



Avaliação de níveis de vibração admissíveis em estruturas de edifícios: Avaliação de conforto humano

Paula Lopes Santana dos Santos

Dissertação apresentada na Escola Superior de Tecnologia e Gestão, Instituto Politécnico de Bragança, para efeito da obtenção do Grau de Mestre em Engenharia da Construção no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Salvador.

Orientada por:

Manuel Teixeira Brás César

Yasmin Fortes Fonseca

Bragança, 13 de Fevereiro de 2020

Índice

Resumo.....	1
Abstract.....	2
1. Introdução.....	3
1.1 Aspectos gerais	3
1.2 Objetivos.....	5
1.3 Estrutura da Tese	6
2. Estado da Arte	7
2.1 Introdução.....	7
2.2 Critérios de Avaliação	7
2.2.1 Critério Estrutural	7
2.2.2 Critério para o conforto humano.....	11
2.3 Laje com vigotas pré-tensionadas	26
2.3.1 Introdução	26
2.3.2 Sensibilidade humana às vibrações.....	26
2.3.3 Caracterização das ações induzidas pela atividade humana.....	28
2.3.3.1 Atividades ritmadas.....	28
2.3.3.2 Vibrações induzidas pelo passo.....	31
2.3.3.3 Critérios de aceitação para o ser humano	32
3. Estudo de caso	35
3.1 Dimensionamento.....	35
3.1.1 Estado Limite Ultimo	35
3.1.2 Estado Limite de Serviço.....	36
3.1.3 Vibração	37
3.1.4 Resultados	40
4. Estudo prático.....	45
4.1 Resultados esperados	45

4.2 Resultados do ensaio	46
5. Conclusões	52
5.1 Trabalhos futuros	53
Bibliografia.....	54

Índice de figuras

Figura 1 - Sistema de eixos utilizado para avaliação dos níveis de vibração no corpo humano (ISO 2631)	14
Figura 2 – Curva base para aceleração de vibrações em edifícios – eixo z (BS 6472)	17
Figura 3 - Curva base para aceleração de vibrações em edifícios – eixo x e y (BS 6472)	18
Figura 4 - Curva para aceleração de vibrações em edifícios – eixo z (BS 6472)	19
Figura 5 - Curvas para velocidade de pico de vibração em edifícios - eixo z (BS 6472)	20
Figura 6 - Curva para aceleração de vibrações em edifícios – eixo x e y (BS 6472)	21
Figura 7 - Curvas para velocidade de pico de vibração em edifícios - eixo x e y (BS 6472)	22
Figura 8 - Representação da laje a ser dimensionada	35
Figura 9 - Gráfico Frequência de vibração x Período	40
Figura 10 - Secção transversal da laje simples	41
Figura 11 - Secção transversal da laje dupla	41
Figura 12 – Seção transversal da laje utilizada	45
Figura 13 - Vista da obra	47
Figura 14 - Vista das casas	47
Figura 15 – Foto do andar superior 1/2	48
Figura 16 – Foto do andar superior 2/2	48
Figura 17 - Foto superior da laje ensaiada com acelerômetro	49
Figura 18 - Foto inferior da laje ensaiada	49
Figura 19 - Foto do ensaio	50
Figura 20 - Resultado do ensaio Aceleração x Tempo	50
Figura 21 - Resultado do ensaio Magnitude x Frequência	51

Índice de tabela

Tabela 1 - Valores limite para vibrações curta duração sugeridos pela norma DIN 4150-3	8
Tabela 2 - Classificações das estruturas de acordo com a norma SN 640312 ..	9
Tabela 3 - Valores limite para vibrações em estruturas sugeridos pela norma SN 640312	9
Tabela 4 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas	11
Tabela 5 - Limites da percepção humana às vibrações verticais (pessoa em pé)	12
Tabela 6 - Valores aceitáveis de vibrações em edifícios avaliados em KB sugeridos pela norma DIN 4150-2.....	13
Tabela 7 - Frequência medida de aceleração m/s^2 correspondente a uma baixa probabilidade de criticas prejudiciais	23
Tabela 8 - Valores de doso de vibração ($m/s^{1,75}$) abaixo onde vários graus de criticas prejudiciais podem ser esperados em edificações residenciais	23
Tabela 9 - Valores de aceleração para curva base na Figura 2.....	24
Tabela 10 - Valores de aceleração para curva base na Figura 3.....	25
Tabela 11 - Coeficientes de Fourier para várias atividades rítmicas	30
Tabela 12 - Exemplos de valores de cálculo para a sobrecarga devido a participantes em atividades de grupo.....	31
Tabela 13 - Fatores de correção para α_n em função do número de participantes, p.	31
Tabela 14 - Parâmetros de cálculo para ações dinâmicas devido ao movimento de um indivíduo	32
Tabela 15 - Valor dos coeficientes multiplicativos a aplicar às curva-base - ISO 2631-2	34
Tabela 16 - Valores-limite para o fator de aceleração em pavimentos.....	39
Tabela 17 - Frequências e coeficientes dinâmicos, segundo Murray	39
Tabela 18 - Valores do carregamento em primeira instância	41
Tabela 19 - Verificação quanto ao Estado Limite Último	41
Tabela 20 - Verificação quanto ao Estado Limite de Serviço	42
Tabela 21 - Verificação quanto à vibração	42

Tabela 22 - Valores do carregamento corrigido	43
Tabela 23 - Verificação quanto ao Estado Limite Último	43
Tabela 24 - Verificação quanto ao Estado Limite de Serviço	43
Tabela 25 - Verificação quanto à vibração	44
Tabela 26 - Cargas permanentes e variáveis do estudo prático	46
Tabela 27 - Resultados esperados da vibração no estudo prático.....	46

Índice de equação

Equação 1	10
Equação 2	12
Equação 3	14
Equação 4	15
Equação 5	29
Equação 6	29
Equação 7	29
Equação 8	32
Equação 9	33
Equação 10	36
Equação 11	36
Equação 12	36
Equação 13	37
Equação 14	37
Equação 15	37
Equação 16	38
Equação 17	38
Equação 18	38
Equação 19	38

Resumo

Na presente tese, buscou-se realizar a identificação e comparação dos critérios preconizados nas normativas nacionais e internacionais a respeito sobre os níveis máximos admissíveis de vibração em estruturas de edifícios com o intuito de garantir o conforto dos ocupantes durante o período de vida útil da estrutura; isto é, encontrar o limite das vibrações excessivas que possam comprometer o bom funcionamento da estrutura e condicionar o conforto dos ocupantes. Além disso, realizou-se um estudo de caso a respeito das lajes aligeiradas com vigotas pré-tensionadas, dimensionando-a segundo os estados limites último e de serviço e pela vibração. Por fim, buscou-se executar um estudo prático para ratificar os cálculos realizados.

Abstract

In this thesis, we sought to identify and compare the criteria recommended in national and international regulations regarding the maximum permissible levels of vibration in building structures in order to ensure the comfort of occupants during the life span of the structure; that is, to find the limit of excessive vibrations that may compromise the proper functioning of the structure and condition the comfort of occupants. In addition, a case study was conducted on the beam and block load span tables, dimensioning it according to the states last limits and service and vibration. Finally, we sought to carry out a practical study to ratify the calculations performed.

1. Introdução

1.1 Aspectos gerais

A motivação de vibrações em estruturas não se encontra apenas após a sua finalização e, sim, desde o processo de construção. As máquinas que operam durante a obra podem afetar diversos elementos da estrutura tal como fundações, pedestais, ou membros estruturais (lajes e vigas), e até todo edifício em varias maneiras com bastantes tipos diferentes de forças dinâmicas. Já as máquinas que atuam nas proximidades da construção também geram vibração sobre a mesma. Esse tremor é transmitido através do solo, e, por ele não ser homogêneo, dificulta saber sua total influência, sendo esse valor sempre aproximado. As atividades que estão associadas a esse tipo de vibração podem ser:

- Veículos em canteiros de obras
- Empilhadeiras, estaca-prancha
- Compactação de vibração
- Consolidação dinâmica
- Escavação
- Explosão

Após a finalização da construção a ação dos ventos causam ruídos à estrutura e a própria utilização, como salas de dança e auditórios, acabam trazendo impactos à estrutura.

Antes de discorrer sobre as problemáticas causadas pelas vibrações, tem-se que ter uma compreensão de dois critérios: Estado de Limite Último (ELU) e Estado de Limite de Serviço/Utilização (ELS). O Estado Limite em geral está relacionado à condição que define impropriedade para o uso da estrutura, por razões de segurança, funcionalidade ou estética, desempenho fora dos padrões especificados para sua utilização normal ou interrupção de

funcionamento em razão da ruína de um ou mais de seus componentes, ou seja, é o estado onde um, ou todo elemento estrutural não consegue mais atender a todos os requisitos e esforços para seu funcionamento de maneira contínua e adequada ou, até mesmo, quando o elemento estrutural atinge um limite de colapso total. O ELU está ligado ao estado no qual a estrutura não está mais íntegra, sua capacidade resistente esgotou-se, trazendo risco à segurança e, por isso, não pode ser mais utilizada. Já o ELS associa-se ao conforto para os usuários, durabilidade da estrutura, aparência e boa utilização de um modo geral [1].

A problemática causada pelas vibrações nos edifícios está reunida nos dois critérios citados anteriormente. Mesmo o Estado de Limite Último sendo o que traz mais preocupações aos cientistas devido ao abalo econômico e social, é o Estado de Limite de Segurança/Utilização que será o foco desta tese.

No corpo humano, a vibração pode ser transmitida de duas maneiras distintas: pelo corpo inteiro ou parte dele. A primeira, como o próprio nome já insinua vai desde os pés (posição em pé) ou do assento (posição sentada), como é o caso de trabalhadores que operam máquinas, tratores e veículos que geram algum tipo de frequência (variando entre 0,5 a 80Hz), até a cabeça. Já a segunda é sentida em partes localizadas no corpo como, por exemplo, nas mãos e braços pelos trabalhadores que manuseiam britadeiras, furadeiras de impacto, ou seja, máquinas manuais vibrantes com frequência variando de 5 a 1.000 Hz [2].

O corpo humano sofre reações diversas às vibrações recebidas em diversas maneiras. A exposição ocupacional continuada das vibrações pode causar efeitos diretos sobre o corpo, podendo ser destacados os seguintes problemas: perda do equilíbrio e falta de concentração, distúrbios gastrointestinais, aumento da frequência cardíaca, perda do controle muscular de partes do corpo, distúrbios visuais com visão turva, descalcificação de pequenas áreas dos ossos do corpo, lesões na coluna vertebral e degeneração gradativa do tecido muscular e nervoso. Além disso, uma doença muito comum e reconhecida resultante da exposição prolongada das mãos à vibração e a impactos repetidos é a síndrome dos dedos brancos ou doença de Raynaud,

causada pelo espasmo das artérias digitais, que limita o fluxo sanguíneo nos dedos, sendo que, em casos extremos, pode causar danos permanentes ou gangrena [2].

1.2 Objetivos

Este trabalho de investigação pretende descrever as várias metodologias de avaliação do nível de vibração em estruturas de edifícios, assim como identificar os critérios regulamentares (nacionais e internacionais) utilizados para definir os níveis máximos de vibração por forma a garantir o conforto dos utilizadores bem como boas condições de serviço (evitar e/ou controlar danos nos elementos estruturais e não estruturais, por exemplo, danos associados à fendilhação/fissuração e efeitos associados à fadiga).

Serão apresentados os fundamentos teóricos e as metodologias utilizadas para a obtenção dos parâmetros dinâmicos de um sistema estrutural (incluindo ensaios experimentais com excitação ambiental e vibração forçada). Também serão apresentados os aspectos mais relevantes da resposta humana aos diferentes níveis de vibração e os valores de exposição recomendados na regulamentação e nas especificações técnicas.

O estudo compreende ainda a aplicação das metodologias de análise e avaliação do nível de vibração a cinco situações teórica e uma real. Com base nos resultados obtidos serão identificados eventuais problemas associados a níveis de vibração excessiva, e serão propostas soluções para corrigir estes problemas e garantir um bom funcionamento em serviço da estrutura e o conforto dos ocupantes.

