

ANÁLISE COMPARATIVA DE VIBRAÇÕES E CONFORTO EM ELEVADORES COM DIFERENTES SISTEMAS DE ACIONAMENTO

Culau, E. L.¹, Quintas, J. P. R.², Gomes, H. M.³

RESUMO

Com o passar dos anos e com o constante crescimento da população mundial, será cada vez mais importante o aprimoramento dos meios de transporte vertical. Portanto, faz-se necessário um estudo mais aprofundado, quantificando as vibrações em cabina para cada sistema de acionamento, determinando a partir destes dados qual o sistema que oferece maior conforto e aquele que é o mais desconfortável, buscando sempre entender os motivos que os levam a ser mais ou menos confortáveis para o usuário. Desta forma, são avaliadas as vibrações em elevadores com acionamento hidráulico e elétrico (tipo mais comum movido a cabos de tração, polia e motor), sendo que nos elevadores elétricos são analisados pelo menos três casos distintos: elevador de duas velocidades (AC2), elevador de duas velocidades com controle de tensão e corrente no motor de tração (ACVV) e elevador equipado com inversor de frequência para controle direto da amplitude das tensões e frequências, na aceleração e redução (ACVVVF). Os valores obtidos nas medições são comparados com os valores descritos na norma internacional ISO 2631-1 para vibrações de corpo inteiro, que determina os índices ideais de conforto em escala e também determina os valores e cálculos para análise com relação à saúde dos usuários.

PALAVRAS-CHAVE: conforto em elevador, elevador elétrico, elevador hidráulico, vibrações de corpo inteiro.

¹Graduação em Eng. Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, E-mail: erick_culau@hotmail.com

²Doutor em Eng. Mecânica pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dep. de Eng. Mecânica, Av. Sarmento Leite, 425, sala 202, 90050-170, Porto Alegre, E-mail: pablo@mecanica.ufrgs.br

³Doutor em Eng. Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dep. de Eng. Mecânica, Av. Sarmento Leite, 425, sala 202, 90050-170, Porto Alegre, E-mail: herbert@mecanica.ufrgs.br

<http://dx.doi.org/10535/rsae.v15i1.7208>

1. INTRODUÇÃO

Analisando o constante crescimento populacional mundial nas áreas urbanas dos últimos anos e a conseqüente verticalização das cidades para atender a esta demanda, é imprescindível que os sistemas de transporte vertical existentes sejam estudados e aprimorados, a fim de proporcionar maior conforto e qualidade em viagem aos seus usuários. Segundo relatório do DESA, 2015, as próximas décadas trarão alterações profundas no tamanho e na distribuição espacial da população global, de tal modo que a parcela da população urbana em 2050 deverá aumentar para 66%, ultrapassando os 54% de 2014. Esta diferença percentual trará um aumento de 2,5 bilhões de habitantes nestas áreas. Tal mudança exigirá um número maior de elevadores instalados em cada cidade, o que ampliará o número de usuários que passarão cada vez mais tempo dentro deste meio de transporte.

O elevador é o meio de transporte mais seguro do mundo. Com o surgimento dos comandos eletrônicos micro processados, trabalhando em conjunto com inúmeros sensores e limites, aliado ao surgimento de outros sistemas de acionamento que estimularam a competitividade do mercado, esta condição se confirma a cada dia. Com uma evolução enfatizada na segurança em primeiro lugar, o quesito conforto vem sendo aprimorado nas últimas décadas, onde novas tecnologias estão sendo lançadas a fim de proporcionar experiências cada vez mais agradáveis aos usuários de elevador

No presente trabalho são analisados elevadores elétricos movidos a motor, polia e cabos de tração, distintos principalmente no quesito comando eletrônico, sendo mensurados ao menos dois elevadores para cada tipo de comando estudado: AC2, ACVV e ACVVVF. As medições também são realizadas em dois elevadores hidráulicos, distintos em sua finalidade, sendo um deles residencial e outro para acessibilidade, divergindo também no tipo de comando eletrônico. As medições são realizadas de forma que os dados possam ser comparados em relação ao conforto de cada diferente sistema de acionamento, determinando o mais confortável e o mais desconfortável. Uma análise sobre o tempo que cada sistema de acionamento de elevador permite que um usuário frequente (ascensorista) fique exposto a vibrações neste sem que haja danos à saúde é também realizada. Comparações dos resultados de dois elevadores situados em um Centro Médico, de mesma idade e especificações mecânicas, tendo um deles passado por modernização do acionamento eletrônico de AC2 para ACVVVF recentemente, também são encontradas no presente trabalho.

2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como principal objetivo analisar o conforto que os diferentes sistemas de acionamento para elevadores proporcionam aos seus usuários. São utilizados os valores de vibrações obtidos nas medições em forma de aceleração nos três eixos (x, y e z) para ranqueá-los, comparando com a escala para conforto da norma ISO 2631-1, 1997, de forma que o elevador com melhores resultados seja o primeiro da lista e o elevador com os piores resultados, o último. Esta análise é relevante para que se evidencie as diferenças entre cada sistema de acionamento de elevador e os motivos que os levam a ser mais ou menos confortáveis para o passageiro. Uma análise em relação à saúde, baseada na norma ISO 2631-1, 1997, também é objetivo deste trabalho.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Sistema de acionamento por motor elétrico, polia e cabos de tração

Sistema de acionamento mais comum em elevadores, é composto basicamente por motor elétrico, acoplado em máquina engrenada, com polia motora e cabos de tração. Os cabos de aço que passam pelos canais da polia estão fixados em suas extremidades à cabina do elevador e ao contrapeso. O contrapeso é composto por uma armação metálica e pesos, que são usualmente

blocos de concreto, e deve ter carga total igual ao peso da cabina vazia acrescido de 50 % de sua capacidade total nominal. Para o acionamento do motor e controle das funções do elevador existe quadro de comando eletrônico específico para cada sistema a ser descrito abaixo. Outros componentes fazem parte do elevador como um todo, como guias de ferro fundido para a cabina e o contrapeso, sistema regulador de velocidade, freios de segurança, limites eletrônicos e mecânicos, amortecedores de cabina e contrapeso, portas de cabina e pavimento e demais itens complementares.

3.1.1 Comando eletrônico “AC2”

Modelo de acionamento que representa ainda parcela significativa dos elevadores de passageiro em atividade no Brasil, funciona com corrente alternada e duas velocidades. Segundo Troller, 2015, no sistema AC2 o motor de indução possui dois enrolamentos estatóricos, possibilitando assim duas velocidades distintas. O primeiro enrolamento corresponde à velocidade nominal do elevador, também chamado enrolamento de alta, e o segundo corresponde a 25 % da velocidade nominal do elevador. No momento em que o elevador parte o motor é acionado diretamente no enrolamento de alta, permanecendo ligado até o momento da redução, que é detectado por sensores na caixa de corrida, quando o elevador está a uma distância de 1 a 1,5 metros do pavimento de destino. A distância de redução depende da velocidade do elevador. Neste ponto é feita a comutação, desligando-se o enrolamento de alta e ligando-se o enrolamento de baixa velocidade. Ao chegar no ponto de nivelamento o elevador para, desligando o motor e acionando o freio. A troca do enrolamento de alta para o de baixa, provoca uma mudança repentina no conjugado aplicado pelo motor, que é desconfortável para o usuário do elevador. Para tornar mais suave a troca entre enrolamentos uma solução comum é utilizar um volante de inércia. O volante de inércia é um disco de massa elevada, tipicamente feito de aço, acoplado ao eixo da máquina de tração, que armazena energia na forma de energia cinética.

O método utilizado para diminuir o desconforto na partida envolve a aplicação de resistência conectada ao enrolamento de campo, reduzindo o conjugado e a velocidade do motor. No momento da partida a resistência atua de forma plena e, conforme intervalo de tempo configurado previamente, a resistência vai sendo reduzida até que seja removida. Este processo também pode ser utilizado na redução, de forma inversa, aumentando a resistência até o momento da parada do elevador.

