

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ANÁLISE DO CONFORTO INTERNO DE ELEVADORES: UM ESTUDO DE CASO

por

GABRIEL FETZER DORNELES

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Dorneles, Gabriel Fetzer
ANÁLISE DO CONFORTO INTERNO DE ELEVADORES: UM
ESTUDO DE CASO / Gabriel Fetzer Dorneles. -- 2024.
15 f.
Orientador: Daniel Milbrath De Leon.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto
Alegre, BR-RS, 2024.

1. Conforto interno. 2. Elevadores. 3. Vibrações.
4. Medição de vibrações. I. De Leon, Daniel Milbrath,
orient. II. Título.

Gabriel Fetzer Dorneles

METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO CONFORTO INTERNO DE ELEVADORES

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador(a): Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Daniel Milbrath de Leon (Presidente)

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Porto Alegre, Fevereiro de 2024

AGRADECIMENTOS

Em especial, agradeço aos meus pais, Daniela e Marcelo, por todo o apoio e incentivo ao longo de toda a minha vida e estarem sempre presentes nos melhores e nos piores momentos, sem eles nada disso seria possível. Agradeço aos meus avós Valkiria e Ernani, por todo o carinho e auxílio que eles me deram. Ao meu irmão Guilherme, por sempre ser uma figura presente e compreensiva. Aos meus grandes amigos Gabriel, Lucas e Nathan, por todo o suporte e por serem sempre companheiros tão queridos e apoiadores.

Agradeço ao meu professor orientador Daniel, por todo o auxílio em cada etapa do trabalho, sempre ouvindo as minhas ideias e norteando o melhor caminho para este trabalho. Agradeço aos amigos que fiz durante o curso, que me ajudaram a enfrentar os desafios que apareceram durante o curso. Agradeço, também, à empresa TK Elevadores por disponibilizar equipamentos e tempo de trabalho para que eu pudesse desenvolver as pesquisas e medições deste trabalho. Agradeço aos colegas do departamento de Engenharia de Campo, por me ajudarem a aprender e me auxiliar no desenvolvimento profissional, em especial na figura do Nelson, que me ensinou e auxiliou durante as medições realizadas.

DORNELES, G.F. **Metodologia para análise do conforto interno de elevadores**. 2024. 15 folhas. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

RESUMO

Este trabalho vai analisar casos reais de problemas apresentados em elevadores no Brasil e na América Latina, com o foco na análise do desconforto interno relatado pelos proprietários. Para isso, os problemas serão abordados a partir do método de análise de vibrações descrito na norma ISO 18738, e analisados na forma com que eles são identificados nos gráficos de vibração medidos em campo. A partir disso, serão correlacionadas essas análises às características dos elevadores trabalhados (percurso, velocidade etc.) e, por fim, será descrito o impacto desses defeitos para os proprietários dos elevadores e para a empresa prestadora de serviços destes equipamentos.

PALAVRAS-CHAVE: Conforto interno, Elevadores, Vibrações, Medição de vibrações.

DORNELES, G. F. **Methodology for analyzing the internal comfort of elevators**. 2024. 15 pages. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2024.

ABSTRACT

This work will analyze real cases of problems presented in elevators in Brazil and Latin America, with a focus on analyzing the internal discomfort reported by the owners. To this end, the problems will be approached using the vibration analysis method described in the ISO 18738 standard, and analyzed as they are identified in the vibration graphs measured in the field. These analyses will then be correlated with the characteristics of the elevators being worked on (route, speed, etc.) and, finally, the impact of these defects on the owners of the elevators and the company that provides services for this equipment will be described.

Translated with DeepL.com (free version)

KEYWORDS: Internal comfort, Elevators, Vibration, Vibration measurement.

NOMENCLATURA

Símbolos

f	Frequência	[Hz]
V	Velocidade Linear	[m/s]
R	Raio	[m]
D	Diâmetro	[m]

Símbolos gregos

ω	Velocidade Angular	[rad/s]
----------	--------------------	---------

Abreviaturas e acrômimos

FFT	Fast Fourier Transform (Transformada Rápida de Fourier)
-----	---

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação	1
1.2. Revisão Bibliográfica	1
1.3. Objetivo	2
2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	2
2.1. Funcionamento de elevadores tracionados por cabos de aço	2
2.2. Funcionamento e impacto dos componentes no tracionamento	3
2.2.1. Guias	3
2.2.2. Estrutura de cabine.....	3
2.2.3. Máquina de tração.....	3
2.2.4. Cabos de aço	4
2.2.5. Corrediças	4
2.2.6. Balanceamento estático.....	4
2.3. Frequência de vibração dos componentes	5
2.3.1. Frequência de vibração a partir do diâmetro de polias	5
2.3.2. Frequência de vibração a partir da rotação da máquina.....	5
2.4. Transformada Rápida de Fourier	5
3. METODOLOGIA	6
3.1. Metodologia e aplicação da norma ISO 18738.....	6
3.2. Equipamento EVA-625.....	6
3.3. Aplicação da análise de sobre-aceleração.....	7
3.4. Análise A95 dos gráficos de vibração	7
3.4. Caracterização dos elevadores analisados	7
3.4.1. Elevador 1	7
3.4.2. Elevador 2	8
4. RESULTADOS	8
4.1. Elevador 1	8
4.1.1. Análise inicial	8
4.1.2. Identificação do problema	9
4.1.3. Solução encontrada	10
4.2. Elevador 2	12
4.2.1. Análise inicial	12
4.2.2. Identificação do problema	12

4.2.3. Solução encontrada	14
5. CONCLUSÃO	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
ANEXO	17
APÊNDICE.....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Posição correta para medição de vibração na cabina (Fonte: ISO 18738:2003)	6
Figura 2 – Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.....	9
Figura 3 – (a) Gráfico FFT de aceleração (mg) x frequência (Hz). (b) Gráfico de vibração para o intervalo analisado em aceleração (mg) x tempo (s).	10
Figura 4 - Gráfico da análise de corrente em amplitude de corrente (A) x tempo (s).....	11
Figura 5 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de Jerk no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.	11
Figura 6 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.....	12
Figura 7 - (a) Gráfico FFT de aceleração (mg) x frequência (Hz). (b) Gráfico de vibração para o intervalo analisado em aceleração (mg) x tempo (s).	13
Figura 8 – Medição do raio da polia de contrapeso ao longo da circunferência utilizando um relógio comparador.....	14
Figura 9 - Gráficos de aceleração(mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.....	14
Figura 10 - Identificação dos componentes de um elevador na caixa de corrida. (Fonte: Adaptação de TK Elevadores, 2022).....	17
Figura 11 – (a) Corrediça deslizante. (b) Corrediça de rolo.....	17
Figura 12 – (a) Máquina DAF-270. (b) Máquina ERS empresa Torindrive.	18
Figura 13 – Guias “T” para elevadores.	18
Figura 15 – Especificações do equipamento EVA-625 (Fonte: PMT EVA-625 Datasheet) ...	18
Figura 14 – Equipamento EVA-625 e seus componentes	18
Figura 16 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s) sem aplicação do filtro Butterworth 10 Hz. (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.....	19
Figura 17 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s) sem aplicação do filtro Butterworth 10 Hz. (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.....	19

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Valores característicos para avaliação da sobre-aceleração (Fonte: Howkins, 2006)	7
Tabela 2 - Valores característicos para avaliação do parâmetro A95.....	7
Tabela 3 - Características do elevador 1.....	8
Tabela 4 - Características do elevador 2.....	8
Tabela 5 – Frequências características das polias e máquina analisadas	10
Tabela 6 - Frequências características das polias e máquina analisadas	13

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

A principal motivação para este trabalho é a solução de problemas, em especial em equipamentos complexos, como elevadores, onde a análise de defeitos traz consigo um desafio ainda maior. Em contrapartida, na grande maioria dos casos o desafio encontra-se não somente na atuação e resolução dos problemas, mas sim na identificação desses problemas e da sua causa raiz, ou seja, onde esses problemas são gerados. No caso de elevadores, os problemas que normalmente são apresentados, abrangem uma gama enorme de possibilidades sobre a causa raiz, entretanto, que decorrem de um mesmo sintoma percebido tanto pelo passageiro quanto pelo profissional que está atuando na sua solução, um desconforto durante a viagem do elevador. Estes problemas, normalmente são analisados de forma a identificar a causa raiz do problema por tentativa e erro, portanto, são analisados todos os componentes e realizados trabalhos de ajuste que não são necessariamente os trabalhos necessários para a solução deste problema.

Neste trabalho será realizado um estudo sobre um dos métodos de análise que aborda a análise de vibrações no interior da cabine, e que demanda um grande conhecimento ao mesmo tempo teórico e empírico do profissional que irá aplicá-lo, porém é um método que consegue identificar não só o tipo de problema como a localização deste problema ao longo do percurso do elevador.

