

UNIVERSIDADE DE PASSO FUNDO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

Área de concentração: Infraestrutura e Meio Ambiente

Dissertação de Mestrado

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIBRAÇÃO EM
PISOS COM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA COLADA

Jéssica Maria Bresolin

Passo Fundo

2020



Jéssica Maria Bresolin

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIBRAÇÃO EM
PISOS COM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA
COLADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Passo Fundo

2020

CIP – Catalogação na Publicação

B842a Bresolin, Jéssica Maria
Avaliação dos parâmetros de vibração em pisos com
vigas de madeira laminada colada [recurso eletrônico] /
Jéssica Maria Bresolin. – 2020.
13 MB ; PDF.

Orientador: Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.
Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade de
Passo Fundo, 2020.

1. Estruturas de madeira (Construção civil). 2. Madeira –
Vibração. 3. Vigas de madeira. 4. Conforto humano.
I. Chamberlain Pravia, Zacarias Martin, orientador. II. Título.

CDU: 624.011.1

Catalogação: Bibliotecária Juliana Langaro Silveira - CRB 10/2427

Jéssica Maria Bresolin

AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS DE VIBRAÇÃO EM
PISOS COM VIGAS DE MADEIRA LAMINADA
COLADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, da Faculdade de Engenharia e Arquitetura da Universidade de Passo Fundo, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia, sob a orientação do Prof. Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia.

Data de aprovação: Passo Fundo, 26 de março de 2020.

Zacarias Martin Chamberlain Pravia, Dr.

Orientador

Liz Graciela Nallim, Dr^a.

Universidade Nacional de Salta - UNSA

Fernando Busato Ramires, Dr.

Universidade de Passo Fundo – UPF

Francisco Dalla Rosa, Dr.

Universidade de Passo Fundo – UPF

“A procura da verdade é difícil e é fácil, já que ninguém poderá desvendá-la por completo ou ignorá-la inteiramente. Contudo, cada um de nós poderá acrescentar um pouco do nosso conhecimento sobre a natureza e, disto, uma certa grandeza emergirá” (Aristóteles).

AGRADECIMENTOS

Sempre classifiquei essa, como a pior parte da dissertação, a ser escrita, porque na vida não se desenvolve uma análise de regressão e não é pelo seu valor p , que descobrimos a significância das pessoas ao longo da nossa jornada.

Primeiramente, gostaria de agradecer de coração, ao professor Dr. Zacarias Martin Chamberlain Pravia, pela troca de conhecimentos e experiências, pela paciência e conselhos, bem como pela grande amizade e parceria construída.

Agradeço aos meus pais e minha irmã, por todo o suporte, amparo, zelo e muita motivação para que mais um ciclo fosse concluído, além de compreender a minha ausência em tantos momentos especiais.

Agradeço ao meu namorado, Luís Felipe Arruda, meu amigo e companheiro em todas as horas, por todo o suporte ao longo dessa grande jornada, pela companhia nas madrugadas, pelos incentivos diários e por compartilhar comigo a vida.

Agradeço aos funcionários Lucas Dias, Amilton Sartor, Newton Rodrigues, Matheus Nicolao e Leunir Freitas, bem como aos estagiários Felipe Sasso e Rafaela Pagnussat do Centro Tecnológico de Engenharia Civil, Ambiental e Arquitetura – CETEC, da Universidade de Passo Fundo, por todo o auxílio ao longo do desenvolvimento dos procedimentos experimentais na pesquisa, além da grande amizade firmada com todos.

Por fim, agradeço aos grandes amigos encontrados nos colegas e professores do mestrado, pelas trocas de conhecimentos, incentivos, momentos especiais e de boas risadas.

RESUMO

Tratando-se a madeira do material de construção mais popular a ser empregado na execução de pavimentos, os sistemas construtivos com madeira serrada e roliça, passaram a ser substituídos por elementos projetados em madeira, dadas suas propriedades mecânicas aprimoradas, essas possibilitando concepções arquitetônicas diferenciadas, especialmente em termos de alcance de longos vãos. Sendo esses produtos leves, por mérito da baixa massa atribuída à madeira, os pisos são suscetíveis à amplificação dinâmica e ao fenômeno da ressonância, ao serem estimulados diariamente por carregamentos dinâmicos, oriundos da prática de atividades habituais dos próprios ocupantes, como caminhar, correr e pular, provocando vibrações excessivas e níveis de acelerações intoleráveis, de forma a exibir performance de desempenho inaceitável. Uma vez que, em escala internacional, o dimensionamento e análise estrutural prescritos por documentos normativos, são regidos pela aferição das propriedades dinâmicas de pisos com dimensões e concepções específicas, as verificações de desempenho para pisos extensos constituídos por produtos projetados de madeira, tornam-se inconsistentes. Perante essas condições, a presente pesquisa tem como foco principal, a obtenção das propriedades dinâmicas da frequência natural e amortecimento de um piso constituído por vigas de Madeira Laminada Colada e estrutura de fechamento em placas de OSB, através de procedimentos experimentais voltados à prática de atividades humanas de caminhar, correr e pular, admitindo-se para o registro dos sinais vibratórios, distintos dispositivos de medição, associada ao desenvolvimento de uma análise modal por modelagem numérica e de uma avaliação subjetiva da estrutura, quanto ao conforto humano, em termos do incômodo e aceitabilidade das vibrações. Em face dos procedimentos realizados, dois cenários obtidos evidenciam a relevância da amplificação do desenvolvimento de pesquisas voltadas às vibrações excessivas de pisos de madeira massiva, posto que o primeiro cenário destaca a classificação da estrutura avaliada como um piso de alta frequência, apresentando frequências naturais inseridas no intervalo de 13,12 Hz a 17,69 Hz para o primeiro modo de vibração identificado e taxa de amortecimento estrutural na faixa de 1,0% a 3,81%, adequadas para pisos em madeira, ao passo que o segundo cenário ressalta a categorização piso, por uma avaliação de ordem subjetiva, como uma estrutura com desempenho insatisfatório, quanto ao conforto.

Palavras-chave: Pisos em madeira. Vigas de Madeira Laminada Colada. Vibrações induzidas pelo homem. Frequência natural. Amortecimento. Conforto humano.

ABSTRACT

As wood is the most popular building material to be used in the execution of floors, the construction systems with sawn and round wood, began to be replaced by wood engineering products, given their improved mechanical properties, these enabling differentiated architectural conceptions, especially in terms of reaching long spans. Being these light products, due to the low mass attributed to wood, the floors are susceptible to dynamic amplification and the phenomenon of resonance, as they are daily stimulated by dynamic loads derived from the practice of usual occupants activities themselves, such as walking, running and jumping, causing excessive vibrations and levels of intolerable accelerations, in order to exhibit unacceptable performance. As on an international scale, the structural design and analysis prescribed by normative documents are governed by the measurement of the dynamic properties of floors with specific dimensions and conceptions, the performance checks for extensive floors consisting of wood engineering products become inconsistent. Under these circumstances, the present research has as main focus, the obtaining of dynamic properties of natural frequency and damping on a Glued Laminated timber floor and Oriented Strand Board flooring, through experimental procedures practicing human activities such as walking, running and jumping, admitting to the recording of vibratory signals, different measuring devices, associated with the development of a modal analysis by numerical modeling and a subjective evaluation about human comfort, in terms of the discomfort and acceptability of vibrations. From the procedures carried out, two scenarios obtained show the relevance of the amplification of the development of research aimed at excessive vibrations of mass timber floors, since the first scenario highlights the classification of the structure evaluated as a high frequency floor, presenting natural frequencies inserted in the range of 13,12 Hz to 17,69 Hz for the first identified vibration mode and structural damping rate in the range of 1,0% to 3,81%, suitable for timber floors, while the second scenario emphasizes the floor categorization by a subjective evaluation, as a structure with unsatisfactory performance, regarding comfort.

Key-words: Timber floors. Glued laminated timber beams. Human-induced vibrations. Natural frequency. Damping. Human comfort.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Produtividade média de madeiras manufaturas de Pinus e Eucalipto, no cenário mundial.	26
Figura 2 – Elementos básicos aos EWPs, oriundos da cadeia de processamento de corte da madeira.....	29
Figura 3 – Piso tradicional de madeira com vigas de madeira serrada e fechamento com tábuas de encaixe.	31
Figura 4 – Piso de madeira com vigas em madeira laminada colada (<i>a</i>) e vigas I compostas (<i>b</i>), ambos comportando estrutura de fechamento mecanicamente rígida.....	32
Figura 5 – Classes e subclasses dos movimentos oscilatórios.....	37
Figura 6 – Configurações dos distintos tipos de movimentos oscilatórios.....	38
Figura 7 – Movimento ondulatório genérico.	39
Figura 8 – Representação genérica do período natural de uma determinada estrutura.	40
Figura 9 – Representação gráfica genérica da frequência natural.	41
Figura 10 – Sistema dinâmico horizontal.	42
Figura 11 – Sistema vertical carregado estaticamente, com deslocamento constante.....	43
Figura 12 – Sistema vertical carregado dinamicamente, com deslocamento variável no tempo.	43
Figura 13 – Graus de liberdade de um sistema dinâmico.	44
Figura 14 – Equilíbrio de forças de sistemas dinâmicos.	44
Figura 15 – Classificação das vibrações	47
Figura 16 – Comportamento do sinal de vibrações não amortecidas.	48
Figura 17 – Comportamento do sinal de vibrações amortecidas.	48
Figura 18 – Metodologia do decremento logarítmico.	49
Figura 19 – Metodologia da larga de banda.	50
Figura 20 – Frequências idênticas, admitidas para sucessivos passos de marcha.	54
Figura 21 – Ciclo da marcha.....	55
Figura 22 – Percurso de contato dos pés com a superfície, na fase de apoio.	56
Figura 23 – Impulso gerado na caminhada humana.	56
Figura 24 – Esquema de carregamentos do caminhar humano.	57
Figura 25 – Modelo genérico de forças devido ao caminhar.....	57
Figura 26 – Variações da força vertical típica normal da caminhada humana.	58