3.1.2 Comando eletrônico “ACVV”

Sistema de acionamento também conhecido como “Softstarter” ou “Omicron” representa uma pequena parcela dos elevadores de passageiro em atividade no Brasil. Assim como o sistema AC2, também faz uso de dois enrolamentos, um de alta para a partida e velocidade nominal e um de baixa para realizar a redução da velocidade e nivelamento antes da parada pelo freio. A principal diferença para o sistema AC2 se dá pela utilização de tiristores para o controle de potência e velocidade do motor. Segundo Troller, 2015, a velocidade do motor é controlada a partir da tensão aplicada nos terminais trifásicos do estator, que por sua vez depende do ângulo de disparo dos tiristores. Após tempo determinado pelo software de controle, o tiristor é acionado, de forma que apenas uma parte de cada semiciclo de onda alimente a carga. A redução de velocidade do elevador é feita por meio da alteração do padrão de disparo dos tiristores. São criados campos magnéticos estáticos em dois enrolamentos da armadura, criando um conjugado que se opõe ao movimento do rotor de forma controlada. No momento em que o elevador alcança o nivelamento com o piso do pavimento, a velocidade está próxima de zero e o freio mecânico é acionado. A velocidade desempenhada pelo motor é medida em tempo real por meio de um tacômetro ou encoder, caracterizando sistema de malha fechada. A curva de velocidade medida é comparada

com a curva padrão de velocidade definida e gravada no software do comando, de forma a permitir ao comando do elevador reajustar o ângulo de disparo dos tiristores sempre que necessário. Este sistema caracteriza-se por manter uma alta corrente de partida, na ordem de 4 a 5 vezes a corrente nominal.

3.1.3 Comando eletrônico com inversor de frequência ACVVVF

Sistema de acionamento mais utilizado atualmente, representa parcela de pouco mais da metade dos elevadores em atividade no Brasil, oferecendo melhor rendimento, maior economia de energia e performance. Diferente dos sistemas já mencionados no presente trabalho, no sistema ACVVVF apenas o enrolamento de alta do motor é utilizado para obtenção das velocidades de partida, nominal e de redução, dispensando o uso do enrolamento de baixa e do volante de inércia.

Segundo Troller, 2015, este sistema permite um controle mais sofisticado da tensão alternada que alimenta os enrolamentos de campo do motor, variando tanto a amplitude quanto a frequência de entrada. A velocidade do motor é controlada por parâmetros ajustáveis no inversor. Um encoder é utilizado para acompanhar a velocidade desempenhada em tempo real e assim realimentar o controlador. O acionamento ACVVVF utilizado em elevadores permite excelente desempenho e conforto em todas as faixas de operação do motor, podendo manter conjugado elevado e constante em baixas velocidades, nivelamento preciso e aceleração controlada.

3.2 Sistema de acionamento hidráulico

Os elevadores hidráulicos estão se tornando cada vez mais populares para uso em residências e pequenas edificações, usualmente limitados em até 8 pavimentos. Funciona segundo o princípio de Pascal para fluidos incompressíveis, onde o acréscimo de pressão produzido em um líquido em equilíbrio transmite-se integralmente a todos os pontos deste líquido. O sistema é composto por reservatório de óleo, bomba hidráulica, válvulas, mangueiras, pistão e arcada, sendo esta última a estrutura da cabina do elevador.

Na subida, a bomba está ligada e o fluxo passa por ela enquanto a válvula de retorno para o reservatório se mantém fechada. O fluido incompressível, como não tem para onde ir, empurra o pistão, movimentando o elevador para cima. Na descida, a bomba está desligada enquanto a válvula de retorno se mantém aberta com o fluxo passando por ela, permitindo que o elevador desça pela ação da gravidade.

3.2.1 Elevador hidráulico residencial com comando eletrônico

Este tipo de elevador hidráulico é o que mais se assemelha para o usuário a um elevador elétrico movido à tração, pois as chamadas são realizadas por meio de botoeiras eletrônicas, com controle de velocidade, de aceleração e de redução pelo comando eletrônico, possui cabina fechada com porta automática, velocidade nominal similar aos elevadores movidos a cabos de tração residenciais e guias de ferro fundido laterais para o deslocamento correto.

Para o ajuste gradual da aceleração e desaceleração, um conjunto de válvulas, principais e auxiliares, são utilizadas em harmonia com o controle da vazão da bomba hidráulica, regidas pelo comando eletrônico. Sensores são posicionados na caixa de corrida para monitoramento das velocidades e pesadores de carga são instalados na cabina para que a pressão no cilindro seja ajustada, mantendo nivelamento preciso nos andares independente da carga em cabina.

3.2.2 Plataforma de acessibilidade

Geralmente utilizada para transporte vertical em percursos que atendem a dois andares distintos, este tipo de elevador hidráulico opera com velocidades baixas e controles eletrônicos mais simples. Os botões de acionamento são do tipo pressão constante, ou seja, o usuário deve

manter o botão acionado durante todo o deslocamento do elevador, sendo praticamente instantâneo o início do movimento com o princípio da execução de pressão no botão. Da mesma forma, quando o botão deixa de ser acionado, o elevador para quase que instantaneamente. Limites são instalados no final dos cursos superior e inferior, desligando a bomba na subida e fechando a válvula principal na descida, mesmo que o botão continue a ser pressionado após atingir o limite final do percurso.

3.3 Exposição de corpo inteiro a vibrações

Neste trabalho são avaliadas as vibrações de corpo inteiro relacionadas ao conforto e à saúde humana. Segundo a norma ISO 2631-1, 1997, os efeitos causados por estas vibrações podem ter grandes variações entre indivíduos, podendo causar sensações como desconforto e irritação, influência nas capacidades de desempenho ou até apresentar riscos para a saúde e segurança. Esta norma é aplicável a vibrações de corpo inteiro transmitidas por meio das superfícies de apoio como os pés de uma pessoa em pé, as nádegas, costas e pés de uma pessoa sentada ou a área de apoio de uma pessoa deitada. Conforme a Figura 3.1, existem três principais posições para a realização das medições de vibrações. A pessoa que estará em contato direto com o transdutor, terá os eixos posicionados sempre da mesma maneira, sendo o eixo z na direção da coluna vertebral, o eixo x na direção de frente e costas e o eixo y na direção lateral. No presente trabalho as medições são realizadas para o caso de uma pessoa em pé, mas poderiam ser utilizadas as mesmas curvas de ponderação para um ascensorista que estivesse sentado.

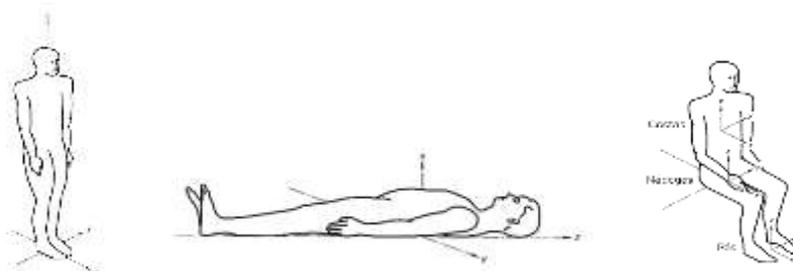


Figura 3.1 – Posições dos eixos para medição das vibrações (FONTE: ISO 2631-1, 1997)

Ponderações de frequência são necessárias para os diferentes eixos de vibração. As principais curvas de ponderação de frequência (filtros), relacionadas à saúde, ao conforto e à percepção, são dadas na Tabela 3.1. Estas ponderações de frequência são realizadas de forma analógica ou digital, por meio da captura do sinal com equipamentos previamente calibrados.

Tabela 3.1 – Aplicação das curvas de ponderação (FONTE: ISO 2631-1, 1997)

Frequência Ponderada	Saúde	Conforto	Percepção
W_k	eixo z, em pé	eixo z, sentado eixo z, em pé eixos 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 eixos x e y, em pé com encosto	eixo x, sentado eixo y, sentado eixos x e y, reclinado

Após obtenção dos valores para aceleração ponderada média *rms* em cada um dos três eixos, foi considerado o procedimento da norma de higiene ocupacional NHO-09, 2013, onde a variável

de aceleração correspondente é a aceleração média resultante e se deve fazer a soma quadrada das acelerações médias de cada eixo multiplicadas pelos fatores de correção k . O cálculo da aceleração *rms* média resultante, se dá conforme a equação (1)

$$a_w = \sqrt{k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2} \quad (1)$$

onde a_w é a aceleração *rms* média resultante em m/s^2 , k_x , k_y , e k_z são os fatores multiplicadores respectivos de cada eixo e a_{wx} , a_{wy} e a_{wz} são os valores de aceleração ponderada média *rms* dos eixos x , y e z , respectivamente, para o intervalo de tempo da medição efetuada.

3.3.1 Avaliação em níveis de conforto

A avaliação em relação ao conforto tem sempre um caráter subjetivo, pois além das vibrações a que o corpo está exposto, existem outros fatores que influenciam neste quesito. No caso de elevadores, ruído, iluminação e mobiliário, podem ter influência significativa na sensação de conforto e podem variar bastante conforme percepção de cada indivíduo. De acordo com o Anexo C da norma ISO 2631-1:1997, uma condição de vibração particular pode provocar uma condição de desconforto inaceitável em certa situação, mas pode ser classificada como agradável ou estimulante em outra.

Como visto na Tabela 3.1, as curvas de ponderação para medições com relação ao conforto serão calculadas atribuindo W_k ao eixo z e W_d aos eixos x e y . Os fatores de multiplicação k , para os eixos x , y e z , segundo a norma ISO 2631-1:1997, terão valor igual a 1.