1.2. Revisão Bibliográfica

Este método de análise de vibrações surgiu como uma solução para a identificação de problemas através do monitoramento de vibrações e acústica interna em equipamentos de elevação. Para isso, existem duas normas que servem como suporte a este método de análise e que delimitam os limites de aceitação e os padrões de qualidade aceitáveis para cada caso, são eles, a norma ISO 18738 e a norma ISO 2631.

A norma ISO 18738 descreve um padrão para a aplicação dos equipamentos de medição e a padronização dos dados obtidos em campo. Com isso, os gráficos obtidos em diversos equipamentos com características diferentes podem ser analisados da mesma forma, atribuindo limites de tolerância para estes valores.

A norma ISO 2631 trata da percepção do corpo humano sobre as vibrações sofridas e os efeitos dessa vibração sobre ele. Ela define um intervalo de frequências entre 0,5 Hz e 80 Hz e analisa possíveis efeitos sobre a saúde, conforto e percepção, além de um intervalo entre 0,1 Hz e 0,5 Hz que podem gerar possíveis efeitos de enjoo ou náuseas. A abordagem desta norma faz uma avaliação sobre os três pontos apresentados anteriormente (saúde, conforto e percepção) e busca orientar quanto aos impactos, analisando sobre os 3 eixos principais (x, y e z), e sobre os efeitos em termos numéricos para obter medições mais precisas. Ela define métodos de medições para vibrações ao longo do corpo de forma transiente, aleatória e periódica em 3 casos distintos, para uma pessoa em pé, sentada e deitada.

LI, conglin et al. (2022) analisa as diferenças entre os métodos de análise das normas ISO 18738-1:2012 e ISO 2641-4:2001 sobre a influência da vibração no conforto de viagens e a comparação entre as abordagens em cada uma, definindo suas diferenças e pontos positivos.

Howkins (2006) considera uma análise sobre as propriedades que influenciam no conforto de elevadores, como o ruído, vibrações e sobre-aceleração. Nestes casos o autor discute como cada propriedade é percebida pelo passageiro e define alguns parâmetros de referência para definição da qualidade de viagem em elevadores.

CULAU, Erick (2016) aborda uma análise comparativa de vibrações e conforto entre elevadores com diferentes sistemas de acionamento. Neste caso, utiliza-se em grande parte as abordagens sugeridas na norma ISO 2631-1:2001 e os limites apresentados nesta norma para os intervalos de vibrações medidos, utilizando-se desses limites para ordenar os diferentes elevadores analisados em casos mais positivos do que outros.

DADALT, Mateus (2021) analisa os parâmetros de conforto entre projetos de modernização integral em 2 elevadores diferentes. Neste caso, o autor utiliza tanto a avaliação definida na norma ISO 18738:2003, quanto os parâmetros da norma ISO 2631:1997 e as classificações propostas por Howkins (2006) para a sobre-aceleração máxima e Jerk.

Desse modo é possível observar que as abordagens sobre as aplicações desse método são bem diversas, porém, todas elas acabam, no fim, sendo resumidas a sua aplicação sobre elevadores em bom estado, com a finalidade de avaliar qualitativamente a viagem realizada. A partir disso, o foco deste trabalho será na utilização deste método sobre uma nova ótica, a aplicação prática em elevadores problemáticos a fim de utilizá-la, não como um medidor de conforto, mas sim, como um analisador do problema, de modo a auxiliar na solução de cada caso.

1.3. Objetivo

O objetivo deste estudo é avaliar a aplicação do método de análise de vibrações, referenciado na norma ISO 18738, em problemas reais de campo e identificar as causas raízes de cada um dos problemas analisados, de modo a correlacionar os problemas percebidos em campo aos conhecimentos mecânicos de funcionamento de um elevador. Além disso, a partir dos resultados encontrados, serão analisados os pontos positivos e negativos em cada caso, tendo em vista a aplicação desse método de análise. Desse modo, será buscado possíveis alternativas, a partir dele, para melhorar o modo como são analisados os problemas atualmente em elevadores.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Funcionamento de elevadores tracionados por cabos de aço

A utilização do elevador se dá, basicamente, pela suspensão e descida da cabine de passageiros ao longo do percurso da caixa de corrida. Para isso o elevador utiliza um sistema de contrapeso para aliviar a carga sobre a máquina de tração e assim facilitar o movimento dos componentes de acordo com as necessidades. O sistema de suspensão em elevadores pode ser de vários tipos, em especial destaca-se os tipos 1:1 e 2:1 (leia-se “um para um” e “dois para um”, respectivamente). No caso de elevadores 2:1, o cabo é preso através de tirantes em estruturas metálicas do elevador, que servem como bases de sustentação para diversos componentes, e é desviado na cabine e contrapeso através de polias de desvio, com isso as solicitações trativas sobre a máquina e os demais componentes de tração são divididas de modo a aliviar os esforços gerados nestes elementos. Ao mesmo tempo, quando o elevador é 1:1 o cabo de aço é fixado através de tirantes na estrutura tanto da cabine quanto do contrapeso, com isso, os esforços necessários da máquina de tração e dos demais componentes de tração são aumentados, fazendo com que necessite a aplicação de máquinas e componentes cada vez maiores e mais robustos para aguentar e gerar essas forças trativas sobre os cabos do elevador.

A cabine e o contrapeso se deslocam no percurso da caixa de corrida através de corrediças (deslizantes ou de rolo) conectadas a guias metálicas, que por sua vez, são fixas nas vigas estruturais da caixa de corrida. As guias metálicas funcionam como trilhos de trem e mantém a cabine e o contrapeso com movimento vertical e equilibrado ao longo de todo percurso.

O movimento do elevador é realizado pelo acionamento do eixo e do freio da máquina, que neste caso é normalmente fechado. E o controle destes movimentos é realizado pelo inversor de frequências do elevador, que recebe o sinal trifásico corrente alternada (CA) da entrada de energia do prédio, transforma em corrente contínua(CC) e, por fim, transforma em CA variável, através do controle da variação da frequência da corrente de entrada.

Além deste controle, os sistemas de segurança ativos e redundantes presentes nos elevadores além dos controles paralelos de serviços nos pavimentos, como atendimento de chamadas do elevador em cada andar, são controlados pelas placas de comando, que ficam armazenadas no quadro de comando, é este quadro que recebe as informações dos diversos equipamentos do elevador e toma ações pré-programadas sobre estes dados.

2.2. Funcionamento e impacto dos componentes no tracionamento

2.2.1. Guias

As guias são barras de metal com formato de “T” por onde a cabine e o contrapeso se deslocam na caixa de corrida. Cada uma têm um comprimento de 5 metros e são ligadas entre si através de emendas de guias. O conjunto de guias é fixo nas vigas estruturais da caixa de corrida do elevador. Alguns dos modelos mais comuns de guias podem ser observado em anexo, Figura 13.

Os principais impactos das guias no conforto interno da cabine podem ser observados, tanto em vibrações com intervalos cíclicos de 5 em 5 metros, caracterizando um problema nas emendas de guias, como em vibrações nos eixos X e Y dos gráficos de vibrações, caracterizando solavancos e movimentos laterais da cabine. As orientações dos eixos analisados serão apresentados na Figura 1.

Geralmente o primeiro problema é causado pela má instalação das guias e é observado logo após a instalação. Já o segundo, pode ocorrer em qualquer momento da vida do elevador, sendo uma de suas causas o desgaste excessivo dos componentes envolvidos no deslocamento da cabine.

2.2.2. Estrutura de cabine

A estrutura de cabine pode influenciar no conforto interno na medida que em elevadores 2:1 as suas polias podem apresentar problemas ou em elevadores 1:1 os tirante e placa de suspensão (onde são fixados os cabos de tração), podem apresentar problemas tanto de desgaste quanto de defeitos de fábrica. Normalmente essa influência gera problemas identificados no eixo Z dos gráficos de vibrações. Quando esse problema é gerado por algum defeito nos canais da polia, ele pode ser identificado pela frequência de vibração da polia.

Outros problemas gerados pela estrutura de cabine são relacionados a centralização da plataforma entre guias e do paralelismo das estruturas laterais, nesses casos o problema é identificado como vibrações no eixo X e Y e que são acompanhados de ruídos na própria estrutura de cabine durante o deslocamento ao longo do percurso. A visualização de uma cabine em conjunto com os demais componentes de um elevador pode ser observada na Figura 10, em anexo. As orientações dos eixos analisados serão apresentados na Figura 1.

