

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

ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE CONFORTO DE
VIAGENS DE ELEVADORES APÓS PROJETOS DE MODERNIZAÇÃO
INTEGRAL

por

Mateus Antônio Rocha Dadalt

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, novembro de 2021.

CIP - Catalogação na Publicação

Dadalt, Mateus Antônio Rocha
ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE CONFORTO DE
VIAGENS DE ELEVADORES APÓS PROJETOS DE MODERNIZAÇÃO
INTEGRAL. / Mateus Antônio Rocha Dadalt. -- 2021.
14 f.
Orientador: Herbert Martins Gomes.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de
Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre,
BR-RS, 2021.

1.Conforto em elevadores. 2.Modernização de
elevadores. 3.Vibração. 4.Aceleração ponderada. 5.
sobre-aceleração. I. Gomes, Herbert Martins, orientador.
III. Título.

Elaborada pelo Sistema de Geração Automática de Ficha Catalográfica da UFRGS com os
dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Mateus Antônio Rocha Dadalt

ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE CONFORTO DE VIAGENS DE
ELEVADORES APÓS PROJETOS DE MODERNIZAÇÃO INTEGRAL

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
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Cirilo Sperb Bresolin
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Herbert Martins Gomes

Prof. Dr. Rodrigo Rossi

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Porto Alegre, novembro de 2021.

Dedico esse trabalho, especialmente, a meus pais Irno e Lycia.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço aos meus pais Irno Antônio e Lycia Amélia e aos irmãos Maria Luísa, Fábio Augusto e João Gabriel pelo incondicional apoio durante os anos de graduação, pelo incentivo e por serem referências para mim.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul por ter me proporcionado todas as experiências enriquecedoras para minha evolução como ser humano e profissional capacitado, e pelas pessoas que pude conhecer.

Ao meu orientador Prof. Dr. Herbert Martins Gomes que foi um exemplo como tutor, me orientou e sempre esteve disposto a esclarecer meus questionamentos que surgiram ao decorrer do trabalho.

Ao Centro Estudantil da Engenharia Mecânica – CEMEC por ter sido o meu farol e o divisor de águas dentro do curso.

À TK Elevator e a todos do Departamento de Instalações da filial de Porto Alegre pelos ensinamentos sobre elevadores e por me apoiarem na execução desse trabalho.

À EME Jr. pela oportunidade de me desenvolver e me preparar para o mercado de trabalho com visão empreendedora.

ANÁLISE COMPARATIVA DE PARÂMETROS DE CONFORTO DE VIAGENS DE ELEVADORES APÓS PROJETOS DE MODERNIZAÇÃO INTEGRAL

Mateus Antônio Rocha Dadalt

mateus.dadalt@ufrgs.br

Resumo. Com o decorrer do tempo de uso, elevadores necessitam da atualização para garantir sua funcionalidade, segurança, extensão de vida útil e conforto dos passageiros. O processo de modernização integral substitui componentes importantes para o pleno funcionamento do elevador. A fim de comprovar as melhorias, o presente trabalho avalia de forma quantitativa o ganho do grau de conforto das viagens em relação à vibração e à sobre-aceleração ocasionadas pelo deslocamento. Realizaram-se medições em elevadores não modernizados e depois de serem modernizados integralmente do mesmo edifício. Utilizaram-se um dispositivo seatpad com um acelerômetro e um aparelho VI-400Pro para medição da vibração transmitida ao corpo humano normatizados no interior da cabina durante percursos do elevador. Posteriormente, os dados foram processados no software MATLAB R2019a. As medições são realizadas de acordo com a metodologia indicada pela ISO 18738:2003, comparando os resultados assim obtidos com os valores referentes ao conforto do passageiro de acordo com a ISO 2631-1:1997 e literatura. A análise dos resultados obtidos do processamento dos dados mostra que, considerando a vibração, todas as viagens são consideradas de confortáveis, mas há uma diminuição da vibração para os casos modernizados. Em relação à sobre-aceleração, todos os valores obtidos dos elevadores antigos são inaceitáveis, enquanto que os modernizados estão na faixa de agradável a aceitável.

Palavras-chave: conforto em elevadores, modernização de elevadores, vibração, aceleração ponderada, sobre-aceleração

Comparative analysis of comfort parameters of elevators lifts after integral modernization projects

Abstract. Over the period of use, elevators need to be updated to ensure their functionality, safety, an extension of service life, and passenger comfort. The necessary modernization process replaces essential components for the full functioning of the elevator. This work quantitatively evaluates the gain in the degree of comfort of travel concerning vibration and over-acceleration caused by displacement to check the improvements. Measurements were carried out on non-modernized elevators and after being fully modernized in the same building. A seat pad device with an accelerometer and a VI-400Pro device was used to measure the vibration transmitted to the human body, standardized inside the cabin during elevator journeys. Subsequently, the data were processed in the MATLAB R2019a software. The measurements are carried out by the methodology indicated by ISO 18738:2003, comparing the results thus obtained with the values referring to passenger comfort following ISO 2631-1:1997 and literature. The analysis of the results obtained from the data processing shows that considering the vibration, all trips are considered comfortable, but there is a decrease in vibration for the modernized cases. Regarding over-acceleration, all values obtained from the old elevators are unacceptable, while the modern ones are in the pleasant to an acceptable range.

Keywords: elevators comfort, elevators modernization, vibration, weighted acceleration, jerk.

NOMENCLATURA

Símbolos

W_k	Frequência ponderada na direção axial z	
W_k	Frequência ponderada nas direções axiais x e y	
k_x	Fator multiplicativo da aceleração na direção axial x	
k_y	Fator multiplicativo da aceleração na direção axial y	
k_z	Fator multiplicativo da aceleração na direção axial z	
a_w	Aceleração RMS ponderada	[m/s ²]
a_{wx}	Aceleração RMS ponderada na direção axial x	[m/s ²]
a_{wy}	Aceleração RMS ponderada na direção axial y	[m/s ²]
a_{wz}	Aceleração RMS ponderada na direção axial z	[m/s ²]
a_v	Aceleração RMS total ponderada	[m/s ²]

Abreviaturas e acrômimos

RMS

Root Mean Square

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivo	1
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	2
2.1	História dos elevadores.....	2
2.2	Modernização de Elevadores.....	3
2.3	Conforto e qualidade das viagens de elevadores	3
3	TRANSMISSÃO DA VIBRAÇÃO AO CORPO HUMANO.....	4
3.1	Avaliação do conforto relacionado à vibração	5
3.2	Parâmetros de avaliação dos elevadores.....	6
3.2.1	Aceleração.....	6
3.2.2	Sobre-Aceleração (<i>Jerk</i>).....	7
4	METODOLOGIA	7
4.1	Dispositivos para medição.....	8
4.2	Instrumentação do elevador.....	8
4.3	Elevadores avaliados	9
4.4	Processamento dos dados	10
5	RESULTADOS E ANÁLISES	11
5.1	Da avaliação dos parâmetros dos elevadores	11
5.1.1	Aceleração.....	11
5.1.2	Da avaliação de conforto em relação à aceleração RMS total	12
5.1.3	Sobre Aceleração.....	12
5.1.4	Da avaliação de conforto em relação à sobre-aceleração.....	13
6	CONCLUSÕES.....	14
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15
	APÊNDICE A	16
	APÊNDICE B	19
	APÊNDICE C	20

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1- Eixos baicêtricos do corpo humano (Fonte: ISO 2631-1:1997).....	5
Figura 3.2 - Frequências ponderadas para os eixos x , y e z (Fonte: ISO 2631-1:1997).....	5
Figura 3.3 - Regiões para avaliação da aceleração em viagens de elevador (Fonte: BS ISO 18738:2003).	7
Figura 3.4 - Sinal da sobre-aceleração (Fonte: BS ISO 18738:2003).....	7
Figura 4.1 - Equipamento (a)VI-400Pro e <i>seatpad</i> usados nas medições. (b) Detalhe <i>seatpad</i> (Fonte: Manual VI-400Pro).	8
Figura 4.2 - (a) Posicionamento do transdutor no interior da cabina. (b) Pé em cima do transdutor para assegurar contato. (c) Vista geral do instrumento na cabina (Fonte: Autor e ISO-18738:2003.).	8
Figura 4.3 - Interior da cabina (a)antes e (b) depois da modernização respectivamente.	10
Figura 4.4 - Aceleração antes e depois do filtro de 10 Hz respectivamente.	11
Figura 5.1 - Aceleração RMS em cada direção axial z do elevador antigo presidente para viagem do 12° ao 10° andar.	11
Figura 5.2 - Aceleração RMS em cada direção axial z do elevador modernizado presidente para viagem do 12° ao 10° andar.....	12
Figura 5.3 - Sinal da sobre-aceleração do elevador antigo presidente para viagem do 12° ao 10° andar.....	13
Figura 5.4 - Sinal da sobre-aceleração do elevador modernizado presidente para viagem do 12° ao 10° andar.....	13

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Guia de aplicação das curvas de ponderação (Fonte: ISO 2631-1:1997).	4
Tabela 3.2 - Escala de conforto (Fonte: ISO 2631-1:1997).	6
Tabela 3.3 - Valores guias para caracterização da sobre-aceleração (Fonte: Howkins, 2006).	7
Tabela 4.1 - Características dos Elevadores.	9
Tabela 4.2 - Características das máquinas de Tração.	9
Tabela 5.1 - Resultados encontrados da aceleração RMS total por elevador de todas medições.	12
Tabela 5.2 - Resultados encontrados de sobre-aceleração máxima por elevador de todas medições.	13
Tabela A.1 - Medições e processamento das viagens.	16
Tabela A.2 - Medições e processamento das viagens (cont.).....	17
Tabela A.3 - Medições e processamento das viagens (cont.).....	18
Tabela A.4 - Quantidade de medições por viagem em cada elevador *	18
Tabela B.1 - Classificação da sobre-aceleração de acordo com Howkins (2006)*	19
Tabela B.2 - Resultados encontrados de sobre-aceleração máxima de viagens comuns aos quatro elevadores.	19
Tabela C.1 - Máxima aceleração RMS total de cada viagem por elevador.	20
Tabela C.2 - Resultados encontrados da aceleração RMS total de viagens comuns aos quatro elevadores.	20

1 INTRODUÇÃO

Um dos fatores fundamentais para os conceitos da arquitetura moderna foi o desenvolvimento e popularização da tecnologia de elevadores. Conforme as construções tornaram-se maiores, cresceu-se a demanda por equipamentos mais rápidos, eficientes e seguros. Por se tratar do transporte de seres-humanos, o grau de conforto das viagens se torna um parâmetro relevante para seu projeto. Embora a amplitude da vibração de um elevador em funcionamento não ameace a saúde e a segurança dos passageiros, podem-se atingir valores que causam desconforto ao usuário, e esse pode ser o fator determinante em uma negociação de venda de instalação ou de contrato de serviço de manutenção. Presenciam-se o crescimento dos centros urbanos e a necessidade da presença de elevadores nas construções já há algumas décadas. Após muito ciclos de uso, mesmo com um plano de manutenção bem executado, a vida útil dos componentes chega ao fim, e a tecnologia do equipamento fica defasada, necessitando de atualizações. Com a evolução dessa indústria, as empresas de ascensores buscam inovações que tragam uma experiência de mais segurança e conforto para os passageiros durante as viagens.