Figura 27 – Parâmetros relacionados ao comprimento dos passos.	59
Figura 28 – Frequências idênticas, admitidas para sucessivos passos de corrida.....	60
Figura 29 – Fases da corrida.	61
Figura 30 – Forças verticais típicas da corrida humana.....	61
Figura 31 – Movimentos do corpo durante um salto.	62
Figura 32 – Modelo genérico de forças devido a atividade de saltar.	64
Figura 33 – Diferentes frequências de ressonância do corpo humano.	66
Figura 34 – Fatores que afetam a aceitabilidade de vibrações em pisos, induzidas por atividades humanas.	67
Figura 35 – Relação sugerida entre os parâmetros a e b	72
Figura 36 – Estrutura da pesquisa.	74
Figura 37 – Vista em perspectiva do piso a ser executado pela pesquisa.....	75
Figura 38 – Vista superior: dimensões de largura (lz) e comprimento (lx) do piso.	76
Figura 39 – Vista frontal: dimensões do espaçamento entre as vigas do piso.....	76
Figura 40 – Dimensão genérica admitida para a seção transversal das vigas de MLC do piso.	76
Figura 41 – Locação das linhas de aparafusamento adotadas para a execução do piso.	79
Figura 42 – Identificação das vigas laminadas coladas do piso por eixos.....	80
Figura 43 – Condições de suporte do piso.	81
Figura 44 – Dimensões do perfil I empregado como viga de suporte.	81
Figura 45 – Piso finalizado.	82
Figura 46 – Aspecto visual final das lâminas de madeira de <i>Pinus</i> , a serem empregadas pela pesquisa.....	84
Figura 47 – Corpo-de-prova para ensaio de umidade da madeira.	86
Figura 48 – Corpos-de-prova admitidos para a caracterização da umidade da madeira de <i>Pinus</i>	87
Figura 49 – Aspecto dos corpos-de-prova, após finalização do processo de submersão em água.....	90
Figura 50 – Direções principais atribuídas à madeira, longitudinal (L), radial (R) e tangencial (T).....	91
Figura 51 – Efeitos do esforço de compressão paralela às fibras, em peças de madeira.....	92
Figura 52 – Corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras da madeira.	93

Figura 53 – Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da madeira.	93
Figura 54 – Caracterização de resistência à compressão paralela às fibras da madeira de <i>Pinus</i>	94
Figura 55 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das lâminas (<i>MOELa</i>).	96
Figura 56 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das vigas (<i>MOEV</i>).	96
Figura 57 – Identificação das lâminas.	98
Figura 58 – Realização do ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das lâminas.	99
Figura 59 – Disposição final das lâminas das vigas.	104
Figura 60 – Realização do ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das vigas.	105
Figura 61 – Efeitos do esforço de cisalhamento paralela às fibras, em peças de madeira coladas.	108
Figura 62 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola, na direção paralela às fibras da madeira.	109
Figura 63 – Cola Cascamite.	109
Figura 64 – Cola PUR-501.	110
Figura 65 – Corpos-de-prova da cola Cascamite.	111
Figura 66 – Corpos-de-prova da cola PUR-501.	112
Figura 67 – Realização do ensaio de determinação do cisalhamento da lâmina de cola paralela às fibras.	112
Figura 68 – Corpo-de-prova para ensaio de massa específica aparente das placas de OSB.	115
Figura 69 – Corpos-de-prova para a determinação da massa específica aparente das placas de OSB.	115
Figura 70 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade dos painéis de OSB (<i>MOEOSB</i>).	117
Figura 71 – Corpo-de-prova para ensaio de Módulo de Elasticidade das placas de OSB.	118
Figura 72 – Corpos-de-prova para a determinação do Módulo de Elasticidade das placas de OSB.	119

Figura 73 – Realização do ensaio de Módulo de Elasticidade das placas de OSB.....	120
Figura 74 – Dispositivo de medição 1: Conjunto de acelerômetros da <i>Silicon Designs</i> . ..	122
Figura 75 – Dispositivo de medição 2: Acelerômetro GP2-LX.	123
Figura 76 – Dispositivo de medição 3: aplicativo <i>myFrequency</i> instalado em Smartphone.	123
Figura 77 – Configuração da medição experimental da frequência natural das lâminas (fL) com o <i>Acelerômetro 3</i>	125
Figura 78 – Configuração da medição experimental da frequência natural das vigas (fVA), com o <i>Acelerômetro 2</i>	126
Figura 79 – Configuração da medição experimental da frequência natural das vigas (fVS), com o <i>Acelerômetro 3</i>	126
Figura 80 – Percurso ao longo do sentido longitudinal do piso.....	129
Figura 81 – Exemplificação de um percurso de ordem aleatória.	130
Figura 82 – Configuração da execução do ensaio de <i>Heel drop test</i>	131
Figura 83 – Identificação e localização dos pontos de medição do <i>Heel drop test</i>	132
Figura 84 – Percursos longitudinal (PL) e transversal (PT), destinados a prática das atividades de caminhada e corrida.	134
Figura 85 – Área destinada a prática das atividades de salto e impacto de calcanhar.....	135
Figura 86 – Configuração da avaliação da vibração do piso, com indivíduo de teste em pé.	137
Figura 87 – Configuração da avaliação da vibração do piso, com indivíduo de teste sentado em uma cadeira.	138
Figura 88 – Geometria do elemento <i>SHELL281</i>	141
Figura 89 – Estrutura do piso modelada numericamente.	142
Figura 90 – Áreas admitidas para a modelagem das peças de OSB.	143
Figura 91 – Frequência fundamental das lâminas, medida com <i>Acelerômetro 3</i>	145
Figura 92 – Frequência fundamental das vigas, medida com <i>Acelerômetro 2</i>	150
Figura 93 – Frequência fundamental das vigas, medida com <i>Acelerômetro 3</i>	150
Figura 94 – Sinal vibratório e frequência natural da viga VLC1, pelo <i>Acelerômetro 2</i>	151
Figura 95 – Sinal vibratório e frequência natural da viga VLC1, pelo <i>Acelerômetro 3</i>	151
Figura 96 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC1 (fL_{VCL1}).....	153

Figura 97 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC2 (<i>fL_VCL2</i>).....	154
Figura 98 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC3 (<i>fL_VCL3</i>).....	154
Figura 99 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC4 (<i>fL_VCL4</i>).....	155
Figura 100 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC5 (<i>fL_VCL5</i>).....	155
Figura 101 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC6 (<i>fL_VCL6</i>).....	156
Figura 102 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC7 (<i>fL_VCL7</i>).....	156
Figura 103 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC8 (<i>fL_VCL8</i>).....	157
Figura 104 – Análises estatísticas da frequência fundamental das vigas de MLC (<i>fV</i>)....	157
Figura 105 – Indivíduo de teste 01, praticando o teste de caminhada individual.....	159
Figura 106 – Indivíduo de teste 02, praticando o teste de caminhada individual.....	160
Figura 107 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PA</i> , devido ao caminhar do <i>Indivíduo 01</i>	161
Figura 108 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PB</i> , devido ao caminhar do <i>Indivíduo 01</i>	161
Figura 109 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PA</i> , devido ao caminhar do <i>Indivíduo 02</i>	162
Figura 110 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PB</i> , devido ao caminhar do <i>Indivíduo 02</i>	162
Figura 111 – Quadro de dez indivíduos praticando o teste de caminhada em grupo.	164
Figura 112 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PA</i> , devido ao caminhar de um grupo de pessoas.	165
Figura 113 – Frequências naturais do piso no ponto <i>PB</i> , devido ao caminhar de um grupo de pessoas.	165
Figura 114 – <i>Heel drop test</i> mensurado pelo <i>Acelerômetro 1</i>	167
Figura 115 – <i>Heel drop test</i> mensurado simultaneamente pelo <i>Acelerômetro 2</i> e <i>Acelerômetro 3</i>	168

Figura 116 – Frequências naturais do piso devido ao <i>heel drop test</i> , medidas por três equipamentos distintos.....	170
Figura 117 – Análise estatística dos dispositivos de medição da frequência natural do piso, devido ao <i>heel drop test</i>	171
Figura 118 – Indivíduo de teste caminhando pelo percurso longitudinal <i>PL</i>	172
Figura 119 – Indivíduo de teste caminhando pelo percurso transversal <i>PT</i>	172
Figura 120 – Indivíduo de teste correndo pelo percurso longitudinal <i>PL</i>	173
Figura 121 – Indivíduo de teste correndo pelo percurso transversal <i>PT</i>	173
Figura 122 – Indivíduo de teste saltando na região central do piso.....	174
Figura 123 – Indivíduo de teste realizando o <i>Heel drop test</i> na região central do piso.....	174
Figura 124 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso <i>PL</i>	181
Figura 125 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso <i>PT</i>	182
Figura 126 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso <i>PL</i>	182
Figura 127 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso <i>PT</i>	183
Figura 128 – Frequências naturais do piso, devido ao salto na região central da estrutura.	183
Figura 129 – Frequências naturais do piso, devido ao <i>heel drop test</i> na região central da estrutura.	184
Figura 130 – Análise estatística dos dispositivos de medição da frequência natural do piso, devido à prática das atividades humanas.	185
Figura 131 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada no percurso <i>PL</i>	193
Figura 132 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada no percurso <i>PT</i>	194
Figura 133 – Amortecimentos do piso, devido à corrida no percurso <i>PL</i>	194
Figura 134 – Amortecimentos do piso, devido à corrida no percurso <i>PT</i>	195
Figura 135 – Amortecimentos do piso, devido ao salto na região central da estrutura.	195
Figura 136 – Amortecimentos do piso, devido ao <i>heel drop test</i> na região central da estrutura.	196
Figura 137 – Sinais vibratórios no domínio do tempo: (a) caminhada, (b) corrida.	197
Figura 138 – Sinais vibratórios no domínio do tempo: (a) salto, (b) <i>heel drop test</i>	198
Figura 139 – Análise estatística dos dispositivos de medição do amortecimento do piso, devido à prática das atividades humanas.	199
Figura 140 – Indivíduo de teste em pé durante a avaliação subjetiva do piso, quanto à prática de atividades humanas.	201