1.3 Estrutura da Tese

A tese é composta por 5 capítulos sendo eles divididos em:

- Introdução
- Estado da arte
- Estudo de caso
- Estudo prático
- Conclusão

2. Estado da Arte

2.1 Introdução

Neste capítulo será observado um conjunto de critérios de diversas normas internacionais e nacionais a respeito dos limites de vibrações permitidos e o controle seguido em variados locais. Nas situações onde as vibrações são provocadas por fatores externos, como os abalos sísmicos, a utilização do ELU pode melhorar o desempenho da estrutura em busca de escapar de danos estruturais relevantes. Em contrapartida, quando o foco está no conforto humano, a utilização do método anterior pode atenuar os níveis de vibrações, extrapolando os limites permitidos pela ELS em diversas normas. Em ocorrências deste tipo, deve-se buscar a linha tênue onde os dois critérios são atendidos. Há normas que buscam generalizar termos genéricos do conforto a partir do estudo da percepção das vibrações pelo homem, no entanto, outras são mais específicas e fixam níveis de vibrações para apenas um tipo de estrutura, como por exemplo, as em concreto.

Após esta análise, busca-se investigar também normas que possuem outros critérios de avaliação, a exemplo de parâmetros estruturais que visam esquivar-se de patologias construtivas que podem ser causadas por erro humano ou por alguma explosão.

2.2 Critérios de Avaliação

2.2.1 Critério Estrutural

A norma DIN 4150 – parte 3 (1975) [3] é o documento no qual estabelecem-se os níveis de vibrações aceitáveis nas estruturas sujeitas a ações impulsivas como explosões ou trabalhos de cravação de estacas, também é nele que muitas outras normas se baseiam, dentre elas a NP 2074[4].

Nesta norma alemã há uma tabela na qual relaciona-se o tipo de estrutura, que pode ser edifícios industriais, habitacionais ou particularmente delicados, como é o caso de construções antigas, com as velocidades máximas permitidas na base e no piso mais elevado de cada edifício nas categorias de curta duração e permanente. Na Tabela 1, observa-se as relações no período de curta duração; é possível verificar os limites impostos das velocidades na base em mm/s a partir de três intervalos de frequências: menor que 10 Hz, entre 10 e 50 Hz e entre 50 e 100 Hz e, os limites das velocidades no piso elevado em qualquer frequência.

Tabela 1 - Valores limite para vibrações curta duração sugeridos pela norma DIN 4150-3

Tipo de estrutura	Velocidade máxima (mm/s) na base do edifício			Velocidade máxima (mm/s) no piso mais elevado do edifício
	Frequência (Hz)			Qualquer frequência
	< 10	10-50	50-100	
Edifícios industriais	20	20-40	40-50	40
Edifícios habitacionais	5	5-15	15-20	15
Edifícios particularmente delicados	3	3-8	8-10	8

Se as vibrações estiverem na categoria permanente, essa norma sugere que a componente horizontal da velocidade não ultrapasse 5mm/s nos pisos de edifícios industriais e habitacionais, e que em elementos estruturais isolados destas construções, como é o caso de lajes, a velocidade seja inferior a 10mm/s.

Outra norma bastante requisitada no assunto de níveis de vibração em estruturas sujeitas a ações impulsivas é a norma Suíça SN 640312[5]. Nela é possível obter uma tabela dividida em quatro classes estruturais geradas a partir da vulnerabilidade que suas solicitações apresentam, citando também os tipos de edifícios que se enquadram em cada grupo (Tabela 2).

Tabela 2 - Classificações das estruturas de acordo com a norma SN 640312

Classe da estrutura	Definição
I	Estruturas de betão armado e estruturas de aço (não contendo rebocos) tais como edifícios industriais, pontes, chaminés, muros de suporte e condutas superficiais;
	Estruturas subterrâneas como cavernas, túneis e galerias sem revestimentos
II	Edifícios como lajes e caves em betão, com paredes em betão e alvenaria de tijolo, muros de alvenarias e condutas enterradas;
	Estruturas subterrâneas como cavernas, túneis e galerias revestidas a alvenaria
III	Edifícios com caves compostas por pavimentos e paredes em betão, com superestrutura em alvenaria de pedra e pavimentos em madeira
IV	Edifícios particularmente vulneráveis ou edifícios em restauro

Há outra tabela que relaciona as quatro classes com as vibrações provocadas pelo movimento de máquinas, tráfegos e trabalhos de construção e com as que são geradas a partir de trabalhos que envolvam explosões que, por sua vez tem relação com o carácter permanente ou ocasional (Tabela 3). No primeiro caso são considerados intervalos de frequência de 10 a 30 Hz e de 30 a 60 Hz; já no segundo caso os intervalos são de 10 a 60 Hz e 60 a 90 Hz. Vale ressaltar que essa tabela nos fornece a velocidade máxima em mm/s em cada situação apresentada.

Tabela 3 - Valores limite para vibrações em estruturas sugeridos pela norma SN 640312

Classe da estrutura	Vibrações provocadas pelo movimento de máquinas, tráfego e trabalhos de construção		Vibrações provocadas por trabalhos com explosivos	
	f (Hz)	V_{max} (mm/s)	f (Hz)	V_{max} (mm/s)
I	10-30	12	10-60	30
	30-60	12-18	60-90	30-40
II	10-30	8	10-60	18
	30-60	8-12	60-90	18-25
III	10-30	5	10-60	12
	30-60	5-8	60-90	12-18
IV	10-30	3	10-60	8
	30-60	3-5	60-90	8-12

Vale ressaltar que a norma permite vibrações com níveis mais elevados nos casos em que as mesmas tem carácter ocasional em comparação as permanentes, isso ocorre devido a menor periodicidade de ocorrência, o que as torna mais admissível.

A norma portuguesa NP 2074 [4] citada anteriormente, também apresenta valores limites para velocidades máximas e estas são medidas nas bases das construções.

Já a norma brasileira NBR 6118 [6] cita no estado-limite de vibrações excessivas que para assegurar comportamento satisfatório das estruturas sujeitas a vibrações, deve-se afastar o máximo possível à frequência própria da estrutura (f) da frequência crítica (f_{crit}), que depende da destinação da respectiva edificação. A condição abaixo deve ser satisfeita:

$$f > 1,2 \cdot f_{crit}$$

Equação 1

Quando a ação crítica é originada por uma máquina, a frequência crítica passa a ser a da operação da máquina. Nesse caso, pode não ser suficiente afastar as duas frequências, própria e crítica. Principalmente quando a máquina é ligada, durante o seu processo de aceleração, é usualmente necessário aumentar a massa ou o amortecimento da estrutura para absorver parte da energia envolvida.

Nos casos especiais, em que as prescrições anteriores não puderem ser atendidas, deve ser feita uma análise dinâmica mais acurada, conforme estabelecido em Normas Internacionais, enquanto não existir Norma Brasileira específica.

Na falta de valores determinados experimentalmente, podem ser adotados os valores indicados na Tabela 4 para f_{crit} .

Tabela 4 - Frequência crítica para vibrações verticais para alguns casos especiais de estruturas submetidas a vibrações pela ação de pessoas (NBR 6118)

Caso	f_{crit}
Ginásio de esportes e academias de ginástica	8,0
Salas de dança ou de concerto sem cadeiras fixas	7,0
Passarelas de pedestres ou ciclistas	4,5
Escritórios	4,0
Salas de concerto com cadeiras fixas	3,5

Todas as normas citadas anteriormente tem o intuito de conter os danos em construções habitacionais, industriais e de serviço que podem ser expostas a ações impulsivas. Além delas, há outras normas e recomendações que visam limitar o surgimento de patologias estruturais ocasionadas por diversos tipos de ações: ISO 4886 [7] (portuguesa), BS 7385 [8] e BS 5228 [9] (britânicas), UNI 9916 [10] (italiana), AFTES [11] (francesa) e SS 4604866 [12] (sueca) [13].

2.2.2 Critério para o conforto humano

Como citado anteriormente, a problemática do conforto humano perante as vibrações está relacionada com a percepção e sensibilidade dos utilizadores e, por isso, faz-se necessário estabelecer limites que amenizem o incômodo. Vários autores indicaram regras expeditas de avaliação da sensibilidade dos seres humanos a vários níveis de vibração, estando indicada na Tabela 5 uma dessas propostas [14]. Neste caso, pressupõe-se que as vibrações têm caráter harmônico de amplitude inferior a 1mm, fazendo-se uma distinção das vibrações com frequências entre 1 e 10Hz, onde se estabelecem valores limite em termos de aceleração máxima, e das vibrações cujo conteúdo em frequência se situa entre 10 e 100Hz, devendo nestas circunstâncias proceder-se a uma avaliação em termos de velocidade de pico [13].

Tabela 5 - Limites da percepção humana às vibrações verticais (pessoa em pé)

Efeito das vibrações nas pessoas	Frequências de 1 a 10 Hz a_{\max} (mm/s ²)	Frequências de 10 a 100 Hz V_{\max} (mm/s)
Imperceptíveis	10	0,16
Pouco perceptíveis	40	0,64
Claramente perceptíveis	125	2,00
Incômodas	400	6,40
Muito desagradáveis	1000	16,00
Intoleráveis	>1000	>16,00

Uma das normais mais conhecidas e mais antigas para atender os critérios do conforto humano é a DIN 4150 – parte 2 [15]. Esta norma é direcionada aos problemas de vibrações em edifícios a partir de fontes externas de perturbação, estabelecendo limites aceitáveis para vibrações com frequências entre 1 e 80 Hz. Para o efeito recorre a um parâmetro designado de KB e é definido segundo a equação abaixo:

$$KB = d \cdot \frac{0,8 \cdot f^2}{\sqrt{1 + 0,032 \cdot f^2}}$$

Equação 2

Onde:

d é a amplitude das oscilações;

f é a frequência das oscilações.

A amplitude das oscilações deve ser considerada com base na direção mais crítica, podendo ser também obtida através do registro de velocidades ou acelerações se o movimento foi harmônico. Para tal, basta dividir qualquer uma destas grandezas pela frequência angular ou pelo seu quadrado, respectivamente. Na Tabela 6, encontra-se transcrito o conteúdo da norma relativo aos limites impostos para alguns casos concretos levando em consideração a localização do edifício, o período do dia e os tipos de vibrações. Após a análise é possível constatar que os valores para vibrações contínuas

são sempre inferiores ou iguais em comparação às pouco frequentes, assim como os valores do período da noite em comparação aos do dia.

Tabela 6 - Valores aceitáveis de vibrações em edifícios avaliados em KB sugeridos pela norma DIN 4150-2

Localização do edifício	Período	KB aceitável	
		Vibrações contínuas ou repetidas	Vibrações pouco frequentes
Zonas puramente residenciais, propriedades de alojamento e estâncias de férias	dia	0,2 (0,15*)	4
	noite	0,15 (0,1*)	0,15
Aldeias, zonas de pequenos escritórios e centros comerciais	dia	0,3 (0,2*)	8
	noite	0,2	0,2
Zonas de escritórios e comércio em geral	dia	0,4	12
	noite	0,3	0,3
Zonas industriais	dia	0,6	12
	noite	0,4	0,4
Zonas especialmente sensíveis a vibrações	dia	0,1 - 0,6	4 - 12
	noite	0,1 - 0,4	0,15 - 0,4
(*) Os valores entre parênteses devem ser adotados se os edifícios forem excitados horizontalmente com frequências inferiores a cerca de 5Hz.			

Outra norma bastante importante e que é referência para a medição dos níveis de vibração no corpo inteiro é a ISO 2631 [16]. Esta norma portuguesa indica que o que causa efeito no ser humano são os efeitos periódicos. A orientação é aplicável a vibrações onde a faixa de frequência varia de 0,5 a 80 Hz é transmitida para um corpo sentado como um todo através do assento, porém vibrações inferiores a 1 Hz podem ser desconsideradas o que faz com que a faixa relevante seja de 1 a 80 Hz. Os efeitos da vibração no corpo inteiro de alta intensidade durante um longo período pode acarretar em problemas de saúde envolvendo a coluna e o sistema nervoso em maior probabilidade e também no sistema digestivo, urinário e nos órgãos femininos, porém estes em menor chance.

A avaliação do efeito de uma vibração sobre a saúde deve ser feita de forma independente ao longo de cada eixo. A avaliação da vibração deve ser feita no que diz respeito à aceleração de maior frequência ponderada determinada em qualquer eixo no assento. Vale ressaltar que quando a vibração em dois ou mais eixos é comparável, a soma vetorial é às vezes usada para estimar o risco à saúde. Faz-se necessário realizar uma ponderação de frequência para pessoas sentadas com um fator de multiplicador k ; nos eixos x e y é de 1,4 e no z de 1,0.