2.2.3. Máquina de tração

As máquinas de tração em elevadores são máquina elétricas que podem ou não serem engrenadas e cujo acionamento é feito por um inversor de frequência controlado pelo quadro de comando do elevador. A aceleração da máquina e velocidade de movimento do elevador são parametrizados pelo software do elevador e as curvas de aceleração devem ser ajustadas antes da entrega do elevador ao proprietário. Os modelos de máquina de tração utilizados para análise neste trabalho, podem ser analisados na Figura 12, em anexo.

Os problemas decorrentes da máquina de tração normalmente têm relação com o desgaste dos canais da polia ou de vibrações excessivas de componentes internos da máquina. Problemas gerados por desgaste nas polias de tração são identificados como vibrações cíclicas que correspondem à frequência de giro do eixo da máquina. Já os problemas decorrentes de vibrações anormais ou folgas, podem ter origem tanto no amortecimento deficiente da base da máquina, alteração de algum parâmetro de controle que aproximou a rotação da máquina ao módulo de frequência natural de algum componente, ou simplesmente algum defeito decorrente do desgaste dos componentes internos devido ao excesso de esforços sobre eles.

2.2.4. Cabos de aço

Os cabos de tração possuem a única função de transmitir as forças da máquina para a cabine e contrapeso, sendo a sua instalação uma etapa bem delicada em qualquer instalação, em especial em elevadores com percurso muito grande. A quantidade de cabos instalados depende da capacidade dos esforços máximos aplicados e da disponibilidade de canais na polia da máquina utilizada. A visualização dos cabos de tração em conjunto com os demais componentes de um elevador pode ser observada na Figura 10, em anexo.

A equalização dos cabos é uma etapa crítica para o bom funcionamento do equipamento, ela é realizada ainda na instalação do elevador e serve para garantir que as solicitações e esforços estão distribuídas igualmente em cada um dos cabos. Ela é realizada a partir das medições dos esforços geradas por extensômetros ligados aos tirantes dos cabos e que monitoram as solicitações por eles suportadas.

Outro fator importante para o tracionamento do elevador é a torção dos cabos, a verificação dessa ocorrência deve feita pela equipe de manutenção a cada 6 meses. Esse torcimento gera esforços maiores sobre o cabo de aço e pode provocar o seu rompimento caso haja algum contato ou interferência durante o percurso com outro componente estrutural do elevador. Além disso, a passagem do cabo torcido pelas polias de cabine, contrapeso ou máquina podem gerar vibrações que são pontuais e expressivas, porém normalmente esse tipo de defeito é identificado sem a necessidade de uma análise mais aprofundada, necessitando uma simplesmente de uma inspeção visual do profissional que atuará sobre o defeito.

2.2.5. Corrediças

As corrediças desempenham a função de conexão da estrutura da cabine às guias, de forma a manter a cabine alinhada e equilibrada sobre o eixo das guias, além disso, elas podem ser do tipo deslizante ou de rolo. Este último tipo é mais utilizado em elevadores com percurso e capacidade maiores, garantindo maior estabilidade e amortecimento das vibrações durante o percurso. Assim como as guias, defeitos neste componente também podem ser identificados por alterações nos eixos X, Y e Z dos gráficos de vibrações. As orientações dos eixos analisados serão apresentados na Figura 1.

Em corrediças de rolo um defeito comum do desgaste do rolo pode torná-lo ovalado, gerando uma vibração cíclica em Z que pode ser calculada pela frequência de rotação do rolo, calculada a partir do seu diâmetro. Já no caso de corrediças deslizantes, os principais problemas decorrem da sua má instalação e, por consequência, desalinhamento entre guias, gerando vibrações horizontais em X e Y. Os modelos analisados de corrediças podem ser visualizados na Figura 11, em anexo.

2.2.6. Balanceamento estático

O balanceamento de massa e equilíbrio da cabine é feito durante a instalação do elevador de modo a garante que o centro de massa da cabine está posicionado alinhado com o centro das guias. Uma má execução desse procedimento, seja decorrente da troca de um componente por

outro com massa diferente (modernização parcial), ou da instalação de um novo equipamento, como um aparelho de ar-condicionado, faz com que haja um desbalanceamento da cabine e, conseqüentemente, gera alterações nos gráficos horizontais X e Y, provocando vibrações laterais no interior da cabine durante as viagens. As orientações dos eixos analisados serão apresentados na Figura 1.

2.3. Frequência de vibração dos componentes

2.3.1. Frequência de vibração a partir do diâmetro de polias

Uma das formas de identificar a influência de um componente através da análise de vibrações, parte da análise de frequência de vibração dos componentes que desenvolvem movimentos rotativos. Essa análise se baseia na equação (1):

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad (1)$$

Sabendo que:

$$\omega = \frac{V}{R} \quad (2)$$

Substituindo a equação (2) em (1), temos:

$$f = \frac{V}{\pi D} \quad (3)$$

Aplicando a equação (3), podemos utilizar os valores conhecidos de velocidade de deslocamento do elevador e diâmetro da polia, de cada componente, e identificar a frequência das vibrações provocadas pelos movimentos rotativos.

2.3.2. Frequência de vibração a partir da rotação da máquina

Outra frequência importante de ser analisada entre os componentes de um elevador é a frequência de rotação da máquina. Para isso utiliza-se o valor de rotação identificado na própria máquina, que deve ser utilizado na unidade de rotação por minuto e, posteriormente, dividindo-o por 60, dessa forma, encontra-se diretamente o resultado na unidade Hz, para ser comparado com os demais dados analisados.

2.4. Transformada Rápida de Fourier

Este algoritmo serve para calcular de forma mais rápida, a transformada discreta de Fourier, o que permite representar um sinal periódico como uma soma infinita de componentes senoidais, senos e cossenos. De um modo geral, ela decompõe um sinal, representado originalmente no domínio do tempo, em termos de suas componentes periódicas, no domínio de frequência, para facilitar a identificação.

Na prática, assumindo uma medição de complexidade de análise assintótica, ela diminui a complexidade de cálculo de um algoritmo de $O(N^2)$ para $O(N \log N)$, sendo N a quantidade de dados de entrada no cálculo de um algoritmo. Em geral os valores de N serão tão grandes que a diferença de velocidade no cálculo será enorme.

As aplicações deste método são muitas, porém neste trabalho será utilizada a sua abordagem sobre algoritmos de filtragem, a partir de um intervalo definido de tempo, em dados de vibrações. Assim, busca-se encontrar as frequências que estão provocando as vibrações no

elevador e identificar o comportamento da variação de aceleração entre picos nos gráficos analisados.

3. METODOLOGIA

3.1. Metodologia e aplicação da norma ISO 18738

O método de medição da vibração analisada neste trabalho seguiu os critérios de aplicação conforme a norma ISO 18738. Alguns pontos chave da aplicação do método valem ser ressaltados em vista da análise futura realizada sobre os dados.

A medição da vibração é realizada no interior da cabine e com a ferramenta de medição posicionada no centro do piso da cabine, conforme Figura 1, então é realizada uma viagem completa no elevador partindo do primeiro piso inferior até o último pavimento. Para garantir uma análise correta dos dados após a medição, é imprescindível que a ferramenta faça a análise pelo ao menos meio segundo antes do elevador começar a fechar a porta no primeiro pavimento, e que finalize a análise pelo ao menos meio segundo após a completa abertura da porta no último pavimento. Isso irá garantir que durante a análise dos dados, sejam identificados com clareza os 4 limites de análise propostos na norma.

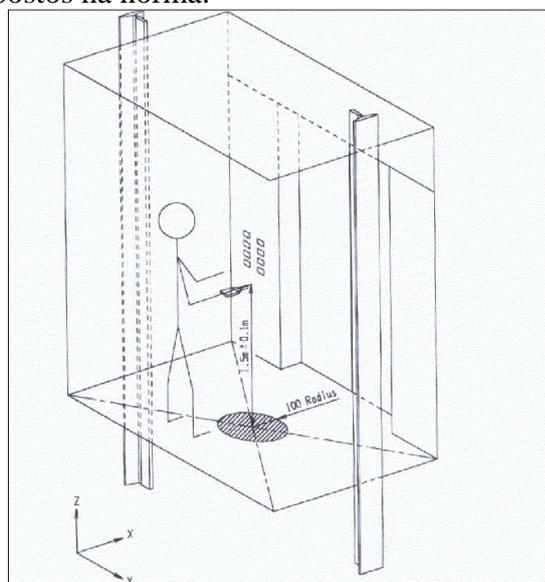


Figura 1 - Posição correta para medição de vibração na cabine (Fonte: ISO 18738:2003)

Com a ferramenta conectada a um computador, será utilizado o software próprio da ferramenta para iniciar as medições e finalizar a análise. Ao todo serão obtidos 3 gráficos de aceleração (um em cada eixo analisado X, Y e Z) e mais 3 gráficos auxiliares que servirão de guia durante a análise, com medidas de distância percorrida (percurso), velocidade durante a viagem e Jerk ao longo do percurso.