Figura 141 – Indivíduo de teste sentado em uma cadeira durante a avaliação subjetiva do piso, quanto à prática de atividades humanas.	202
Figura 142 – Avaliação da vibração devido ao <i>heel drop</i> com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	204
Figura 143 – Avaliação da vibração devido à caminhada com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	205
Figura 144 – Avaliação da vibração devido à corrida com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	206
Figura 145 – Avaliação da vibração devido ao salto com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	207
Figura 146 – Avaliação da vibração devido ao <i>heel drop</i> com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	208
Figura 147 – Avaliação da vibração devido à caminhada com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	209
Figura 148 – Avaliação da vibração devido à corrida com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	210
Figura 149 – Avaliação da vibração devido ao salto com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).	211
Figura 150 – Primeiro modo de vibração do piso.	215
Figura 151 – Segundo modo de vibração do piso.	215
Figura 152 – Terceiro modo de vibração do piso.	216
Figura 154 – Seção ilustrativa da combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade.	231
Figura 155 – Esquema das áreas de aplicação da película de cola.	232
Figura 156 – Processo de aplicação da película de cola nas áreas de contato entre as lâminas.	232
Figura 157 – Controle de temperatura ambiente para a colagem das vigas.	233
Figura 158 – Determinação da pressão dos sargentos tipo C 8”.	234
Figura 159 – Dispositivo para prensagem das vigas, com chapas de aço.	236
Figura 160 – Espaçamento entre os instrumentos de aplicação de pressão, para a colagem das vigas.	236
Figura 161 – Sequência admitida para a colagem das lâminas.	237
Figura 162 – Prensagem da 1ª, 2ª, 3ª e 4ª etapas de colagem.	237

Figura 163 – Prensagem da 5ª e 6ª etapas de colagem.	238
Figura 164 – Prensagem da 7ª etapa de colagem.	238
Figura 165 – Disposição das vigas de MLC.	239
Figura 166 – Vigas de MLC simplesmente apoiadas sobre as vigas de suporte em aço...240	
Figura 167 – Espuma vinílica acetinada empregada na região de contato entre as vigas de MLC e vigas de suporte em aço.	241
Figura 168 – Instalação requerida para os painéis de OSB.	242
Figura 169 – Plano esquemático da disposição das peças de OSB.	243
Figura 170 – Dimensões das peças de OSB.	243
Figura 171 – Parafusos auto atarraxantes aplicados nas (a) fixações de extremidade e (b) fixações intermediárias.	244
Figura 172 – Aplicação dos parafusos nas (a) extremidades, (b) juntas intermediárias simples e (c) juntas intermediárias transpassadas, do piso.	245
Figura 173 – Processo de pré-furação das linhas de aparafusamento do piso.	246
Figura 174 – Processo de aparafusamento do piso.	246

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais produtos estruturais projetados com lâminas de madeira.	29
Quadro 2 – Principais produtos estruturais projetados com folheados de madeira.	30
Quadro 3 – Principais produtos estruturais projetados com lascas e fibras de madeira.	30
Quadro 4 – Propriedades técnicas da cola Cascamite.....	110
Quadro 5 – Propriedades técnicas da cola PUR-501.	111
Quadro 6 – Descrição das fases de medição, para a determinação da frequência fundamental do piso.....	128
Quadro 7 – Níveis de classificação admitidos para a avaliação do conforto e aceitabilidade das vibrações, por questionário.....	139
Quadro 8 – Descrições do coeficiente de variação (CoV).	144
Quadro 9 – Classificações do piso quanto ao incômodo das vibrações.....	212
Quadro 10 – Classificações do piso quanto à a aceitabilidade das vibrações.....	213
Quadro 11 – Pesquisas relacionadas (continua).	227

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Espessuras para placas de OSB.....	77
Tabela 2 – Dimensões dos elementos de fixação das placas de OSB.....	78
Tabela 3 – Propriedades dos parafusos.....	79
Tabela 4 – Caracterização da umidade (U) da madeira de <i>Pinus</i>	87
Tabela 5 – Caracterização da densidade básica (ρ_{bas}) da madeira de <i>Pinus</i>	90
Tabela 6 – Caracterização da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de <i>Pinus</i>	94
Tabela 7 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC1.....	100
Tabela 8 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC2.....	100
Tabela 9 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC3.....	101
Tabela 10 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC4.....	101
Tabela 11 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC5.....	102
Tabela 12 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC6.....	102
Tabela 13 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC7.....	103
Tabela 14 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC8.....	103
Tabela 15 – Módulo de elasticidade das vigas ($MOEV$), medido experimentalmente.	106
Tabela 16 – Resistência ao cisalhamento na lâmina da cola paralelo às fibras da madeira, do adesivo Cascamite e PUR-501.....	113
Tabela 17 – Caracterização da massa específica aparente (ma_{OSB}) das placas de OSB.	116
Tabela 18 – Módulo de elasticidade das placas de OSB.	121
Tabela 19 – Características dos indivíduos de teste.	133
Tabela 20 – Dados de entrada das vigas de MLC.....	140
Tabela 21 – Dados de entrada das placas de OSB.....	140
Tabela 22 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC1.....	145
Tabela 23 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC2.....	146
Tabela 24 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC3.....	146
Tabela 25 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC4.....	147
Tabela 26 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC5.....	147
Tabela 27 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC6.....	148
Tabela 28 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC7.....	148
Tabela 29 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC8.....	149

Tabela 30 – Frequência fundamental das vigas VLC1 à VLC8.	152
Tabela 31 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no sentido longitudinal da estrutura.	163
Tabela 32 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada de um grupo de pessoas.	166
Tabela 33 – Frequências naturais do piso devido ao <i>heel drop test</i> , medidas por três equipamentos distintos.....	169
Tabela 34 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso <i>PL</i>	175
Tabela 35 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso <i>PT</i>	176
Tabela 36 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso <i>PL</i>	177
Tabela 37 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso <i>PT</i>	178
Tabela 38 – Frequências naturais do piso, devido ao salto na região central da estrutura.	179
Tabela 39 – Frequências naturais do piso, devido ao <i>heel drop test</i> na região central da estrutura.	180
Tabela 40 – Amortecimento do piso, devido à caminhada no percurso <i>PL</i>	187
Tabela 41 – Amortecimento do piso, devido à caminhada no percurso <i>PT</i>	188
Tabela 42 – Amortecimento do piso, devido à corrida no percurso <i>PL</i>	189
Tabela 43 – Amortecimento do piso, devido à corrida no percurso <i>PT</i>	190
Tabela 44 – Amortecimento do piso, devido ao salto na região central da estrutura.	191
Tabela 45 – Amortecimento do piso, devido ao <i>heel drop test</i> na região central da estrutura.	192
Tabela 46 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada de um grupo de pessoas.	200
Tabela 48 – Pressão dos grampos sargentos tipo C 8”.	235

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	21
1.1	PROBLEMÁTICA	23
1.2	JUSTIFICATIVA	24
1.3	OBJETIVOS	26
1.3.1	Objetivo geral	26
1.3.2	Objetivos específicos	27
2	REVISÃO DE LITERATURA	28
2.1	VIBRAÇÕES EM SISTEMAS ESTRUTURAIS DE PISOS DE MADEIRA	28
2.1.1	Dinâmica estrutural.....	36
2.1.1.1	Graus de liberdade de um sistema dinâmico	42
2.1.1.2	Equilíbrio de um sistema dinâmico	44
2.1.1.3	Classificação das vibrações	47
2.1.1.3.1	Fontes de vibrações forçadas	50
2.1.2	Carregamentos dinâmicos induzidos por atividades humanas	51
2.1.2.1	Esforço dinâmico da atividade humana de caminhar	52
2.1.2.1.1	Frequência de passo	53
2.1.2.1.2	Ciclo da marcha	54
2.1.2.1.3	Comprimento da passada	59
2.1.2.2	Esforço dinâmico da atividade humana de correr	60
2.1.2.3	Esforço dinâmico da atividade humana de saltar	62
2.1.3	Propriedades estruturais influentes no desempenho à vibração.....	64
2.1.4	Sensibilidade às vibrações	66
2.1.5	Considerações de documentos normativos quanto à vibração.....	68
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	74
3.1	ESTRUTURA EM ANÁLISE.....	74
3.2	MATERIAIS.....	82
3.2.1	Caracterização da madeira constituinte das vigas.....	83
3.2.1.1	Umidade	84
3.2.1.2	Densidade básica	88
3.2.1.3	Resistência à compressão paralela às fibras	91
3.2.1.4	Módulo de Elasticidade	95

3.2.2	Caracterização da cola	106
3.2.3	Caracterização das placas de OSB	113
3.2.3.1	Massa específica aparente	114
3.2.3.2	Módulo de Elasticidade (MOE _{OSB})	116
3.3	MÉTODOS	121
3.3.1	Frequência fundamental das lâminas (f _L) e vigas (f _V)	124
3.3.2	Frequência fundamental do piso (f _p)	127
3.3.2.1	Fase 1: Teste de caminhada individual	128
3.3.2.2	Fase 2: Teste de caminhada em grupo	129
3.3.2.3	Fase 3: <i>Heel drop test</i>	130
3.3.2.4	Fase 4: Teste de atividades humanas	133
3.3.3	Amortecimento do piso (ξ)	135
3.3.4	Avaliação do conforto quanto às vibrações	136
3.3.5	Modelagem numérica	139
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	144
4.1	Frequência fundamental das lâminas (f _L) e vigas (f _V)	144
4.2	Frequência fundamental do piso (f _p)	159
4.2.1	Fase 1: Teste de caminhada individual	159
4.2.2	Fase 2: Teste de caminhada em grupo	164
4.2.3	Fase 3: <i>Heel drop test</i>	167
4.2.4	Fase 4: Teste de atividades humanas	171
4.3	Amortecimento do piso (ξ)	186
4.4	Avaliação do conforto quanto às vibrações	201
4.5	Modelagem numérica	214
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	217
5.1	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	219
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	221
	APÊNDICES	227

1 INTRODUÇÃO

A madeira roliça oriunda dos troncos de árvores, além de seus produtos derivados tradicionais como a madeira serrada, destacam-se como o material de construção mais antigo a ser empregado pelo homem, desde os primórdios da civilização, dado que até meados do século XIX, as mais importantes obras de Engenharia eram executadas com madeira e pedras, ou até mesmo com a combinação de ambos os materiais (ABBOTT; WHALE, 1987; PFEIL; PFEIL, 2003).

Tradicionalmente, estruturas de madeira eram aplicadas em sistemas estruturais leves e com vãos limitados. Entretanto, no início do século XX, a madeira roliça e a madeira serrada, passaram a ser substituídas por estruturas compostas de aço e concreto, uma vez que esses materiais mostravam-se plenamente disponíveis no mercado e satisfatoriamente econômicos aos empreendedores (JELEČ; VAREVAC; RAJČIĆ, 2018).

Sendo a madeira um material orgânico, a mesma apresenta limitações de uso devido a sua sensibilidade à umidade e ataques biológicos, bem como possui imperfeições de caráter natural (CRUZ, 2013). Em consequência a essas limitações, a fabricação de produtos compósitos à base de madeira, como placas de pequena espessura, folheados ou fibras, unidos por meio de colas adesivas, conhecidos como *Engineering Wood Products* – EWPs bem como produtos de madeira massiva, se deu a partir dos anos 1960, possibilitando às estruturas maior durabilidade, estabilidade dimensional e propriedades mecânicas mais homogêneas.