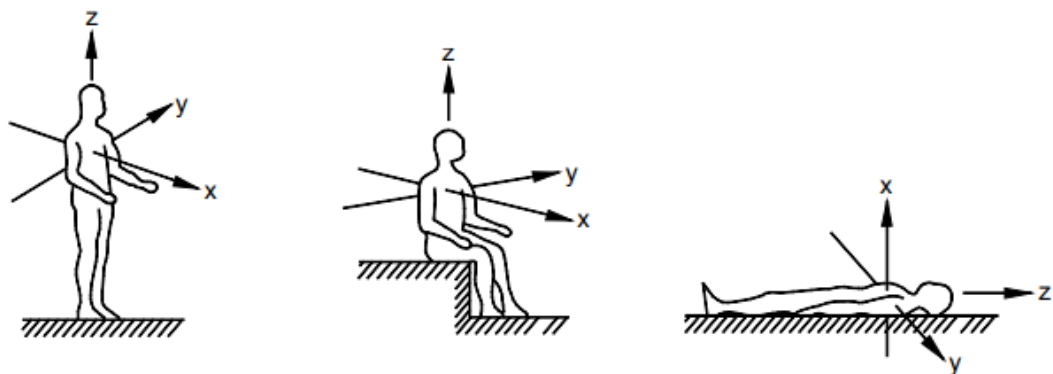


Figura 1 - Sistema de eixos utilizado para avaliação dos níveis de vibração no corpo humano (ISO 2631)

Nota-se que não há dados suficientes para mostrar uma relação quantitativa entre a exposição à vibração e o risco de efeitos para a saúde. Portanto, não é possível avaliar a vibração do corpo inteiro em termos de probabilidade de risco em várias magnitudes de exposição e durações.

Quando a exposição à vibração consiste em dois ou mais períodos de exposição a diferentes magnitudes e durações, a magnitude de vibração equivalente correspondente à duração total da exposição pode ser avaliada de acordo com qualquer uma das fórmulas:

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^2 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{2}}$$

Equação 3

ou

$$a_{w,e} = \left[\frac{\sum a_{wi}^4 \cdot T_i}{\sum T_i} \right]^{\frac{1}{4}}$$

Equação 4

Onde:

$\alpha_{w,e}$ é a magnitude da vibração equivalente (aceleração rms em m/s²);

α_w é a magnitude da vibração (aceleração rms em m/s²) para a duração da exposição T.

Embora, como declarado anteriormente, não exista evidência conclusiva para apoiar uma dependência temporal da vibração em relação ao conforto, a frequência de aceleração foi usada para calcular a dose de vibração que será recebida durante uma exposição diária esperada. Este valor estimado da dose de vibração em metros por segundo para a potência 1,75 (m/s^{1,75}) é dado por:

$$eVDV = 1,4 \cdot a_w \cdot T^{1/4}$$

Onde:

α_w é a aceleração rms da frequência ponderada;

T é a duração de exposição, em segundos.

O valor estimado da dose de vibração obtido por esse procedimento pode ser comparado ao obtido em um ambiente alternativo, de modo a comparar o desconforto dos dois ambientes.

Já a norma britânica BS 6472 [17] caracteriza a vibração do edifício em relação à resposta humana. Segundo ele, as magnitudes satisfatórias estão relacionadas a críticas prejudiciais dos ocupantes e não são determinadas por quaisquer outros fatores como risco de saúde em curto prazo ou eficiência de trabalho. Nas situações onde existem magnitudes acima do nível mínimo, as vibrações podem ser toleradas, como nos projetos de escavação nas construções. Em caso de vibrações a longo prazo, o critério a ser usado com relação à resposta humana pode ser escolhido com base na ocupação

esperada e na atividade dos ocupantes. Cada quarto ocupado de um edifício deve ser analisado de acordo com tais critérios.

Esta norma apresenta imagens que traduzem as magnitudes de vibrações satisfatórias em edifícios. As curvas bases na Figura 2 e na Figura 3 descrevem estas grandezas para resposta humana aproximadamente igual em relação ao incômodo humano e/ou queixas sobre interferências com atividades. As magnitudes de vibrações satisfatórias em edifícios devem ser especificadas em múltiplos das magnitudes da curva base ou magnitudes medidas em comparação com os valores da dose de aceleração ou vibração r.m.s. indicados na Tabela 7 e na Tabela 8. Em magnitudes de vibração abaixo das curvas de base da Figura 2 à Figura 7, críticas prejudiciais ou queixas de vibração são raros. No entanto, esta afirmação não implica que, dependendo das circunstâncias e expectativas, o incômodo e/ou reclamações sejam necessariamente esperadas em magnitudes mais altas [17].

Vale ressaltar que nas figuras o eixo das abcissas representa a frequência em Hz e o das ordenadas a aceleração em m/s^2 nas Figuras 2, 3, 4 e 6 e velocidade em m/s nas Figuras 5 e 7.

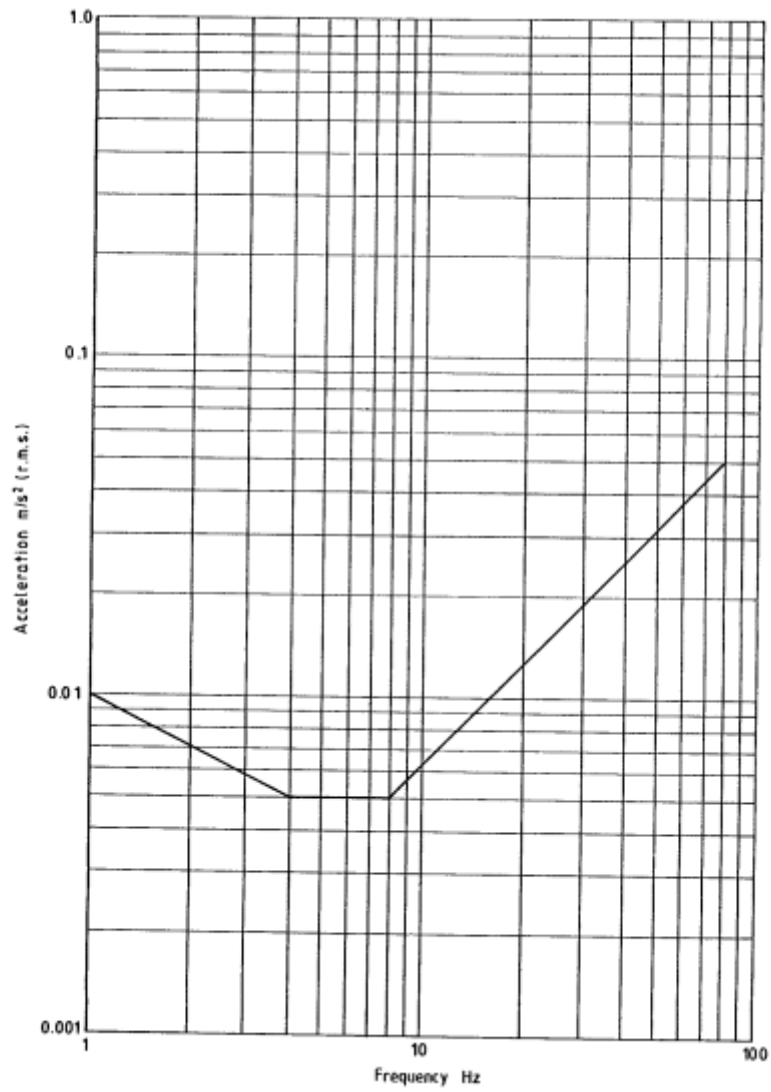


Figura 2 – Curva base para aceleração de vibrações em edifícios – eixo z (BS 6472)

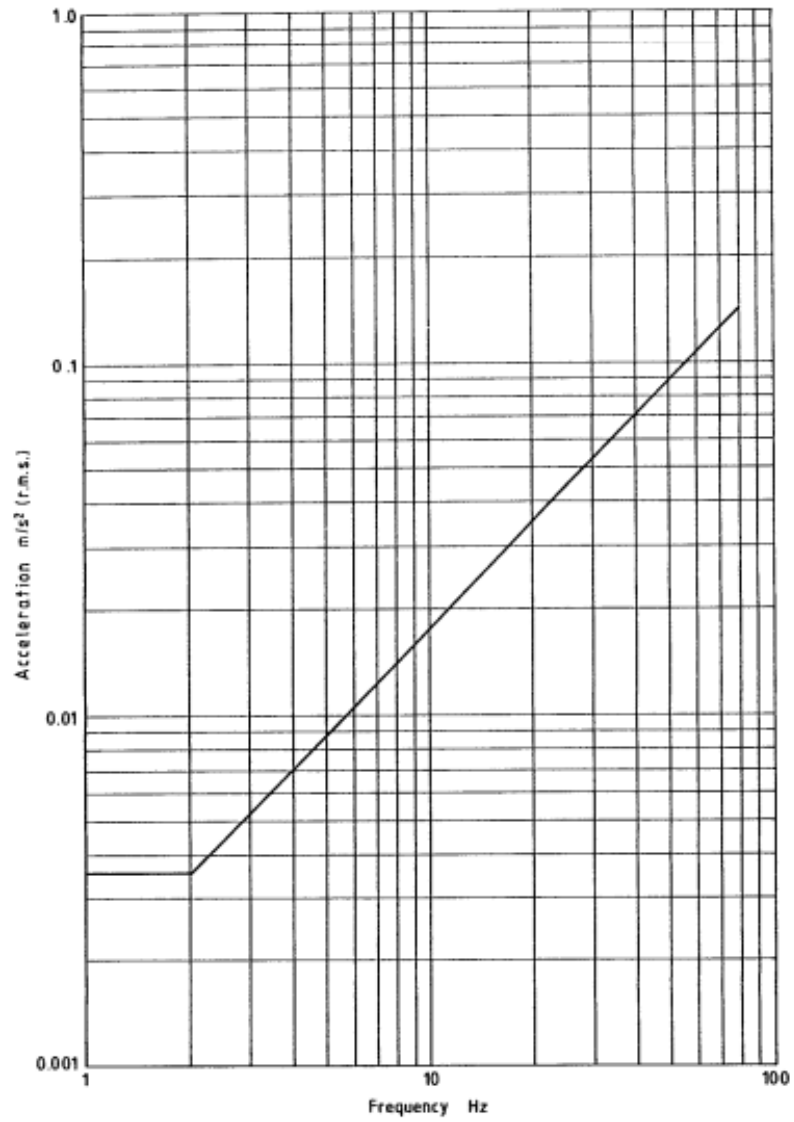


Figura 3 - Curva base para aceleração de vibrações em edifícios – eixo x e y (BS 6472)

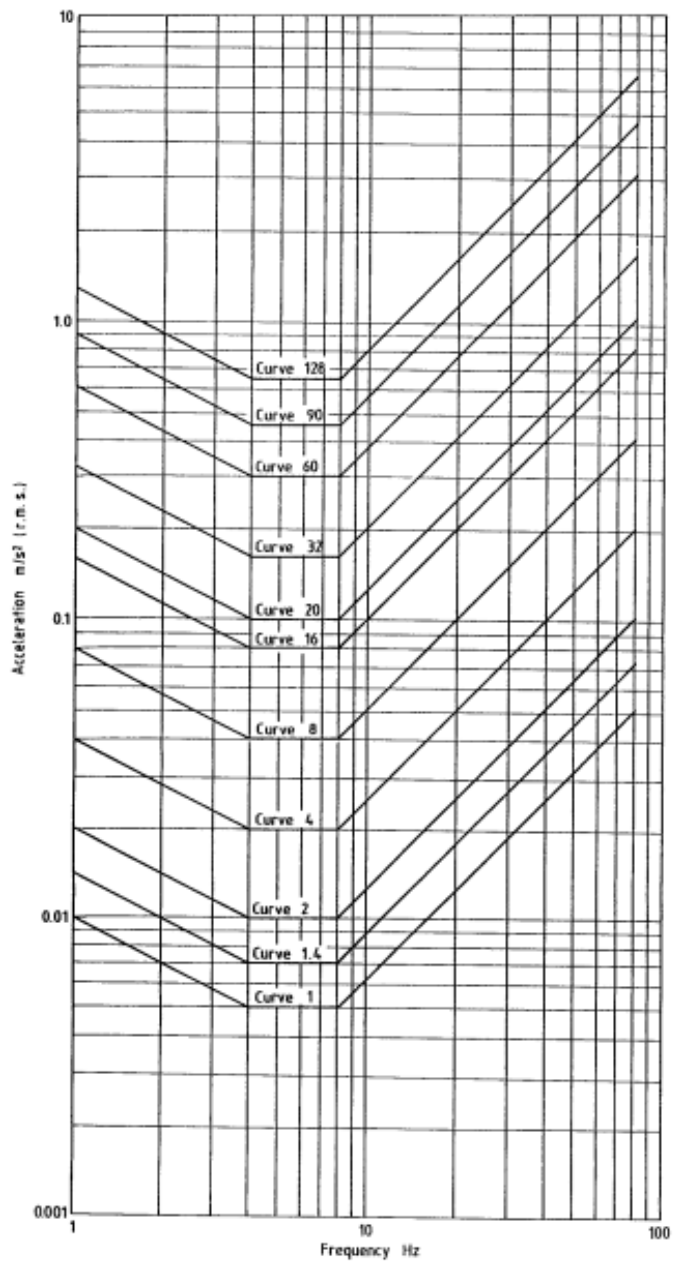


Figura 4 - Curva para aceleração de vibrações em edifícios – eixo z (BS 6472)

