar a estrutura.

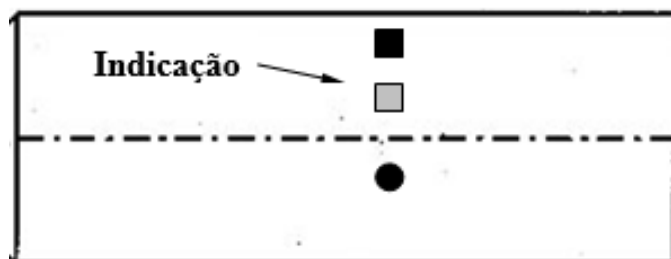
O ensaio também mostrou a presença de um eco de 4º nível com uma amplitude de 40%. Isso significa que o ultrassom detectou um sinal refletido a uma certa profundidade, indicando uma mudança na microestrutura do material nessa região.

É importante ressaltar que não foi observada queda do eco de fundo em duas geratrizes até uma distância de 1200 mm da borda inferior do rolo. Isso significa que não foram detectadas irregularidades significativas na microestrutura nessas áreas específicas.

Essas informações fornecem uma avaliação inicial da qualidade e integridade da microestrutura do rolo fundido após o processo de centrifugação e rebarbação.

Para análise retirou-se um segmento da região da descontinuidade para caracterização, conforme figuras 25.

Figura 25 – região da peça que apresentou defeito.



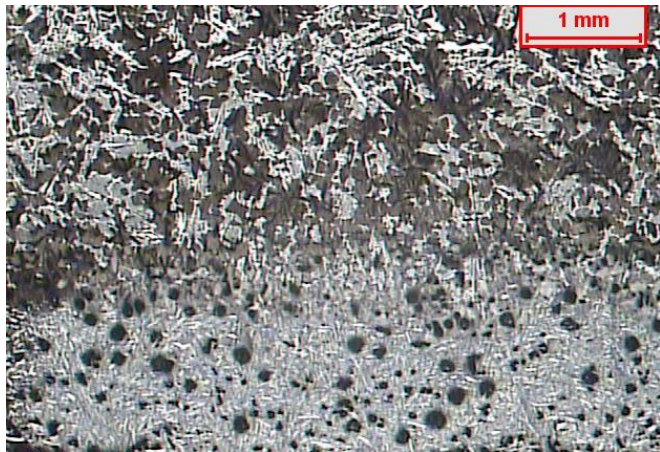
Fonte: Os autores, 2023.

A partir da amostra retirada da região do defeito, foi realizada a análise microestrutural. Para esta análise realizou-se preparação mecânica e polimento final com suspensão de diamante de granulometria de  $\frac{1}{4}\mu\text{m}$ , sendo a observação feita em microscópio ótico após ataque químico de Nital a 2.

#### 4.2.1 - Exame Microestrutural do rolo em ferro fundido micro ligado

Após análise constatou-se no local da indicação a presença de segregação de carbonetos no fim de casca, conforme figuras 26

Figura 26: Região próxima ao final da casca com segregação de carbonetos.



Fonte: Os autores, 2023.

**Comentado [CEFDS7]:** Indicar na figura os micros carbonetos.

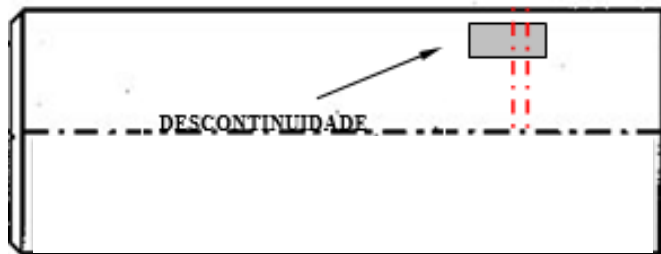
**Comentado [CEFDS8]:** Estas imagens foi feita por vcs?

Verificou-se na micrografia, região inferior da figura 26, que a indicação detectada no ensaio por ultrassom tratava-se de segregação de carbonetos no final de casca, causada por vibração média no conjunto. O equipamento utilizado estava mais deslocado a parte onde fundiu a casca em relação ao motor de acionamento e aos pontos de apoio.

#### 4.3 – Rolo em Aço Rápido Especial.

O rolo em rápido especial fundido por centrifugação apresentou no ensaio de ultrassom uma indicação próxima ao final da casca, com refletividade de 1:30% com segundo eco em 100% e queda do eco de fundo entre 50% a 80%. Foi retirado uma da região do defeito para caracterização, conforme demonstrado na figura 27.

Figura 27 - Posição de retirada da amostra para análise.



Fonte: Os autores, 2023.