Para Howkins (2006) o conforto do transporte de ascensores é muito subjetivo, pois depende de aspectos quantificáveis, como a vibração e não quantificáveis, como a percepção de estética e sensação de segurança. É possível, quantificar a experiência de forma objetiva através da mudança do efeito da gravidade no corpo do passageiro causado pela variação da aceleração do equipamento. Essa combinação de aspectos subjetivos e objetivos é classificada como experiência humana no transporte de elevadores. Segundo Guo (2019), a maior parte das vibrações de menor amplitude não ameaça a saúde nem a segurança dos passageiros, mas essas podem atingir valores que trazem desconforto. Isso demonstra a importância da análise e controle da vibração para melhorar o conforto das viagens de elevador.

O presente trabalho trata de um estudo comparativo dos resultados de medições de vibração em um grupo de quatro elevadores do mesmo edifício, onde dois desses foram modernizados integralmente recentemente. Realizou-se o total de 90 medições, sendo 34 delas em elevadores antes da modernização e 56 delas em elevadores modernizados. O objetivo é obter e processar dados suficientes para afirmar de forma quantitativa o ganho em conforto das viagens após a atualização do equipamento. As viagens não serão avaliadas em relação a possíveis danos à saúde em termos de exposição à vibração, posto que a partir da análise dos resultados obtidos por Biasuz (2011) e outros autores, os valores de dose de vibração para uma jornada de oito horas de todas as viagens por ele medidas estão 2 ordens de grandeza abaixo do limite considerado saudável para o corpo humano.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo avaliar de forma quantitativa e qualitativa o ganho em conforto das viagens de elevadores após realizados projetos de modernização, através de comparações dos resultados de medições de vibração e da taxa de variação da aceleração no tempo (*Jerk*), na direção axial *z*, em elevadores prestes a serem modernizados e recentemente modernizados da mesma edificação. A instrumentação das medições e o processamento dos dados são realizados de acordo com a norma BS ISO 18738:2003, e a avaliação dos resultados considera os valores de referência da norma internacional ISO 2631-1:1997 e a referência Howkins (2006), especializada em conforto de elevadores. Essa análise é relevante para que se evidencie os benefícios das atualizações de componentes dos ascensores que possuem muitos ciclos de uso desde sua instalação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 História dos elevadores

Durante o século I A.C., os elevadores eram acionados através da energia humana ou animal. Buscado realizar o transporte vertical de animais e armas de batalha, o conforto e a segurança das viagens não eram parâmetros relevantes para aqueles projetos.

Por muitos séculos, as habitações humanas foram majoritariamente horizontais, limitadas a poucos pavimentos, pois haviam restrições estruturais das construções e a ausência de tecnologia de transporte vertical de pessoas. Nas edificações maiores, os andares de cima eram os menos desejados, pela inconveniência e desconforto em ter que subir vários lances de escada para chegar-se até eles. Em 1743, o primeiro elevador projetado para transportar seres-humanos foi inaugurado no Palácio de Versalhes, exclusivamente para o Rei Luís XV da França.

Até a metade do século XIX, não havia muitos prédios com mais de 4 andares por falta de uma tecnologia de elevação segura de seres-humanos. Em 1854, porém, Elisha Graves Otis apresentou o aparelho de segurança, o mecanismo automático de prevenção de queda da cabina caso houvesse rompimento dos cabos de sustentação. Essa invenção revolucionou a indústria, viabilizou a popularização de elevadores e, conseqüentemente, em conjunto com o desenvolvimento da tecnologia de estruturas de aço para a construção civil, edifícios cada vez mais altos, verticalizando as cidades.

Em 1857, começou a produção comercial de elevadores, e em Nova Iorque, foi instalado o primeiro elevador público para transporte de passageiros, movido por uma máquina a vapor. No ano 1880, o alemão Werner von Siemens, projetou o primeiro elevador movido a motor elétrico, além de ser mais rápido, expandiu os limites de cargas. Em 1889, foi instalado pela Otis, em Nova Iorque, o primeiro elevador com motor de corrente alternada, alavancando a indústria de elevadores com motores elétricos.

Em 1924, Otis instalou o primeiro elevador com sistema controlado por sinais na *Standard Oil Building*, também em Nova Iorque. Esse sistema controlava automaticamente a aceleração, a velocidade entre os andares e a desaceleração, conforme o elevador se aproximava do andar indicado, proporcionando maior conforto aos passageiros.

Atualmente, a tecnologia de elevadores dispõe desde sistemas de monitoramento do equipamento para análise preditiva de falha conectados à rede de internet à softwares de gerenciamento de tráfego. Através da definição de parâmetros nos módulos de controle do elevador no quadro de comando do equipamento, é possível definir as condições de operação da máquina que interferem no conforto das viagens, como a velocidade angular do motor durante o nivelamento, o tempo de redução de velocidade até o nivelamento e o torque de partida do motor.

Os sistemas de tracionamento são compostos por motores de indução ligados à rede elétrica, em que a frequência, a corrente e a tensão são controladas por um sistema inversor em conjunto a um módulo controlador de velocidade eletrônico, ajustando o torque do motor e, portanto, a velocidade da cabina de acordo com a sua posição dentro da caixa de corrida e o andar para qual foi feita a chamada.

O material de revestimento das cabinas e das portas deixou de ser, majoritariamente, madeira e passou a ser aço. Além de mais leves, sofrem menos desgaste ao longo do tempo, mantendo a boa aparência estética por mais tempo.

Na UFRGS há uma série de trabalhos relacionados à avaliação do conforto de usuários de elevadores, dentre eles estão os trabalhos de TCC do Biasuz (2011), Biasuz et al. (2016) e posteriormente o trabalho de Culau (2016), Culau et al. (2018), os quais medem e avaliam a questão do conforto em usuários de elevadores segundo recomendações normativas para tal e medições efetuadas em elevadores mais antigos e elevadores mais modernos. Particularmente no trabalho de Culau (2016) ênfase é dada a diferenciação do conforto quanto ao tipo de acionamento do elevador após sofrer algumas reformas.

Diversos são os manuais de fabricantes de elevadores que indicam (por exemplo o da Atlas-Schindler, 2020), de forma simplificada (e não obrigatória) as velocidades de operação dos elevadores em função das distâncias dos percursos a serem efetuados pelos elevadores. Entretanto estas recomendações não indicam ou levam em conta os níveis de aceleração ou conforto que estas velocidades podem gerar nos elevadores, principalmente se os mesmos não tiverem as manutenções e instalações devidamente certificadas.

2.2 Modernização de Elevadores

Os elevadores devem ter bela estética e estar em bom estado de conservação para transmitir conforto e segurança, e, então, para tornar as viagens mais agradáveis aos moradores e visitantes de um edifício, além de valorizar o imóvel. Porém, conforme os anos de operação, o equipamento sofre desgaste por conta do uso frequente.

O ciclo de vida de elevadores pode variar de acordo com a intensidade do seu uso, a qualidade do produto instalado e manutenção. Além disso, há alguns fatores externos como, condições do ambiente, destinação do equipamento, como elevadores de serviço em prédios residenciais, até vandalismo dos usuários. Embora um serviço de manutenção confiável consiga manter o elevador funcionando de forma segura entre 12 e 15 anos como em qualquer máquina, chegar-se-á ao fim da vida útil dos componentes.

Após realizada uma avaliação do equipamento em que, por questões logísticas e econômicas, chega-se à conclusão que não é mais sustentável mantê-lo, a solução é um projeto de modernização do equipamento. Para atender diferentes necessidades, como atualizar componentes obsoletos, aumentar a eficiência energética e se ajustar ao gosto dos condôminos, o trabalho pode ser executado de duas formas: parcial ou integral. A modernização parcial é aquela em que se prevê a substituição pontual dos componentes mais complexos, como a máquina de tração, até os mais simples, como as botoeiras, porém, não exige a troca da estrutura do elevador. Já a modernização integral é indicada quando é necessário substituir todo o equipamento, podendo reaproveitar apenas alguns componentes do elevador antigo, como guias, estrutura do contrapeso e cabos de sustentação.

2.3 Conforto e qualidade das viagens de elevadores

O tema do conforto em elevadores, especialmente elevadores de edifícios altos que exigem maior velocidade vem se tornando crescente como indicado no trabalho de Hernelind e Roivainen (2017). No mesmo trabalho, há sugestões de soluções baseadas no controle ativo das vibrações por meio de atuadores no sistema de corredeiras da cabina dos elevadores. Além do problema do conforto quanto à vibração, o conforto sonoro também tem sido temática para diversos artigos como no trabalho de Monge e Gómes (2020).

Zhang (2017) alega que o conforto das viagens de elevadores é definido de forma pessoal através da percepção do corpo humano sob um ambiente vibratório, incluindo efeitos físicos e psicológicos. Conforme Howkins (2006) afirma, a qualidade da locomoção vertical em ascensores é de difícil quantificação, já que esses aspectos subjetivos influenciam a percepção dos usuários, como a estética da cabina. Essas circunstâncias inerentes ao indivíduo na avaliação podem ser relacionadas também à sensação de segurança que o equipamento transmite ao usuário.