3.2. Equipamento EVA-625

O EVA-625 é uma ferramenta de análise de vibrações em elevadores, desenvolvida para a avaliação da qualidade das viagens conforme a norma ISO 18738, sendo uma ferramenta amplamente aplicada na análise de conforto e identificação de defeitos em elevadores no mundo todo. Criada pela empresa Physical Measurement Technologies, Inc., esta ferramenta conta com acelerômetros nos 3 eixos (X, Y e Z) que possuem um alcance na leitura de +/- 10g e taxa de amostragem de 1024 Hz. Além disso, ela é uma das poucas ferramentas que conseguem aplicar um filtro de vibrações baseado na norma ISO 18738, que determina os índices ideais de conforto

interno sentidos pelo corpo humano, filtro Butterworth 10 Hz passa-baixa de segunda ordem. Ademais, esse equipamento possui, ainda, uma poderosa ferramenta aplicável aos dados de vibrações, permitindo aplicar uma transformada rápida de Fourier em um intervalo definido de dados e encontrar as frequências de vibração características nesse intervalo, permitindo a identificação de vibrações ocasionadas por algum componente do elevador.

3.3. Aplicação da análise de sobre-aceleração

Segundo Howkins (2006), “Jerk é provavelmente a mais importante variável em elevadores e a mais difícil de quantificar quanto a qualidade de viagem em elevadores”, isso se deve a dificuldade de padronizar um valor agradável, aceitável e inaceitável deste parâmetro, tendo em vista que cada pessoa percebe as sensações provocadas por ele de formas diferentes. Alguns parâmetros são apresentados por ele, conforme Tabela 1, para tentar quantificar a qualidade de viagens a partir do Jerk máximo durante a viagem.

Tabela 1 - Valores característicos para avaliação da sobre-aceleração (Fonte: Howkins, 2006)

Jerk máximo (m/s³)	Avaliação
< 2	Agradável
Entre 2 e 6	Aceitável
> 6	Inaceitável

3.4. Análise A95 dos gráficos de vibração

A95 representa o valor para o qual 95% das diferenças entre picos no gráfico estão contidas, e assim como os valores de aceleração analisados, será utilizada a unidade de medida mg, que representa o submúltiplo da constante de aceleração da gravidade na terra. Para referência, neste trabalho, serão aceitos valores máximos para o A95 que são amplamente aplicados nas análises de grandes empresas que desenvolvem e prestam serviços em elevadores, tais valores são evidenciados pela Tabela 2. Estes valores são meramente comparativos, sendo a sua validade constantemente testada em aplicações práticas de grandes empresas.

Tabela 2 - Valores característicos para avaliação do parâmetro A95

Eixo analisado	A95 máximo (mg)
X	6,5*
Y	8*
Z	15*

*Estes valores são aceitos para elevadores com velocidade de até 3 m/s.

3.4. Caracterização dos elevadores analisados

3.4.1. Elevador 1

A análise realizada neste elevador foi baseada na reclamação evidenciada pelo proprietário e solicitada para investigação. O problema de desconforto era apresentado logo antes do elevador começar a se mover. Para realizar a análise tomou-se como base os dados característicos do elevador, os quais são retratados pela Tabela 3.

Tabela 3 - Características do elevador 1

Elevador 1	
Número de paradas	10
Capacidade	22 pessoas
Máquina	DAF270L014
Rotação da Máquina (RPM)	239
Diâmetro da Polia Máquina (mm)	440
Diâmetro da Polia Cabine (mm)	400
Diâmetro da Polia Contrapeso (mm)	530
Potência (kW)	20
Velocidade (m/s)	1,75
Suspensão	2:1

3.4.2. Elevador 2

O problema percebido neste elevador fazia com que a cabine oscilasse no eixo Z ao longo do percurso, sendo essa uma oscilação cíclica em todo o percurso e característica de um fenômeno chamado de “ioiô”. Para realizar a análise tomou-se como base os dados característicos do elevador, os quais são retratados pela Tabela 4.

Tabela 4 - Características do elevador 2

Elevador 2	
Número de paradas	8
Capacidade	8 pessoas
Máquina	ERS-61P7
Rotação da Máquina (RPM)	279
Diâmetro da Polia Máquina (mm)	240
Diâmetro da Polia Cabine (mm)	240
Diâmetro da Polia Contrapeso (mm)	140
Potência (kW)	6,9
Velocidade (m/s)	1,75
Suspensão	2:1

4. RESULTADOS

4.1. Elevador 1

4.1.1. Análise inicial

A primeira análise realizada foi feita utilizando a ferramenta EVA-625, a fim de identificar o período de ocorrência do problema e a sua magnitude. Após a medição em campo aplicou-se um filtro butterworth de 10 Hz, conforme ISO 18738, sobre os dados e analisou-se os resultados da medição. Os valores de aceleração utilizados são medidos utilizando a unidade de mg, sendo 1 (mg) correspondente a $9,87 \times 10^{-3}$ (m/s²).

É possível visualizar, na Figura 2, a presença de uma aceleração repentina “1”, logo antes de o elevador iniciar o movimento. Essa perturbação é visualizada apenas no eixo Z, evidenciando que a causa seja algum componente que contribui para este movimento. Apesar de o intervalo analisado ocorrer antes do limite estipulado pela norma ISO 18738, a característica do problema faz com que uma análise mais abrangente seja necessária.

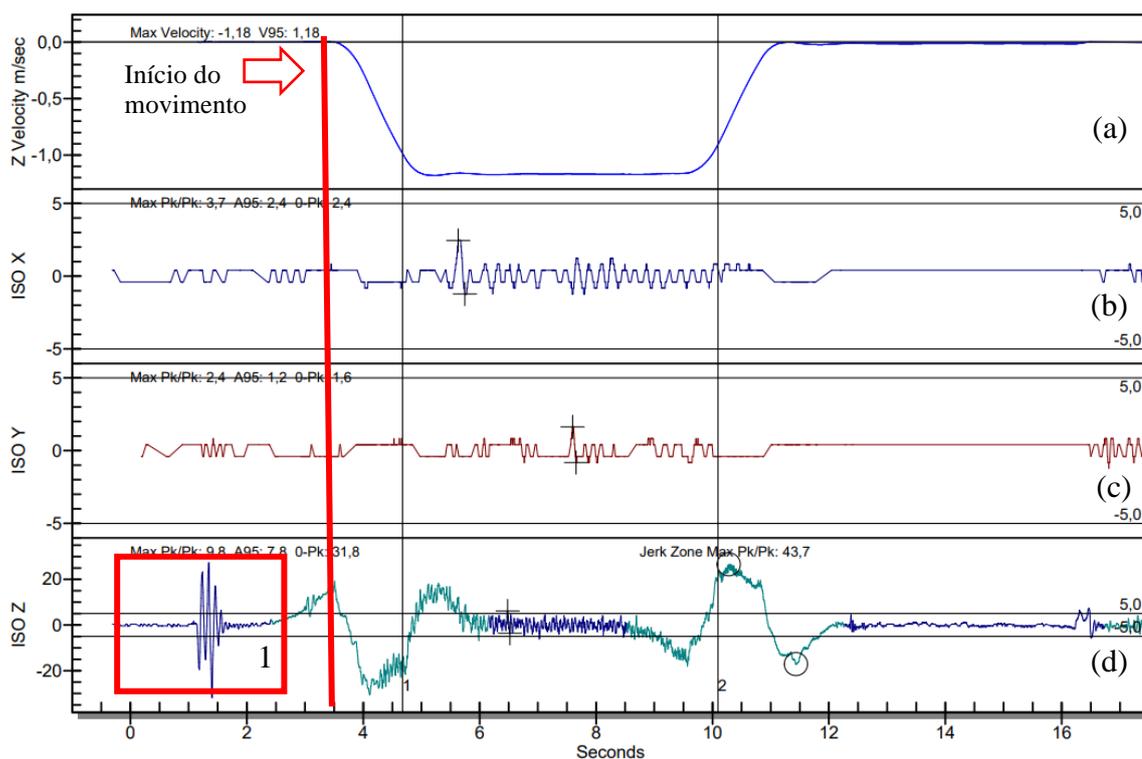


Figura 2 – Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.

4.1.2. Identificação do problema

A primeira análise realizada sobre os dados foi feita tentando identificar o componente que pode estar gerando este problema. De imediato descartou-se problemas nas guias, cabos de aço, estrutura de cabine e balanceamento estático do elevador, pois estes componentes podem gerar problemas durante o deslocamento, e não com a cabine ainda parada.

Pensando no funcionamento do elevador, suspeitou-se de alguma folga ou avaria nas polias do elevador, sendo feita, então, uma análise da frequência do intervalo de ocorrência do problema aplicando a equação (3) aos valores característicos do elevador (Tabela 4).