Com isso, elementos como a Madeira Laminada Colada (Glulam), admitida para construções lineares robustas e complexas, produtos em forma de placas, como os painéis folheados laminados (LVL) e painéis orientados (OSB), utilizados como materiais secundários de revestimento e proteção das estruturas, e a madeira laminada cruzada (CLT), destinada à execução de paredes e pisos, passaram a se destacar no mercado da Construção Civil (JELEČ; VAREVAC; RAJČIĆ, 2018).

Em tempos atuais, devido a constante competitividade e desenvolvimento do campo da Engenharia Estrutural e da indústria da Construção Civil vinculadas a constantes buscas por vantagens competitivas, o êxito de projetos de engenharia em aço, concreto e madeira, demanda da redução do período destinado à elaboração e execução do projeto e da minimização de custos e do quantitativo de materiais incorporados na execução dos empreendimentos (WECKENDORF *et al.*, 2016), sem que a produtividade e qualidade

sejam afetadas, bem como o desenvolvimento de produtos estruturais com propriedades mecânicas aprimoradas. Assim, a partir da combinação desses fatores requeridos, com os avanços nas estratégias de análise e dimensionamento estruturais, como os processos de otimização estrutural, ambiciona-se por concepções estruturais com maiores vãos, leveza, esbeltez e flexibilidade arquitetônica, associados com a redução das dimensões das seções transversais (PEREIRA, 2014; RIBEIRO *et al.*, 2018).

Em vista disso, denota-se no cenário global, que o setor construtivo representa um sistema altamente técnico e ligado à prática cultural local em que cada empreendimento está inserido, sendo na maioria dos casos, fortemente atrelado ao emprego de aço e concreto (JARNERÖ, 2014). Entretanto, ao passo que os referidos produtos manufaturados à base de madeira, chegaram ao mercado com grande índice de disponibilidade, alcançar tais solicitações referentes às concepções estruturais, também tornou-se factível para a madeira, passando esses materiais compósitos a serem destinados à execução de habitações residenciais, edifícios de múltiplos pavimentos, empreendimentos industriais, públicos e comerciais.

Logo, os artefatos como a madeira laminada colada, madeira laminada cruzada e madeira laminada folheada, tornaram-se atrativos aos olhos do mercado empreendedor, devido a sua alta tecnologia e performance estrutural, alcance de estruturas mais altas, variabilidade arquitetônica, ambientes amplos, vãos extensos e baixa relação de massa, sendo indicados especialmente, para situações de projetos onde os pisos almejam alcance de longos vãos (NEGREIRA *et al.*, 2015; RIJAL *et al.*, 2016; ZMIJEWKI; WWOJTOWICZ-JANKOWSKA, 2017).

Tratando-se a madeira do material de construção mais popular a ser empregado na execução de pavimentos (CRESPO, 2009; CRUZ, 2013), os sistemas construtivos convencionais com madeira serrada e roliça, eram fortemente ligados a execução de pavimentos maciços com pequenos vãos, característicos de edificações residenciais e pelo emprego de várias vigas de suporte paralelas, interligadas à tábuas de madeira serrada, por meio de cola ou pregos, devido a ampla disponibilidade desses materiais e facilidade de manuseio (ABBOTT; WHALE, 1987). Por consequência dos elementos de madeira massiva, na década de 60, a tipologia tradicional passou a ser substituída por elementos de viga mais leves, com maior capacidade de suporte de carga nas direções longitudinal e transversal ao vão, atendendo efetivamente aos vãos com incrementos significativos de comprimentos.

A partir de então, essas técnicas construtivas ganharam popularidade, visto que seu processo de manufatura é acelerado e seus artefatos estruturais apresentam elevados parâmetros resistentes, sendo atrativos ao setor do desenvolvimento e execução de projetos, voltados a piso de residências térreas e edificações de cunho comercial e habitacional de múltiplos pavimentos (CHEN; XU; ZHANG, 2014).

1.1 PROBLEMÁTICA

No mercado construtivo atual quanto à execução de pavimentos em edificações, ampla notoriedade é atribuída ao sistema estrutural de vigas de Madeira Laminada Colada, também conhecida como Glulam – *Glued Laminated Timber*, constituídas por dois ou mais laminados com fibras paralelas ao comprimento total da peça e de pequena espessura, unidos entre si por intermédio da utilização de métodos de colagem sob elevadas pressões (RAMAGE *et al.*, 2017; EBADI; DOUDAK; SMITH, 2018), empregando adesivos sintéticos estruturais duradouros, resistentes à umidade, água, temperatura e agentes biológicos (KUZMAN; OBLAK; VRATUŠA, 2010). Esse cenário possibilitando assim, concepções arquitetônicas diferenciadas, com comprimento e seções transversais maiores e de variadas formas, de acordo com as solicitações do mercado (ONG, 2015; MILNER; WOODARD, 2016).

Devido as propriedades de leveza e baixa relação massa-rigidez atreladas ao referido sistema estrutural, pisos constituídos pelo mesmo apresentam aumento da deflexão e baixo isolamento à vibração, de modo a exibir uma performance de desempenho inaceitável (CRESPO, 2009; RIJAL *et al.*, 2016; EBADI; DOUDAK; SMITH, 2016). Isso se deve ao fato de que, como esses membros possuem frequências naturais gradativamente baixas e próximas das faixas de frequência de excitação dinâmica devido à ações externas, os pisos em madeira tornam-se suscetíveis à amplificação dinâmica e ao fenômeno da ressonância, de forma a provocar vibrações excessivas e níveis de acelerações de carácter intolerável aos ocupantes, essas reduzindo a capacidade de realização de tarefas e podendo provocar implicações no grau de saúde dos ocupantes, bem como até mesmo coibir o funcionamento dos empreendimentos (MARGARIDO, 2013; WECKENDORF *et al.*, 2016; RIBEIRO *et al.*, 2018).

Esse comportamento vibratório saliente e insatisfatório, atribuído aos pavimentos de madeira, onde as oscilações verticais ocorrem no em torno de uma posição do sistema

estrutural, tomada como referência (MARGARIDO, 2013), é provocado por carregamentos de ordem dinâmica, resultantes da prática de atividades cotidianas, como caminhar, correr, dançar e pular (JARNERÖ, 2014; TOLEDO; NALLIM; SANCHEZ, 2018), realizadas pelos próprios habitantes, os quais operam simultaneamente como fontes de excitação e elementos receptores e atenuadores dos esforços dinâmicos (MELLO, 2005; CRESPO, 2009; ZHANG, 2017), cenário onde a sensibilidade humana aos movimentos oscilatórios acarreta na problemática de desempenho dos pisos extensos de madeira (WECKENDORF, 2009).

Assim, tendo como base essas conotações, chegou-se ao seguinte problema da pesquisa:

Qual o comportamento dinâmico de um piso de grande vão, constituído por vigas de madeira laminada colada e estrutura de fechamento em OSB, quando estimulado dinamicamente por atividades humanas?

1.2 JUSTIFICATIVA

Os problemas relacionados às vibrações excessivas e intolerantes aos ocupantes, ocorrentes em pisos de madeira com vãos extensos, figuram questões determinantes em termos de dimensionamento e elaboração de projetos estruturais (CHEN; XU, ZHANG, 2014), esses sendo regidos pelo atendimento das diretrizes mínimas propostas em documentos normativos, por meio de metodologias de verificação do desempenho vibracional admitidas pelo Estado Limite de Serviço (ELS), ao invés dos parâmetros de resistência do Estado Limite Último (ELU).

Em escala internacional, os códigos vigentes apresentam técnicas baseadas no ato de aferir as propriedades dinâmicas de estruturas de pisos com dimensões e concepções específicas, por procedimentos analíticos simplistas e empíricos, difundidos através da aplicação de modelos simplificados de vigas ou placas, admitindo-os como uma representação do sistema estrutural do piso, de forma a distanciar as faixas de frequências naturais dos pisos das faixas de frequências de excitação de carregamentos externos (CHEN; XU; ZHANG, 2014; CASAGRANDE et al., 2018).

Ao passo que, mundialmente é crescente a implementação de EWP's para a execução de pavimentos de longo alcance, com distintas concepções e dimensões, as verificações vigentes mostram-se insuficientes para a garantia do desempenho de vibração dos mesmos, dentro dos parâmetros considerados aceitáveis (WECKENDORF, 2009; EBADI;

DOUDAK; SMITH, 2016), uma vez que as tipologias estruturais não são equivalentes, cenário que direciona a verificações com considerações de comportamentos dinâmicos errôneos.

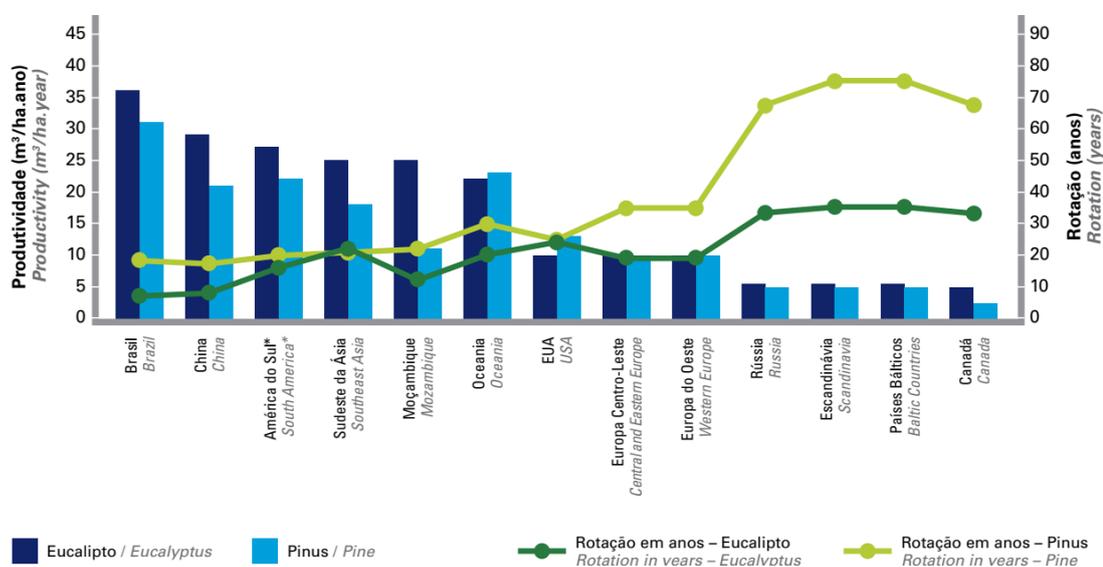
Desta forma, o cenário apresentado acima evidencia a necessidade do desenvolvimento e ampliação de novas investigações quanto à avaliação e controle de vibrações nos referidos modelos de pisos em madeira, estimulados dinamicamente por atividades humanas, por via da combinação de estratégias experimentais e numéricas, para o conhecimento do comportamento real dos mesmos, de forma a assegurar a integridade da estrutura, amparar as tomadas de decisões de projeto e auxiliar no desenvolvimentos de estratégias de controle e redução de vibrações, especialmente para o cenário brasileiro, no qual denota-se certa carência no estudo das propriedades dinâmicas, assunto meramente abordado em cursos de graduação em Engenharia Civil.