A norma BS ISO 18738:2003, define como devem ser feitas as medições e quais parâmetros são relevantes para determinar a qualidade das viagens de elevadores. Ela estabelece que a característica da locomoção depende dos níveis sonoros dentro da cabina e vibração no piso relevantes para a percepção dos passageiros associadas ao movimento do transporte.

A vibração consiste em movimentos inerentes a corpos dotados de massa e elasticidade. Segundo Rao (2011), qualquer movimento repetitivo em um intervalo de tempo é considerado um movimento vibratório. A quantidade de vezes em que um ciclo se repete em um segundo é

chamado frequência, medido em ciclos por segundo, ou Hertz (Hz). O inverso da frequência é chamado de período, medido em segundos. A ISO 18738:2006 define vibração como a variação ao longo do tempo da magnitude da aceleração e é expressa em unidades de m/s^2 .

Referente ao movimento dos elevadores, segundo Howkins (2006) pode-se assumir um comportamento principal de vibração na direção vertical (que é o do movimento de ascensão ou descida elevador) e vibrações horizontais secundárias e de menor intensidade, decorrentes, na maioria das vezes, a folgas e/ou movimentações das cargas (pessoas) que estão dentro da cabina do elevador. Estas vibrações (verticais e horizontais) são ligeiramente amortecidas e, nas condições de parada e arranque do elevador, elas se assemelham bastante a vibrações livres, uma vez que o sistema cabine, cabos e contrapeso se assemelham bastante a um sistema de um grau de liberdade.

3 TRANSMISSÃO DA VIBRAÇÃO AO CORPO HUMANO

Ao estar em contato com uma superfície vibrando, a energia vibratória será absorvida pelo corpo, como consequência da atenuação promovida pelos tecidos e órgãos. O modo como a vibração afeta a saúde, o conforto, a percepção e o enjoo devido ao movimento é em função do conteúdo em frequência da vibração. A percepção da vibração pelo corpo é dependente de como o corpo responde à variação da aceleração, da velocidade e do deslocamento, singularmente ou de forma combinada. Para o caso de viagens de elevadores, a avaliação da transmissão da vibração ao ser humano de acordo à norma ISO 2631-1:1997 se aplica a movimentos transmitidos ao corpo inteiro, como um todo, em um sistema de coordenadas com a origem em um ponto considerado de entrada de vibração no corpo. No caso deste trabalho: os pés de uma pessoa em pé.

Para cada avaliação sobre a forma da qual a vibração afeta o corpo humano e para cada direção na qual se quer avaliá-la são aplicados filtros de ponderação aos sinais de aceleração captados pelo instrumento usado para medi-la. Para esse trabalho, W_k é usado para a direção do eixo z, na direção da coluna vertebral, e W_d para as direções x, na direção de frente e costas, e y, na direção lateral, conforme a Tabela 3.1 e o item b) da Figura 3.1. Em relação aos eixos da cabina, o eixo x corresponde à direção da porta e do fundo da cabina, o eixo y às laterais da cabina, e o eixo z corresponde ao eixo da direção de ascensão do elevador.

De acordo com Biasuz (2011), os filtros servem para que se considerem apenas os sinais que virão a afetar as determinadas partes do corpo. As faixas de frequência são definidas a partir das frequências naturais dos membros que compõem o corpo humano. A gama de frequências considerada com potencial influência no corpo humano varia de 0,5 Hz a 80 Hz para o conforto.

Tabela 3.1 - Guia de aplicação das curvas de ponderação (Fonte: ISO 2631-1:1997).

Frequência Ponderada	Saúde	Conforto	Percepção	Enjoo
W_k	eixo z, em pé;	eixo z, sentado; <u>eixo z, em pé;</u> eixo x y e z, deitado;	eixo z, sentado; eixo z, em pé;	-
W_d	eixo y, em pé; eixo x, em pé;	eixo x, sentado; eixo y, sentado; <u>eixo x e y, em pé;</u> eixo y e z, com encosto;	eixo x, sentado; eixo y, sentado; eixo x e y, reclinado;	-
W_f	-	-	-	Vertical

A ponderação de frequência pode ser feita de forma analógica ou digital. As curvas de ponderação podem ser vistas na Figura 3.2 incluindo as limitações para banda de frequência.

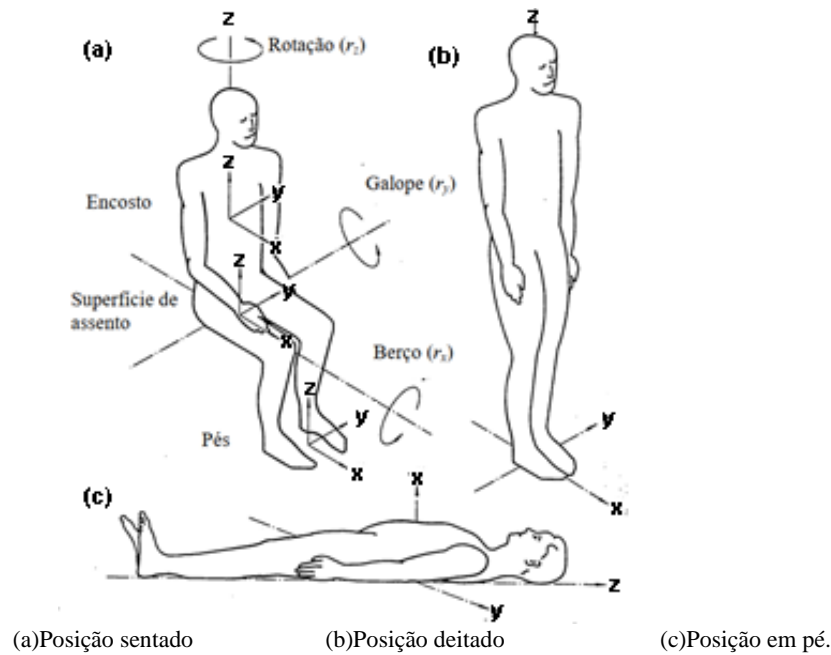


Figura 3.1- Eixos baicêntricos do corpo humano (Fonte: ISO 2631-1:1997).

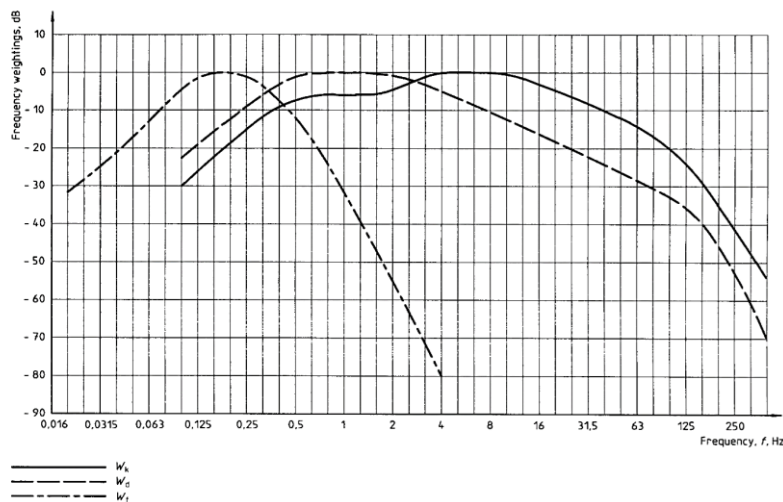


Figura 3.2 - Frequências ponderadas para os eixos x , y e z (Fonte: ISO 2631-1:1997).

3.1 Avaliação do conforto relacionado à vibração

De acordo com a norma ISO 2631-1:1997, a avaliação do conforto referente à vibração é uma estimativa do efeito vibratório em pessoas saudáveis cujos corpos estão submetidos a oscilação periódica, aleatória e/ou transiente durante as viagens. Para o conforto de pessoas em pé, a vibração ocorre segundo os três eixos de translação (x , y e z) na superfície principal que suporta o corpo. O método de avaliação de acordo com a norma se trata de medições do valor eficaz (ou RMS, *Root Mean Square*) ponderado da aceleração, que deve ser calculado de acordo com a Equação (1):

$$a_w = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_w^2(t) dt} \quad (1)$$

onde $a_w(t)$ é a aceleração RMS ponderada em (m/s^2) e T é a duração da medição, em (s). As ponderações em frequência usadas para a previsão dos efeitos da vibração no conforto são como dito anteriormente, para o caso de pessoas de pé, W_d e W_k . Estas ponderações deverão ser

aplicadas com os fatores multiplicativos k , tal que no eixo x (vibração no pavimento), $W_d, k_x = 1$, no eixo y (vibração no pavimento), $W_d, k_y = 1$, no eixo z (vibração no pavimento), $W_k, k_z = 1$.

A partir desses valores, aplicando a raiz quadrada da soma dos quadrados da aceleração de cada componente (eixos x , y e z) multiplicados pelo quadrado do fator de multiplicação específico (soma vetorial), obtém-se a aceleração RMS total ponderada a_v correspondente à vibração total, conforme a Equação (2):

$$a_v = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (2)$$

onde a_v é o valor eficaz total da aceleração ponderada em m/s^2 , k_x , k_y e k_z são os fatores multiplicadores respectivos para cada eixo e a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} são valores de aceleração ponderada relativas nos eixos x , y e z , respectivamente. Esse valor é comparado com os limites determinados pela norma ISO 2631-1:1997 para determinar o grau de conforto da viagem, conforme a Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Escala de conforto (Fonte: ISO 2631-1:1997).