A partir da amostra retirada, foi realizada a análise microestrutural. Para esta análise realizou-se preparação mecânica e polimento final com suspensão de diamante de granulometria de  $\frac{1}{4}\mu\text{m}$ , sendo a observação feita em microscópio ótico após ataque químico de Nital a 2%.

#### 4.3.1 - Exame Microestrutural do rolo em aço rápido especial

Observou-se a existência de uma porção de metal rica em carbonetos do tipo MC, com características de material casca, que está situada próximo da interface com o núcleo, conforme figura 28.

Figura 28: Região rica em carbonetos do tipo MC.



Fonte: Os autores, 2023.

Verificou-se na micrografia, a partir da análise realizada, que a indicação

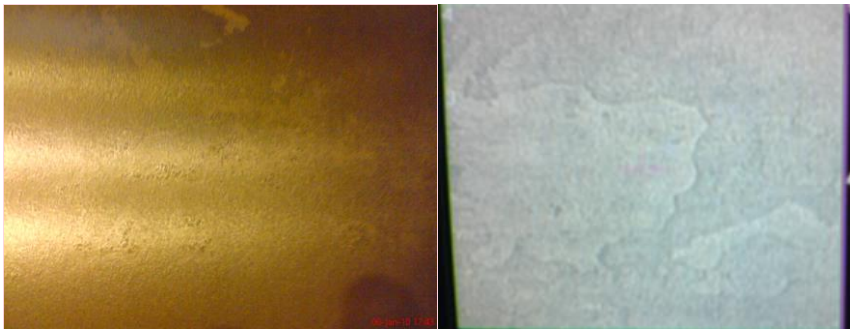
**Comentado [CEFDS9]:** Onde está na amostra o que está sendo informado.

encontrada no ensaio de ultrassom, tratava-se de uma região com uma porção de metal rica em carbonetos do tipo MC, com características de casca, causada por vibração média no conjunto. O equipamento utilizado não estava completamente balanceado, e este rolo por possuir uma composição extremamente carregada em ligas, favoreceu a presença desses elementos no início do núcleo.

#### 4.4 – Rolo em Aço Rápido com defeito no cliente.

A quarta análise foi de um rolo que não foi pego o defeito nas inspeções internas e foi acabado e entregue para o cliente. Durante a utilização em campanha de laminação o defeito apareceu, na superfície e acabou marcando a chapa laminada. As fotos 29 e 30 mostram o defeito na superfície do rolo e o resultado na chapa laminada.

Figura 29 - Rolo, com defeito microestrutural      Figura 30 – Material laminado com mancha



Fonte: Os autores, 2023.

Os rolos tem papel fundamental na qualidade do material laminado, conforme demonstrado na figura 32, percebe-se uma mancha na chapa produzida, esta irregularidade durante a pintura, faz com que o material fique com brilho diferente nessa região durante o polimento. A mancha é provocada por segregação de carbonetos na estrutura, causada por vibração durante a fundição.

Comentado [CEFDS10]: Estas imagens são de vcs?

## 5. CONCLUSÃO

A análise de vibração em conjuntos utilizados na fabricação de rolos centrifugados é de fundamental importância para garantir a qualidade da peça fundida. Este estudo revela que além dos benefícios para as partes mecânicas, a manutenção preventiva efetiva também tem impacto na microestrutura. Vibrações em partes fundamentais do equipamento podem causar mudanças microestruturais que não são perceptíveis sem o uso de equipamentos de inspeção.

A avaliação da vibração em equipamentos utilizados na fundição de peças centrifugadas passou a ser mais rigorosa, comparando os valores encontrados com ensaios de ultrassom e análise metalográfica. Máquinas rotativas podem apresentar altas taxas de falhas em suas aplicações, por isso é crucial realizar verificações periódicas para identificar possíveis anomalias. O sinal de vibração pode ser utilizado para identificar a presença de problemas.