A análise de frequência das polias do elevador, mostradas na Tabela 5, não trouxe os resultados esperados, sendo os valores de frequência encontrados, para as polias do elevador, próximos de 1 Hz e o valor encontrado, para a rotação da máquina, ficando muito próximo da primeira frequência característica do sistema, porém longe da frequência principal identificada na análise do movimento, com valor de 9 Hz e identificada na Figura 3.

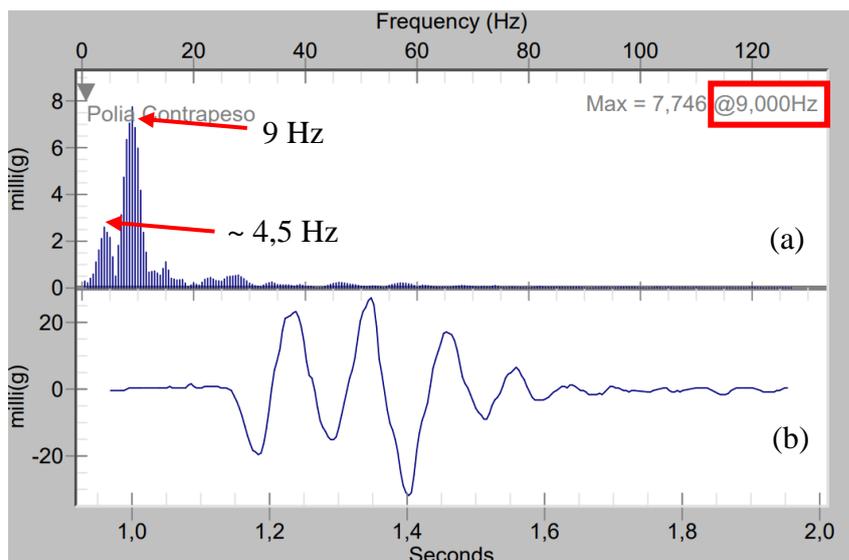


Figura 3 – (a) Gráfico FFT de aceleração (mg) x frequência (Hz). (b) Gráfico de vibração para o intervalo analisado em aceleração (mg) x tempo (s).

Tabela 5 – Frequências características das polias e máquina analisadas

Componente analisado	Frequência (Hz)
Polia da máquina	0,9
Polia da cabine	0,9
Polia do contrapeso	0,7
Rotação da máquina	4

Em grande parte, isso se deve ao tempo de ocorrência deste problema, que tornou a frequência encontrada muito alta em relação às frequências de qualquer uma das polias do elevador. Porém, identificou-se, em campo, que na máquina de tração existia uma folga entre o eixo do motor e a engrenagem que fixa o disco de freio, porém, antes do movimento do elevador, este fenômeno não deveria influenciar em um movimento repentino do elevador, tendo em vista que o freio é normalmente fechado.

A partir disso, descartou-se uma causa mecânica e passou-se a tratar a análise sobre o comportamento elétrico dos componentes. Neste caso, verificou-se o comportamento das correntes do elevador durante o movimento da cabine, através da análise das curvas do sensor de corrente (hall) da placa de comando.

É possível identificar, antes do início do movimento da máquina, uma pequena corrente que é aplicada em concordância ao movimento inesperado identificado na análise com a ferramenta EVA-625. Com isso, a análise passou a ser sobre identificar qual a causa dessa corrente inesperada sobre a máquina antes do movimento do elevador, partindo então, para a análise do esquema elétrico e software do elevador.

4.1.3. Solução encontrada

Analisando a corrente do elevador, verificou-se então a presença de um teste de verificação de corrente antes do movimento do motor. Assim, o teste realizado pelo motor provocava uma corrente no freio da máquina, que atrelada à folga existe neste modelo, fazia com que antes de iniciar o movimento, a cabine sofre-se uma vibração severa antes do início do movimento.

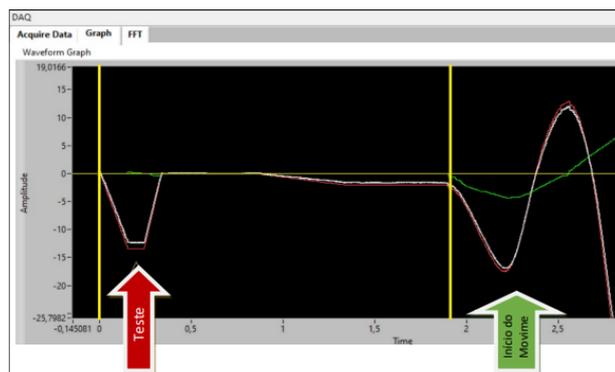


Figura 4 - Gráfico da análise de corrente em amplitude de corrente (A) x tempo (s).

Como medida de contenção foi solicitado que fosse removido este teste de corrente do programa do elevador. Esta aplicação é similar à utilizada em elevadores com sistema regenerativo de energia, onde não é aplicado o teste de corrente.

Após a correção do problema foi realizada novamente uma análise de vibração no elevador, utilizando a ferramenta EVA-625.

A análise final, Figura 5, evidenciou a ausência de movimento do elevador no período anterior ao movimento da cabine, além de apresentar um valor, segundo Howkins(2006), agradável, de 2 m/s^3 para o Jerk no eixo Z durante a viagem, conforme destacado no gráfico. Em paralelo, foi sugerido que fosse feita uma avaliação junto ao fabricante da máquina DAF270 para verificar se a soma da existência de folga entre o eixo do motor e a engrenagem do disco do freio, chaveta e outros componentes construtivos pode ser considerada normal ou torna-se um impeditivo para seguir utilizando este modelo de máquina neste modelo de elevador. A análise do gráfico sem a aplicação do filtro Butterworth 10 Hz, pode ser visualizada no Apêndice, Figura 17.

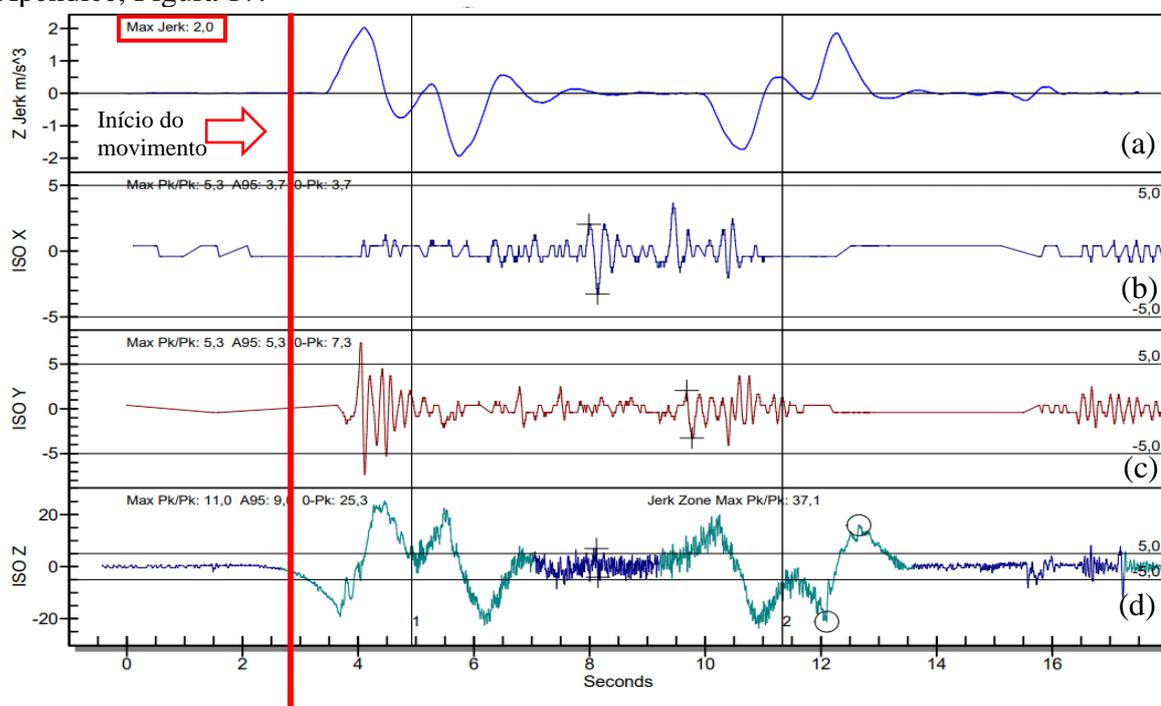


Figura 5 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de Jerk no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.