No campo da Engenharia Estrutural brasileira, a qual é fortemente ligada a empreendimentos executados em concreto armado e aço, a madeira é categorizada como um material secundário, para fins de estruturas provisórias e de componentes de revestimentos, devido a carência de profissionais habilitados com domínio de conhecimento quanto suas propriedades mecânicas, tecnológicas, econômicas e ambientais.

Em suma, deve-se abrir novos espaços para a implementação da madeira como um material estrutural básico em empreendimentos de pequeno a grande porte, dada à ampla extensão territorial do Brasil, contemplada por 7,84 milhões de hectares destinados às florestas cultivadas para fins de manejo, pelo emprego de técnicas especializadas como a silvicultura, a qual trabalha em prol de regulamentar a procedência da madeira empregada no mercado global (IBÁ, 2017).

Por intermédios das técnicas de manejo florestal, o Brasil lidera o ranking mundial de produção madeireira oriunda de florestas gerenciadas, ostentando uma média de produtividade de 30,5 e 35,7 m³/ha ao ano, de madeiras macias (Pinus) e madeiras de lei (Eucalipto) respectivamente, perante grandes potências mundiais desse setor (IBÁ, 2017), conforme aponta a Figura 1. Esse cenário, ao setor brasileiro de produção madeireira, trata-se de uma fonte promissora e de grande potencial para alavancar o desenvolvimento sustentável econômico brasileiro, uma vez que, ao final do ano de 2016, esse setor contribuiu efetivamente em 6,2% no Produto Interno Bruto (PIB) nacional, gerando 3,7 milhões de empregos diretos e indiretos, além de uma renda final de aproximadamente 10 bilhões de reais (IBÁ, 2017).

Figura 1 – Produtividade média de madeiras manufaturas de Pinus e Eucalipto, no cenário mundial.



Fonte: IBÁ (2017).

Isto posto, estando a presente pesquisa inserida no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGEng), com enquadramento na linha de pesquisa de Infraestrutura Sustentável, além de ampliar as temáticas abordadas no programa, visa também amplificar as perspectivas notórias e vantajosas atreladas ao emprego da madeira como um material fundamental de construção, por se tratar de um recurso de ordem sustentável e renovável, que agrega vigorosos valores sociais, ambientais e econômicos, sendo considerada como o material de construção do século XXI, (WOODARD; MILNER, 2016; ZMIJEWKI; WOJTOWICZ-JANKOWSKA, 2017), uma vez que o programa está diretamente relacionado à diretrizes sustentáveis.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Investigar o comportamento dinâmico de um piso longo constituído por vigas de Madeira Laminada Colada e estrutura de fechamento em placas de OSB, estimulado pela prática de atividades humanas, através da obtenção dos parâmetros dinâmicos da frequência natural e amortecimento, por intermédio de determinações experimentais e modelagem numérica.

1.3.2 Objetivos específicos

Com isso, os objetivos específicos da presente pesquisa são:

- a) Obter a propriedade dinâmica da frequência fundamental do piso, estimulado por atividades humanas, através de procedimentos experimentais com aplicação de acelerômetros com diferentes taxas de aquisição de dados;
- b) A partir dos sinais registrados experimentalmente, desenvolver a análise dos mesmos visando a determinação analítica da propriedade dinâmica do amortecimento estrutural;
- c) Classificar o piso quanto ao conforto e à aceitabilidade das vibrações, por pesquisas subjetivas, corroborando com as prescrições da normativa brasileira ABNT NBR 7190:1997, acerca da verificação do Estado Limite de Serviço quanto às vibrações em sistemas de pisos;
- d) Determinar as frequências naturais do piso numericamente, pela modelagem em programa computacional de elementos finitos, desenvolvendo análise modal da estrutura.

2 REVISÃO DE LITERATURA

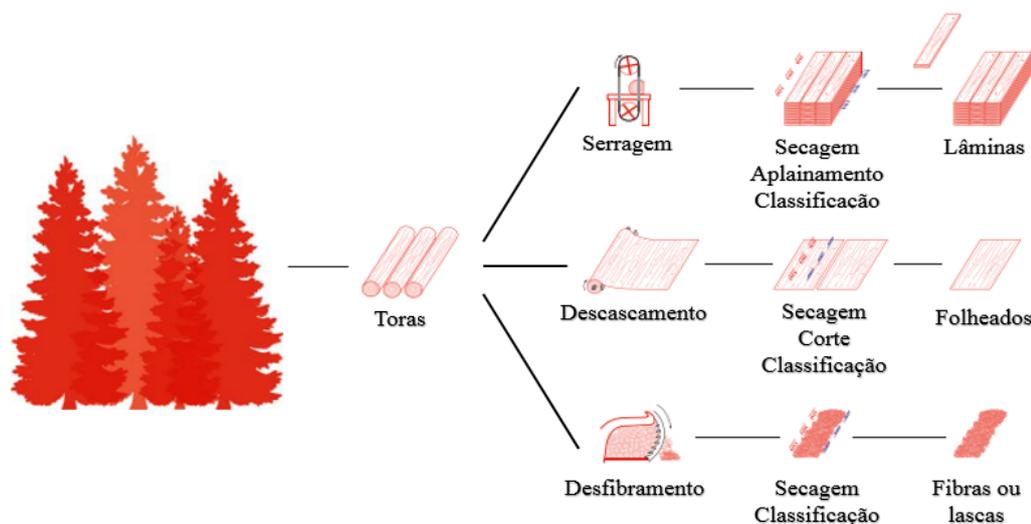
2.1 VIBRAÇÕES EM SISTEMAS ESTRUTURAIS DE PISOS DE MADEIRA

A madeira quando colhida no formato roliço característico do tronco, é primeiramente direcionada as serrarias, para o processo de identificação e remoção de defeitos presentes na superfície dos troncos, sendo em seguida direcionadas à etapa de desdobro, processo no qual aproximadamente 50% do volume total de cada tronco, é destinado à produção de elementos de tábuas e folheados, com consequente produção de pó, fibras e aparas de madeira, sendo esses subprodutos, destinados a indústria combustível, moveleira e de produtos de engenharia com valor no mercado (RAMAGE *et al.*, 2017).

Dadas as propriedades anisotrópicas e heterogêneas vinculadas a madeira, com a evolução da sociedade, principalmente em termos tecnológicos, visando atingir comportamento mais isotrópico e homogêneo para fins de aplicação como elementos estruturais, desenvolveram-se procedimentos altamente industriais para a transformação das características da madeira, de modo a serem criados os produtos à base de madeira, conhecidos internacionalmente como *Wood Engineering Products* (WOODARD; MILNER, 2016).

A matriz básica para a fabricação desses materiais compósitos, está diretamente atrelada com o emprego de tecnologias de colagem adesiva de elementos fundamentais de variados tamanhos e formas, como lâminas, folheados e fibras ou lascas de madeira, provenientes respectivamente, da cadeia de processamento de corte da madeira maciça por serragem, descascamento e desfibramento, conforme demonstrado pela Figura 2. Deste modo, associando-se efetivamente a colagem com a distribuição dos artefatos básicos nas camadas que irão compor os elementos estruturais, esses produtos apresentam aperfeiçoamento de propriedades mecânicas, estabilidade dimensional e elevada durabilidade (ZMIJEWKI; WOJTOWICZ-JANKOWSKA, 2017).

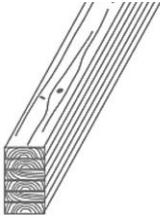
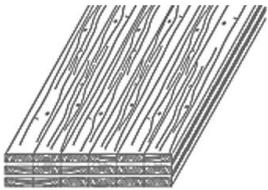
Figura 2 – Elementos básicos aos EWP, oriundos da cadeia de processamento de corte da madeira.



Fonte: Adaptado de Ramage *et al.* (2017).

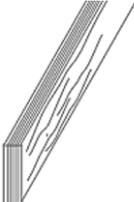
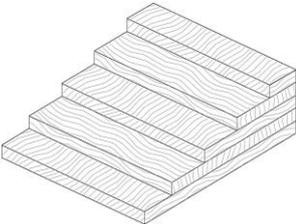
Deste modo, os elementos projetados produzidos com laminações, folheados, fibras e lascas de madeira com grande destaque no mercado internacional, são mostrados e descritos brevemente no Quadro 1, Quadro 2 e Quadro 3.

Quadro 1 – Principais produtos estruturais projetados com lâminas de madeira.

Elemento	Definição	Uso
<p>Madeira laminada colada (MLC, GLT ou Glulam)</p> 	<p>Elementos constituídos pela associação de duas ou mais laminações, dispostas de modo paralelo ao grão da madeira e ao comprimento da peça, sendo coladas entre si por meio do emprego de adesivos e prensas com elevadas pressões.</p>	<p>Vigas para longos vão e com alta capacidade de carga, colunas e arcos, destinados a ambientes externos e internos.</p>
<p>Madeira laminada cruzada (CLT)</p> 	<p>Painéis constituídos pela combinação de camadas de laminações em número ímpar, dispostas de forma adjacente entre si, sendo coladas com auxílio de adesivos e prensas com altas pressões.</p>	<p>Painéis para pisos, forros e paredes, indicados para aplicações em ambientes externos e internos.</p>

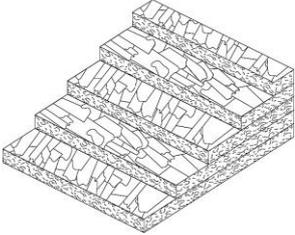
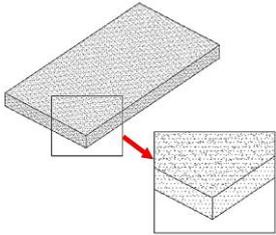
Fonte: Próprio autor (2020).