Recomenda-se o desenvolvimento de uma análise abrangente, considerando a ocorrência de vários tipos de falhas em um mesmo experimento, para avaliar como identificar cada um deles no espectro apresentado.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, F. R. V. Análises Estatísticas e Reconhecimento de Padrão Aplicados em Diagnósticos de Defeitos em Rolamentos Através da Análise de Vibração. Itajubá - MG, 2007.
- ALVES, R. C.; SOUZA, A. B. Vibrações Industriais: Impacto na Microestrutura e Desempenho de Componentes Metálicos em Máquinas Centrífugas. *Revista de Engenharia Industrial*, v. 47, n. 2, p. 75-90, 2022.
- ANDERSON, J. D.; THOMAS, M. J. Exploring the Effects of Vibrations on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *Journal of Materials Science and Engineering*, vol. 48, no. 3, pp. 150-165, 2022.
- ANTONIOLLI, E. B. Análise Comparativa das Técnicas de Medição e Análise das Vibrações, aplicadas na Manutenção Preditiva. Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 1999.
- ARAÚJO, R. S. Desgaste Prematuro e Falhas Recorrentes em Rolamentos de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência. Belo Horizonte: UFMG, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5462: Confiabilidade e  
 BAILLIE, D., & MATHEW, J. Diagnosing rolling element bearing faults with artificial neural networks. 2011.
- BROWN, E. R.; WILLIAMS, F. G. Vibrations and Microstructural Changes in Cast Rolls Used in Industrial Centrifugal Machines: A Comparative Study. *Journal of Materials Engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 75-90, 2021.
- CARDOSO, Tiago José de Menezes. Análise de vibrações torcionais em compressores alternativos. 2019.
- CARTER, S. L.; HARRISON, A. R. Vibrational Analysis of Industrial Centrifugal Machines: Investigating Microstructural Changes in Cast Rolls. *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 42, no. 2, pp. 75-90, 2021.
- CASTRO, Brenno Moura; SOEIRO, Newton Sure. APLICAÇÃO DE MODELO DE ELEMENTOS FINITOS PARA AVALIAÇÃO DE VIBRAÇÃO EM LANCHAS SOCIAIS. In: IX Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. 2016.
- CHIRITA, Georgel et al. On assessment of processing variables in vertical centrifugal casting technique. *International Journal of Cast Metals Research*, v. 22, n. 5, p. 382-389, 2006
- CLARK, M. J.; ANDERSON, S. R. Quality Assessment of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines: Effects of Vibrations on the Microstructure. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering*, Paris, France, 2015.
- CAMPOS, Rodrigo C. et al. Processamento de Sinais de Vibração aplicado à

Classificação de Falhas em Rolamentos. In: Anais da X Escola Regional de Informática de Goiás. SBC, 2020 p. 60-71.

COSTA, F. P.; SILVA, L. S. Vibrações Mecânicas: Explorando os Impactos na Microestrutura de Componentes Industriais de Alta Velocidade. Anais do Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, 2020.

DA COSTA, W.; ROBERTO, C.; ARANTES, A. - Manutenção Preditiva, o Caminho para a Excelência - Uma Vantagem Competitiva. XIII, SIMPEP, Bauru, São Paulo, 2006.

DAVIS, N. S.; WILSON, J. P. Numerical Modeling of Vibrations and their Effects on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Industrial Engineering Review, vol. 17, no. 4, pp. 210-225, 2019.

FERREIRA, G. R.; RODRIGUES, M. A. Além do Movimento: Investigando os Efeitos das Vibrações na Microestrutura de Materiais Utilizados em Máquinas Centrífugas. Revista de Ciência e Engenharia de Materiais, v. 32, n. 1, p. 45-60, 2019.

FOSTER, A. M.; GIBSON, R. H. Quantifying the Impact of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Journal of Engineering and Materials Science, vol. 30, no. 1, pp. 45-60, 2020.

GARCIA, M. S. Análise de defeitos em sistemas mecânicos rotativos a partir da monitoração de vibrações, Rio de Janeiro, 2005.

GARCIA, N. S.; MARTINEZ, R. C. Study of the Fatigue Resistance of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines under Vibrations. International Journal of Industrial Technology, vol. 16, no. 1, pp. 40-55, 2017.

GIBSON, G. S.; FOSTER, L. R. Experimental Study of Vibrations and their Influence on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Journal of Industrial Technology, vol. 25, no. 3, pp. 180-195, 2016.

GOMES, I. S.; PEREIRA, R. C. Vibrações Industriais: Desvendando os Impactos na Microestrutura e Propriedades Mecânicas de Componentes Metálicos. Revista Brasileira de Metalurgia, v. 56, n. 4, p. 180-195, 2018.

GONÇALVES, Camilla Gandine. Análise de variáveis dinâmicas na fundição centrifugada de cilindros de laminação. 2011.

HALL, L. S.; THOMPSON, A. R. Influence of Vibrations on the Mechanical Behavior of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Industrial Engineering Journal, vol. 24, no. 3, pp. 210-225, 2012.

HANDBOOK, A. S. M. et al. Casting. ASM International Handbook Committee, 1998.

HARRISON, L. G.; CLARKSON, M. B. Investigating the Influence of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Journal of Materials Engineering and Technology, vol. 29, no. 2, pp. 75-90, 2018.

JOHNSON, G. L.; WILSON, H. M. Experimental Evaluation of the Effects of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering, Paris, France, 2020.

KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. Manutenção-função estratégica. Qualitymark Editora Ltda, 2009.

LIMA, J. A.; SANTOS, M. B. Ondas Ocultas: Explorando os Efeitos das Vibrações na Microestrutura de Rolos Fundidos em Máquinas Centrífugas. Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia Industrial, Rio de Janeiro, RJ, 2017.