Apesar do caráter por vezes subjetivo para níveis de conforto, alguns valores de vibrações apresentam reações muito similares em cada indivíduo no que este considera confortável ou não. Os valores da Tabela 3.2 dão indicações aproximadas de reações humanas a várias magnitudes de valores globais totais de vibração.

Tabela 3.2 – Escala de reações humanas a vibrações (FONTE: ISO 2631-1:1997)

Índice de Conforto	Escala
< 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

3.3.2 Avaliação em relação à saúde

No presete trabalho são estudados os efeitos da exposição à vibração de corpo inteiro periódica, aleatória e passageira, na saúde de usuários de elevador. Para tornar possível a comparação de valores mensurados de diferentes durações com os gráficos da norma ISO 2631-1, 1997 em relação a limites de riscos à saúde, é importante que o intervalo de tempo em que o usuário esteve exposto às vibrações de corpo inteiro no elevador sejam representativas de 8 horas diárias. Assim, é definida a exposição diária à vibração A(8), em m/s^2 , como:

$$A(8) = a_w \sqrt{T / T_0} \quad (2)$$

onde T_0 é uma duração de referência de 8 horas, T é a duração da exposição a vibração mensurada em horas e a_w a aceleração compensada ponderada resultante do período mensurado.

De acordo com a ISO 2631-1, 1997, uma zona de alerta ou cuidado quanto à saúde é indicada entre as linhas tracejadas representativas da equação B.1 e as linhas pontilhadas da equação B.2, conforme a figura 3.2. Para as exposições abaixo do limite inferior das equações, efeitos na saúde não foram claramente documentados ou objetivamente observados, e esta zona é conhecida como VAE (*Vibration Action Exposure*). Acima do limite superior das equações, encontra-se a zona conhecida como VLE (*Vibration Limit Exposure*), e os riscos para a saúde são prováveis. Estas recomendações são baseadas principalmente em exposições na faixa de 4 h para 8 h, como indicado pelo sombreamento na Figura 3.2, devendo ser feita a adaptação dos valores de acelerações *rms* mensurados para o valor de exposição diária a vibração A(8).

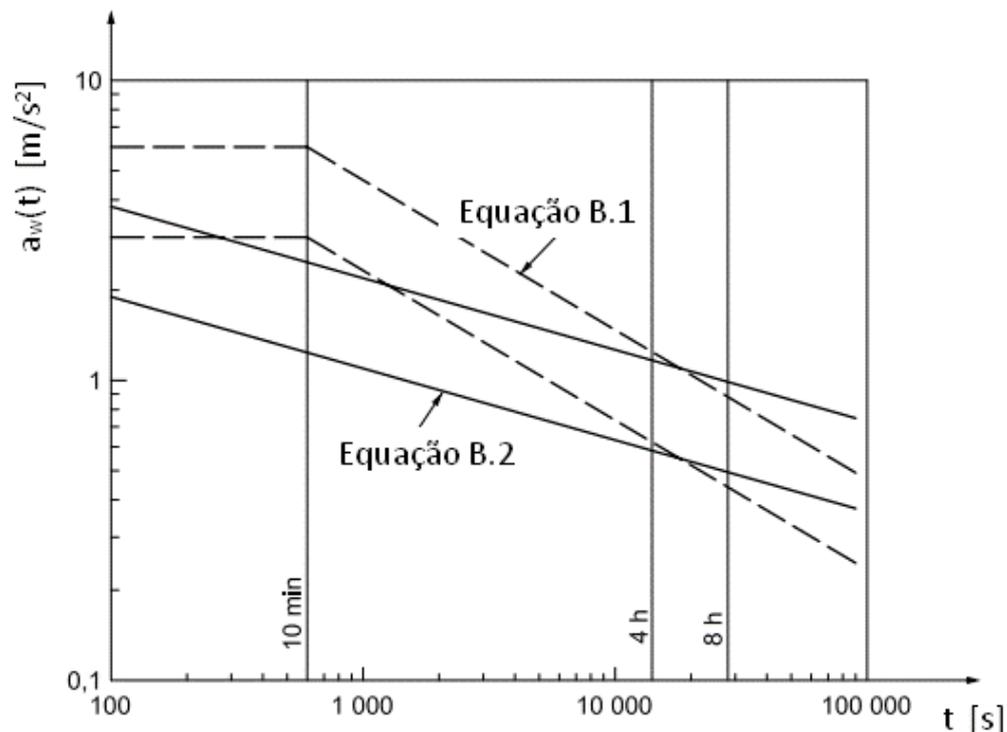


Figura 3.3 – Zonas de perigo para saúde baseado nos valores de aceleração ponderada média e tempo de exposição. (FONTE: ISO 2631-1:1997)

As equações B.1 e B.2 utilizadas para calcular as linhas tracejadas no gráfico da Figura 3.2, encontram-se descritas abaixo:

$$a_{w_1} \cdot T^{1/2} = a_{w_2} \cdot T^{1/2} \quad \text{para a equação B.1} \quad (3)$$

$$a_{w_1} \cdot T^{1/4} = a_{w_2} \cdot T^{1/4} \quad \text{para a equação B.2} \quad (4)$$

onde a_{w_1} e a_{w_2} representam os valores das acelerações ponderadas que são equivalentes e T representa os tempos de exposição para as suas respectivas acelerações ponderadas.

Para a análise em relação à saúde e exposição diária à vibração, os cálculos da aceleração compensada serão realizados de acordo com a Tabela 3.1, sendo W_k atribuído ao eixo z e W_d aos eixos x e y, para uma pessoa em pé. Os fatores de multiplicação k serão 1,4 para os eixos x e y e igual a 1 para o eixo z, conforme indicado na norma ISO 2631-1:1997.

Para determinação dos limites VAE e VLE, a serem empregados nos cálculos, utilizou-se neste trabalho outra norma referente à saúde, que vem sendo empregada na comunidade europeia que é a DIRECTIVE 2002/44/EC. Diferentemente da ISO 2631-1:1997, onde estes valores podem ser determinados apenas após análise por meio do gráfico, esta norma os define em $VAE = 0,5 \text{ m/s}^2$ e $VLE=1,15 \text{ m/s}$, para 8 horas diárias de exposição.

4. METODOLOGIA

A obtenção dos dados de aceleração nos eixos (x, y e z) para análise em relação ao conforto e à saúde foi realizada seguindo a metodologia descrita na norma BS ISO 18738:2003.

4.1 Equipamentos utilizados

Nas medições realizadas nas cabinas dos elevadores foi utilizado acelerômetro para captação das vibrações tri-axiais. Este acelerômetro se localiza no interior do núcleo rígido do equipamento de medição conhecido como *seatpad*. O *seatpad* tem formato de disco, com bordas flexíveis para se adaptar às superfícies a serem mensuradas. Os valores captados pelo *seatpad* são armazenados e analisados no medidor portátil Quest VI-400 Pro número de série 12430. O medidor portátil dispõe de quatro canais para aquisição de dados, porém para a realização deste experimento foram necessários apenas três, correspondentes aos eixos x, y e z. Para a configuração do medidor portátil utiliza-se o software QuestSuite Professional II, que permite definir os canais que serão utilizados, os dados que serão armazenados, a taxa de armazenamento e a curva de ponderação para a frequência de medição. Além de configurar o medidor portátil, o software permite o pós processamento dos dados obtidos, fornecendo gráficos e tabelas completas com os dados adquiridos.

4.2 Instrumentação dos elevadores

As medições foram realizadas posicionando o *seatpad* no centro da cabina dos elevadores, fixando-o com o auxílio dos pés, que posicionados nas bordas do disco tornou a fixação mais eficaz, evitando maiores interferências nos dados adquiridos. Os eixos foram alinhados conforme as normas ISO 18738:2003 e ISO 2631-1:1997, que indicam as mesmas posições, conforme Figura 4.2.

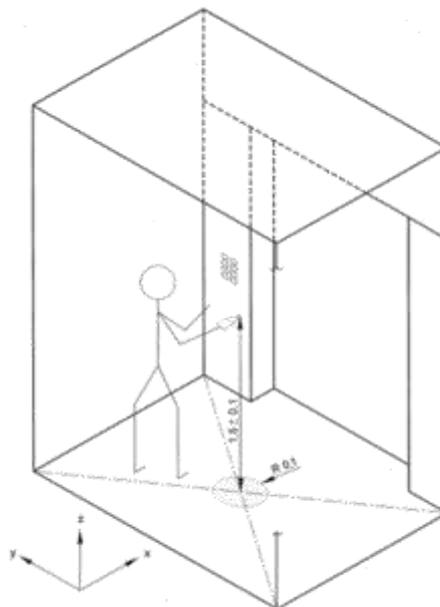


Figura 4.2 – Posição correta do *seatpad* na cabina (FONTE: BS ISO 18738:2003)

Os eixos devem ser alinhados de forma que o eixo x esteja na direção de porta e fundos da cabina, o eixo y esteja na direção lateral e o eixo z na direção perpendicular ao piso da cabina do elevador, na direção do movimento principal deste. As medições seguiram procedimento descrito na norma ISO 18738:2003, iniciando a aquisição de dados até 0,5 s antes do início do fechamento das portas de cabina e finalizando a medição em torno de 0,5 s após a abertura das portas de cabina no andar de destino.