Aceleração total RMS	Escala de percepção
< 0,315 m/s ²	Confortável
0,315 – 0,63 m/s ²	Levemente Confortável
0,5 – 1 m/s ²	Pouco Desconfortável
0,8 – 1,6 m/s ²	Desconfortável
1,25 – 2,5 m/s ²	Muito Desconfortável
> 2,0 m/s ²	Extremamente Desconfortável

Em geral, os limites de conforto ou desconforto de um passageiro devido às várias amplitudes de vibração são difíceis de determinar por conta da susceptibilidade de cada pessoa. Além disso, fatores do ambiente, como a temperatura local, a expectativa do passageiro e a atividade que ele executa durante a viagem, como ler ou se alimentar, mudam a sua avaliação sobre o conforto. Por conta disso, a norma ISO 2631-1:1997 estabelece indicações aproximadas das prováveis reações às variadas amplitudes para essa avaliação devido à vibração, como indica a escala de percepção da Tabela 3.2.

3.2 Parâmetros de avaliação dos elevadores

A norma BS ISO 18738:2003 apenas estabelece como deve ser as medições e quais são os parâmetros relevantes para comparação, pois os valores limites são meramente ilustrativos independentemente se os elevadores são residências, comerciais ou convencionais. Assim a referida norma especifica de que forma os parâmetros de vibração devem ser avaliados.

3.2.1 Aceleração

De acordo com Zhang (2017), a aceleração é quantificação da descrição de intensidade de uma vibração no corpo inteiro, portanto todos os tipos de avaliação de conforto são baseados nela. No caso de viagens de elevador, as pessoas podem se sentir mais leves ou mais pesadas por conta da presença da aceleração, e afirma que, por isso, pode afetá-las psicologicamente e fisicamente. Howkins (2006) afirma que a aceleração será percebida como boa enquanto se mantiver constante.

Segundo a norma BS ISO 18738:2003, os limites devem ser utilizados para definir as regiões sobre as quais quantidades de sinais são calculadas. Na Figura 3.3 são mostradas as regiões de aceleração decorrentes da movimentação do elevador que devem ser consideradas para análise, que são: (i) Limite 0: 0,5 s antes de a porta começar a fechar (início do movimento); (ii) Limite 1:

500 ms depois que o movimento começou; (iii) Limite 2: 500 ms antes de cessar o movimento; (iv) Limite 3: 0,5 s depois da porta abrir (final do movimento).

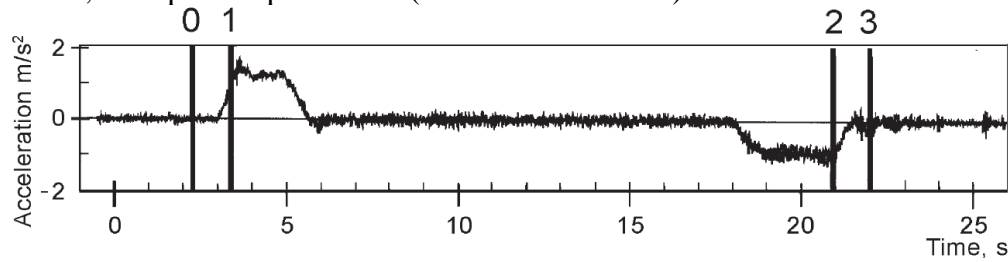


Figura 3.3 - Regiões para avaliação da aceleração em viagens de elevador (Fonte: BS ISO 18738:2003).

3.2.2 Sobre-Aceleração (*Jerk*)

Howkins (2006) define a sobre-aceleração como a taxa de variação da aceleração do eixo z, expressa em m/s^3 como na equação (3).

$$\text{Jerk}(t) = \frac{da_{wz}(t)}{dt} \quad (3)$$

Também conhecido pelo termo em inglês *Jerk*, esse é o parâmetro variável de viagens de elevador mais importante de se controlar, pois o corpo humano responde mais rapidamente a mudanças da taxa de aceleração (sobre-aceleração) do que as mudanças de velocidade (aceleração). Com mudança da aceleração, as forças sobre o corpo humano mudam, e se são severas o suficiente, os passageiros se sentirão muito desconfortáveis. Howkins (2006) define limites de conforto relacionados ao *Jerk*, como visto na Tabela 3.3. A norma ISO 18738:2003 define que o valor máximo de *Jerk* deve ser considerado ao fazer-se uma avaliação de conforto. A curva típica de sobre-aceleração é demonstrada na Figura 3.4.

Sobre-Aceleração	Avaliação do usuário
$< 2,0 \text{ m/s}^3$	agradável
$2,0 - 6,0 \text{ m/s}^3$	aceitável
$> 6,0 \text{ m/s}^3$	inaceitável

Tabela 3.3 - Valores guias para caracterização da sobre-aceleração (Fonte: Howkins, 2006).

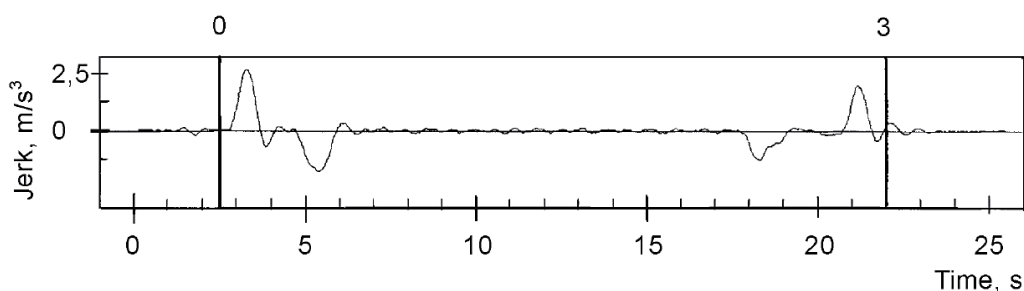


Figura 3.4 - Sinal da sobre-aceleração (Fonte: BS ISO 18738:2003).

4 METODOLOGIA

A avaliação do conforto das viagens de ascensores consiste em uma aplicação da metodologia indicada pela norma BS ISO 18738:2003. A caracterização dos resultados obtidos tem como parâmetro os valores fornecidos pela norma ISO 2631-1:1997 para a vibração e com os valores apontados por Howkins (2006) para a sobre-aceleração.

4.1 Dispositivos para medição

A medição da vibração da cabina durante a viagem requer o uso de um acelerômetro, um transdutor que converte energia cinética em sinal elétrico. O utilizado nesse trabalho é um transdutor triaxial. Além do transdutor, é necessário um aparelho que analise, faça as ponderações em frequências indicadas por norma e armazene os dados de vibração. Foi utilizado o instrumento VI-400Pro, S/N 12430, um medidor e analisador portátil de vibração que mede instantaneamente em quatro canais de entrada de sinal. Para este trabalho, três dos canais foram utilizados para medir a vibração triaxial (Figura 4.1). Esse equipamento é capaz de realizar a ponderação das frequências digitalmente. Além de medir as vibrações, o equipamento deve ter memória interna suficiente para armazenar os dados gravados a uma taxa ao menos de 200 Hz em medições de até um minuto.

A configuração do VI-400Pro é realizado através do software QuestSuite Professional II que permite definir qual será a curva de ponderação por frequência empregada para a medição como indicado anteriormente.

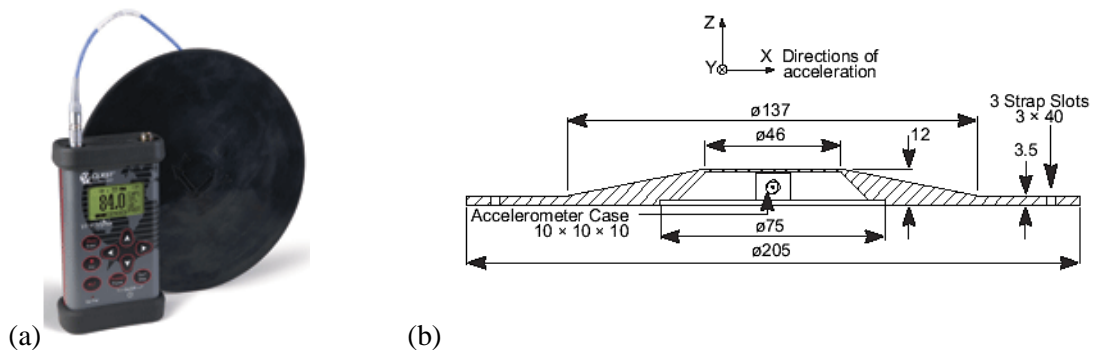


Figura 4.1 - Equipamento (a)VI-400Pro e *seatpad* usados nas medições. (b) Detalhe *seatpad* (Fonte: Manual VI-400Pro).

4.2 Instrumentação do elevador

A medição da vibração deve ser medida num sistema de coordenada com origem num ponto considerado de entrada da vibração no corpo humano. Seguindo a orientação da ISO-18738-2003, para a instrumentação no interior da cabina é necessário que o *seatpad* seja posicionado no centro da mesma, como indicado na Figura 4.2. Com o auxílio dos pés, apoiam-se sob o dispositivo para se ter melhor fixação, evitando que ocorram interferências de medição, como a rotação do *seatpad* sob o piso durante a viagem. O correto posicionamento do acelerômetro tem importância para que a avaliação da exposição à vibração seja consistente. A orientação dos eixos de medição deve coincidir com as orientações indicativas da norma (Figura 4.2).

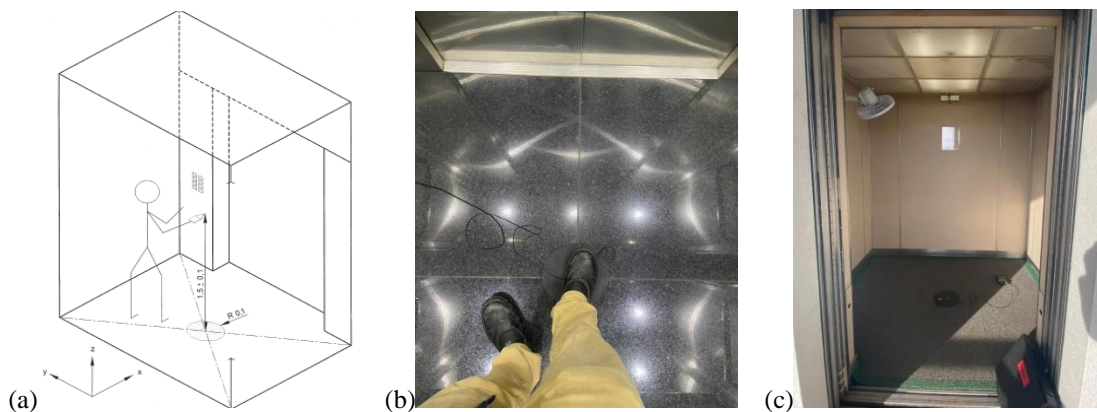


Figura 4.2 - (a) Posicionamento do transdutor no interior da cabina. (b) Pé em cima do transdutor para assegurar contato. (c) Vista geral do instrumento na cabina (Fonte: Autor e ISO-18738:2003.).