4.2. Elevador 2

4.2.1. Análise inicial

A primeira análise realizada foi feita utilizando a ferramenta EVA-625, a fim de identificar o período de ocorrência do problema e a sua magnitude. Após a medição em campo aplicou-se um filtro butterworth de 10 Hz, conforme ISO 18738, sobre os dados e analisou-se os resultados da medição. Os valores de aceleração utilizados são medidos utilizando a unidade de mg, sendo 1 (mg) correspondente a $9,87 \times 10^{-3}$ (m/s²).

Analisando a Figura 6, é evidenciada a ocorrência de vibração ao longo de todo o percurso, principalmente através do valor de A95 no eixo Z, que apresentou uma magnitude de 30,6 mg, muito acima do máximo valor aceitável, descrito em 3.4.

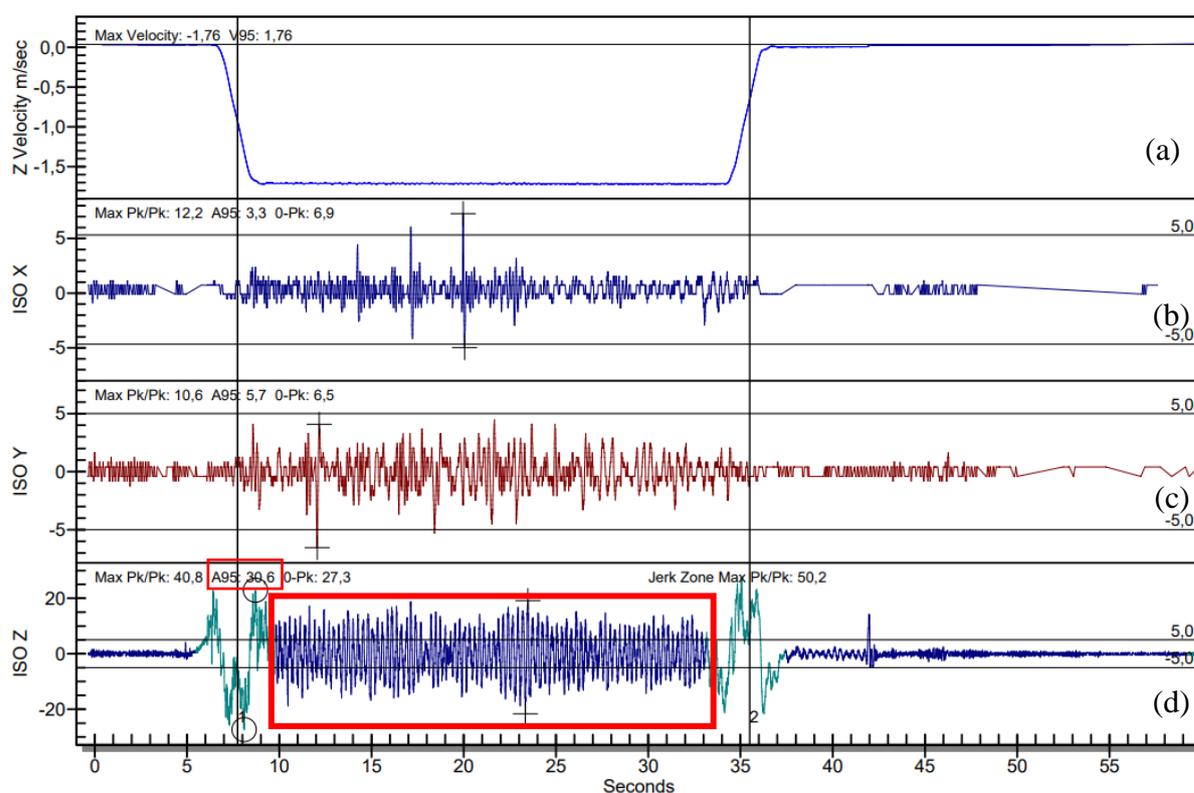


Figura 6 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.

4.2.2. Identificação do problema

A partir desses dados foi feita uma análise sobre a frequência dessa oscilação para identificar a frequência característica desse fenômeno e encontrar uma possível causa para essa ocorrência. Foram feitas análise em vários intervalos de 2 segundos ao longo do tempo em que é apresentado este problema.

Na Figura 7 é possível visualizar a frequência analisada pela ferramenta (FFT) do software utilizado na análise, a qual foi definida com um valor de 4 Hz. Esse valor representa a frequência média das oscilações apresentadas durante o percurso de viagem.

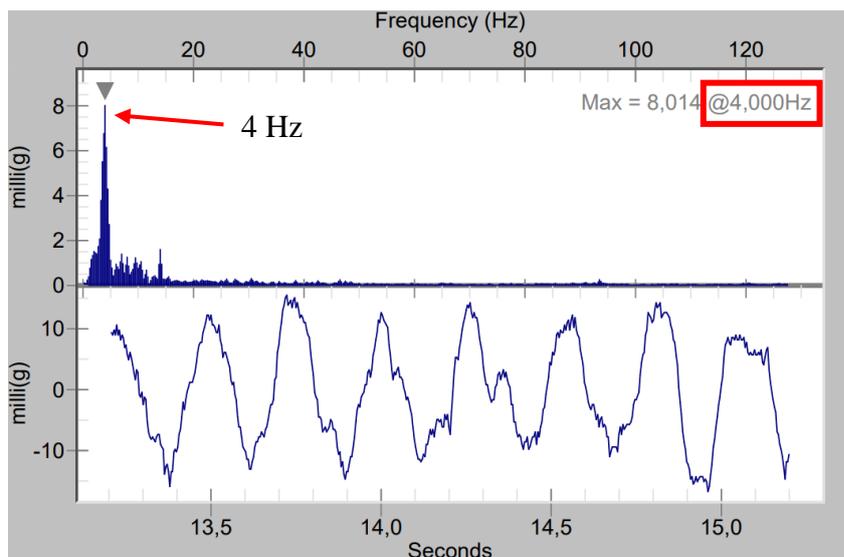


Figura 7 - (a) Gráfico FFT de aceleração (mg) x frequência (Hz). (b) Gráfico de vibração para o intervalo analisado em aceleração (mg) x tempo (s).

Neste caso, como o comportamento das vibrações se mostrou cíclico, suspeitou-se de componentes giratórios no movimento, que poderiam gerar esse tipo de comportamento vibratório. Passou-se, então, a calcular a frequência característica de movimento de cada um dos componentes a partir da rotação da máquina em RPM e dos diâmetros das polias da máquina, cabine e contrapeso.

A partir das análises realizadas, encontrou-se uma frequência característica para a polia de contrapeso que é muito próxima do valor apresentado no gráfico de frequência e, portanto, gerando uma suspeita para a origem do problema sobre esse componente.

Tabela 6 - Frequências características das polias e máquina analisadas

Componente analisado	Frequência (Hz)
Polia da máquina	2,3
Polia da cabine	2,3
Polia do contrapeso	4
Rotação da máquina	4,7

Analisando os canais da polia de contrapeso, ficou evidente a causa do problema. A análise com relógio comparador, mostrou que a polia possuía uma variação de 10 mm no raio ao longo de todo o canal, sendo a tolerância máxima especificada em projeto de 0,2 mm.



Figura 8 – Medição do raio da polia de contrapeso ao longo da circunferência utilizando um relógio comparador

4.2.3. Solução encontrada

Após a troca da polia de contrapeso e equalização dos cabos de tração foi feita uma nova análise no elevador utilizando a ferramenta EVA-625, buscando comparar os dados de vibração obtidos, em relação aos dados anteriores.

Após a análise, verificou-se uma diminuição significativa das vibrações em Z, evidenciada principalmente pela redução da magnitude de A95 neste eixo, passando dos anteriores 30,6 para 13,5, valor este que pode ser considerado aprovado com base nos padrões de grandes empresas que atuam na área de elevadores. A análise do gráfico sem a aplicação do filtro Butterworth 10 Hz, pode ser visualizada no Apêndice, Figura 17.