4.3 Caracterização dos elevadores instrumentados

Foram instrumentados um total de 9 elevadores diferentes, sendo todas as medições realizadas em elevadores situados no Rio Grande do Sul, nas cidades de Novo Hamburgo, São Leopoldo e Campo Bom. A Tabela 4.1 traz informações com relação à marca, idade, às características técnicas e ao tipo de acionamento e comando dos elevadores avaliados.

Tabela 4.1 – Características dos elevadores instrumentados

Destinação	Tipo	Comando	Marca	Velocidade	Capacidade	Paradas	Idade Aprox	Modernizado
Centro med	Tração	AC2	SUR	45 m/min	420 kg	06	25 anos	
Centro med	Tração	VVVF	SUR	45 m/min	420 kg	06	25 anos	2015
Resid. Social	Tração	AC2	SUR	60 m/min	420 kg	13	25 anos	
Resid. Serviço	Tração	AC2	SUR	60 m/min	420 kg	13	25 anos	
Residencial	Tração	VVVF	SUR	45 m/min	490 kg	09	30 anos	2015
Residencial	Hidra.	Eletrônico	HIDRAL	30 m/min	450 kg	05	1 ano	
Residencial	Tração	ACVV	SUR	60 m/min	560 kg	15	25 anos	
Residencial	Tração	ACVV	SUR	60 m/min	560 kg	15	25 anos	
Acessibilidade	Hidra.	Simples	Thyssen	6 m/min	250 kg	02	10 anos	

4.3.1 Elevadores elétricos movidos à tração

Sob aspectos gerais, os 7 elevadores elétricos movidos a cabos de tração estudados são muito similares, especialmente no que diz respeito à estética das cabinas, iluminação e incidência de ruídos, sendo a principal diferença o comando eletrônico e interação com a máquina de tração e movimentação do elevador. No total foram instrumentados três elevadores com sistema de acionamento AC2, dois ACVV e dois ACVVVF.

Dos elevadores modelo AC2 estudados, dois são residenciais e estão situados no mesmo edifício, porém têm destinações diferentes, sendo um deles para uso social, onde o maior conforto é o principal objetivo, e o outro é destinado para serviços, onde maiores solicitações de carga e ajustes para performance costumam ser necessários. O outro elevador modelo AC2 estudado tem destinação comercial, situado em um Centro Médico, ou seja, possui alto tráfego. A se destacar, diferem os elevadores residenciais do comercial também pela velocidade, sendo a dos elevadores residenciais de 60 m/min e a do Centro Médico de 45 m/min, que se faz necessária em função do número de paradas distinto de cada edificação.

Os elevadores do modelo ACVV instrumentados situam-se em mesmo edifício, têm as mesmas características técnicas, mesma destinação e mesma data de instalação. Portanto não são esperados resultados com distinção significativa entre os elevadores deste modelo.

Os dois elevadores ACVVVF mensurados são frutos de modernização no comando eletrônico, onde manteve-se as características originais dos elevadores, como velocidade e capacidade nominal, operadores de porta, cabina, máquina de tração e demais componentes mecânicos. Foram alterados apenas o comando eletrônico (o que inclui limites, sensores de poço, fiação e demais

componentes) e as botoeiras de cabina e pavimentos. Entre si, estes diferem pela destinação, sendo um deles residencial e o outro comercial.

4.3.2 Elevadores hidráulicos

Os elevadores hidráulicos instrumentados diferem entre si pelo sistema de comando e acionamento. O elevador residencial é controlado por sistema totalmente eletrônico, realizando ajustes em tempo real de velocidade, vazões de bomba, de válvulas e renivelamento. A plataforma hidráulica de acessibilidade tem acionamento por botão de pressão constante com efeito direto na vazão da bomba ou abertura da válvula. Os dois modelos instrumentados diferem também nas características estéticas, pois a plataforma de acessibilidade é aberta e panorâmica enquanto o elevador residencial se assemelha esteticamente aos demais elevadores do presente trabalho. Outra diferença importante se dá na velocidade dos dois modelos sendo a velocidade do elevador residencial equivalente a 5 vezes a velocidade da plataforma de acessibilidade.

5. RESULTADOS

Foram realizadas em média 8 medições para cada um dos elevadores dos prédios mais altos, de 5 a 6 medições para os elevadores dos prédios intermediários e 4 medições para os elevadores hidráulicos, presentes em menores edificações, totalizando 67 medições válidas. Cada medição teve duração aproximada de 30 segundos, dependendo do percurso e velocidade de cada equipamento. Os andares foram escolhidos de forma aleatória, garantindo, porém, que em cada elevador fossem feitas medições de viagens mais curtas nas áreas mais altas, centrais e mais baixas do edifício e viagens mais longas, tanto de subida quanto de descida.

5.1 Avaliação em relação ao conforto

De posse dos dados adquiridos, foram feitas diferentes análises para conforto, observando as possíveis causas para os desempenhos verificados. Os dados foram analisados encontrando o maior valor para aceleração ponderada no eixo z em cada uma das medições e realizando o cálculo de a_w conforme equação (1) e Tabela 3.1, para $k=1$, com os dados de aceleração ponderada em x e y correspondentes ao instante do maior valor em z. A análise exclusiva da maior aceleração no eixo z, traria na prática resultados ligeiramente menores em todas as medições, porém satisfatórios e muito próximos aos resultados aqui apresentados.

Em uma análise geral, os elevadores modernizados acionados com sistema ACVVVF apresentaram o melhor desempenho, com os menores valores de a_w . A plataforma de acessibilidade apresentou os maiores valores de aceleração, e, portanto, piores resultados para conforto, conforme Tabela 5.1. Nenhum dos elevadores avaliados ultrapassou o valor de 1 m/s^2 .

Tabela 5.1 – Classificação dos elevadores mensurados com relação ao conforto

Posição	Acionamento	Velocidade	a_w (m/s ²)	Elevador (Destinação)	Escala
1	ACVVVF	45 m/min	0,2220	Residencial	Confortável
2	ACVVVF	45 m/min	0,2406	Centro Médico	
3	ACVV	60 m/min	0,3161	Residencial	Levemente confortável
4	Hid. eletrônico	30 m/min	0,3417	Residencial	
5	ACVV	60 m/min	0,3951	Residencial	
6	AC2	45 m/min	0,5268	Centro Médico	Lev. Confort / P. Desconf
7	AC2	60 m/min	0,6868	Residencial Soc.	Pouco desconfortável
8	AC2	60 m/min	0,8539	Residencial Serviço	Pouco desconfortável / Desconfortável
9	Hid. simples	6 m/min	0,8821	Plataforma acessibilidade	

5.1.1 Avaliação dos resultados nos elevadores elétricos movidos a tração

Os resultados para elevadores com acionamento ACVVVF foram muito satisfatórios, ficando dentro da região de conforto de até $0,315 \text{ m/s}^2$ em todas as medições. A diferença que se observa nos resultados dos dois elevadores estudados pode ser atribuída à destinação destes, pois o elevador do Centro Médico, que apresentou aceleração ponderada resultante ligeiramente maior, tem necessidade de fluxo consideravelmente maior também, o que faz com que o elevador necessite de mais agilidade nas reduções e acelerações, reduzindo o tempo para nivelamento e, conseqüentemente, reduzindo o conforto. Cabe ressaltar que trabalhando com inversores de frequência estes parâmetros podem ser reajustados a qualquer tempo, alterando tais características conforme necessidade e/ou vontade dos responsáveis pelo uso do elevador.

Os elevadores de acionamento ACVV tiveram seus resultados muito próximos da zona considerada confortável pela ISO 2631-1:1997, ficando em uma zona caracterizada por ser levemente confortável, o que é satisfatório. A diferença nos resultados obtidos entre os dois elevadores idênticos pode ser atribuída à idade dos componentes do comando eletrônico, perdendo algumas características originais com o tempo por meio do desgaste.