O acelerômetro é posicionado seguindo o sistema de coordenadas triaxial, como definido pela ISO-18738-2003. Além do correto alinhamento dos eixos do acelerômetro, é necessário que ele seja posicionado o mais próximo possível do eixo imaginário central do transporte, para isso, foi usado como referência a marcação do rejunte das cabinas novas e da linha de abertura de porta para as cabinas antigas. De acordo com a norma ISO 2631-1:1997, todas as medições foram feitas com apenas uma pessoa dentro da cabina.

As direções dos eixos do transdutor foram: (a) direção horizontal x – na direção da porta-fundos da cabina; (b) direção horizontal y – na direção lateral da cabina e (c) direção vertical z – na direção do eixo da cabina do elevador.

4.3 Elevadores avaliados

Os elevadores medidos são elétricos e encontravam-se em condições de uso. O prédio cujos elevadores foram avaliados é o Instituto de Previdência do Estado do Rio Grande do Sul – IPERGS, localizado na Rua Borges de Medeiros, 1945, em Porto Alegre, RS, sendo portanto elevadores comerciais, com muitos ciclos de uso ao longo do dia. Os elevadores foram caracterizados de acordo com suas posições no saguão, classificados em modernizados ou antigos, conforme a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Características dos Elevadores.

Nº de Obra	Marca	Posição	Classificação	Quantidade de medições
142905	TK Elevator	Presidente	Modernizado	27
142906	TK Elevator	Lateral	Modernizado	29
142909	Atlas Schindler	Presidente	Antigo	18
142910	Atlas Schindler	Lateral	Antigo	16

Os elevadores 142905 e 142906 tiveram sua modernização realizada pela TK Elevator, e o equipamento liberado a uso em 05/05/2021. Uma foto do elevador antes e depois da modernização está indicado na Figura 4.3. As especificações das máquinas de tração estão na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Características das máquinas de Tração.

Nº de Obra	Velocidade (m/min)	Capacidade (kg)	Quadro de Comando	Potência (CV)	Ano
142905	150	1500	FDG M28	26,2	2021
142906	150	1500	FDG M28	26,2	2021
142909	150	1400	AC2 a relé	40	1971
142910	150	1400	AC2 a relé	40	1971

As medições foram realizadas nas semanas do mês de junho de 2021. Os equipamentos TK Elevator modernizados estão com seu plano de manutenção preventiva sendo executados mensalmente desde sua liberação. Não foram encontradas informações sobre plano de manutenção dos elevadores Atlas. Havia limitações nas medições dos elevadores antigos ocasionados pela característica dos elevadores e pela precariedade do equipamento. Os elevadores antigos só atendiam chamados a alguns andares por conta da especificidade do tráfego de cada equipamento em cada andar. Já os elevadores modernizados atendem a todos andares, portanto, realizaram-se 7

viagens comuns aos quatro equipamentos, totalizando 31 medições. Também foram feitas viagens aleatórias pela caixa de corrida nos quatro equipamentos para obter-se mais dados. As viagens feitas em cada elevador podem ser vistas no Apêndice A.

Os sistemas de controle presentes no quadro de comando FDG (Frequencydyne Gold) dos elevadores modernizados permitem definir numericamente parâmetros relacionados a taxa de variação da aceleração, diferentemente do equipamento antigo. Uma das etapas do processo de modernização trata-se do ajuste desse parâmetro em busca da curva de desaceleração e aceleração que gere as viagens mais confortáveis possíveis. Os elevadores com quadro de comando AC2 a relé tem a característica de arranques e paradas bruscos devido ao seu modo de operação.

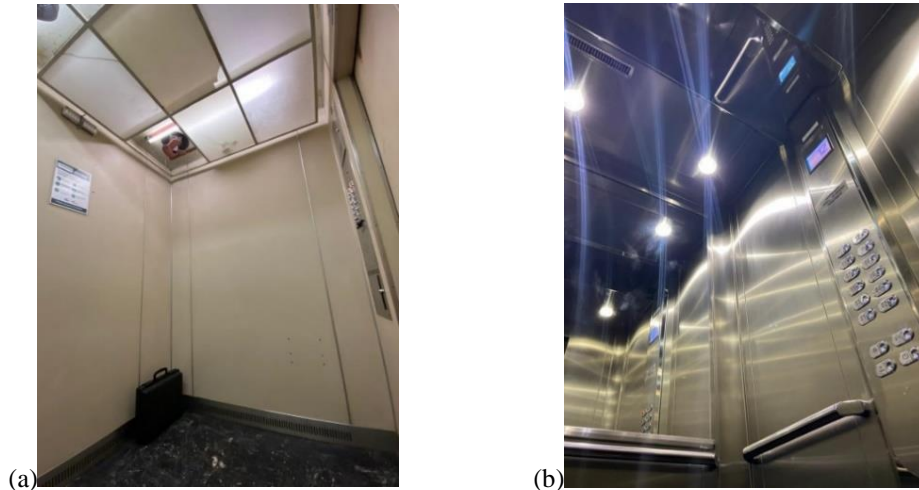


Figura 4.3 - Interior da cabina (a) antes e (b) depois da modernização respectivamente.

4.4 Processamento dos dados

Os procedimentos para avaliação das vibrações definidos pela norma ISO 2631-1:1997 incluem o método de tratamento do sinal da vibração em função do tempo e da representação em bandas de frequências. Para definição do *Jerk* durante o processamento, os sinais de aceleração na direção axial z gravados pelo aparelho foram filtrados por um filtro correspondente à direção z . Após, por recomendação da norma, um filtro passa-baixa de 10 Hz deve ser utilizado de forma a ter uma atenuação de 3dB a aproximadamente 1,5 a frequência de corte de 10Hz com o intuito de maximizar a relação sinal/ruído e atraso de fase linear na faixa de frequências de interesse. Este processo de pós-processamento foi implementado no software *MATLAB R2019a*, o resultado pode ser visto na Figura 4.4. Após filtrados, os dados são ajustados à uma curva gerada através de um *spline* (uma série de polinômios unidos por pontos que atendem ao critério de suavidade e diferenciabilidade). Esta recomendação da norma visa obter uma curva suave que represente a aceleração e que possa, posteriormente, avaliar a sua derivada para assim encontrar a curva da sobre-aceleração. A avaliação do *Jerk* deve ser feita avaliando-se o máximo valor de ocorrência nas regiões “0” e “3”, indicados na Figura 3.4.

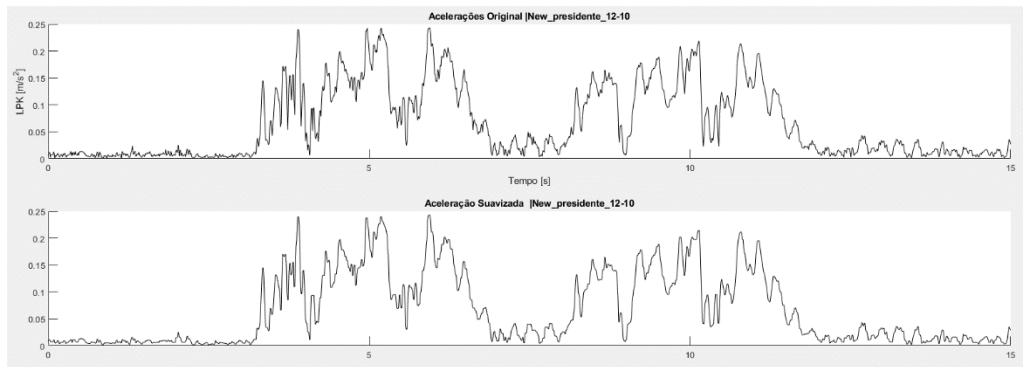


Figura 4.4 - Aceleração antes e depois do filtro de 10 Hz respectivamente.

5 RESULTADOS E ANÁLISES

As medições foram executadas de forma a reproduzir a realidade do uso cotidiano dos equipamentos pelos passageiros do prédio. A coleta foi realizada com um tempo total de aquisição médio de 24 segundos. A categorização de cada viagem assim como os valores numéricos obtidos em relação à sobre-aceleração pode ser vista no Apêndice B. Conforme o estipulado pela norma ISO 2631-1:1997, e baseando-se nos resultados apresentados no Apêndice B, os quatro equipamentos se encontram na faixa considerável agradável para avaliação da aceleração RMS total. De acordo com o parâmetro de Howkins (2006) para a sobre-aceleração, os elevadores modernizados se encontram na faixa de agradável a aceitável, já em todos os ascensores não modernizados os valores medidos são considerados inaceitáveis.

5.1 Da avaliação dos parâmetros dos elevadores

Para obter-se a visualização gráfica dos parâmetros, utilizou-se o software Matlab R2019a. Para a avaliação nas seções 5.1.1 e 5.1.3, foi escolhida a viagem de descida entre os andares 12 e 10 realizadas no elevador presidente antes e depois de modernizado para se comparar com o esperado pela norma ISO 18738:2003.

5.1.1 Aceleração

Na Figura 5.1 e na Figura 5.2, mostram-se os gráficos típicos de aceleração de viagens nos elevadores medidos com os valores RMS obtidos pelo equipamento comercial VI400-Pro e graficados com o Matlab R2019a.