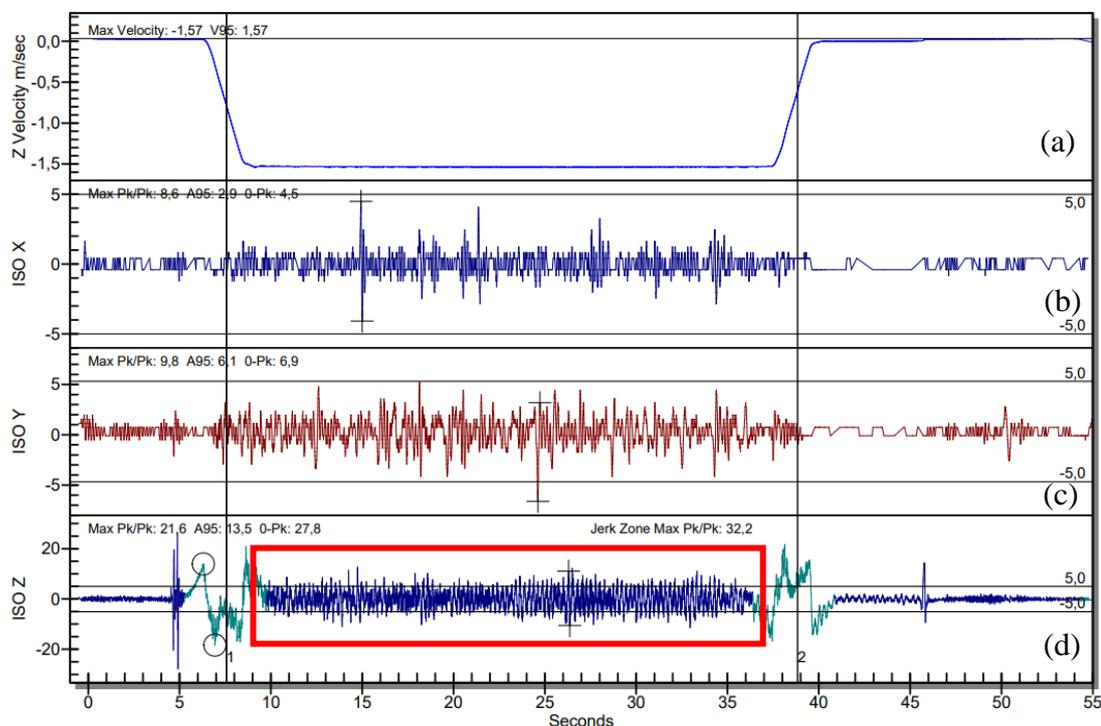


Figura 9 - Gráficos de aceleração(mg) x tempo (s). (a) Gráfico de velocidade no eixo Z. (b) Gráfico de vibração no eixo X. (c) Gráfico de vibração no eixo Y. (d) Gráfico de vibração no eixo Z.

5. CONCLUSÃO

A aplicação do método de análise sobre o elevador 1, apresentou resultados bem satisfatórios em relação à identificação do problema, tanto o momento de ocorrência, a magnitude, bem como as características no fenômeno, ajudaram a encontrar a causa raiz do problema. Porém, a sua curta duração, tornou difícil a aplicação do método de análise de frequências sobre os valores encontrados no período. Assim, apesar de apresentar dificuldades na análise deste caso, a identificação dos dados possibilitou uma caracterização do problema e um filtro sobre os componentes que possivelmente estavam afetando a ocorrência do sintoma analisado.

No caso do elevador 2, a aplicação do método de análise também apresentou um bom resultado a respeito da identificação e caracterização do problema, tornando clara a ocorrência cíclica e constante do problema ao longo de toda a viagem. Além disso, essa característica cíclica do sintoma, possibilitou uma análise muito mais assertiva a respeito dos resultados apresentados, com a aplicação da análise de frequência identificando perfeitamente o componente e a causa raiz do problema.

Assim, de forma geral, podemos notar que a abordagem desse tipo de análise sobre problemas reais e a sua posterior análise, se mostrou muito boa em relação à identificação do problema e de suas características e que a partir dessa análise é possível aplicar outros métodos para identificar as causas raízes em cada caso. Apesar disso, a aplicação deste método demanda uma boa experiência e conhecimento prático, sobre elevadores, do profissional que irá realizá-la, porém, quando bem utilizada, demonstrou ser uma ferramenta indispensável para grandes empresas e prestadoras de serviços que atuam, principalmente, no diagnóstico de problemas em campo. Dessa forma, sua aplicação poderia ser um aliado importante não só nas análises de reparos, como também em manutenções preventivas, a fim de controlar e monitorar casos mais sensíveis, como por exemplos de equipamentos que apresentam elevado percurso e/ou uma elevada velocidade nominal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A HOWKINS, R. E. (2006). **Elevator Ride Quality**, IAEE Book Elevator Technology, V. 16, p.22-23, Ed. A. Lustig, Helsinki.

CULAU, E. L. **Análise Comparativa de Vibrações e Conforto em Elevadores com Diferentes Sistemas de Acionamento**. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), 15f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DADALT, M. R. **Análise comparativa de parâmetros de conforto de viagens de elevadores após projetos de modernização integral**. 2021. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), 15f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

PAZIM, L. C. **Análise da eficiência da borracha amortecedora da base de máquina de elevadores**. 2022. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica), 14f. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

International Organization for Standardization. (1997). **“Mechanical vibration and shock-Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)”**, (ISO Standard No. 2631- 2: 2003). Switzerland, 2003. <https://www.iso.org/standard/23012.html>.

Li, C., Lu J., Lai, J., Yao, J., Xiao, G. (2022). **Assessment of ride comfort of traction elevators using ISO 18738-1:2012 and ISO 2631-4: 2001 standards**. Journal of Intelligent Manufacturing and Special Equipment Vol. 3 No. 2, 2022 pp. 156-172. <https://www.emerald.com/insight/2633-6596.htm>.

Szydło, K., Longwic, R., Litak, G., Dziubiński, M., Drozd, A. (2019). **Assessment of Lift Passenger Comfort by the Hilbert–Huang Transform**. Journal of Vibration Engineering & Technologies (2020) 8:373–380

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**. Pearson, 6th Edition, 1147p. 2017.

BS ISO 18738:2003, **Lift (elevators) – measurement of lift ride quality**. British Standard International Organization for Standardization, 2003.

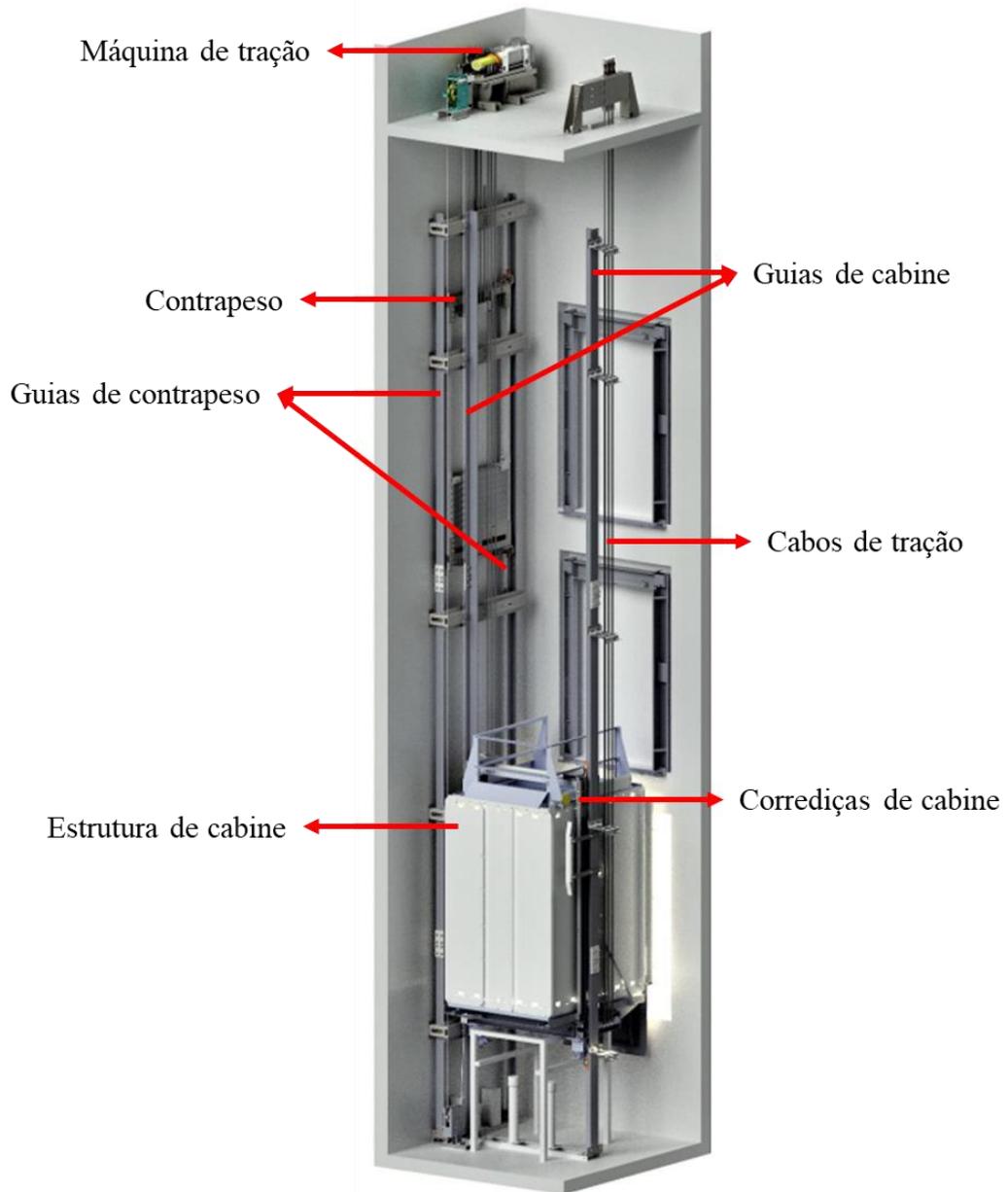


Figura 10 - Identificação dos componentes de um elevador na caixa de corrida. (Fonte: Adaptação de TK Elevadores, 2022)