Pela idade e características do sistema de acionamento, os resultados para o elevador de comando AC2 do Centro Médico podem ser considerados satisfatórios, pois suas acelerações ficaram dentro da faixa considerada levemente confortável. Já os dois elevadores residenciais se enquadram na faixa pouco desconfortável, podendo trazer algum incômodo para usuários mais sensíveis. As possíveis causas destes resultados distintos são as diferenças nas velocidades, destinação e ajustes. O elevador do Centro Médico tem velocidade de 45 m/min , enquanto os elevadores residenciais possuem velocidade nominal de 60 m/min . Como a velocidade de baixa é calculada como sendo 25% da velocidade nominal, e a parada no sistema AC2 é realizada apenas pelo freio após a redução, os elevadores residenciais possuem uma maior desaceleração, pois vão de 15 m/min a 0 m/min quase que instantaneamente pela ação do freio, enquanto que no elevador comercial a queda na velocidade é de $11,25 \text{ m/min}$ até 0 m/min .

Realizando um comparativo entre os resultados dos elevadores residenciais, nota-se desconforto superior na parada do elevador destinado a serviços. Este fato pode ser atribuído ao ajuste da mola do freio, que quando submetida a maior compressão (aproximadamente $\frac{1}{4}$ de volta) aumenta a pressão exercida pelo freio da máquina quando acionado, realizando paradas com nivelamento mais preciso, mesmo com carga elevada, porém mais desconfortáveis, pois não permite o escorregamento no contato entre o freio e o flange da máquina. Abaixo, seguem Figuras 5.1 e 5.2, demonstrativas das medições obtidas para conforto com os melhores e piores resultados para os elevadores elétricos movidos à tração.

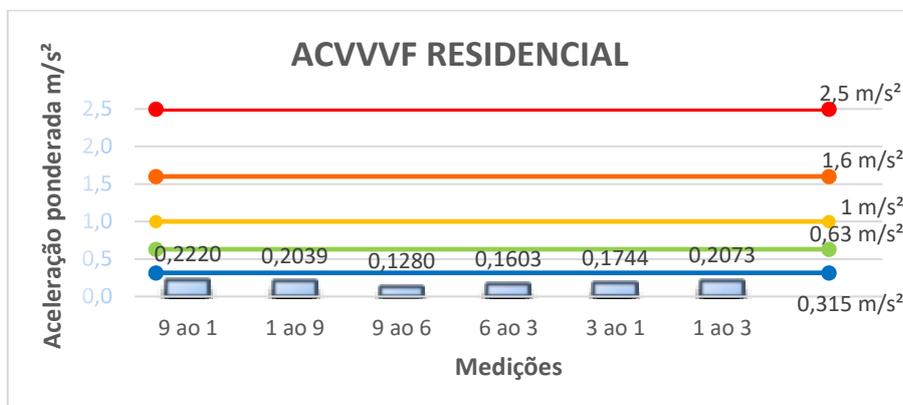


Figura 5.1 – Resultados de acelerações máximas combinadas por percurso melhor ACVVVF

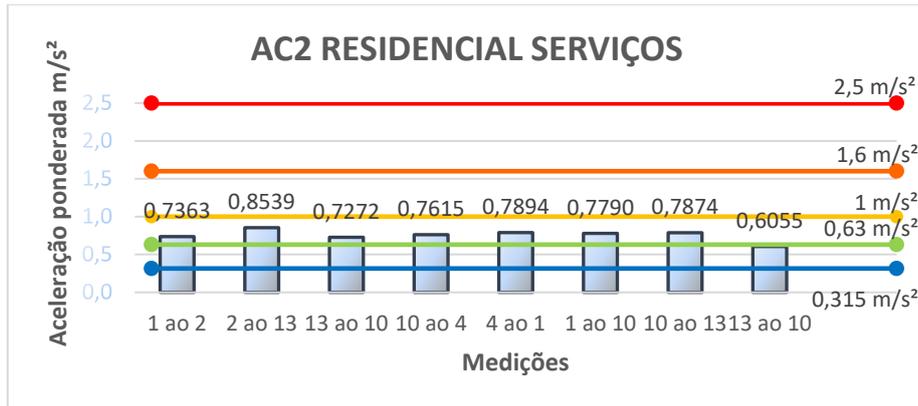


Figura 5.2 – Resultados de acelerações máximas combinadas por percurso pior AC2

5.1.2 Avaliação dos resultados nos elevadores hidráulicos

Enquanto o elevador hidráulico com comando eletrônico ficou situado na faixa levemente confortável, muito próximo dos valores considerados confortáveis pela norma, e similar aos sistemas computadorizados ACVV, a plataforma de acessibilidade teve o pior resultado entre todos os elevadores instrumentados, ficando na faixa pouco desconfortável. Isto se deve ao fato de que a plataforma com botões por pressão constante tem acionamento praticamente instantâneo, não realizando ajustes de vazão para controle de aceleração e desaceleração. Portanto, este resultado já era de certa forma esperado. Nas Figuras 5.3 e 5.4 abaixo, das acelerações máximas por percurso para cada acionamento, fica nítida a diferença mencionada.

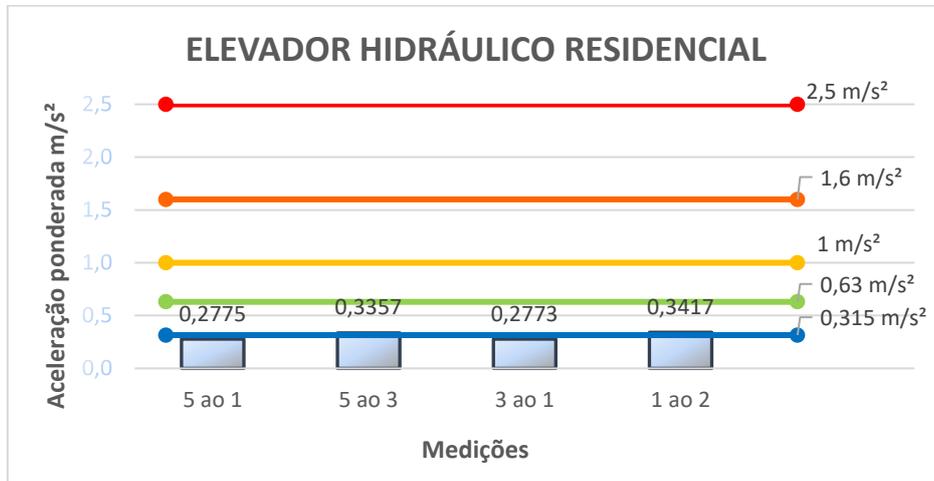


Figura 5.3 – Resultados de acelerações máximas combinadas por percurso elevador hidráulico

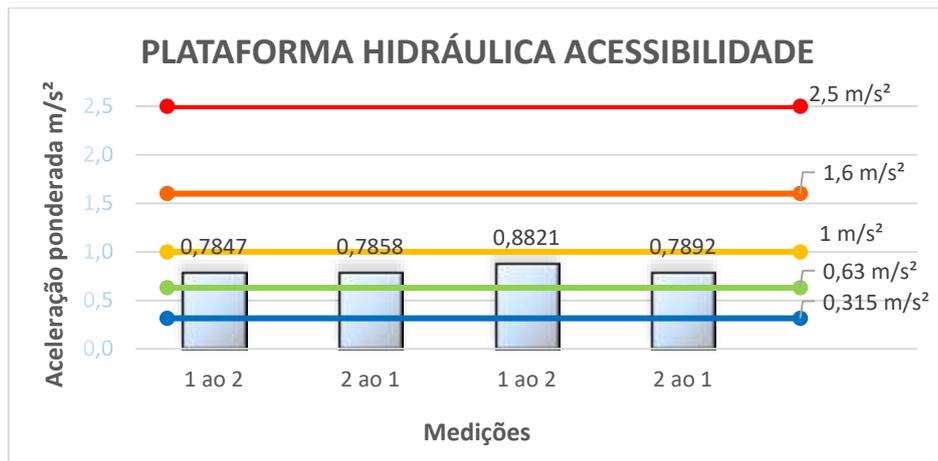


Figura 5.4 – Resultados de acelerações máximas combinadas por percurso da plataforma

5.1.3 Centro Médico

No Centro Médico, os dois elevadores são idênticos mecanicamente, possuindo mesmo percurso total, quantidade de cabos de tração e espessura destes, mesma máquina de tração, mesma idade e mesmo modelo de cabina. Os resultados comprovam a importância e a eficiência da modernização do comando eletrônico dos elevadores antigos, proporcionando conforto muito superior quando comparados diretamente, pois as vibrações a que o passageiro é submetido são menores que a metade das vibrações proporcionadas pelo comando original AC2, além das demais vantagens já mencionadas anteriormente no presente trabalho. Abaixo seguem Figuras 5.5 e 5.6, demonstrando os percursos realizados e as acelerações ponderadas combinadas máximas observadas para cada um dos elevadores.