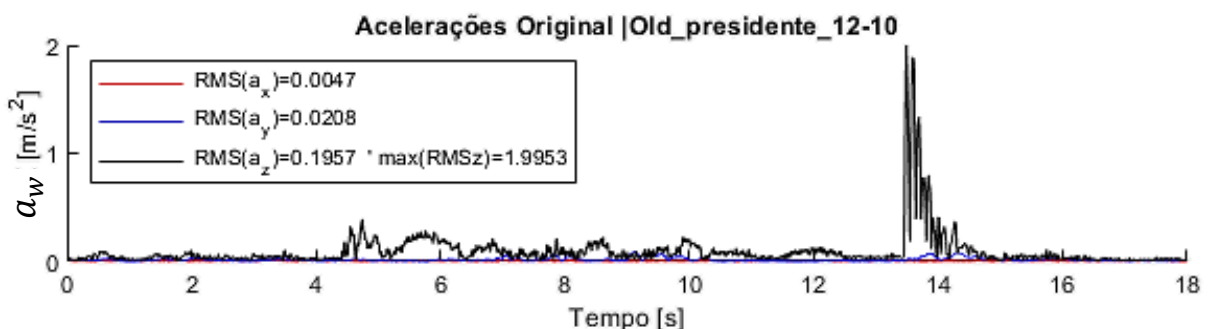


Figura 5.1 - Aceleração RMS em cada direção axial z do elevador antigo presidente para viagem do 12º ao 10º andar.

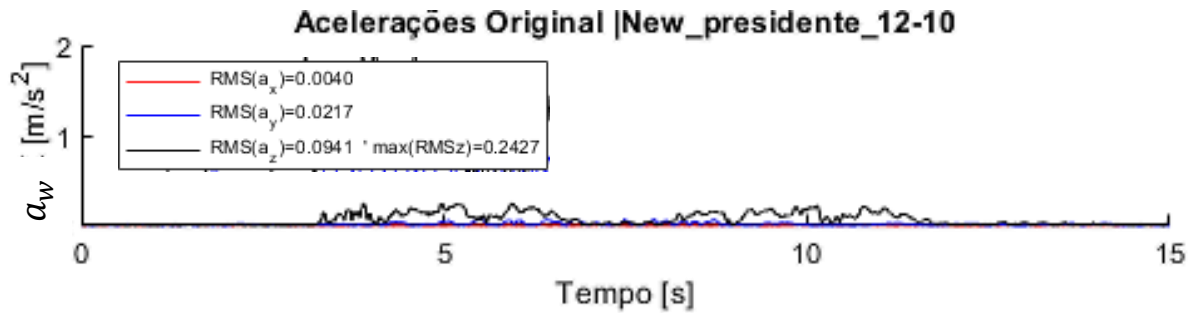


Figura 5.2 - Aceleração RMS em cada direção axial z do elevador modernizado presidente para viagem do 12º ao 10º andar.

Esperava-se um sinal da aceleração que se repetisse durante o arranque e a parada. Na Figura 5.1, pode-se ver que, para o elevador antigo, o arranque ocorre com menos vibrações, mas há um pico de aceleração na direção axial z durante sua parada, em que o passageiro sente o impulso intenso ao chegar no andar de destino. Essa característica se repetiu em todos os elevadores antigos. Esse desajuste é esperado em um elevador controlado por AC2 a relé com muito tempo de uso. Já na Figura 5.2, observa-se que as regiões de aceleração e de desaceleração da curva são mais semelhantes, e não ocorrem picos destoantes de aceleração em momento algum. Essa característica se repetiu em todos os elevadores modernizados, mostrando que há maior controle sobre o parâmetro.

5.1.2 Da avaliação de conforto em relação à aceleração RMS total

A Tabela 5.1 mostra algumas informações das medições das acelerações RMS totais para cada um dos elevadores avaliados considerando todas as medições feitas. No Apêndice C, encontra-se a mesma tabela apenas considerando as viagens comuns aos quatro elevadores. Os valores encontrados para cada viagem de cada elevador se encontram no Apêndice A.

Tabela 5.1 - Resultados encontrados da aceleração RMS total por elevador de todas medições.

Nº da Obra	Elevador	a_v médio (m/s ²)	a_v máximo (m/s ²)
142905	Presidente modernizado	0,072	0,102
142906	Lateral Modernizado	0,086	0,098
142909	Presidente Antigo	0,166	0,202
142910	Lateral Antigo	0,175	0,263

Em todas as medições dos elevadores encontraram-se valores de aceleração RMS total na faixa considerada confortável, porém a média de aceleração RMS total encontrada nos elevadores modernizados é aproximadamente metade da encontrada nos elevadores antigos. Como já era esperado para medições de vibrações em elevadores, a aceleração RMS eficaz na direção axial z foi a que teve maior influência. No caso dos elevadores antigos, estão duas ordens de grandeza maior que na direção axial x e uma ordem de grandeza maior que na direção axial y.

5.1.3 Sobre-Aceleração

Nas Figuras 5.3 e 5.4, mostram-se os gráficos típicos de sobre-aceleração em viagens dos elevadores, após processamento dos dados medidos, com os valores RMS obtidos pelo equipamento comercial VI400-Pro.

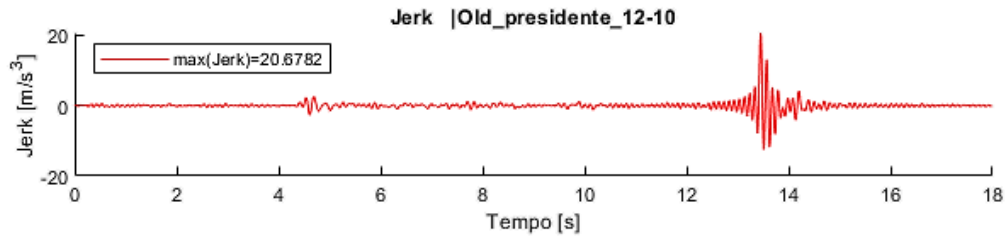


Figura 5.3 - Sinal da sobre-aceleração do elevador antigo presidente para viagem do 12° ao 10° andar.

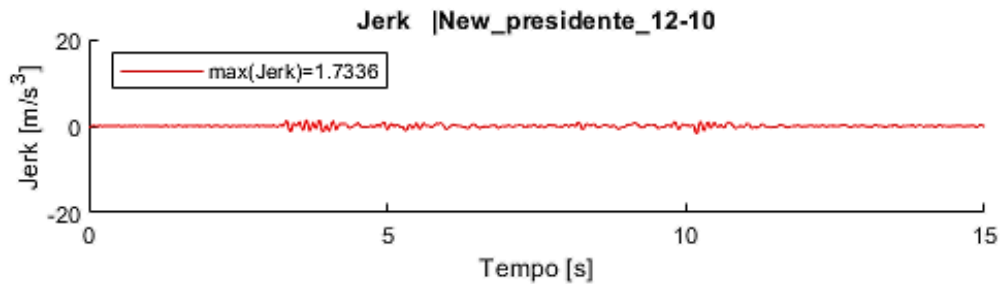


Figura 5.4 - Sinal da sobre-aceleração do elevador modernizado presidente para viagem do 12° ao 10° andar.

Também se esperava valores semelhantes na faixa de desaceleração e de arranque, porém para os valores encontrados de *jerk* houve uma variação expressiva entre os elevadores modernizados e os antigos. Os elevadores antigos também se caracterizaram por paradas bruscas ao chegar no andar de destino, já os elevadores modernizados realizavam-nas de forma mais suave.

5.1.4 Da avaliação de conforto em relação à sobre-aceleração

A Tabela 5.2 mostra algumas informações das medições de sobre-acelerações máximas para cada um dos elevadores avaliados considerando todas as medições feitas. No Apêndice B, encontra-se a mesma tabela apenas considerando as viagens comuns aos quatro elevadores, e também informações sobre a categorização de cada viagem em relação à sobre-aceleração máxima encontrada. Os valores encontrados para cada viagem de cada elevador se encontram no Apêndice A.

Tabela 5.2 - Resultados encontrados de sobre-aceleração máxima por elevador de todas medições.

Nº de Obra	Elevador	Média do máximo <i>Jerk</i> (m/s ³)	Máximo máximo <i>Jerk</i> (m/s ³)	Referência de Conforto (Howkins)
142905	Presidente Modernizado	1,33	1,96	Agradável Jerk < 2,0 m/s ³
142906	Lateral Modernizado	1,49	2,19	Aceitável 2,0 < Jerk < 6,0 m/s ³
142909	Presidente Antigo	15,45	20,88	Inaceitável Jerk > 6,0 m/s ³
142910	Lateral Antigo	12,79	18,80	Inaceitável Jerk > 6,0 m/s ³

Nos elevadores modernizados, aproximadamente 7% das medições se encontraram na faixa aceitável e 93% na faixa agradável. Para as medições realizadas nos elevadores antigos, entretanto, 100% das viagens se encontraram na faixa de inaceitável. Há uma redução de ordem de grandeza entre os elevadores modernizados e os antigos, ou seja, para o passageiro, o elevador para ou acelera progressivamente.

6 CONCLUSÕES

A avaliação em relação aos parâmetros de conforto definidos pela norma ISO 18738:2003 permitiu evidenciar de forma quantitativa os benefícios trazidos por um projeto de modernização integral de elevadores. Conclui-se também que as vibrações na direção axial z são predominantes em relação às outras direções para o cálculo de aceleração RMS total.

Em relação aos limites propostos pela norma ISO 2631:1997 de vibração total transmitida ao corpo humano durante o percurso, todas viagens feitas nos elevadores se mantiveram na faixa de confortável, porém houve uma redução da vibração de aproximadamente 54% para os casos modernizados ao comparar-se com os antigos. As viagens feitas nos elevadores não modernizados caracterizaram-se por picos de aceleração RMS na direção axial z nas chegadas ao andar.

Em relação a classificação sugerida por Howkins (2006) para a sobre-aceleração máxima, 100% das viagens feitas nos ascensores antigos são consideradas inaceitáveis, enquanto, para os elevadores modernizados, aproximadamente, 93% são consideradas agradáveis e 7% aceitáveis. Houve uma redução por volta de 90% do *Jerk* máximo medido nos elevadores modernizados em relação aos elevadores antigos. Observa-se que em todas as viagens dos elevadores antigos, apenas na chegada ao andar que o valor de sobre-aceleração atingia o nível inaceitável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATLAS-SCHINDLER. **Manual de Transporte Vertical em Edifícios, Elevadores de Passageiros, Escadas Rolantes, Obra Civil e Cálculo de Tráfego**, Disponível em: www.atlas.schindler.com, acessado em 10/06/2021.