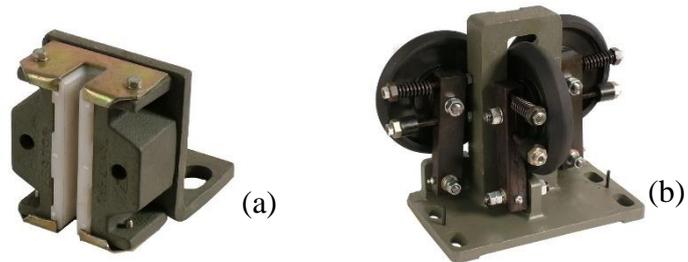


Figura 11 – (a) Corrediça deslizante. (b) Corrediça de rolo.

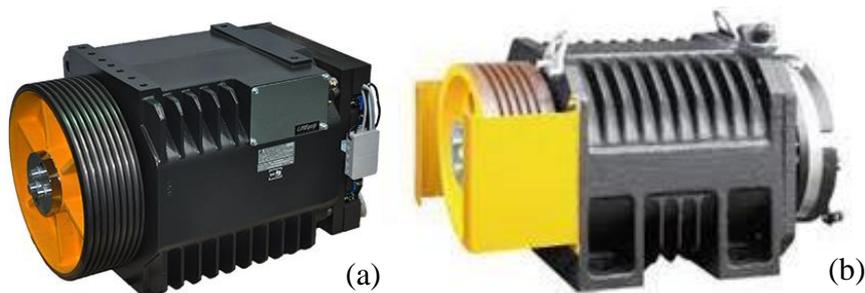


Figura 12 – (a) Máquina DAF-270. (b) Máquina ERS empresa Torindrive.



Figura 13 – Guias “T” para elevadores.

<p>EVA-625 Specifications Microprocessor: 8XC52 Family Running @ 11 MHz Display: 4 Line by 20 Column Liquid Crystal Keyboard: 1 X 4 Sealed Membrane Communications: Serial RS232, 57600 Baud Clock: Integrated Battery Backed Real Time Clock Battery: 12 V, Rechargeable Lead Acid Cel, 30 Hrs per Charge Battery Charger: Universal Voltage Sensors: 3 Accelerometers (x,y,z Triaxial arrangement) 1 Condenser Microphone Accelerometer Technology: Piezoresistive, DC to 400 Hz</p>	<p>A/D Converter: 13 Bit Self Calibrating Anti-Aliasing Filters: (Acceleration Channels) Software Selectable: 80 Hz or 160 Hz Cutoff Sampling Rate: Software Selectable: 256 or 512 SPS/Channel Frequency Response: Acceleration Selectable 0 to 80/ 0 to 160 Hz Frequency Response: Mic: A-Weighted Fast Response 8 KHz Type 2S True RMS Sound Level Measurement Range: Acceleration: +1.5g to -1.5g, Mic: 40 to 90db(A) Resolution: Acceleration 600 micro(g), (.0006g), Mic: 1 dB Data Storage: Over 700 Seconds of 4 Channel Data (Serial Version) PC Requirements: Windows XP, Windows Vista, Win 7, Win 8</p>	<p>Specifications Subject to Change Due to Continuum</p>
<p>Packaging: Case: Structural Resin, Water Proof Dimensions: 27.3L x 24.7W x 12.7D (cm) 10.7L x 9.7W x 5.0D (in)</p>	<p>Weight: 4.3 (kg), 9.5 (lb) Accelerometer Housing: Stainless Steel (Removable Reorientation, Attachment to Structural Member) Chassis, Microphone Housing: Anodized Aluminum</p>	

Figura 15 – Especificações do equipamento EVA-625 (Fonte: PMT EVA-625 Datasheet)



Figura 14 – Equipamento EVA-625 e seus componentes

APÊNDICE

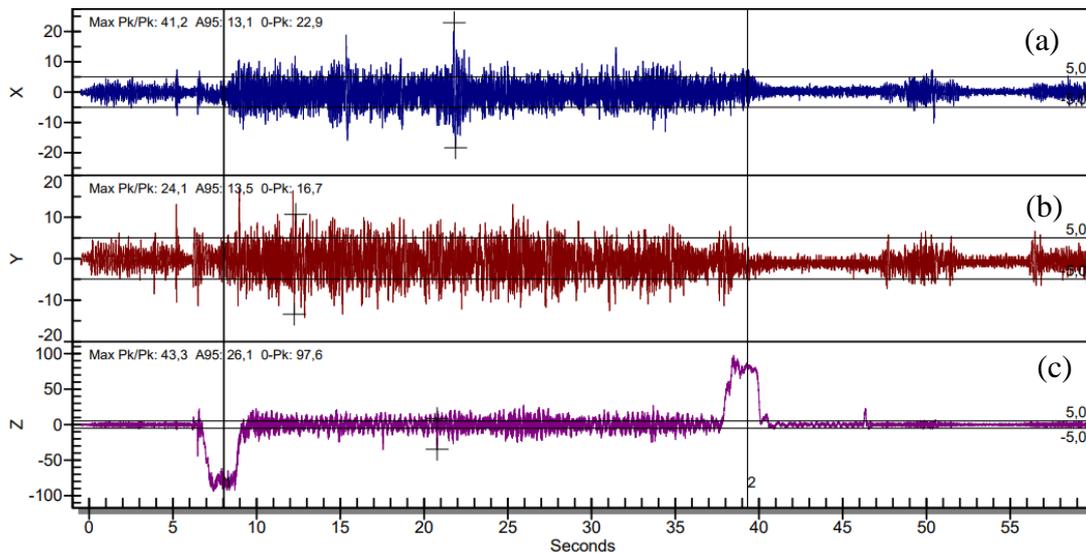


Figura 16 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s) sem aplicação do filtro Butterworth 10 Hz. (a) Gráfico de vibração no eixo X. (b) Gráfico de vibração no eixo Y. (c) Gráfico de vibração no eixo Z.

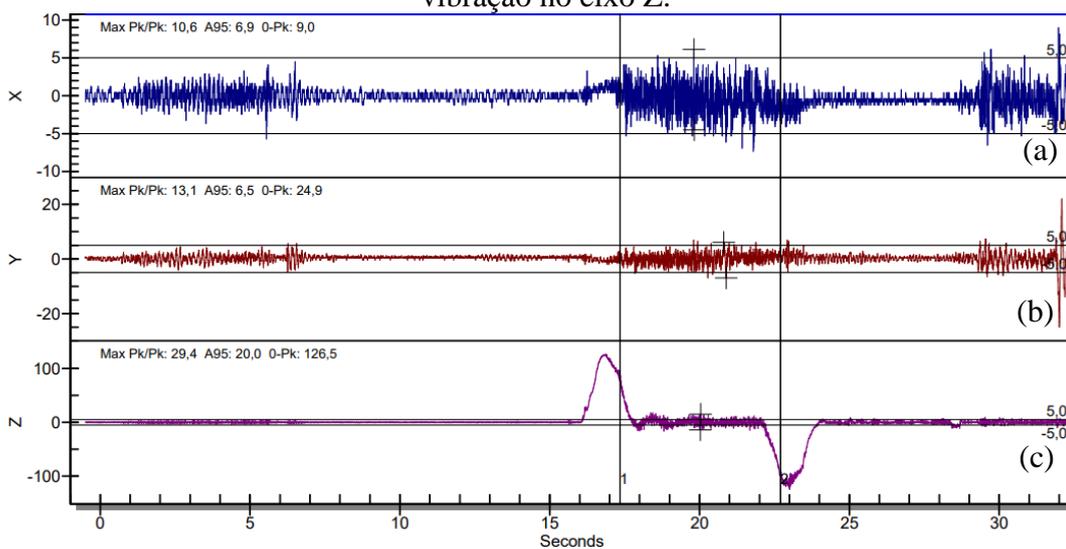


Figura 17 - Gráficos de aceleração (mg) x tempo (s) sem aplicação do filtro Butterworth 10 Hz. (a) Gráfico de vibração no eixo X. (b) Gráfico de vibração no eixo Y. (c) Gráfico de vibração no eixo Z.