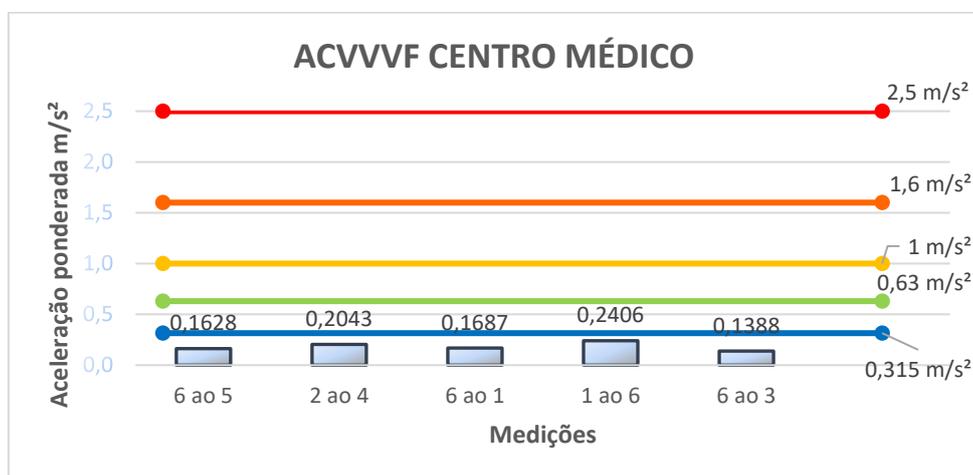


Figura 5.5 – Acelerações máximas combinadas por percurso do elevador modernizado

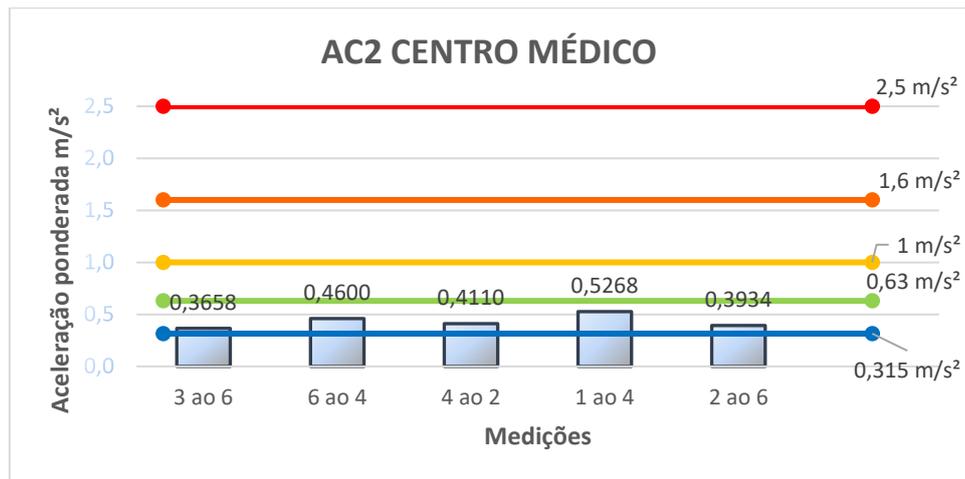


Figura 5.6 – Acelerações máximas combinadas por percurso do elevador original

5.2 Avaliação em relação a saúde

Os valores obtidos para análise em relação à saúde, por meio do cálculo da aceleração compensada *rms*, foram aplicados na equação (1), de acordo com a Tabela 3.1, com $k=1,4$ para os eixos x e y e $k=1$ para o eixo z . Foram analisados os dados de acelerações ponderadas nos três eixos, durante todos os instantes adquiridos em cada percurso. Todos os valores obtidos foram considerados satisfatórios, não oferecendo riscos em nenhum dos casos a um possível ascensorista submetido à jornada de 8 horas de trabalho na cabina do elevador. Os valores mais próximos do limite de ação, limite a partir do qual o usuário deve começar a tomar atitudes preventivas para evitar possíveis danos a saúde, se dão para 53,92 horas contínuas de exposição ao padrão de vibração obtido na medição do elevador residencial de serviços modelo AC2, muito superior as 8 horas contínuas a que se submeteria a estes padrões de vibrações um possível ascensorista. Segue Tabela 5.2 com os resultados em relação à saúde obtidos para todos os elevadores estudados neste trabalho.

Tabela 5.2 – Classificação dos elevadores mensurados com relação à saúde

Local	Acionamento	A(8) EQ (m/s ²)	VAE (h)	VLE (h)	Ranking
Residencial	ACVVVF 45 M/MIN	0,0591	573,3772	2775,1456	1
Centro Médico	ACVVVF 45 M/MIN	0,0674	440,7182	2133,0761	2
Residencial	ACVV 60 M/MIN	0,1016	193,9398	938,6687	3
Residencial	HID ELET 30 M/MIN	0,1016	193,9097	938,5231	4
Residencial	ACVV 60 M/MIN	0,1215	135,4051	655,3607	5
Plataforma	PLAT HID 6 M/MIN	0,1635	74,8570	362,3079	6
Centro Médico	AC2 45 M/MIN	0,1696	69,5091	336,4243	7
Residencial Social	AC2 60 M/MIN	0,1706	68,6854	332,4373	8
Residencial Serviço	AC2 60 M/MIN	0,1926	53,9238	260,9912	9

De forma surpreendente, a plataforma hidráulica de acessibilidade superou os elevadores com comando eletrônico de acionamento AC2 no quesito saúde, alcançando o posto de sexto melhor resultado dos 9 estudados, mesmo tendo sido a pior no quesito conforto. Este fato pode ser

associado aos picos na aceleração observados no momento da comutação do enrolamento de alta para o de baixa nos elevadores AC2, gerando um terceiro pico de aceleração no período mensurado, enquanto a plataforma de acessibilidade possui apenas os dois picos, na partida e na parada. Esta situação pode ser verificada nos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8.

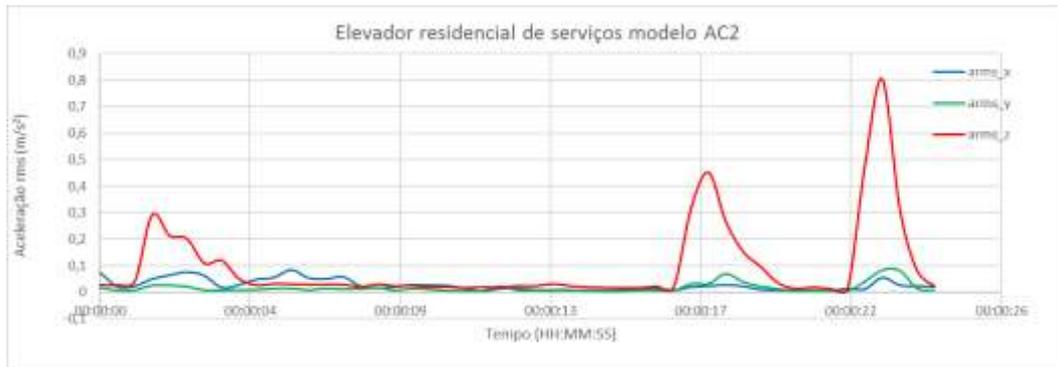


Figura 5.7 - Gráficos das acelerações ponderadas rms x tempo elevador AC2.

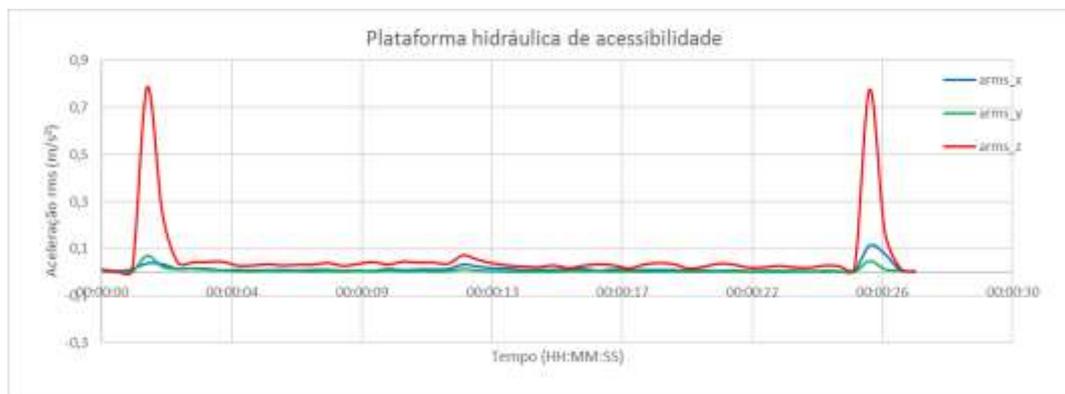


Figura 5.8 - Gráficos das acelerações ponderadas rms x tempo plataforma hidráulica.