BIASUZ, S. A. **Estudo da adequação da vibração de elevadores a normas internacionais**. 2011. 30f. Monografia – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

BIASUZ, S. A., TOSO, M. A., GOMES, H. M. **Vibração em elevadores de passageiros: adequação a normas para saúde e conforto**. CONEM 2016, Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 21-25 Agosto, Fortaleza, CE, 2016.

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

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

CULAU, E. L., QUINTAS, J. P. R., GOMES, H. M. **Análise comparativa de vibrações e conforto em elevadores com diferentes sistemas de acionamento**. Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural. ASAE, Associação Sul-Americana de Engenharia Estrutural, V.15, n. 1, p.61-8, jan;/abr. 2018. <http://dx.doi.org/10535/rsae.v15i1.7208>

GUO, L., JIANG, X. **Research on Horizontal Vibration of Traction Elevator**. In: Wang K., Wang Y., Strandhagen J., Yu T. (Eds) Advanced Manufacturing and Automation VIII. IWAMA 2018. Lecture Notes in Electrical Engineering, vol. 484. 2019. Springer, Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-13-2375-1_18

HERNELIND, J., ROIVAINEN, G. **High rise elevators – challenges and solutions in ride comfort simulations**. Science in the Age of Experience, 2017. <http://www.3ds.com/events/science-in-the-age-of-experience>.

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

ISO 2631-1:1997. **Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole body vibration – Part 1: General requirements**. International Organization for Standardization, 1997.

MONGE, R., GÓMEZ, A. **Methodology to identify noise and vibrations problems for ride quality improvements**. Instituto Tecnológico de Aragón, Zaragoza, Spain, 2020.

QUEST-TECHNOLOGY. **Real-time vibration Analyzers, VI-400PRO, Preliminary owner’s manual**. 2005.

RAO, S. S. **Mechanical Vibrations**, 6th Edition, Pearson Ed, 1112p., 2011.

TKE Elevators, **Six Warning Signs Your Elevators Need to be Updated**, 2021. <https://www.tkelevator.com/us-en/company/insights/six-warning-signs-your-elevators-need-to-be-updated.html>. Acessado 11/06/2021.

VERMA, S. **Invention Story of Elevator**. Engineering Garage: Na EE world online resource. October 3, 2013. <https://www.engineersgarage.com/invention-story-of-elevator/> . Acessado em 10/06/2021.

ZHANG, Y., SUN, X., SHAO, X., SU, W. **Elevator ride comfort monitoring and evaluation using Smartphones**. J. of Mech. Systems and Signal Processing, V. 105: 377–390, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.12.005>

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Medições e processamento das viagens.

Nro. Medição	Elevador	Viagem	Tempo (s)	a_{wmax} (m/s ²)	a_{wz} (m/s)	a_{wx} (m/s ²)	a_{wy} (m/s ²)	a_v (m/s ²)	Max Jerk (m/s ³)
1	Antigo Lateral	12 a 10	17,00	1,91	0,17	0,0045	0,0284	0,17	11,58
2	Antigo Lateral	10 a 7	19,00	1,30	0,15	0,0041	0,0350	0,15	9,23
3	Antigo Lateral	7 a 6	14,01	1,74	0,22	0,0041	0,0303	0,22	12,73
4	Antigo Lateral	7 a 6	14,01	1,29	0,18	0,0045	0,0279	0,18	11,34
5	Antigo Lateral	12 a 11	11,01	2,21	0,23	0,0043	0,0207	0,23	13,55
6	Antigo Lateral	12 a 1	35,00	1,15	0,10	0,0042	0,0501	0,11	10,25
7	Antigo Lateral	11 a 1	34,00	1,16	0,11	0,0042	0,0532	0,12	10,62
8	Antigo Lateral	11 a 12	14,00	1,97	0,20	0,0042	0,0684	0,21	13,15
9	Antigo Lateral	10 a 12	16,00	2,48	0,18	0,0046	0,0206	0,18	18,12
10	Antigo Lateral	7 a 10	20,00	1,50	0,15	0,0042	0,0236	0,15	12,57
11	Antigo Lateral	3 a 1	17,00	1,16	0,15	0,0042	0,0283	0,15	9,67
12	Antigo Lateral	2 a 1	12,01	1,07	0,23	0,0039	0,0266	0,23	9,29
13	Antigo Lateral	1 a 12	36,00	2,57	0,12	0,0043	0,0333	0,13	18,80
14	Antigo Lateral	1 a 11	34,00	2,24	0,12	0,0044	0,0329	0,13	18,02
15	Antigo Lateral	1 a 4	19,00	1,64	0,17	0,0043	0,0419	0,18	12,31
16	Antigo Lateral	4 a 1	21,00	1,33	0,14	0,0043	0,0331	0,14	11,53
17	Antigo Lateral	1 a 3	16,00	1,57	0,20	0,0042	0,0416	0,20	13,60
18	Antigo Lateral	1 a 2	13,00	1,58	0,26	0,0045	0,0406	0,26	13,81
19	Modernizado Presidente	12 a 11	20,01	0,40	0,09	0,0039	0,0449	0,10	1,59
20	Modernizado Presidente	12 a 10	15,01	0,24	0,07	0,0040	0,0217	0,07	1,73
21	Modernizado Presidente	12 a 8	27,00	0,24	0,07	0,0045	0,0207	0,07	1,52
22	Modernizado Presidente	12 a 1	37,00	0,24	0,06	0,0044	0,0229	0,06	1,15
23	Modernizado Presidente	11 a 12	24,00	0,38	0,08	0,0044	0,0129	0,08	1,91
24	Modernizado Presidente	11 a 1	32,00	0,27	0,07	0,0043	0,0390	0,08	1,96
25	Modernizado Presidente	10 a 12	26,00	0,27	0,07	0,0042	0,0187	0,07	1,63
26	Modernizado Presidente	10 a 7	28,00	0,20	0,06	0,0044	0,0152	0,06	1,33
27	Modernizado Presidente	10 a 5	25,00	0,20	0,06	0,0040	0,0188	0,07	1,14
28	Modernizado Presidente	9 a 5	27,00	0,19	0,06	0,0040	0,0141	0,06	1,18
29	Modernizado Presidente	8 a 12	26,00	0,20	0,07	0,0043	0,0168	0,07	1,63
30	Modernizado Presidente	7 a 10	28,00	0,21	0,06	0,0046	0,0142	0,07	1,57
31	Modernizado Presidente	7 a 6	22,00	0,32	0,08	0,0046	0,0064	0,08	1,38
32	Modernizado Presidente	7 a 5	25,00	0,24	0,07	0,0046	0,0097	0,07	1,23
33	Modernizado Presidente	6 a 7	21,00	0,33	0,08	0,0043	0,0102	0,08	1,34
34	Modernizado Presidente	5 a 10	27,00	0,19	0,06	0,0046	0,0159	0,06	1,22
35	Modernizado Presidente	5 a 9	26,00	0,19	0,06	0,0044	0,0129	0,06	1,39
36	Modernizado Presidente	5 a 7	25,00	0,24	0,07	0,0042	0,0096	0,07	1,17
37	Modernizado Presidente	5 a 1	28,00	0,20	0,06	0,0045	0,0198	0,07	0,84
38	Modernizado Presidente	3 a 1	25,00	0,27	0,07	0,0041	0,0160	0,08	0,99
39	Modernizado Presidente	2 a 1	23,00	0,44	0,09	0,0042	0,0350	0,09	0,98

Tabela A.2 - Medições e processamento das viagens (cont.).

Nro. Medição	Elevador	Viagem	Tempo (s)	a_{wmax} (m/s ²)	a_{wz} (m/s)	a_{wx} (m/s ²)	a_{wy} (m/s ²)	a_v (m/s ²)	Max Jerk (m/s ³)
40	Modernizado Presidente	1 a 12	37,00	0,21	0,05	0,0043	0,0181	0,06	1,52
41	Modernizado Presidente	1 a 11	35,00	0,22	0,06	0,0043	0,0200	0,06	1,50
42	Modernizado Presidente	1 a 2	21,00	0,43	0,09	0,0043	0,0351	0,09	1,10
43	Modernizado Presidente	1 a 3	26,00	0,30	0,07	0,0045	0,0301	0,08	0,98
44	Modernizado Presidente	1 a 4	30,00	0,23	0,06	0,0044	0,0188	0,06	0,91
45	Modernizado Presidente	1 a 5	26,00	0,22	0,06	0,0046	0,0200	0,07	0,91
46	Modernizado Lateral	9 a 1	32,00	0,27	0,07	0,0042	0,0201	0,07	2,03
47	Antigo Presidente	9 a 1	23,00	1,33	0,17	0,0044	0,0719	0,18	12,25
48	Antigo Presidente	1 a 5	20,00	1,26	0,15	0,0047	0,0297	0,15	13,26
49	Antigo Presidente	1 a 3	19,00	1,11	0,15	0,0045	0,0333	0,16	12,05
50	Antigo Presidente	12 a 11	15,00	2,19	0,20	0,0044	0,0164	0,20	18,44
51	Antigo Presidente	11 a 1	32,00	1,45	0,13	0,0047	0,0436	0,14	12,46
52	Antigo Presidente	12 a 10	18,00	2,00	0,20	0,0047	0,0208	0,20	20,68
53	Antigo Presidente	10 a 7	24,00	1,74	0,17	0,0045	0,0196	0,17	20,74
54	Antigo Presidente	7 a 5	21,00	1,70	0,16	0,0045	0,0285	0,17	17,02
55	Antigo Presidente	5 a 10	21,00	1,58	0,16	0,0043	0,0521	0,16	15,70
56	Antigo Presidente	5 a 7	20,00	1,46	0,16	0,0046	0,0495	0,16	15,16
57	Antigo Presidente	7 a 10	16,00	1,55	0,17	0,0045	0,0362	0,17	13,89
58	Antigo Presidente	7 a 10	19,00	1,51	0,15	0,0047	0,0315	0,16	15,55
59	Antigo Presidente	12 a 10	17,00	2,09	0,19	0,0050	0,0240	0,19	21,08
60	Antigo Presidente	7 a 10	18,00	1,51	0,16	0,0047	0,0534	0,16	14,43
61	Antigo Presidente	1 a 12	37,00	1,70	0,12	0,0045	0,0408	0,12	12,68
62	Antigo Presidente	1 a 9	30,00	1,70	0,14	0,0044	0,0504	0,15	11,87
63	Modernizado Lateral	1 a 2	20,00	0,42	0,09	0,0042	0,0071	0,09	1,10
64	Modernizado Lateral	12 a 11	22,00	0,39	0,08	0,0044	0,0060	0,08	1,91
65	Modernizado Lateral	12 a 10	23,00	0,27	0,08	0,0043	0,0070	0,08	2,07
66	Modernizado Lateral	12 a 7	27,00	0,25	0,07	0,0045	0,0111	0,07	1,21
67	Modernizado Lateral	12 a 1	35,00	0,25	0,06	0,0042	0,0337	0,07	1,42
68	Modernizado Lateral	11 a 1	33,00	0,25	0,06	0,0043	0,0312	0,07	1,24
69	Modernizado Lateral	11 a 12	20,00	0,42	0,09	0,0040	0,0072	0,09	2,19
70	Modernizado Lateral	10 a 12	21,00	0,29	0,09	0,0049	0,0126	0,09	1,75
71	Modernizado Lateral	10 a 7	25,00	0,21	0,07	0,0043	0,0082	0,07	1,77
72	Modernizado Lateral	10 a 5	28,00	0,23	0,07	0,0042	0,0136	0,07	1,32
73	Modernizado Lateral	9 a 5	24,00	0,25	0,08	0,0048	0,0521	0,10	1,44
74	Modernizado Lateral	7 a 12	26,00	0,30	0,08	0,0043	0,0266	0,08	1,46
75	Modernizado Lateral	7 a 10	21,00	0,22	0,08	0,0040	0,0107	0,08	1,57
76	Modernizado Lateral	7 a 6	21,00	0,35	0,08	0,0046	0,0273	0,09	1,29
78	Modernizado Lateral	7 a 5	22,00	0,27	0,08	0,0045	0,0083	0,08	1,12
79	Modernizado Lateral	6 a 7	16,00	0,35	0,09	0,0047	0,0197	0,09	1,36