Quadro 2 – Principais produtos estruturais projetados com folheados de madeira.

Elemento	Definição	Uso
<p>Laminado de madeira laminada (LVL)</p> 	<p>Elementos constituídos por painéis de folheados, orientados paralelamente entre si, na direção longitudinal da peça, os quais são colados sob pressão e em temperatura elevadas.</p>	<p>Vigas e colunas para ambientes internos.</p>
<p>Contraplacado</p> 	<p>Painéis constituídos pela combinação de camadas de folheados de ordem ímpar, com arranjo de direções ortogonais alternadas, coladas entre si por adesivos, sob pressão e a uma elevada temperatura.</p>	<p>Elementos internos empregados como estruturas de fechamento, bem como componentes para acabamento.</p>

Fonte: Próprio autor (2020).

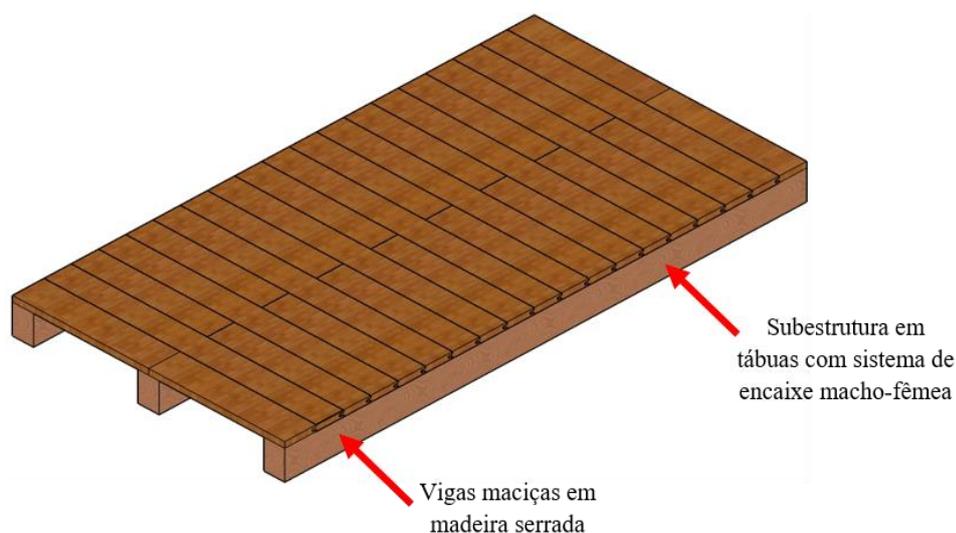
Quadro 3 – Principais produtos estruturais projetados com lascas e fibras de madeira.

Elemento	Definição	Uso
<p><i>Oriented Strand Board (OSB)</i></p> 	<p>Painéis compostos por lascas de madeira coladas com o auxílio de pressão e elevadas temperaturas, devendo as camadas de superfície apresentar as lascas paralelas a direção longitudinal do painel, ao passo que as camadas internas são dispostas transversalmente.</p>	<p>Alma de vigas I compostas e material base para aplicação do revestimento em pisos, bem como de fechamento de paredes e cobertura.</p>
<p><i>Medium Density Fiber Board (MDF)</i></p> 	<p>Painéis constituídos por materiais fibrosos de madeira, as quais são pulverizadas com resina e cera, de modo a serem unidas sob pressão.</p>	<p>Elementos internos empregados como estruturas de fechamento, bem como componentes para acabamento.</p>

Fonte: Próprio autor (2020).

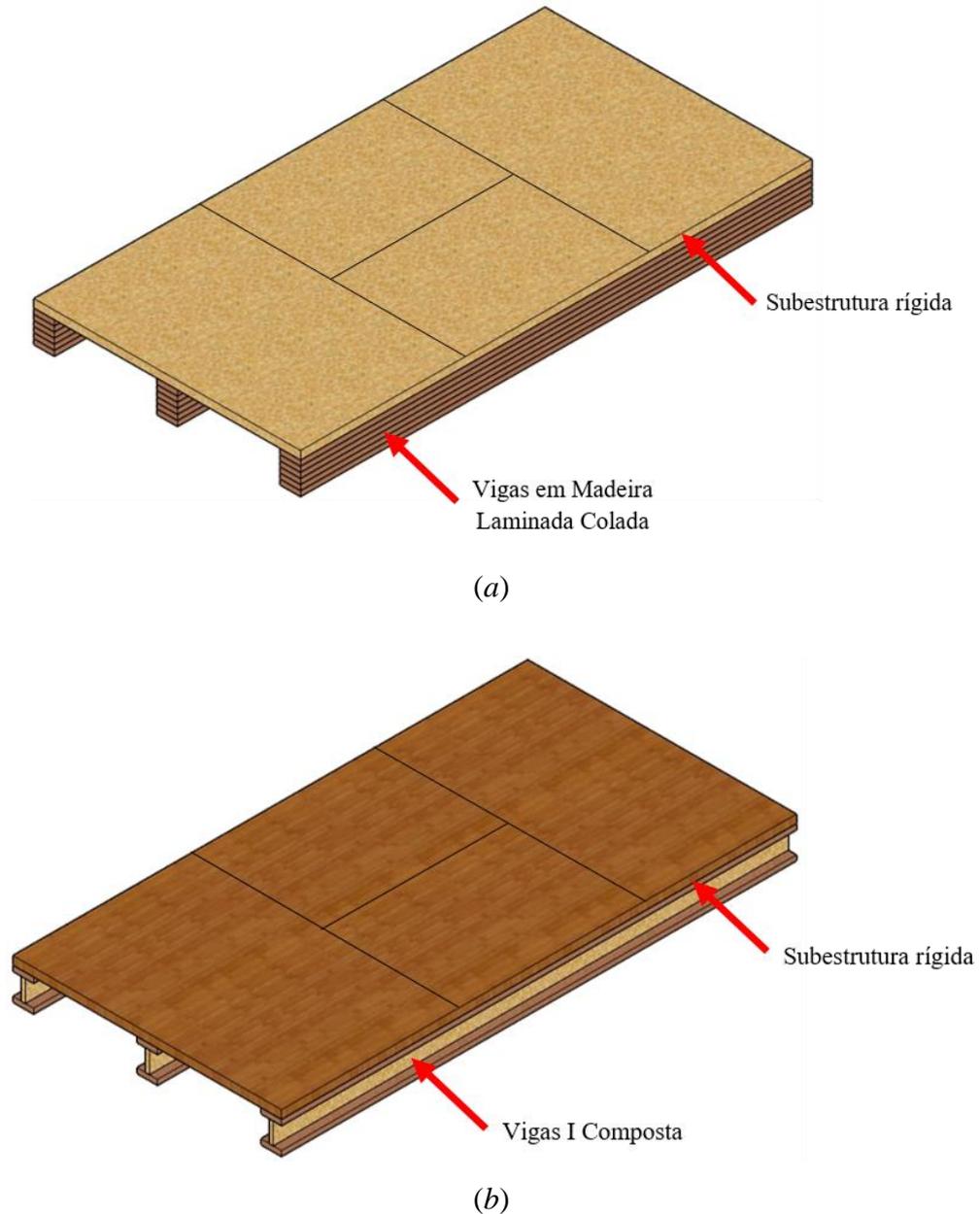
Assim sendo, com o surgimento de tais elementos de madeira massiva, partir dos anos 1960, características de construção leve e rápida execução, maior notoriedade fora dada aos mesmos pelo mercado construtivo, de modo que os pavimentos tradicionais de madeira, compostos por vigas curtas de madeira serrada e seção maciça, unidas por uma subestrutura de fechamento em tábuas com sistemas de encaixe, demonstrados pela Figura 3, passaram a ser gradativamente substituídos por pisos dotados de uma série de vigas longas dispostas paralelamente, como vigas de madeira laminada colada (Figura 4a) ou vigas I compostas, essas constituídas normalmente por alma em OSB e mesas em LVL (Figura 4b), ambos sistemas admitindo subestrutura de assoalho mecanicamente rígida, constituída através da aplicação de variados materiais, como elementos folheados ou fibrosos (CHEN; XU; ZHANG, 2014; WECKENDORF *et al.*, 2016).

Figura 3 – Piso tradicional de madeira com vigas de madeira serrada e fechamento com tábuas de encaixe.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 4 – Piso de madeira com vigas em madeira laminada colada (a) e vigas I compostas (b), ambos comportando estrutura de fechamento mecanicamente rígida.



Fonte: Próprio autor (2020).

Posto que, essas tipologias estruturais de pisos são de elevada leveza, ficam propensas a amplificação dos movimentos oscilatórios ao serem excitados por carregamentos dinâmicos induzidos especialmente, por atividades de caminhar, correr, saltar e dançar, praticadas pelos próprios ocupantes (TOLEDO *et al.*, 2017; CASAGRANDE *et al.*, 2018).

A força atribuída às passadas, ocasionadas pelas atividades humanas, compreende a força de impacto de curta duração, gerada pelo calcanhar a cada passo e um trem de ondas harmônicas, em razão de uma série contínua de passos. Em razão dessa natureza da força da passada, duas tipologias de vibrações atuam sobre os pisos de madeira, a vibração transitória e a ressonância, essas dependentes das propriedades dinâmicas do sistema estrutural do pavimento (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; XIONG; KANG; LU, 2011).

Em vista disso, para fins de determinação da resposta dinâmica dessas estruturas à excitação por atividades humanas e avaliação dos critérios de desempenho aplicáveis, os pavimentos são categorizados como de baixa ou alta frequência. Os pisos com frequências fundamentais abaixo da faixa de 8 a 10 Hz, são ditos de baixa frequência pois são suscetíveis à respostas vibratórias ressonantes, posto que a vibração ocasionada por uma passada humana, não é dissipada pela massa, rigidez ou amortecimento do piso antes da ocorrência de outra passada, de modo a ocorrer a interação entre as respostas de ambos movimentos, ampliando a magnitude do carregamento dinâmico. A contraponto desse cenário, os pisos de alta frequência comportam frequências naturais superiores ao intervalo de 8 a 10 Hz, não exibindo falhas de desempenho à vibração, uma vez que a resposta do passo é dominada pela resposta transitória originada pela força de impacto individual do calcanhar a cada passada, sendo essa dissipada pela rigidez e massa do sistema, antes que o próximo passo seja dado (ISO, 2007; GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; XIONG; KANG; LU, 2011; SANDOVAL, 2015).