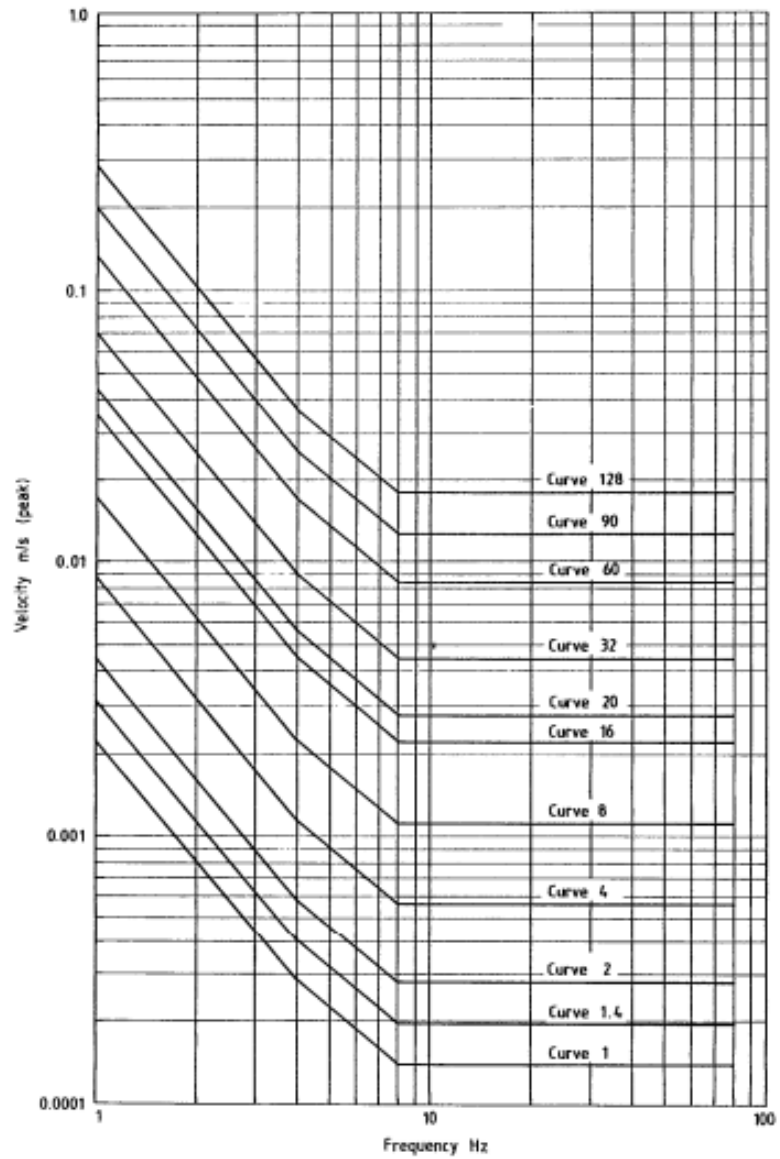


Figura 5 - Curvas para velocidade de pico de vibração em edifícios - eixo z (BS 6472)

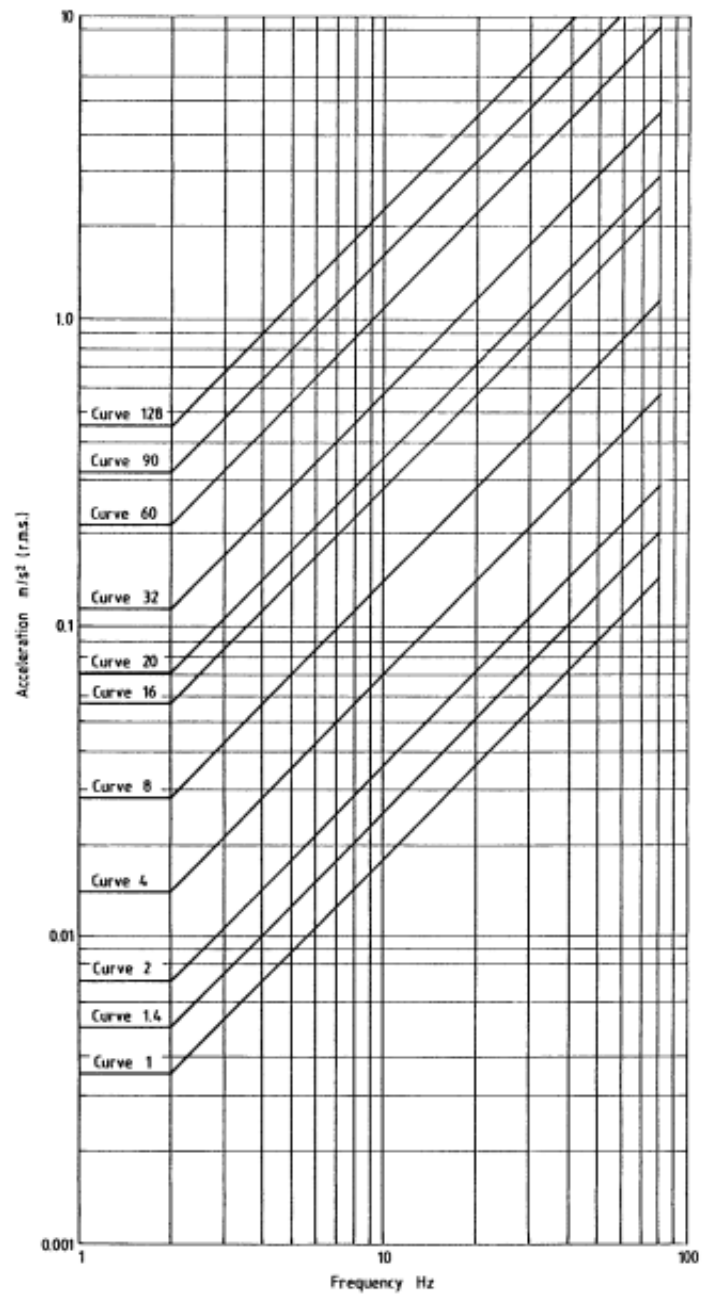


Figura 6 - Curva para aceleração de vibrações em edifícios – eixo x e y (BS 6472)

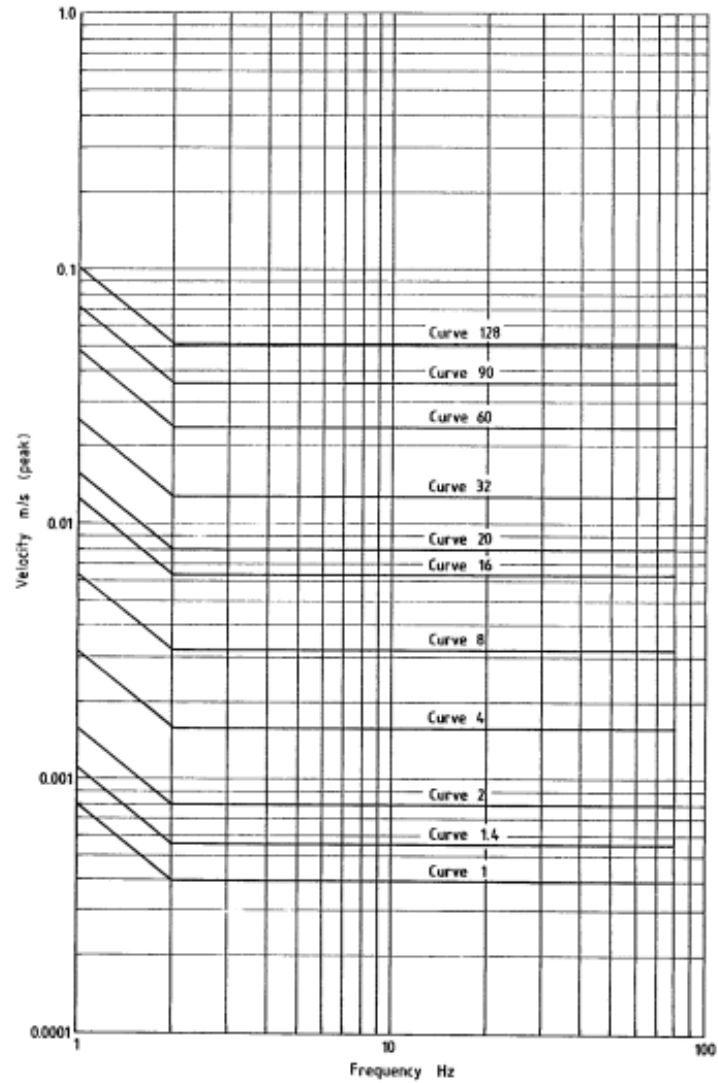


Figura 7 - Curvas para velocidade de pico de vibração em edifícios - eixo x e y (BS 6472)

Na Tabela 7 pode-se analisar a aceleração em m/s^2 medida em um prédio residencial durante o dia em certos períodos de exposição. Nota-se que em intervalos de tempo pequenos é onde se encontra o maior valor de aceleração e no maior intervalo, a menor aceleração.

Tabela 7 - Frequência medida de aceleração m/s^2 correspondente a uma baixa probabilidade de críticas prejudiciais (BS 6472)

Localização	Período de exposição				
	16h	1h	225s	14s	0,9s
Edifícios residenciais	0,01 a	0,02 a	0,04 a	0,08 a	0,16 a
Período diurno	0,02	0,04	0,08	0,16	0,32

Já a Tabela 8 apresenta três níveis de satisfação: baixa probabilidade de críticas prejudiciais, possíveis críticas prejudiciais e provável crítica prejudicial e os relaciona com dois períodos do de em prédios residenciais: dia e noite. Percebe-se que os valores de vibração são menores durante a noite.

Tabela 8 - Valores de doso de vibração ($m/s^{1,75}$) abaixo onde vários graus de críticas prejudiciais podem ser esperados em edificações residenciais (BS 6472)

Localização	Queixas pouco prováveis	Queixas possíveis	Queixas prováveis
Edifícios residenciais Período diurno (16h)	0,2 a 0,4	0,4 a 0,8	0,8 a 1,6
Edifícios residenciais Período noturno (8h)	0,13	0,26	0,51

Os valores de aceleração ponderados devem ser avaliados em relação às magnitudes de aceleração de base na faixa de frequência de sensibilidade máxima. O estabelecimento de critérios e objetivos de projeto, elevando as curvas-base da Figura 2 à Figura 7, deve ser feito por referência às experiências atuais e ao dar a devida consideração às relações sociais, públicas e econômicas, tendo minimizado as magnitudes de vibrações, tanto quanto é razoavelmente praticável.

Vale ressaltar que as curvas de base apresentadas não têm em conta a possibilidade de que, nas frequências acima de aproximadamente 30Hz, a vibração possa introduzir perturbações acústicas indesejáveis. As curvas são aquelas atualmente usadas para avaliar a resposta humana à vibração em edifícios e não são necessariamente a mesma forma que os limiares de percepção de vibração.

A Tabela 9 e a Tabela 10 correspondem, respectivamente, às leituras das curvas representadas na Figura 2 e Figura 3.