Analisando os gráficos acima, observa-se que a plataforma hidráulica de acessibilidade não possui redução antes da parada. Isto também provoca uma carga total de vibrações para o intervalo de tempo mensurado inferior àquela apresentada pelo elevador residencial destinado a serviços modelo AC2, que neste intervalo de tempo ligeiramente inferior, expõe o usuário a três picos de vibração distintos.

6. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos para conforto, pode ser atribuído a cada sistema de acionamento uma aceleração ponderada predominante representante das vibrações e situação de conforto de acordo com a escala disponível na norma ISO 2631-1:1997. Desta forma, os elevadores que possuem sistemas de acionamento ACVVVF podem ser considerados confortáveis, com uma aceleração combinada característica que não ultrapassa os $0,25 \text{ m/s}^2$, ficando sempre abaixo do limite para conforto de $0,315 \text{ m/s}^2$. Os sistemas de acionamento ACVV podem ser considerados levemente confortáveis, com aceleração combinada não ultrapassando o valor de $0,4 \text{ m/s}^2$, muito próximo dos valores considerados como confortáveis. Quanto aos elevadores com comando AC2, estes apresentaram resultados divergentes para cada velocidade e em relação à destinação. No entanto, baseando-se nos resultados obtidos, pode ser atribuído valor de até $0,55 \text{ m/s}^2$ de aceleração combinada máxima para elevadores de velocidades nominais de 45 m/min ,

dentro da faixa considerada levemente confortável. Já para os elevadores de comando AC2 e velocidade nominal de 60 m/min, considera-se valores de aceleração combinada máxima na casa de 0,85 m/s², com predominância dos valores ficando dentro da faixa considerada pouco desconfortável, entre 0,63 m/s² e 1 m/s². Quanto aos elevadores hidráulicos, o elevador residencial apresentou acelerações ponderadas máximas de até 0,35 m/s², sendo considerado um sistema levemente confortável, com resultados muito próximos de confortável. E por fim, pode se estimar para plataformas hidráulicas de acessibilidade a condição de transporte pouco desconfortável, com acelerações ponderadas combinadas máximas de até 0,89 m/s², as maiores obtidas neste trabalho no quesito conforto, podendo alcançar a condição de desconfortável, segundo a escala da norma ISO 2631-1, quando ultrapassa o valor de 0,8 m/s².

Do presente trabalho, conclui-se também que as vibrações originárias do deslocamento vertical dos elevadores se sobrepõe de forma significativa às vibrações laterais e frontais, que se mantém de forma constante com valores relativamente baixos durante todo o deslocamento. As situações de picos de aceleração, se manifestam de forma distinta em cada sistema de acionamento. Enquanto que nos modelos ACVVVF e ACVV os picos ocorrem, na grande maioria dos percursos mensurados, na partida do elevador, nos elevadores AC2 estes picos incidem na redução e principalmente na parada do elevador, no momento de troca do enrolamento de alta para baixa e quando o freio mecânico é acionado, respectivamente. Na plataforma hidráulica de acessibilidade, os picos de aceleração no eixo z se mantiveram muito próximos na partida e parada quando a plataforma estava descendo e muito superior na partida do que na parada quando o elevador estava subindo.

Na avaliação em relação à saúde, todos os elevadores estudados tiveram resultados satisfatórios, não ultrapassando os valores VAE e VLE em nenhuma das medições. Um ascensorista que passasse 8 horas diárias dentro de uma cabina de elevador, em uso constante, não sofreria nenhum risco, conforme gráfico de valores limites para vibração referentes à saúde demonstrado na Figura 6.1, calculado com base nos resultados da exposição diária à vibração do elevador com resultado mais crítico estudado, o elevador de serviços residencial AC2.

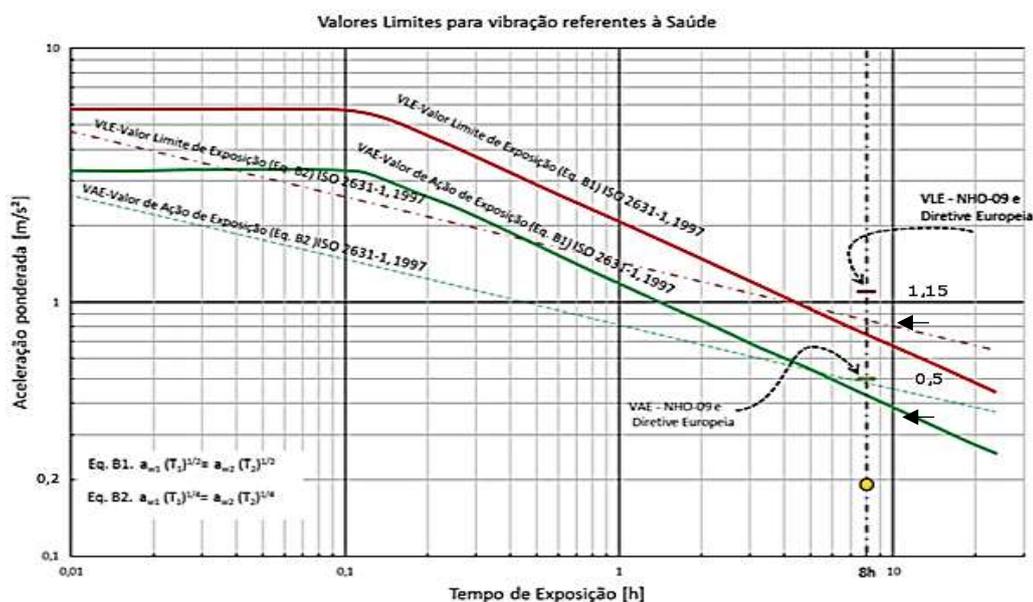


Figura 6.1 - Gráfico de valores limites para vibração referente à saúde do pior caso estudado, onde o ponto laranja representa a exposição diária à vibração A(8) equivalente.

Outro dado observado a ser mencionado é o de que os piores resultados em relação à saúde se deram nos elevadores com maiores magnitudes de vibrações, mas nos percursos menores entre

andares. O elevador residencial AC2 destinado a serviços, com os piores resultados, os demonstra nos menores percursos, com tempo de exposição às vibrações menor. O usuário passa mais tempo sofrendo efeitos das vibrações em percursos menores do que nos percursos maiores, pois estes efeitos têm incidência na partida e na redução e parada dos elevadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Biasuz, S. A.; **“Estudo da Adequação da Vibração de Elevadores a Normas Internacionais”**, Monografia Apresentada como Parte dos Requisitos para Obtenção do Diploma de Engenheiro Mecânico. Porto Alegre: UFRGS, 2011.

BS ISO 18738:2003. **“Lift (Elevators) – Measurement of Lift Ride Quality”**, British Standard International Organization for Standardization, 2003.

DESA, 2015. **“World Urbanization Prospects – The 2014 Revision”**, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. New York: United Nations, 2015.

DIRECTIVE 2002/44/EC. **“On the Minimum Health and Safety Requirements Regarding the Exposure of Workers to the Risks Arising from Physical Agents (Vibration)”**, The European Parliament and the Council of the European Union. Official Journal of the European Communities, L177/13-19, 2002.

Harris, T.; 2002. **“Os elevadores Hidráulicos”**, <http://ciencia.hsw.uol.com.br/elevadores1.htm>. Acessado em 12/10/2016.

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.

NHO-09, 2013. **“Norma de Higiene Ocupacional. Procedimento Técnico – Avaliação da Exposição Ocupacional a Vibrações de Corpo Inteiro”**, Fundacentro, 2013.

Troller, E.; **“Eficiência Energética em Elevadores”**, Projeto de Diplomação Apresentado como Parte dos Requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica. Porto Alegre: UFRGS, 2015.

COMPARATIVE ANALYSIS OF VIBRATIONS AND COMFORT IN ELEVATORS WITH DIFFERENT PROCESSING SYSTEMS

Culau, E. L., Quintas, J. P. R., Gomes, H. M.

ABSTRACT

Over the years and with the constant growth of the world population, it will be increasingly necessary to improve the ways of vertical transportation. Therefore, a further study of lift comfort is required, quantifying the cab vibration for each drive system, determining from this data which system offers greater or lesser comfort to the user, always seeking to understand the reasons which lead them to be more or less comfortable. In this way, vibrations are analyzed in elevators with hydraulic and electric drives (most common type driven by traction cables, pulley and motor), and in electric elevators are analyzed at least three different cases: two-speed elevator (AC2), two-speed lift with voltage and current control in the traction motor (ACVV) and lift equipped with frequency inverter for direct control of the amplitude of the voltages and frequencies in the acceleration and reduction (ACVVVF). The values obtained in the measurements are compared with the values described in the international standard ISO 2631-1 for whole body vibrations, which determines the ideal indexes of comfort in scale and also determines the values and calculations for analysis regarding the health of the users.