Dado que essas atividades ocorrem com frequência e não podem ser facilmente isoladas dos elementos estruturais, são categorizadas como a fonte mais persistente e problemática de capacidade de desempenho falha em pisos de madeira, em razão das deflexões e vibrações verticais excessivas ocasionadas pela prática das mesmas, originando situações de incômodo aos próprios habitantes (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; OPAZO; NEGREIRA *et al.*, 2015; BENEDETTI; ROJAS, 2016).

Esse cenário ocorre em virtude do fenômeno da vibração ressonante, posto que os pisos passam à vibrar em amplitudes cada vez maiores, quando recebem energia de excitação com a mesma frequência natural que os mesmos têm preferências por vibrar (BRAIDO, 2014), criando níveis de aceleração intoleráveis e prejudiciais aos ocupantes (WECKENDORF *et al.*, 2016; EBADI; DOUDAK; SMITH, 2018), uma vez que esses fenômenos ressonam ou aceleram os órgãos humanos, quando as oscilações dinâmicas

ocorrem abaixo do limiar de frequência de 8 Hz, especialmente na faixa de 4 a 8 Hz (ISO, 2003), transmitindo sensação de mal-estar e desconforto (ALMEIDA, 2008).

Assim, denota-se que a performance vibratória aceitável dos variados arranjos estruturais de pavimentos em madeira projetada, tornou-se um importante critério de design quando os vãos superam o limiar de 4,0 metros de comprimento (EBADI; DOUDAK; SMITH, 2018), sendo o estágio de estabelecimento de parâmetros de projetos, governado pelas prescrições de desempenho do Estado Limite de Serviço (ELS), em termos de deflexão máxima e de critérios de vibrações, quanto a limites inferiores definidos para a frequência fundamental de excitação e limites superiores para a amplitude de vibração do piso, ao invés de verificações quanto à eficiência mecânica resistente dos elementos estruturais e seus materiais constituintes, correspondentes ao Estado Limite Último (ELU) (OPAZO; BENEDETTI; ROJAS, 2016; WECKENDORF *et al.*, 2016; CASAGRANDE *et al.*, 2018).

As verificações de desempenho de pisos de madeira, até meados dos anos 80, aplicava-se a metodologia da limitação da deflexão estática, em função do vão considerado na análise e de carregamentos distribuídos uniformemente, como uma estratégia protetiva e de remediação contra a falha geral por desempenho, tanto por vibrações excessivas como por outros atributos insatisfatórios à sua performance (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; EBADI; DOUDAK; SMITH, 2016; WECKENDORF *et al.*, 2016; TOLEDO *et al.*, 2017).

Como a referida verificação de desempenho é baseada em modelos analíticos simplificados de vigas ou placas, tomados para representação completa do comportamento do pavimento como um todo, bem como são aplicáveis somente em situações que comportam concepções tradicionais e dimensões específicas e particulares de pisos em madeira, (CHEN; XU; ZHANG, 2014), quando empregadas como verificação do desempenho vibratório das novas tipologias construtivas de pavimentos, acarretam na obtenção de resultados incoerentes e insatisfatórios (EBADI; DOUDAK; SMITH, 2016), garantindo características vibracionais insuficientes (XIONG; KANG; LU, 2011).

Isso ocorre, dado que a concepção estrutural dos pisos tradicionais e modernos, esses com a aplicação dos elementos de madeira massiva, são divergentes entre si, bem como suas respostas dinâmicas (WECKENDORF *et al.*, 2016), uma vez que os pisos modernos, categorizados como de construção leve, não atendem aos requisitos gerais de desempenho somente pela averiguação do limite máximo de deslocamento vertical no centro do vão, porque mesmo com esse quesito normativo cumprido, continuam a apresentar

comportamento vibracional de carácter inaceitável associado as frequentes reclamações dos habitantes (NEGREIRA *et al.*, 2015; TOLEDO *et al.*, 2017).

Com essa situação, o emprego dos materiais projetados a base de madeira na construção de pisos, traz novos enigmas à Engenharia Estrutural, perante a identificação e prevenção do uso de métodos construtivos que tornem os pisos inutilizáveis a determinado fim de ocupação que fora projetado (EBADI; DOUDAK; SMITH, 2018).

Logo, o desempenho vibratório dessas tipologias, passou a ser objeto de estudo e pesquisa em variados países, a partir das décadas de 1980 e 1990, resultando no desenvolvimento de variadas metodologias de verificação desse quesito, como valores limites para deflexão devido a uma carga pontual unitária, frequência fundamental, deflexão da carga pontual unitária combinada com a frequência fundamental e frequência fundamental associada aos parâmetros de aceleração, sendo adotadas por muitos documentos normativos, como poderá ser observado na subseção 2.1.5 (XIONG; KANG; LU, 2011; JARNERÖ, 2014; TOLEDO, NALLIM E SÁNCHEZ, 2018).

Com tudo isso, denota-se que a resposta vibracional de sistemas estruturais de pisos de madeira, deve ser considerada adequadamente no processo de desenvolvimento de projeto, por intermédio de adoção de padrões atualizados de avaliação, uma vez que esses afastam-se das metodologias tradicionais de verificação de desempenho de vibração, exigindo por parte dos profissionais, a estimativa realista e precisa do nível de resposta vibratória dos sistemas de pisos, por intermédio de adequadas investigações das excitações provocadas por atividades humanas associadas às táticas de modelagens numéricas (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; NEGREIRA *et al.*, 2015).

No campo das investigações quanto às vibrações em sistemas estruturais de pisos constituídos por elementos de madeira massiva, estimulados por carregamentos externos originados principalmente por atividades humanas, as pesquisas descritas no Apêndice A, são de grande notoriedade e relevância para o desenvolvimento da pesquisa em pauta.

2.1.1 Dinâmica estrutural

Estruturas tratam-se de sistemas físicos capazes de transmitir esforços, dado que são suscetíveis a qualquer tipologia de cargas externas, originadas tanto por atividades intrínsecas praticadas no dia-a-dia do homem ou por equipamentos empregados pela indústria, quanto por eventos de ordem natural, como ventos, explosões, ondas marítimas e sismos. Quando o dimensionamento das mesmas, consideram carregamentos ditos estáticos, esses não apresentam qualquer classe de variação, ao longo de todo o seu período de atuação na vida útil das estruturas, ao passo que os carregamentos de ordem dinâmica, apresentam variações no tempo, em termos de magnitude, posição, direção e sentido (SORIANO, 2014).

Devido a essa peculiaridade, os esforços dinâmicos introduzem velocidades, acelerações e deslocamentos, com conseqüentes forças de inércia e amortecimento, nos elementos estruturais, de modo a originar o fenômeno mecânico das vibrações, movimentos oscilatórios caracterizados pela flutuação alternada da estrutura em volta de uma determinada posição de referência (MARGARIDO, 2013). Assim, através do campo da Dinâmicas das Estruturas, esses componentes vibratórios são corretamente identificados e matematicamente quantificados, visando a determinação de seus efeitos, sobre todas as frações estruturais (LIMA, SANTOS, 2008).

As movimentações vibratórias são catalogadas de acordo com a variação no espaço temporal, em duas grandes classes, a determinística e a probabilística, apresentadas pela Figura 5, juntamente com suas subclasses. Na primeira categoria de classificação, o comportamento dos esforços é obtido ao longo de cada intervalo de tempo considerado, por meio do emprego de metodologias analíticas e numéricas, a contraponto da classe probabilística ou aleatória, onde empregam-se métodos de cunho estatístico para a determinação das características dinâmicas, visto que não se obtém os valores específicos em cada intervalo de tempo devido a configuração complexa atribuída aos movimentos vibratórios (MARGARIDO, 2013; SORIANO, 2014).

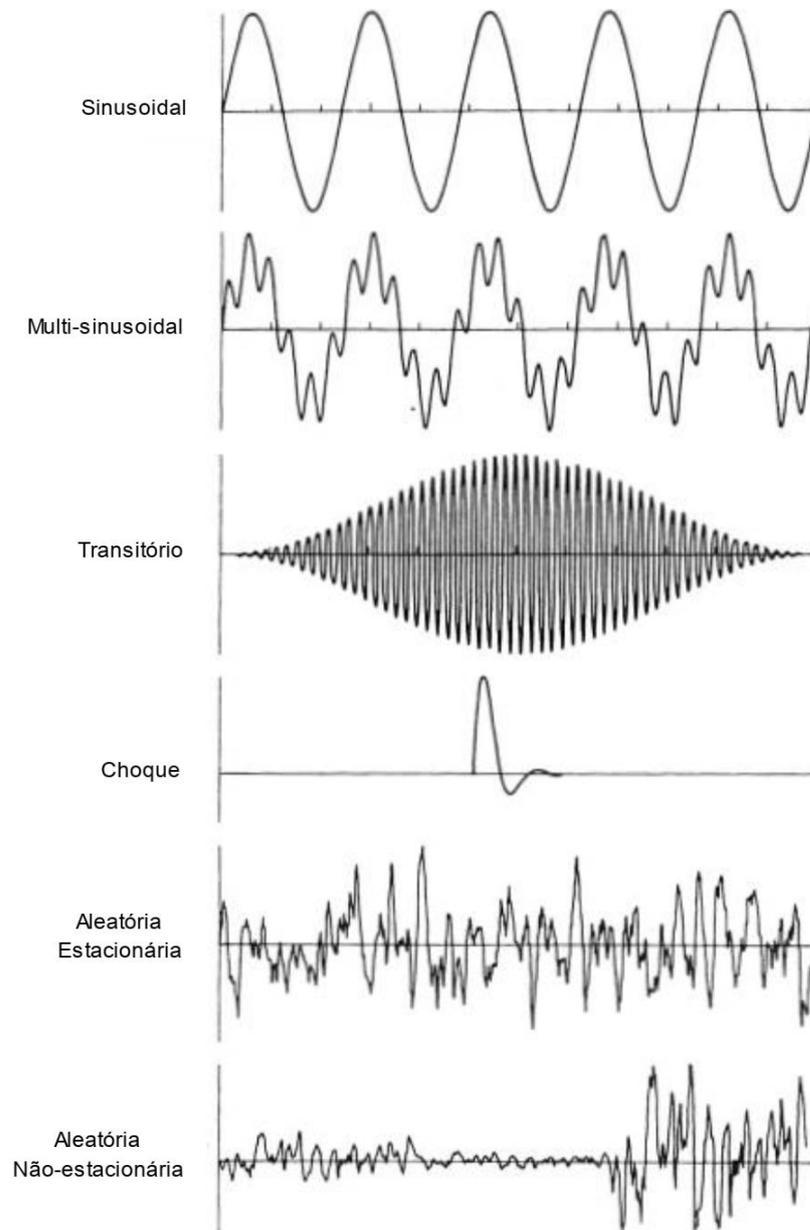
Figura 5 – Classes e subclasses dos movimentos oscilatórios.