Tabela 9 - Valores de aceleração para curva base na Figura 2 (BS 6472)

Frequência	Aceleração (r.m.s)		
Hz	m/s ²		
1,00	1,00	x	10 ⁻²
1,25	8,94	x	10 ⁻³
1,60	7,91	x	10 ⁻³
2,00	7,07	x	10 ⁻³
2,50	6,32	x	10 ⁻³
3,15	5,63	x	10 ⁻³
4,00	5,00	x	10 ⁻³
5,00	5,00	x	10 ⁻³
6,30	5,00	x	10 ⁻³
8,00	5,00	x	10 ⁻³
10,00	6,25	x	10 ⁻³
12,50	7,81	x	10 ⁻³
16,00	1,00	x	10 ⁻²
20,00	1,25	x	10 ⁻²
25,00	1,56	x	10 ⁻²
31,50	1,97	x	10 ⁻²
40,00	2,50	x	10 ⁻²
50,00	3,13	x	10 ⁻²
63,00	3,94	x	10 ⁻²
80,00	5,00	x	10 ⁻²

Tabela 10 - Valores de aceleração para curva base na Figura 3 (BS 6472)

Frequência	Aceleração (r.m.s)
Hz	m/s ²
1,00	3,57 x 10 ⁻³
1,25	3,57 x 10 ⁻³
1,60	3,57 x 10 ⁻³
2,00	3,57 x 10 ⁻³
2,50	4,46 x 10 ⁻³
3,15	5,63 x 10 ⁻³
4,00	7,14 x 10 ⁻³
5,00	8,93 x 10 ⁻³
6,30	1,13 x 10 ⁻²
8,00	1,43 x 10 ⁻²
10,00	1,79 x 10 ⁻²
12,50	2,23 x 10 ⁻²
16,00	2,86 x 10 ⁻²
20,00	3,57 x 10 ⁻²
25,00	4,46 x 10 ⁻²
31,50	5,63 x 10 ⁻²
40,00	7,14 x 10 ⁻²
50,00	8,93 x 10 ⁻²
63,00	1,13 x 10 ⁻¹
80,00	1,43 x 10 ⁻¹

A curva de base para vibração do eixo X e Y é menor do que a curva do eixo Z em baixas frequências. Isto é devido à sensibilidade do corpo humano ao movimento do eixo X ou Y nessas frequências baixas.

2.3 Laje com vigotas pré-tensionadas

2.3.1 Introdução

Com o avanço da tecnologia e, conseqüentemente, da engenharia iniciou-se a busca por vencer vãos cada vez maiores através do pré-esforço e da resistência dos materiais. Uma das principais lajes geradas a partir desse avanço foi a laje de vigotas pré-fabricadas, porém apesar desta atender aos principais critérios estruturais, no quesito vibrações seu comportamento não é agradável. A maior problemática desta laje está relacionada com a vibração vinda do aumento de atividades rítmicas, resultante de utilizações participativas associadas a movimentos sincronizados. A normalização europeia prEN 1990 [18], relativa às bases de cálculo estrutural, indica que esta questão deve ser avaliada no contexto dos estados limites de utilização e remete o projetista para os critérios definidos na norma ISO 2631 [16], indicando, de forma sucinta, alguns parâmetros com vista à verificação dos valores-limite [19].

Devido às questões apresentadas o intuito desta tese é dimensionar uma laje de vigotas pré-fabricadas e compará-las as diversas normas internacionais a respeito dos níveis de vibrações aceitáveis para o conforto humano.

Vale ressaltar que as informações apresentadas abaixo foram retiradas do livro Lajes Aligeiradas com Vigotas Pré-Tensionadas [19].

2.3.2 Sensibilidade humana às vibrações

Os limites de tolerância às vibrações em pisos são difíceis de definir, porque, além de variarem de indivíduo para indivíduo, variam também de acordo com as circunstâncias para um mesmo indivíduo, seja em função do estado de concentração ou relaxamento. Por exemplo, o desfrutar de uma refeição ao som de uma orquestra junto a uma pista de dança pode corresponder a uma situação em que a tolerância às vibrações seja cerca de

quatro vezes superior para o mesmo indivíduo quando trabalha em um escritório ou em repouso em sua casa. Um mesmo indivíduo participante num evento rítmico é cerca de dez vezes mais “tolerante” às vibrações provocadas do que quando é meramente um simples observador alheio ao referido evento [19]–[21].

Não há uma definição clara e precisa acerca dos níveis de tolerância, uma vez que a reação das pessoas varia de forma diversa e é de difícil parametrização. Porém há níveis de excitação a partir do qual as vibrações podem causar problemas e estes dependem, na maioria das vezes, da sensibilidade dos indivíduos e das circunstâncias com que ocorrem e, devido a isso, se faz necessário conhecer esses fatores que influenciam no grau de sensibilidade do corpo humano às vibrações:

- A posição do corpo humano – de acordo com as normas ISO 2631 [20], [21], o intervalo de frequências de maior sensibilidade à aceleração situa-se entre 4 e 8 Hz, para vibrações na direção que contém o eixo “pés-cabeça”, direção z, e de 0 a 2 Hz para a direção “peito-costas”, direção x, ou “esquerda-direita”, direção y.
- As características da fonte emissora e o tempo de exposição – em função da amplitude e da composição de frequência.
- Característica do pavimento – em função da massa, rigidez e amortecimento.
- Estado de pré-aviso – a ansiedade e desconforto são atenuados pelo grau de expectativa às excitações. Quanto maior for o conhecimento a priori da ocorrência, menos perturbadoras se tornam as vibrações.
- Tipo de atividade – a sensibilidade à vibração aumenta com o grau de concentração necessário à atividade que se está a exercer, por exemplo, passeio ou dança, trabalho de escritório, leitura, etc.

A resposta humana às vibrações é dividida, segundo a ISSO 2631-1 [20], em três categorias associadas a limites de tolerância:

- i. limite a partir do qual há redução de conforto
- ii. limite a partir do qual a eficiência de trabalho é prejudicada

- iii. limite a partir do qual existe perigo para a segurança ou saúde

A hierarquização proposta por Murray [22], mais adequada ao projeto de edifícios, é constituída por quatro categorias, correspondendo as duas primeiras, no que diz respeito à verificação de segurança, a níveis aceitáveis:

- i. vibração que embora presente não é sentida pelos ocupantes;
- ii. vibração que é sentida mas não constitui perturbação;
- iii. vibração, incomodativa e perturbante;
- iv. vibração, intensa provocando mal-estar aos ocupantes.

Os efeitos devido a ações dinâmicas que podem ser enquadrados nos estados limites de utilização dependem do tipo de ação e da duração da ocorrência, sendo frequentemente classificados [20] como contínuas, vibrações de longa duração ou como vibrações de curta duração, vibrações intermitentes ou transitivas [19].

2.3.3 Caracterização das ações induzidas pela atividade humana

2.3.3.1 Atividades ritmadas

A maioria dos problemas de vibração em pisos tem origem em forças repetidas com origem em equipamentos ou atividades humanas ritmadas, tais como o simples caminhar, dançar, ginástica aeróbica, etc. Nestes casos a força aplicada é do tipo periódico, podendo ser representada por uma combinação de forças sinusoidais, em que as frequências são múltiplos ou harmônicos da frequência-base, f , da força periódica, por exemplo, a frequência do passo.

A ação dinâmica $F(t)$ originada por uma pessoa em movimento repetido periódico pode ser assim definida como uma sequência de impulsos em função do tempo, t , e é normalmente expressa por séries de Fourier [23]–[25].

A frequência e a amplitude das excitações induzidas pelas atividades humanas dependem do sincronismo imposto associado ao movimento. De fato, nestes movimentos o valor mínimo da força dinâmica é zero e o valor máximo depende do tempo de contato dos pés com o pavimento. Durante a fase de contato a força exercida no pavimento pode ser representada como uma forma geométrica, suavizada, similar a meia onda sinusoidal. Definindo como coeficiente de contato $\xi = \frac{t_p}{T_p}$ a relação entre o tempo da fase de contato, t_p , e o período do movimento, T_p , obtêm-se um parâmetro relacionado com o vigor da atividade. Tal vigor é tanto maior quanto menor for o coeficiente de contato ξ . O máximo valor da força de contato é dado por:

$$F(\max) = \frac{\pi \cdot Q}{2\xi}$$

Equação 5

em que $Q = mg$, sendo m a massa do corpo e g a aceleração da gravidade. O valor máximo de $F(t)$ não depende, portanto da periodicidade da atividade.

A modelação matemática da historia de carga em função do coeficiente de contato é definida por Ji, T. (1994) [25] para um indivíduo pela seguinte expressão:

$$F(t) = Q \left[1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \text{sen}(2\pi \cdot n \cdot f \cdot t + \phi_n) \right]$$

Equação 6

em que:

$$\alpha_n = \frac{[2 \cdot (1 + \cos(2\pi n \xi))]^{1/2}}{4\xi^2 n^2 - 1}$$

Equação 7

Onde:

n – número de ordem de cada harmônico;

α_n – é um coeficiente numérico correspondente ao harmônico de ordem n ;

Q – é o valor estático da sobrecarga devido aos participantes no movimento;

f – frequência correspondente ao primeiro harmônico;

ϕ_n – ângulo de defasamento correspondente ao harmônico de ordem n ;

k – número de harmônicos que caracterizam a função excitação no intervalo de frequências relevantes.

Na Tabela 11 apresentam-se os valores adotados pela norma BS 6399 [26] que caracterizam esse tipo de atividades ritmadas.

Tabela 11 - Coeficientes de Fourier para várias atividades rítmicas

Tipo de atividade	Fator de contato ξ		Harmônico de ordem n			
			1	2	3	4
Baixo impacto, movimento pedestre	2/3	α_n	1,29	0,16	0,13	0,04
		ϕ_n	$-\pi/6$	$\pi/6$	$-\pi/2$	$-\pi/6$
Exercícios ritmados de impacto moderado	1/2	α_n	1,57	0,67	0	0,13
		ϕ_n	0	$-\pi/2$	0	$-\pi/2$
Salto, atividade de impacto elevado	1/3	α_n	1,8	1,29	0,67	0,164
		ϕ_n	$\pi/6$	$-\pi/6$	$-\pi/2$	$\pi/6$
Atividade com forte impacto, saltos vigorosos	1/4	α_n	1,89	1,57	1,13	0,67
		ϕ_n	$\pi/4$	0	$-\pi/4$	$-\pi/2$

A norma ISO 10137 [23] apresenta exemplo de valores para as frequências e carga estática Q em função da atividade. Trata-se de valores correspondentes às situações mais frequentes, correspondentes a um mínimo de 20 participantes, adotados de Allen, D. E. [27], e que se reproduzem na Tabela 12.

Tabela 12 - Exemplos de valores de cálculo para a sobrecarga devido a participantes em atividades de grupo

Atividade	Frequência fundamental (Hz)	Ocupação participantes	Sobrecarga Q devido aos participantes ativos (KN/m ²)
Dança	1,5 a 3,0	2,5 m ² /par	0,6
Concertos e eventos desportivos	1,5 a 3,0	0,5 m ² /pessoa	1,5
Exercícios aeróbicos	1,5 a 3,0	3,9 m ² /pessoa	0,4

No caso de agrupamento de pessoas a situação é mais complexa e não se podem extrapolar os valores dos coeficientes de Fourier diretamente das equações 5 e 6, devido fundamentalmente à falta de sincronismo e às diferentes posições e “modos” de manifestação de cada indivíduo.

Um estudo experimental levado a cabo no Reino Unido [28], envolvendo grupo de pessoas em movimento compassado por música ritmada, veio demonstrar que os coeficientes α_n de Fourier variam com o número de pessoas, diminuindo de valor à medida que o número de participantes aumenta. Este efeito mostrou-se mais pronunciado para os harmônicos de ordem maior. Os coeficientes α_n de Fourier a utilizar na equação 6 deverão portanto ser ajustados de acordo com o número, p , de pessoas participantes.

Na Tabela 13 apresentam-se os valores dos resultados experimentais de acordo com o referido estudo.

Tabela 13 - Fatores de correção para α_n em função do número de participantes, p .