KEYWORDS: lift comfort, electric lift, hydraulic lift, full body vibrations.

INTRODUCTION

Analyzing the constant world population growth in the urban areas of the last years and the consequent verticalization of the cities to meet this demand, it is imperative that the existing vertical transportation systems must be studied and improved, in order to provide greater comfort and quality in traveling to their users. According to the DESA report, 2015, the coming decades will bring about profound changes in the size and spatial distribution of the global population, such that the share of urban population in 2050 is expected to increase to 66%, surpassing the 54% in 2014. This percentage difference will increase 2.5 billion people in these areas. This change will require a greater number of elevators installed in each city, which will increase the number of users who will spend more and more time inside this way of transportation.

The elevator is the safest way of transportation in the world. With the emergence of micro processed electronic controls, working together with numerous sensors and limits, coupled with the emergence of other drive systems that have stimulated market competitiveness, this condition is confirmed every day. With an emphasis on safety in the first place, comfort has been enhanced in the last decades, where new technologies are being launched to provide more enjoyable experiences for elevator users.

In the present work, lifts with electric motors, pulley and traction cables are analyzed, mainly in the electronic command, and at least two elevators are measured for each type of control studied: AC2, ACVV and ACVVVF. The measurements are also carried out in two hydraulic elevators, distinct in their purpose, being one of them residential and another one for accessibility, also diverging in the type of electronic control. The measurements are performed so that the data can be compared in relation to the comfort of each different drive system, determining the most comfortable and the most uncomfortable. An analysis of the time each lift drive system allows a

frequent user (elevator operator) to be exposed to vibrations in this one without undue damage to health is also performed. Comparisons of the results of two elevators located in the same building of the same age and mechanical specifications, except that one had a frequency inverter installed, changing the electronic drive from AC2 to ACVVVF recently, are also found in the present work.

EVALUATION IN COMFORT LEVELS

The evaluation in relation to comfort always has a subjective character, because besides the vibrations to which the body is exposed, there are other factors that influence in this question. In the case of elevators, noise, lighting and furniture, they can have a significant influence on the comfort sensation and can vary greatly according to the perception of each individual. According to Annex C of ISO 2631-1: 1997, a particular vibration condition may cause an unacceptable discomfort condition in one situation, but may be classified as pleasant or stimulating in another. As seen in Table 3.1, the weighting curves for comfort measurements will be calculated by assigning W_k to the z-axis and W_d to the x- and y-axes. The multiplication factors k, for the x, y and z axes, according to ISO 2631-1: 1997, will have a value of 1.

Despite the subjective character for levels of comfort, some values of vibrations present very similar reactions in each individual in what it considers comfortable or not. The values in Table 3.2 give approximate indications of human reactions to various magnitudes of total global vibration values.

METHODOLOGY

The acceleration data in the axes (x, y and z) for comfort and health analysis were obtained following the methodology described in BS ISO 18738: 2003.

In the measurements made in the elevator cabins, an accelerometer was used to capture tri-axial vibrations. This accelerometer is located inside the rigid core of the measuring equipment known as a seatpad. The seatpad is disc-shaped, with flexible edges to accommodate the surfaces to be measured. The values captured by the seatpad are stored and analyzed in the portable Quest VI-400 Pro portable meter, serial number 12430. The portable meter has four channels for data acquisition, but for the accomplishment of this experiment only three, corresponding to the axes x, y and z. QuestSuite Professional II software is used to configure the portable measurer, which allows you to define the channels to be used, the data to be stored, the storage rate and the weighting curve for the measurement frequency. In addition to configuring the portable measurer, the software allows the post processing of the obtained data, providing graphs and complete tables with the acquired data.

Measurements were made by positioning the seatpad in the center of the elevator car and setting it with the feet, which positioned at the edges of the disc made the setting more effective, avoiding greater interference in the acquired data. The axes were aligned according to the ISO 18738: 2003 and ISO 2631-1: 1997 standards, which indicate the same positions, according to Figure 4.2.

The axes must be aligned so that the x-axis is in the direction of the door and rear of the cabin, the y-axis is in the lateral direction and the z-axis in the direction perpendicular to the floor of the elevator car in the direction of its main movement. The measurements followed the procedure described in ISO 18738: 2003, initiating data acquisition up to 0.5 s before the start of cabin door closure and finalizing the measurement around 0.5 s after the opening of the cabin doors in the end of the trip.

A total of 9 different elevators were instrumented, and all measurements were performed in elevators located in Rio Grande do Sul, in the cities of Novo Hamburgo, São Leopoldo and Campo

Bom. Table 4.1 provides information regarding the brand, age, technical characteristics and the type of drive and control of the evaluated elevators.

RESULTS

Eight measurements were taken for each of the elevators of the highest buildings, 5 to 6 measurements for the elevators of the intermediate buildings and 4 measurements for the hydraulic elevators, present in smaller buildings, totalizing 67 valid measurements. Each measurement lasted approximately 30 seconds, depending on the course and speed of each equipment. The floors were chosen randomly, however, ensuring that in each elevator measurements of shorter journeys were made in the higher, central and lower areas of the building and longer journeys, both ascent and descent.

With the acquired data, different analyzes were made for comfort, observing the possible causes for the verified performances. The data were analyzed by finding the highest value for z-axis weighted acceleration in each of the measurements and performing the calculation of a_w according to equation (1) and Table 3.1, for $k=1$, with the acceleration data weighted at x and y corresponding to the instant of the highest value in z. The exclusive analysis of the greater acceleration in the z-axis would in practice bring slightly smaller results in all the measurements, however satisfactory and very close to the results presented here.

In a general analysis, the modernized ACVVVF lifts presented the best performance, with the lowest values of a_w . The accessibility platform presented the highest values of acceleration, and therefore, worse results for comfort, according to Table 5.1. None of the evaluated elevators exceeded the value of 1 m/s².

CONCLUSIONS

According to the results obtained for comfort, a predominant weighted acceleration representative of the vibrations and comfort situation can be assigned to each drive system according to the scale available in ISO 2631-1: 1997. In this way, lifts with ACVVVF drive systems can be considered comfortable, with a characteristic combined acceleration not exceeding 0.25 m/s², always being below the comfort limit of 0.315 m/s². The ACVV drive systems can be considered slightly comfortable, with combined acceleration not exceeding 0.4 m/s², very close to the values considered comfortable. About the elevators with AC2 control, these presented divergent results for each speed and in relation to the destination. However, based on the results obtained, up to 0.55 m/s² of maximum combined acceleration can be attributed for nominal speed elevators of 45 m/min within the range considered to be slightly comfortable. For AC2 control units and nominal speed of 60 m/min, maximum combined acceleration values around 0.85 m/s² are considered, with values predominantly within the range considered to be uncomfortable, ranging from 0.63 m/s² and 1 m/s². As for hydraulic elevators, the residential lift presented maximum weighted accelerations up to 0.35 m/s², being considered a slightly comfortable system, with results very close to comfortable. Finally, it can be estimated for hydraulic platforms of accessibility the uncomfortable transport condition, with maximum combined accelerations up to 0.89 m/s², the highest obtained in this work in the comfort item, being able to reach the condition of uncomfortable, according to the scale of ISO 2631-1, when it exceeds the value of 0.8 m/s².

From the present work, it is also concluded that the vibrations originating from the vertical displacement of the elevators significantly overlaps the lateral and frontal vibrations, which is maintained in a constant way with relatively low values throughout the displacement.

The situations of acceleration peaks, manifest in a different way in each drive system. While in the ACVVVF and ACVV models the peaks occur, in the great majority of the measured paths, in the start of the elevator movement, in the AC2 elevators these peaks affect the reduction and

mainly in the elevator stop, when the winding is changed from high to low and when the mechanical brake is activated, respectively. On the hydraulic accessibility platform, the acceleration peaks on the z axis remained very close at start and stop when the platform was descending and much higher at the start than at the stop when the elevator was rising.

In the evaluation with regard to health, all the elevators studied had satisfactory results, not exceeding VAE and VLE values in any of the measurements. An attendant who spent 8 hours a day in an elevator car, in constant use, would not be at risk, according to the chart of health-related vibration limit values shown in Figure 6.1, calculated based on the results of daily exposure to elevator vibration with the most critical result being studied, the AC2 residential services elevator.

Another observed data to be mentioned is that the worst health results occurred in elevators with higher magnitudes of vibrations, but in the smaller pathways between floors. The residential elevator AC2 for services, with the worst results, demonstrates them in the smaller routes, with a lower exposure time to vibrations. The user spends more time under vibration effects on smaller paths than on longer routes, since these effects have an incidence on starting, reducing and stopping of the elevators.