Tabela A.3 - Medições e processamento das viagens (cont.).

Nº. Medição	Elevador	Viagem	Tempo (s)	a_{wmax} (m/s ²)	a_{wz} (m/s)	a_{wx} (m/s ²)	a_{wy} (m/s ²)	a_v (m/s ²)	Max Jerk (m/s ³)
80	Modernizado Lateral	5 a 10	25,00	0,23	0,08	0,0048	0,0425	0,09	1,35
81	Modernizado Lateral	5 a 9	25,00	0,30	0,08	0,0045	0,0389	0,09	1,93
82	Modernizado Lateral	5 a 7	20,00	0,26	0,08	0,0041	0,0081	0,08	1,17
83	Modernizado Lateral	5 a 1	28,00	0,31	0,08	0,0045	0,0386	0,09	1,21
84	Modernizado Lateral	4 a 1	22,00	0,28	0,08	0,0044	0,0464	0,09	1,32
85	Modernizado Lateral	3 a 1	20,00	0,30	0,08	0,0048	0,0079	0,08	1,13
86	Modernizado Lateral	2 a 1	19,00	0,42	0,09	0,0041	0,0070	0,09	1,21
87	Modernizado Lateral	1 a 12	34,00	0,38	0,08	0,0046	0,0497	0,10	1,92
88	Modernizado Lateral	1 a 11	33,00	0,32	0,07	0,0046	0,0517	0,09	2,05
89	Modernizado Lateral	1 a 5	23,00	0,24	0,08	0,0042	0,0194	0,08	1,37
90	Modernizado Lateral	1 a 4	19,00	0,26	0,08	0,0046	0,0128	0,09	1,02
91	Modernizado Lateral	1 a 3	20,00	0,31	0,09	0,0042	0,0094	0,09	1,31

Tabela A.4 - Quantidade de medições por viagem em cada elevador*.

Quantidade de medições em cada elevador por viagem

Viagem	lateral antigo	lateral modernizado	presidente antigo	presidente modernizado	Total
7 a 10	1	1	3	1	6
12 a 10	1	1	2	1	5
1 a 12	1	1	1	1	4
1 a 3	1	1	1	1	4
10 a 7	1	1	1	1	4
11 a 1	1	1	1	1	4
12 a 11	1	1	1	1	4
7 a 6	2	1		1	4
1 a 11	1	1		1	3
1 a 2	1	1		1	3
1 a 4	1	1		1	3
1 a 5		1	1	1	3
10 a 12	1	1		1	3
11 a 12	1	1		1	3
12 a 1	1	1		1	3
2 a 1	1	1		1	3
3 a 1	1	1		1	3
5 a 10		1	1	1	3
5 a 7		1	1	1	3
7 a 5		1	1	1	3
10 a 5		1		1	2
4 a 1	1	1			2
5 a 1		1		1	2
5 a 9		1		1	2
6 a 7		1		1	2
9 a 1		1	1		2
9 a 5		1		1	2
1 a 9			1		1
12 a 7		1			1
12 a 8				1	1
7 a 12		1			1
8 a 12				1	1
Total	18	29	16	27	90

*Onde as viagens comuns aos quatro elevadores são dos andares 7° ao 10°, 12° ao 10°, 1° ao 12°, 1° ao 3°, 10° ao 7°, 11° ao 1°, 12° ao 1°. Totalizando 7 viagens comuns.

APÊNDICE B

Tabela B.1 - Classificação da sobre-aceleração de acordo com Howkins (2006)*.

Classificação da sobre-aceleração máxima de cada viagem por elevador				
Viagem	lateral antigo	lateral modernizado	presidente antigo	presidente modernizado
1 a 11	18,02	2,05		1,50
1 a 12	18,80	1,92	12,68	1,52
1 a 2	13,81	1,10		1,10
1 a 3	13,60	1,31	12,05	0,98
1 a 4	12,31	1,02		0,91
1 a 5		1,37	13,26	0,91
1 a 9			11,87	
10 a 12	18,12	1,75		1,63
10 a 5		1,32		1,14
10 a 7	9,23	1,77	20,74	1,33
11 a 1	10,62	1,24	12,46	1,96
11 a 12	13,15	2,19		1,91
12 a 1	10,25	1,42		1,15
12 a 10	11,58	2,07	20,88	1,73
12 a 11	13,55	1,91	18,44	1,59
12 a 7		1,21		
12 a 8				1,52
2 a 1	9,29	1,21		0,98
3 a 1	9,67	1,13		0,99
4 a 1	11,53	1,32		
5 a 1		1,21		0,84
5 a 10		1,35	15,70	1,22
5 a 7		1,17	15,16	1,17
5 a 9		1,93		1,39
6 a 7		1,36		1,34
7 a 10	12,57	1,57	14,62	1,57
7 a 12		1,46		
7 a 5		1,12	17,02	1,23
7 a 6	12,03	1,29		1,38
8 a 12				1,63
9 a 1		2,03	12,25	
9 a 5		1,44		1,18

*Onde o sinal verde sinaliza que está na faixa agradável, o sinal amarelo sinaliza que está na faixa aceitável, já o vermelho é a faixa inaceitável, de acordo com Howkins (2006).

Tabela B.2 - Resultados encontrados de sobre-aceleração máxima de viagens comuns aos quatro elevadores.

Nº. de Obra	Elevador	Quantidade de medições	Média do Máximo Jerk (m/s ³)	Máximo do Máximo Jerk (m/s ³)
142905	Presidente Modernizado	7	1,53	1,96
142906	Lateral Modernizado	7	1,68	2,07
142909	Presidente Antigo	10	16,20	20,88
142910	Lateral Antigo	7	12,85	18,80

APÊNDICE C

Tabela C.1 - Máxima aceleração RMS total de cada viagem por elevador.

Máxima Aceleração RMS Total de cada viagem por elevador				
Viagem	lateral antigo	lateral modernizado	presidente antigo	presidente modernizado
1 a 11	0,125	0,087		0,060
1 a 12	0,126	0,098	0,124	0,056
1 a 2	0,263	0,088		0,095
1 a 3	0,201	0,087	0,157	0,077
1 a 4	0,179	0,086		0,065
1 a 5		0,081	0,150	0,068
1 a 9			0,152	
10 a 12	0,176	0,090		0,072
10 a 5		0,071		0,067
10 a 7	0,149	0,073	0,168	0,063
11 a 1	0,123	0,071	0,139	0,079
11 a 12	0,210	0,094		0,078
12 a 1	0,114	0,071		0,062
12 a 10	0,172	0,079	0,197	0,073
12 a 11	0,229	0,083	0,202	0,102
12 a 7		0,072		
12 a 8				0,069
2 a 1	0,229	0,089		0,093
3 a 1	0,153	0,084		0,075
4 a 1	0,144	0,094		
5 a 1		0,088		0,066
5 a 10		0,091	0,165	0,065
5 a 7		0,083	0,164	0,068
5 a 9		0,093		0,063
6 a 7		0,093		0,078
7 a 10	0,148	0,078	0,172	0,065
7 a 12		0,083		
7 a 5		0,082	0,165	0,070
7 a 6	0,223	0,087		0,079
8 a 12				0,069
9 a 1		0,071	0,184	
9 a 5		0,095		0,064
Média	0,263	0,098	0,202	0,102

*Onde o sinal verde sinaliza que está na faixa confortável de acordo com a ISO 2631-1:1997.

Tabela C.2 - Resultados encontrados da aceleração RMS total de viagens comuns aos quatro elevadores.

Nº de Obra	Elevador	Quantidade de viagens	a_w médio (m/s ²)	a_w máximo (m/s ²)
142905	Presidente Modernizado	7	0,068	0,079
142906	Lateral Modernizado	7	0,079	0,098
142909	Presidente Antigo	10	0,164	0,196
142910	Lateral Antigo	7	0,148	0,201