Harmônico n	1	2	3	4
Fator de correção	$p^{-0,082}$	$p^{-0,24}$	$p^{-0,31}$	$p^{-0,05}$

2.3.3.2 Vibrações induzidas pelo passo

As forças produzidas por um indivíduo a caminhar ou a correr dependem principalmente do seu peso e do vigor do passo. A força dinâmica $F(t)$ para um

conjunto sucessivo de passos pode também ser representada por uma série de Fourier através da equação:

$$F(t) = Q \left[1 + \sum_{n=1}^k \alpha_n \text{sen}(2\pi \cdot n \cdot f \cdot t + \phi_n) \right]$$

Equação 8

A norma ISO 10137 [23] apresenta exemplos para valores das frequências e coeficientes α_n adotados de Rainer, J. H. [29] e que se transcrevem na Tabela 14.

Os valores correspondentes aos ângulos de defasamento ϕ_n dependem de vários parâmetros. Contudo, as vibrações induzidas por esta atividade são essencialmente governadas pelo primeiro harmônico, pelo que para efeitos de cálculo o seu valor não é relevante [30], [31], podendo-se nas aplicações correntes considera-lo um valor nulo.

Tabela 14 - Parâmetros de cálculo para ações dinâmicas devido ao movimento de um indivíduo

Atividade	Harmônico n	Intervalo de frequência (Hz)	Coefficiente α_n
Caminhar	1	1,7 a 2,3	0,4
	2	3,4 a 4,6	0,2
	3	5,1 a 6,9	0,06
Correr	1	2,5 a 3,3	1,4
	2	5,0 a 6,6	0,4
	3	7,5 a 9,9	0,1

2.3.3.3 Critérios de aceitação para o ser humano

A resposta humana às vibrações dos pavimentos é um fenómeno de elevada complexidade dependendo da amplitude das vibrações, do ambiente que envolve o receptor e do próprio corpo humano. Um movimento contínuo, estacionário, pode ser mais perturbante que o movimento provocado por um impacto do tipo impulsivo. O limiar dos níveis de percepção para as mesmas

oscilações pode ser superior num espaço de trabalho no que num ambiente de repouso, exemplo, numa residência.

Para frequências mais sensíveis, entre os 4 Hz e os 8 Hz, o nível de incomodidade para indivíduos em escritórios ou residências traduz-se em cerca de 0,5% da aceleração da gravidade, o designado fator de aceleração, enquanto que pessoas que estejam envolvidas numa atividade que exija menor concentração ou não estejam em repouso podem aceitar níveis dez vezes superiores. Pessoas que se encontrem em locais movimentados ou que participem em atividades recreativas podem considerar aceitáveis fatores de aceleração de cerca de 1,5%.

A norma ISO 2631-2 [21] foi desenvolvida com vista a descobrir a maioria das situações que envolve as vibrações em edifícios. Esta norma apresenta limites para as acelerações em função do período de exposição e da frequência, tanto para as direções longitudinais como para as transversais, tendo em conta as diferentes posições que um ocupante se pode encontrar – em pé, sentado ou deitado.

Os limites para os diferentes tipos de ocupação são apresentados em função da média quadrática das acelerações, a_{rms} , expressa em m/s^2 , da seguinte forma:

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

Equação 9

Sendo:

a_w – aceleração observada em cada intervalo de tempo (t) em m/s^2 ;

T – duração do tempo de observação, em segundos.

De acordo com o tipo de utilização e natureza das vibrações apresentam-se os valores dos coeficientes multiplicativos a aplicar às curvas-base, recomendados pela ISO 2631-2 e que se reduzem na Tabela 15.

Tabela 15 - Valor dos coeficientes multiplicativos a aplicar às curva-base - ISO 2631-2

Localização	Período do dia	Vibrações intermitentes ou contínuas	Vibrações transitivas com várias ocorrências por dia
Zonas de ocupação sensíveis, e. g., em hospitais, laboratórios de precisão, etc.	Dia e noite	1	1
Zonas residenciais	Dia	2 a 4	30 a 90
	Noite	1,4	1,4 a 20
Escritórios, escolas	Dia e noite	4	60 a 128
Oficinas	Dia e noite	8	90 a 128

Estes níveis de tolerância servem de referência para ser possível assumir como aceitáveis os valores, medidos “in loco” ou especificados em projeto.

3. Estudo de caso

3.1 Dimensionamento

Para o estudo de caso, buscou dimensionar cinco lajes bi-apoiadas com diferentes comprimentos (L) 3, 4, 5, 6 e 7 metros de largura e analisá-las a fim de perceber seu comportamento perante as verificações de estado limite último, de serviço e principalmente quanto às vibrações.

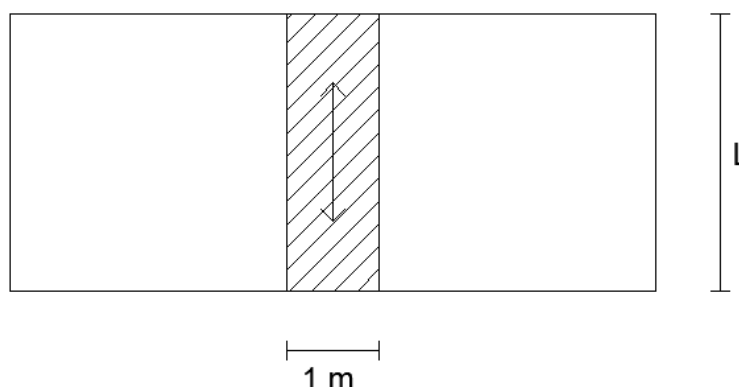


Figura 8 - Representação da laje a ser dimensionada

As cargas permanentes (G) consideradas para o dimensionamento foram o peso próprio da laje (G_1), este é arbitrado no início e depois corrigido, e com isso utilizou-se para a laje de: 3m, 2,0 KN/m², 4m, 3,0 KN/m², 5m, 4,0 KN/m², 6m, 5,0 KN/m² e 7m, 6KN/m²; os revestimentos (G_2), tendo seu valor utilizado de 1,5 KN/m² e as paredes divisórias (G_3) com 1,8 KN/m². Já a sobrecarga (Q) utilizada foi de 2,0 KN/m², levando em consideração de que se trata de um edifício residencial.

3.1.1 Estado Limite Ultimo

Para verificar o ELU, é necessário analisar as forças cortantes, no que diz respeito ao cisalhamento e o momento fletor, comparando seus valores solicitados de cálculo com os resistentes, sendo este, valores tabelados. Ou seja:

$$V_{sd} = V_{Ed} \leq V_{Rd}$$

$$M_{sd} = M_{Ed} \leq M_{rd}$$

Para o cálculo desses valores, faz-se necessário calcular inicialmente o carregamento da laje, levando em consideração os coeficientes de segurança do Eurocódigo 0 de 1,35 para ações permanentes e 1,5 para as variáveis.

$$P_{sd} = 1,35 \cdot (G_1 + G_2 + G_3) + 1,5 \cdot Q$$

Equação 10

$$V_{sd} = \frac{P_{sd} \cdot L}{2}$$

Equação 11

$$M_{sd} = \frac{P_{sd} \cdot L^2}{8}$$

Equação 12

3.1.2 Estado Limite de Serviço

Para análise do ELS, é necessário comparar o máximo esforço quase permanente (M_{cqp}) com a capacidade resistente (M_{fctk}) e a deformação quase permanente (δ_{cqp}) com a deformação limite (δ_{lim}).

$$M_{cqp} \leq M_{fctk}$$

$$\delta_{cqp} \leq \delta_{lim}$$

Antes de iniciar os cálculos referentes ao esforço e deformação quase permanente, é necessário determinar o carregamento quase permanente ($P_{sd,cqp}$).

$$P_{sd,cqp} = (G_1 + G_2 + G_3) + \Psi_1 \cdot Q$$

Equação 13

Sendo o valor adotado para Ψ_1 igual a 0,6.

$$M_{cqp} = \frac{P_{sd,cqp} \cdot L^2}{8}$$

Equação 14

$$\delta_{cqp} = \frac{5 \cdot P_{sd,cqp} \cdot L^4}{384 \cdot EI} \cdot \left(1 + \frac{G}{G + \Psi_1 \cdot Q} \cdot \varphi \right)$$

Equação 15

Sendo:

G – o somatório das cargas permanentes $G_1 + G_2 + G_3$

φ – coeficiente de fluência, 2,5.

$$\delta_{lim} = \frac{L}{400}$$

ou

$$\delta_{lim} = 1,5 \text{ cm}$$

Se existir paredes sobre a laje, adota-se 1,5 cm.

3.1.3 Vibração

Na análise da vibração faz-se necessário a comparação da deformação por vibração (δ_{vib}) em relação à deformação limite (δ_{lim}) e da frequência de vibração (f_{vib}) com a frequência limite (f_{lim}).

$$\delta_{vib} \leq \delta_{lim}$$

$$f_{vib} \leq f_{lim}$$

Como a laje em questão é bi-apoiada, a deformação por vibração é igual a deformação instantânea, ou seja:

$$\delta_{vib} = \delta_{inst} = \frac{5 \cdot w \cdot L^4}{384 \cdot EI}$$

Equação 16

O valor de w na expressão deve ser criteriosamente adotado, correspondendo ao valor médio das ações permanentes e a um valor reduzido da sobrecarga de utilização, cujo valor para habitações é de 0,25 KN/m² [19], [32].

A vibração limite é a mesma da verificação do ELS, ou seja, 1,5 cm.

A frequência própria f pode ser avaliada considerando separadamente as partes correspondentes à laje propriamente dita e aos apoios. No caso de sistemas simplesmente apoiados temos:

$$f_{vib} = \frac{\pi}{2 \cdot L^2} \cdot \sqrt{\frac{g \cdot EI}{w}}$$

Equação 17

Substituindo o valor da flecha máxima, δ , a meio vão que ocorre por efeito da ação uniformemente distribuída, w , a equação 16 pode ser escrita:

$$f = 0,179 \cdot \sqrt{\frac{g}{\delta_{vib}}}$$

Equação 18

Para definir limites para a frequência própria tem-se: introduzindo-se um fator k , em função do tipo de atividades, tem-se:

$$f_{lim} \geq n \cdot f_{step} \cdot \sqrt{1 + \frac{k}{a_0/g} \cdot \frac{\alpha_n \cdot w_p}{w_t}}$$

Equação 19

Onde o k varia de acordo ao tipo de atividade e, para habitações, foi utilizado o valor de 1,2. Já os valores do fator de aceleração (a_0/g) e da frequência do passo encontram-se na Tabela 16 e os do harmônico n e coeficiente dinâmico α_n na Tabela 17.

Tabela 16 - Valores-limite para o fator de aceleração em pavimentos

Utilização	Fator de aceleração a_0/g (%)
Habitacões, escritórios e igrejas	0,50%
Centros comerciais	1,50%
Passadiços interiores	1,50%
Passadiços exteriores	5,00%

Tabela 17 - Frequências e coeficientes dinâmicos, segundo Murray

Harmônico (n)	Andar		Exercícios aeróbicos		Dança em grupo	
	f (Hz)	α_n	f (Hz)	α_n	f (Hz)	α_n
1	1,6 - 2,2	0,5	2,0 - 2,75	1,5	1,5 - 3,0	0,5
2	3,2 - 4,4	0,2	4,0 - 5,5	0,6	-	-
3	4,8 - 6,6	0,1	6,0 - 8,25	0,1	-	-
4	6,4 - 8,8	0,05	-	-	-	-

Já o valor da sobrecarga devido aos participantes w_p é de 0,5 KPa para habitações e o carregamento total w_t é necessário acrescentar ao valor de w_p o peso próprio da laje.

É possível analisar graficamente a frequência de vibração em uma laje em relação ao período, como mostra a equação abaixo, a depender do seu harmônico, coeficiente dinâmico e frequência do passo. Estes podem ser encontrados na Tabela 17.

$$F(n) = P \cdot \alpha_n \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot n \cdot t \cdot f_{step})$$

P nesta equação representa o peso de uma pessoa, podendo ser adotado para tal 0,6 KN. Para gerar a imagem gráfica utilizou o 1º harmônico com a atividade de andar e, adotando para a frequência do passo, 2,0 Hz.