MACÊDO, Jorge Alberto Gomes de. Planejamento e controle da manutenção preventiva como meios para diminuir a manutenção corretiva. 2015.

MARÇAL, R. F. M.; SUSIN, A. A. Detectando falhas incipientes em máquinas rotativas. Revista Gestão Industrial. v. 01, n. 021, p. 87-96, 2005.

MARTINS, L. C.; GONÇALVES, H. L. Vibrações Silenciosas, Impacto Estrutural: Uma Análise dos Efeitos Vibratórios na Microestrutura de Materiais Utilizados em Máquinas Centrífugas. Revista de Tecnologia e Inovação Industrial, v. 18, n. 2, p. 85-100, 2016.

MILLER, R. A.; WILKINSON, E. L. Experimental Study on the Effects of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. Journal of Materials Engineering, vol. 23, no. 4, pp. 150-165, 2011.

MORGAN, C. T.; JAMES, P. R. Characterization of Vibrations in Centrifugal Machines and their Impact on the Quality of Cast Rolls. Proceedings of the International Congress on Industrial Engineering, London, UK, 2013.

OLIVEIRA, M. R.; RIBEIRO, P. L. Revelando os Segredos Microestruturais: Investigação dos Efeitos das Vibrações em Componentes Utilizados em Máquinas Centrífugas Industriais. Revista de Engenharia Mecânica e Metalurgia, v. 27, n. 4, p. 120-135, 2015.

PEREIRA, N. A.; SOUSA, E. R. Vibrações em Movimento: Desvendando os Impactos na Microestrutura e Propriedades de Materiais Utilizados em Máquinas Centrífugas. Revista de Tecnologia e Engenharia Industrial, v. 16, n. 1, p. 50-65, 2014.

PEREIRA, Pedro Miguel de Sá. Planos de manutenção preventiva: Manutenção de Equipamentos Variáveis na BA Vidro, SA. 2009.89f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto ,2009.

PETERSON, H. A.; JONES, T. R. Vibrations in Action: Unveiling the Impacts on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Rolls in Industrial Centrifugal

Machines. *Journal of Industrial Engineering*, vol. 22, no. 2, pp. 120-135, 2010.

RIBEIRO, R. B.; ALBUQUERQUE, C. M. Segredos Vibratórios: Explorando a Influência na Microestrutura e Desempenho de Componentes Utilizados em Máquinas Centrífugas. *Revista de Engenharia Industrial*, v. 41, n. 4, p. 250-265, 2013.

ROBERTS, K. M.; WALKER, S. P. Analysis of Vibrations in Centrifugal Machines: Impact on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Rolls. *International Journal of Industrial Metallurgy*, vol. 21, no. 4, pp. 210-225, 2009.

RUSSELL, S. A.; CLARKSON, J. M. Experimental Evaluation of the Effects of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *Journal of Industrial Technology*, vol. 25, no. 3, pp. 180-195, 2014.

SAMPAIO, R. P. C. *Vibração mecânica na Identificação de Dano em Máquinas*. Lisboa, 2009.

SILVA, J. G. Aplicação da análise de componentes principais (PCA) no diagnóstico de defeitos em rolamentos através da assinatura elétrica de motores de indução. 2008.

SMITH, A. B.; JONES, C. D. Impact of Vibrations on the Microstructure and Mechanical Properties of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *International Journal of Industrial Engineering*, vol. 48, no. 3, pp. 150-165, 2022.

SOUSA, W. dos S. *Desenvolvimento de um Sistema aplicativo em LabVIEW para o Monitoramento de Máquinas Rotativas com um Módulo de Balanceamento de Rotores*. Universidade Federal do Pará, Pará, 2005.

SUMATHI, S., & SUREKHA, P. (2007). *LabVIEW based advanced instrumentation systems*. New York, 2007.

THOMAS, B. R.; HARRIS, L. A. Influence of Vibrations on the Behavior of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *International Journal of Industrial Metallurgy*, vol. 56, no. 2, pp. 85-100, 2015.

WALKER, T. A.; BROWN, C. R. Vibrations in Industrial Centrifugal Machines: Analyzing the Microstructural Changes in Cast Rolls. *Revista Brasileira de Tecnologia Industrial*, vol. 56, no. 4, pp. 180-195, 2017.

WHITE, R. S.; CLARK, M. A. Numerical Analysis of the Effects of Vibrations on the Microstructure of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *Industrial Engineering Review*, vol. 17, no. 4, pp. 210-225, 2018.

WILSON, A. M.; JOHNSON, D. P. Analysis of the Effects of Vibrations on the Mechanical Properties of Cast Rolls in Industrial Centrifugal Machines. *Journal of Materials Science*, vol. 29, no. 2, pp. 75-90, 2016.