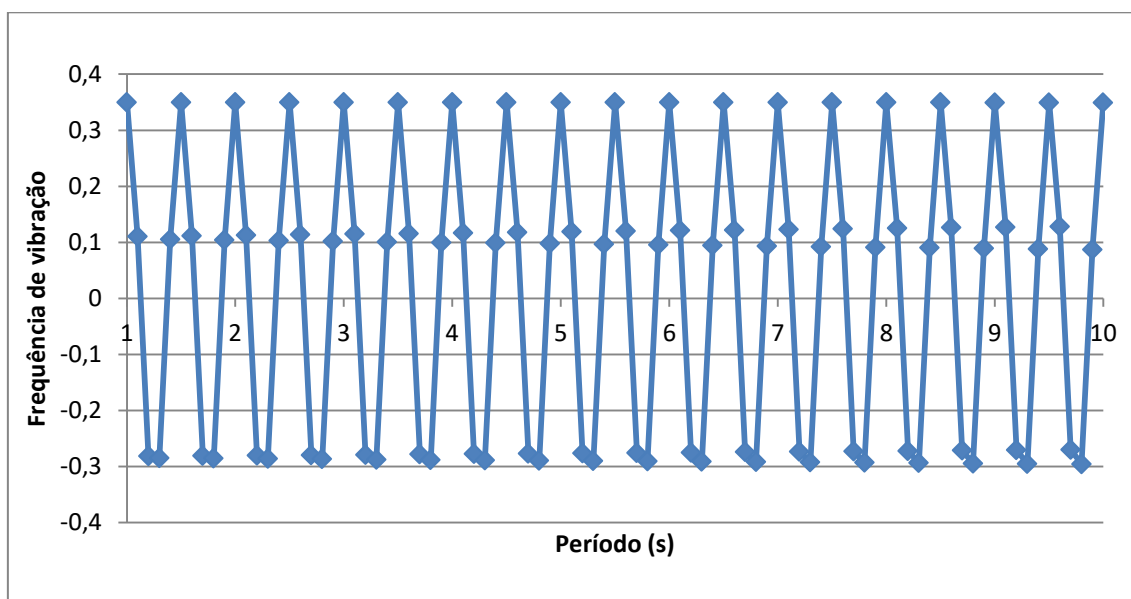


Figura 9 - Gráfico Frequência de vibração x Período

3.1.4 Resultados

A seguir estão expostos as tabelas de resolução do estudo de caso em questão. É importante frisar que os valores de V_{rd} , M_{rd} , M_{fctk} e EI são retirados dos portfólios de cada fabricante, mas, neste caso, a fonte foi o LNEC [33]. Também estão representadas duas secções transversais genéricas das lajes, uma simples (Figura 10) e outra dupla (Figura 11), para representar as utilizadas.

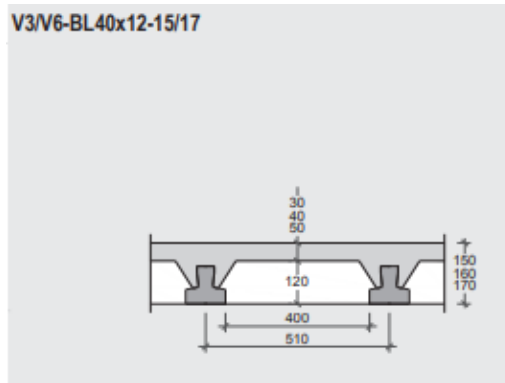


Figura 10 - Secção transversal da laje simples

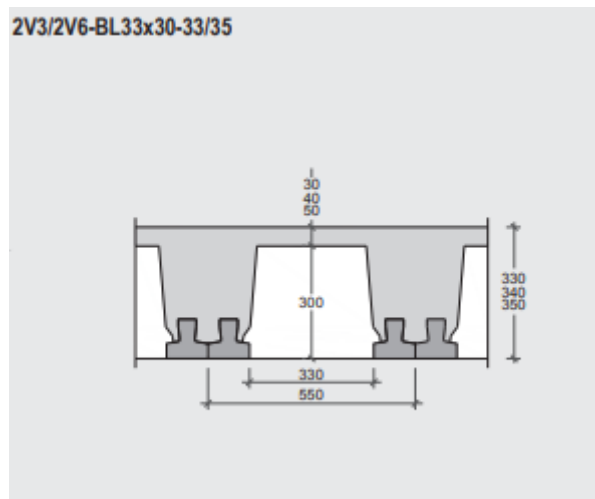


Figura 11 - Secção transversal da laje dupla

Tabela 18 - Valores do carregamento em primeira instância

	PP Laje (KN/m ²) (G1)	Revestimentos (KN/m ²) (G2)	Paredes divisórias (KN/m ²) (G3)	G _{tot} (KN/m ²)	Sobrecarga (KN/m ²) (Q)
L1	2,00	1,50	1,80	5,30	2,00
L2	3,00	1,50	1,80	6,30	2,00
L3	4,00	1,50	1,80	7,30	2,00
L4	5,00	1,50	1,80	8,30	2,00
L5	6,00	1,50	1,80	9,30	2,00

Tabela 19 - Verificação quanto ao Estado Limite Último

Laje	Comprimento (m)	Vigota	P _{sd} (KN/m)	Estado Limite Último					
				V _{sd} = V _{ed} (KN)	V _{rd} (KN/m)	Verificação	M _{sd} = M _{ed} (KNm/m)	M _{rd} (KNm/m)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6-BL40x12-15/17)	10,16	15,23	16,40	sim	11,42	17,20	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6-BL40x20-23/25)	11,51	23,01	24,00	sim	23,01	26,06	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6-BL33x25-28/30)	12,86	32,14	32,90	sim	40,17	45,60	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6-BL33x30-33/35)	14,21	42,62	43,40	sim	63,92	71,30	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6-BL33x30-33/35)	15,56	54,44	81,40	sim	95,27	153,40	sim

Tabela 20 - Verificação quanto ao Estado Limite de Serviço

Laje	Comprimento (m)	Vigota	P _{sd,cqp} (KN/m)	Estado Limite de Serviço						
				M _{cqp} (KNm/m)	M _{fttk} (KNm/m)	Verificação	EI (KNm ² /m)	δ _{cqp} (cm)	δ _{lim} (cm)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6-BL40x12-15/17)	6,1	6,86	9,70	sim	5247	0,37	1,5	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6-BL40x20-23/25)	7,5	15,00	17,00	sim	13797	0,56	1,5	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6-BL33x25-28/30)	8,5	26,56	28,10	sim	22150	0,98	1,5	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6-BL33x30-33/35)	9,5	42,75	46,80	sim	46373	1,10	1,5	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6-BL33x30-33/35)	10,5	64,31	93,40	sim	63104	1,67	1,5	não

Tabela 21 - Verificação quanto à vibração

Laje	Comprimento (m)	Vigota	Vibração					
			f _{vib}	f _{lim}	Verificação	δ _{vib} (cm)	δ _{lim} (cm)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6-BL40x12-15/17)	9,19	10,00	sim	0,0050	1,50	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6-BL40x20-23/25)	7,48	8,52	sim	0,0060	1,50	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6-BL33x25-28/30)	5,66	7,57	sim	0,0092	1,50	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6-BL33x30-33/35)	5,34	6,90	sim	0,0091	1,50	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6-BL33x30-33/35)	4,34	6,40	sim	0,0124	1,50	sim

A seguir, encontram-se a mesma resolução, porém com os valores ajustados do peso próprio e não com os adotados inicialmente.

Tabela 22 - Valores do carregamento corrigido

	PP Laje (KN/m ²) (G1)	Revestimentos (KN/m ²) (G2)	Paredes divisórias (KN/m ²) (G3)	G _{tot} (KN/m ²)	Sobrecarga (KN/m ²) (Q)
L1	2,42	1,50	1,80	5,72	2,00
L2	2,77	1,50	1,80	6,07	2,00
L3	3,16	1,50	1,80	6,46	2,00
L4	4,22	1,50	1,80	7,52	2,00
L5	5,10	1,50	1,80	8,40	2,00

Tabela 23 - Verificação quanto ao Estado Limite Último

Laje	Comprimento (m)	Vigota	P _{sd} (KN/m)	Estado Limite Último					
				V _{sd} = V _{ed} (KN)	V _{rd} (KN/m)	Verificação	M _{sd} = M _{ed} (KNm/m)	M _{rd} (KNm/m)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6- BL40x12-15/17)	10,72	16,08	16,40	sim	12,06	17,20	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6- BL40x20-23/25)	11,19	22,39	24,00	sim	22,39	26,06	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6- BL33x25-28/30)	11,72	29,30	32,90	sim	36,63	45,60	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6- BL33x30-33/35)	13,15	39,46	43,40	sim	59,18	71,30	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6- BL33x30-33/35)	14,34	50,19	81,40	sim	87,83	153,40	sim

Tabela 24 - Verificação quanto ao Estado Limite de Serviço

Laje	Comprimento (m)	Vigota	Psd,cqp (KN/m)	Estado Limite de Serviço						
				M _{cqp} (KNm/m)	M _{fcik} (KNm/m)	Verificação	EI (KNm ² /m)	δ _{cqp} (cm)	δ _{lim} (cm)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6- BL40x12-15/17)	6,92	7,79	9,70	sim	5247	0,43	1,5	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6- BL40x20-23/25)	7,27	14,54	17,00	sim	13797	0,54	1,5	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6- BL33x25-28/30)	7,66	23,94	28,10	sim	22150	0,87	1,5	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6- BL33x30-33/35)	8,72	39,24	46,80	sim	46373	1,00	1,5	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6- BL33x30-33/35)	9,6	58,80	93,40	sim	63104	1,52	1,5	não

Tabela 25 - Verificação quanto à vibração

Laje	Comprimento (m)	Vigota	Vibração					
			f_{vib}	f_{lim}	Verificação	δ_{vib} (cm)	δ_{lim} (cm)	Verificação
L1	3	V3 - 170 (V3/V6-BL40x12-15/17)	8,58	9,28	sim	0,0050	1,50	sim
L2	4	V3 - 240 (V3/V6-BL40x20-23/25)	7,61	8,80	sim	0,0060	1,50	sim
L3	5	V4 - 280 (V3/V6-BL33x25-28/30)	5,99	8,34	sim	0,0092	1,50	sim
L4	6	V5 - 350 (V3/V6-BL33x30-33/35)	5,60	7,41	sim	0,0091	1,50	sim
L5	7	V6 - 350 (2V3/2V6-BL33x30-33/35)	4,55	6,85	sim	0,0124	1,50	sim

4. Estudo prático

A fim de comparar os dados obtidos através das formulações indicadas com os reais valores obtidos nas construções, buscou-se realizar um ensaio prático. A laje em análise encontra-se em uma casa pertencente a um loteamento na região de Bragança, Portugal. Esta casa possui dois pavimentos: um térreo e outro superior, onde no primeiro andar localiza-se as salas de estar e jantar e a cozinha e no segundo andar encontra-se uma suíte, dois quartos e um banheiro.

4.1 Resultados esperados

Sabendo do comprimento da laje ensaiada, 6,50 metros, e da sua especificação [33], considerou-se valores para as cargas permanentes e variáveis (Tabela 26) e, dessa forma, foi possível calcular os resultados esperados para a análise da vibração (Tabela 27). A Figura 12 representa a seção transversal da laje utilizada.

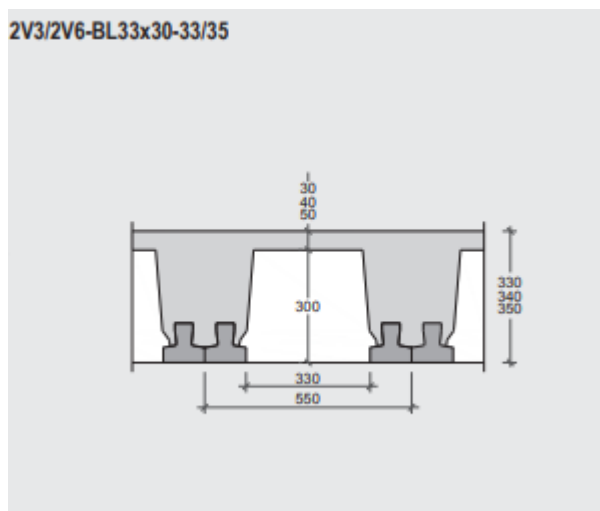


Figura 12 – Seção transversal da laje utilizada

Tabela 26 - Cargas permanentes e variáveis do estudo prático

	PP Laje (KN/m ²) (G1)	Revestimentos (KN/m ²) (G2)	Paredes divisórias (KN/m ²) (G3)	G _{tot} (KN/m ²)	Sobrecarga (KN/m ²) (Q)
L	5,06	1,50	0,75	7,31	2,00

Tabela 27 - Resultados esperados da vibração no estudo prático

Laje	Comprimento (m)	Vigota	Vibração					
			f _{vib}	f _{lim}	Verificação	δ _{vib} (cm)	δ _{lim} (cm)	Verificação
L	6,50	V3 - 350 (2V3/2V6- BL33x30-33/35)	5,60	6,87	sim	0,0094	1,50	sim

As frequências da tabela acima foram calculadas considerando os dados das lajes e a Equação 18 e Equação 19, apresentadas neste trabalho.

Espera-se para uma laje bi-apoiada e com este carregamento, uma frequência de vibração de 5,60 Hz e limite de 6,87 Hz.

4.2 Resultados do ensaio

Em busca de comparar a teoria à prática, foi realizado o ensaio de frequência com o auxílio de um acelerômetro. O mesmo foi realizado na localidade de Bragança, em uma obra de casas que utilizaram como lajes as com vigotas pré-tensionadas. As imagens da obra onde foi realizado o ensaio encontram-se na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, Figura 15 e Figura 16.



Figura 13 - Vista da obra



Figura 14 - Vista das casas



Figura 15 – Foto do andar superior 1/2



Figura 16 – Foto do andar superior 2/2

O ensaio foi realizado em uma laje contínua de 6,47 metros de comprimento. O acelerômetro foi colocado no meio da laje (Figura 17 e Figura 18), a seguir, provocou-se uma vibração através de pancadas na mesma (Figura 19) e, por fim, computou-se os dados da frequência em relação ao tempo.



Figura 17 - Foto superior da laje ensaiada com acelerômetro



Figura 18 - Foto inferior da laje ensaiada



Figura 19 - Foto do ensaio

Com auxílio do SignalExpress, um programa criado para realizar a computação dos dados obtidos pelo acelerômetro e projetar gráficos a partir destes, gerou-se um gráfico aceleração x tempo (Figura 20) e, a partir dele, gerou-se outro de magnitude x frequência (Figura 21). A partir deste último, obteve-se a frequência onde a magnitude gerada pela excitação feita ao pavimento foi máxima.

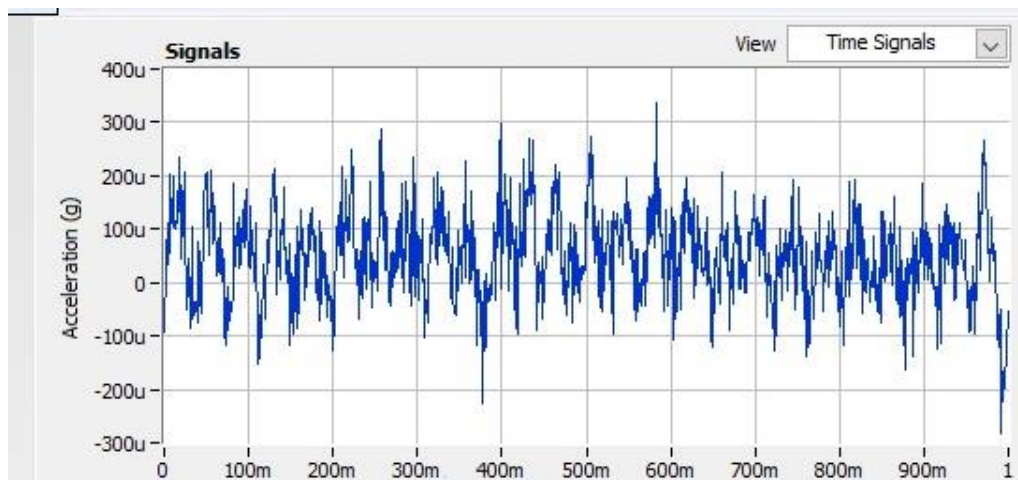


Figura 20 - Resultado do ensaio Aceleração x Tempo

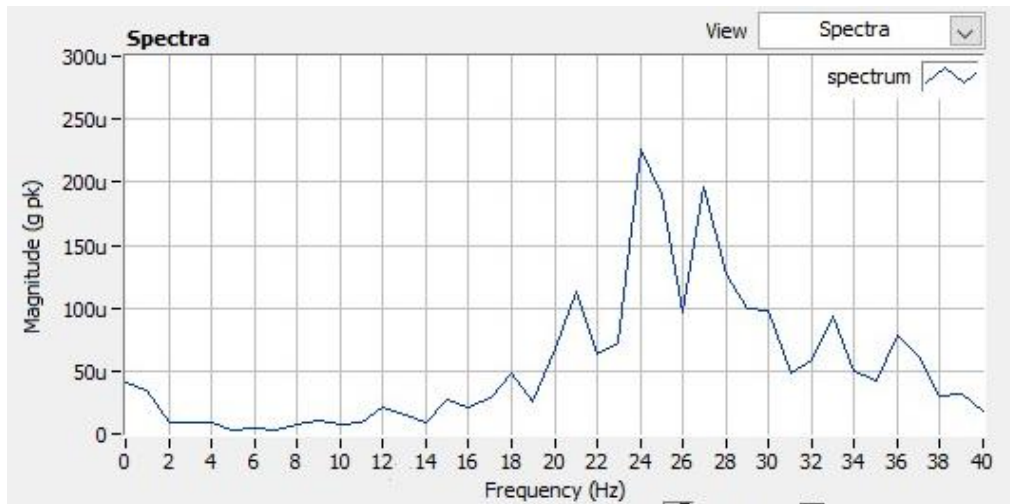


Figura 21 - Resultado do ensaio Magnitude x Frequência

Ao analisar o gráfico presente na Figura 21, constatou-se que a frequência com a maior magnitude foi a de 24 Hz.

5. Conclusões

Este trabalho permitiu agrupar os critérios relacionados aos limites de vibrações presentes em diversas normas, nacionais e internacionais, a fim de sintetizar estas informações e compará-las. Pode-se perceber que algumas normas convergem em alguns quesitos, mas divergem em outros. A norma brasileira, por exemplo, não possui muitos limites a respeito da vibração já que no país não ocorrem abalos sísmicos, sendo, então, as vibrações provocadas apenas pelos maquinários, majoritariamente. Logo, quando é solicitado estabelecer limites, ela recomenda que normas estrangeiras sejam tomadas como base.

Percebe-se também que perante os critérios estruturais, a norma alemã [3] possui faixas mais amplas de limites em comparação com a norma suíça [5] que é um pouco mais criteriosa. Os valores limitantes determinados pela norma brasileira [6] são muito baixos em comparação aos europeus devido ao fato de se tratar de uma região que não sofre muito com a vibração gerada pelos sismos, mas pelas máquinas e utilização do edifício.

No critério do conforto humano, tanto a norma alemã [15] quanto a portuguesa [16] fazem a análise visando o risco à saúde dos ocupantes para a faixa de 1 a 80 Hz, sendo qualquer frequência abaixo de 1 Hz desconsiderada. Já a norma britânica [17] faz seu estudo a partir dos níveis onde os utilizadores se sentem desconfortáveis. O ideal seria aplicar ambas as avaliações, abrangendo, assim, o conforto perante a sensibilidade e a saúde.

As lajes aligeiradas com vigotas pré-tensionadas são um tipo de estrutura que uma das suas maiores problemáticas está ligada justamente às vibrações. Por não ser muito maciça, acaba não “absorvendo” a vibração, fazendo com que o utilizador perceba essas variações com maior facilidade. Pode-se observar que quatro das cinco lajes estudadas foram verificadas em todos os critérios, porém a laje de 7m de comprimento possui problemas com a verificação da deformação, não tendo problemas com o estado limite último e com a vibração. No entanto, a fim de se amenizar esta deformação, no momento da construção é criada uma região maciça para que assim, o vão

teórico diminua juntamente com as deformações. Vale ressaltar que esta técnica pode ser utilizada também caso não haja verificação para o critério de vibração.

Com o ensaio realizado observou-se que a frequência real foi superior à determinada nas verificações. Isso ocorre devido ao fato da laje ensaiada ser contínua e não bi-apoiada como a calculada, ou seja, sua rigidez é maior, fazendo com que a vibração seja maior em comparação à dimensionada.

5.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, indica-se a modelação das lajes considerando a rigidez na extremidade (com molas), além de considerar diversas condições de apoio e ir analisar na prática.

Bibliografia

- [1] D. VIANA, “Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço,” *Estado Limite Último e Estado Limite de Serviço*, 2018. [Online]. Available: <https://www.guiadaengenharia.com/estados-limites/>. [Accessed: 07-Sep-2019].
- [2] E. da S. Lopes, “Os efeitos da vibração na saúde do trabalhador,” 2015. [Online]. Available: <http://www.mundohusqvarna.com.br/coluna/os-efeitos-da-vibracao-na-saude-do-trabalhador/>.
- [3] D. 4150, “DIN 4150 – parte 3 (1975).” 1975.
- [4] NP 2074, “Suggestions To Improve the Portuguese Standard for,” no. 2000.
- [5] S. 640312, “SN 640312.” 1978.
- [6] ABNT NBR 6118, “NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento Design of structural concrete -Procedure,” p. 238, 2014.
- [7] ISO 4886, “ISO 4886.” 1990.
- [8] British Standard BS 7385, “BS 7385: Evaluation and measurement for vibration in buildings —,” 1993.
- [9] BS 5228, “BS 5228.” 1997.
- [10] UNI 9916:2004, “Criteria for the measurement of vibrations and the assessment of their effects on buildings,” 2004.
- [11] AFTES, “AFTES.” 1974.
- [12] SS 4604866, “SS 4604866.” 1991.
- [13] C. M. R. Moutinho, “Controle de vibrações em estruturas de engenharia civil (tese de doutorado),” *Fac. Eng. da Univ. do Porto*, p. 394, 2007.
- [14] W. Bachmann, H.; Ammann, ““Vibrations in Structures Induced by Man and Machines.”” *Structural Engineering Documents*, IABSE, 1987.

- [15] DIN 4150, "DIN 4150 - parte 2." 1975.
- [16] ISO 2631, "Mechanical Vibration and Shock - All Body Vibration Exposure Assessment - Part 1: General Rules," no. 112, pp. 5–13, 1997.
- [17] British Standard BS 6472, "Evaluation Of Human Exposure To Vibration In Buildings (1 Hz to 80 Hz) - Guide For The Evaluation Of Human Exposure To Whole-Body Vibration," p. , 1992.
- [18] EN 1990, "EN 1990." 1990.
- [19] Rui de Sousa Camposinhos e Afonso Serra Neves, *Lajes Aligeiradas com Vigotas Pré-Tensionadas*. .
- [20] International Organizations for Standards, "ISO 2631-1." 1985.
- [21] International Organizations for Standards, "ISO 2631-2." 1985.
- [22] T. M. Murray, "Acceptability Criterion for occupant-Induced Floor Vibrations," *Eng. J.*, vol. 18, pp. 62–70, 1981.
- [23] International Organizations for Standards, "ISO 10137: Bases for design of structures - Serviceability of buildings against vibration." 1992.
- [24] D. E. Murray, T.M.; Allen, "Floor Vibrations Due to Human Activity," 1997.
- [25] B. R. JI, T.; Ellis, "Floor vibration induced by type loads," *Struct. Eng.*, vol. 72, 1994.
- [26] British Standard BS 6399, "BS 6399." .
- [27] D. E. Murray, T.M.; Allen, "Vibration criteria for Assembly Occupancies," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 12, pp. 617–623, 1985.
- [28] B. R. JI, T.; Ellis, "Loads generated by jumping crowds: experimental assessment." 2002.
- [29] G. Rainer. J. H.; Pernica, "Vertical Dynamic Forces From Footsteps," *Can. Acoust.*, 1986.
- [30] H. Baumann, K.; Bachmann, "Dynamic loading induced by persons and

its effect on beam structures,” *Inst. Struct. Eng.*, 1987.

- [31] F. J. Reiher, H.; Meister, “The Effect of Vibraton on People,” *Mater. Command*, 1931.
- [32] J. H. Allen, D. E.; Rainier, “Vibrations for Assembly Occupancies,” *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 12, 1985.
- [33] LNEC, “PAVIMENTOS ALIGEIRADOS DE VIGOTAS PREFABRICADAS DE BETÃO PRÉ-ESFORÇADO,” no. 23. 2018.