Fonte: Margarido (2013).

Logo, para ambos os grupos de classes de movimentos vibracionais, as características específicas de seus sinais no domínio do tempo, são ilustradas na Figura 6.

Figura 6 – Configurações dos distintos tipos de movimentos oscilatórios.



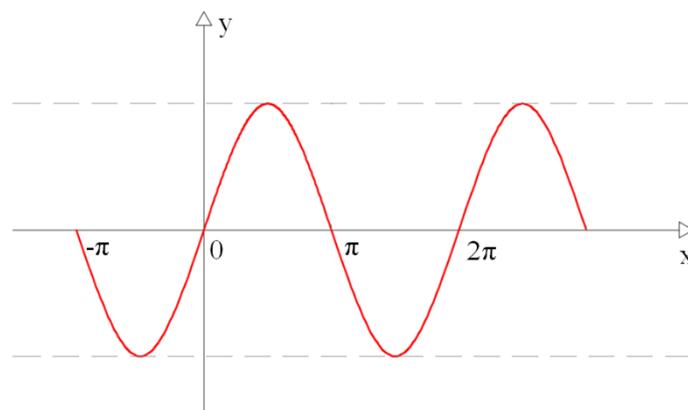
Fonte: Margarido (2013).

Os sinais vibracionais classificados como sinusoidais e multi-sinusoidais são ditos harmônicos, posto que são representados pela alternância de funções seno e cosseno, as quais proporcionam um caráter vibratório periódico e padronizado ao movimento oscilatório, a contraponto do que é encontrado no campo das ações transientes e aleatória estacionária e não estacionária, visto que essas não apresentam índices de periodicidade, exibindo características variacionais ao longo do tempo. Ainda, em termos de ações transientes,

denota-se que carga de choque, é de ordem impulsiva e transitória, com período de duração relativamente curto (LIMA; SANTOS, 2008).

Posto que muitos dos carregamentos reais a que as estruturas estão submetidas, são de natureza determinística e classe periódica, podem ser representados por princípios matemáticos harmônicos, através de funções seno e cosseno de mesma frequência (BOLMSVIK, 2013), como exemplificado pelo movimento ondulatório genérico da Figura 7.

Figura 7 – Movimento ondulatório genérico.



Fonte: Próprio autor (2020).

Isto posto, as propriedades fundamentais da dinâmica, para fins de análise estrutural, são conceituadas.

a) Período natural (T_n): intervalo de tempo expresso em segundos (s), correspondente ao acontecimento de um ciclo oscilatório completo (2π), conforme Figura 8, determinado conforme Equação 1.

$$T_n = \frac{2\pi}{\omega_n} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

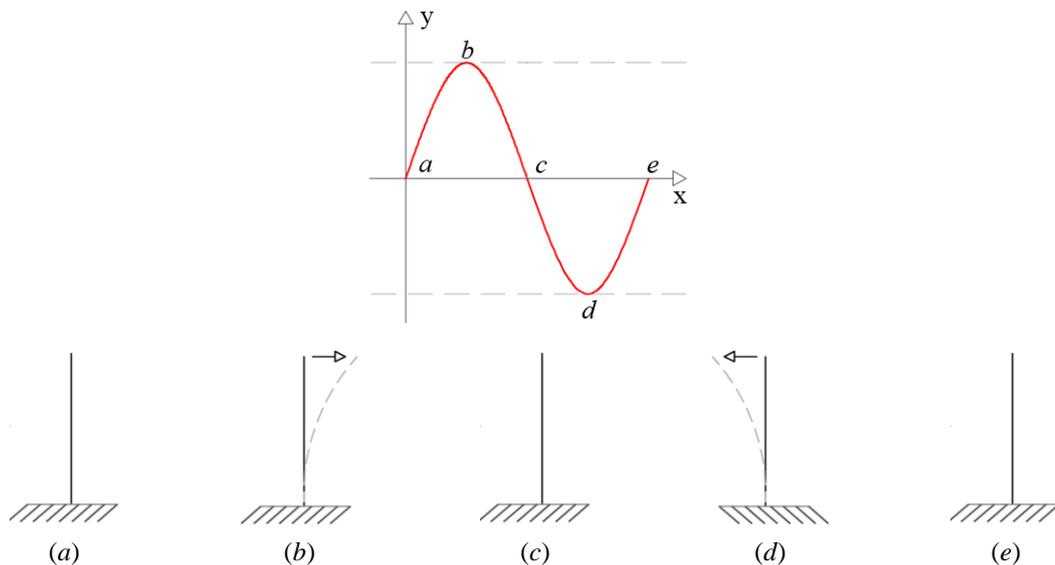
- ω_n – Propriedade dinâmica chamada frequência angular, a qual considera a rigidez (k) do material que compõem o sistema e a massa do mesmo (m),

sendo representada pela unidade radianos/segundos e definida pela Equação 2.

$$\omega_n = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação 2}$$

A referida propriedade dinâmica do período natural, é exemplificada visualmente pela Figura 8, quanto ao comportamento vibracional da extremidade livre de uma coluna qualquer excitada por um carregamento externo, onde o sinal em formato de onda, corresponde a um ciclo completo de oscilação da estrutura, caracterizado pelas fases *a*, *b*, *c*, *d*, *e*. Na fase inicial *a*, a estrutura encontra-se indeformada e em equilíbrio, ao passo que quando excitada, sua extremidade livre move-se para a posição *b*, atingindo certo grau de deslocamento e uma condição deformada, retornando ao seu estado de equilíbrio em *c*, de modo a seguir para a posição deformada *d* com característico deslocamento, completando o ciclo de vibração quando regressa ao posicionamento indeformado em *e*.

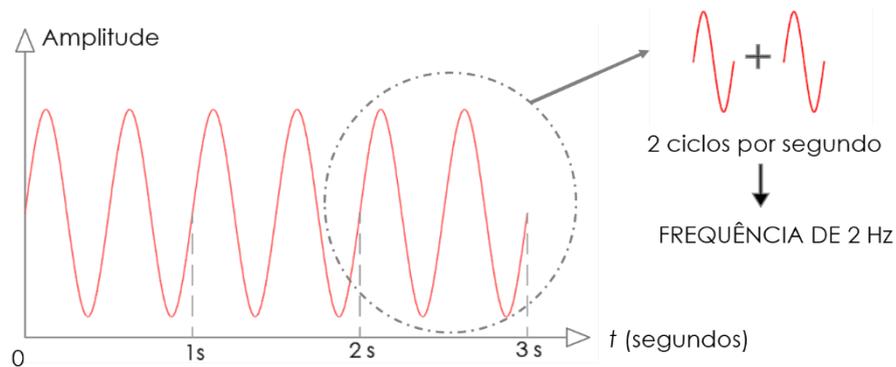
Figura 8 – Representação genérica do período natural de uma determinada estrutura.



Fonte: Próprio autor (2020).

b) Frequência natural ou frequência fundamental (f_n): propriedade que identifica quantos ciclos oscilatórios completos ocorrem em uma unidade de tempo, informando com qual frequência um movimento oscilatório se repete, como apontado pela Figura 9.

Figura 9 – Representação gráfica genérica da frequência natural.



Fonte: Próprio autor (2020).

Em virtude disso, a frequência é expressa em ciclos por segundo, unidade conhecida internacionalmente por Hertz (Hz), de modo a ser determinada analiticamente, por intermédio da equação inversa da propriedade do período natural conforme a Equação 3, reescrita para a Equação 4.

$$f_n = \frac{1}{T_n} \quad \text{Equação 3}$$

$$f_n = \frac{\omega_n}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} * \sqrt{\frac{k}{m}} \quad \text{Equação 4}$$

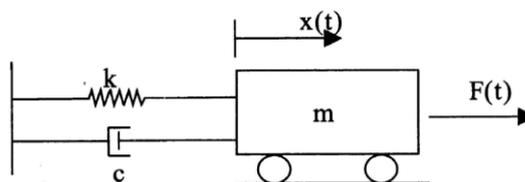
Denota-se assim, que a frequência natural trata-se de parâmetro de maior relevância à Dinâmica Estrutural, posto que aponta a qual taxa de oscilação por unidade de tempo, a vibração de um determinado elemento estrutural é favorável, sendo dependente das características de massa e rigidez do sistema estrutural (CRESPO, 2009; SANDOVAL, 2015)

c) Amplitude: valor do deslocamento máximo ou mínimo que o movimento oscilatório atinge.

2.1.1.1 Graus de liberdade de um sistema dinâmico

Um sistema dinâmico é formado por quatro componentes principais, massa (m), rigidez (k), amortecimento (c) e carregamento aplicado (f), consoante com o conjunto exposto pela Figura 10, onde a fração correspondente a massa (m) simboliza a inércia do sistema que armazena a energia cinética do conjunto, a rigidez (k) representa as propriedades elásticas características, o amortecimento (c) qualifica-se como o elemento responsável pela dissipação de energia e $F(t)$ trata-se do esforço aplicado ao sistema (LIMA; SANTOS, 2008).

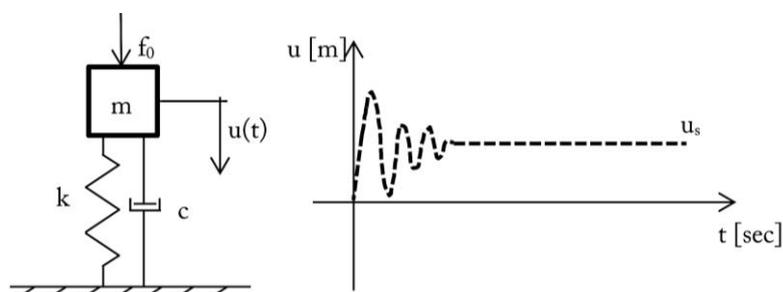
Figura 10 – Sistema dinâmico horizontal.



Fonte: Lima e Santos (2008).

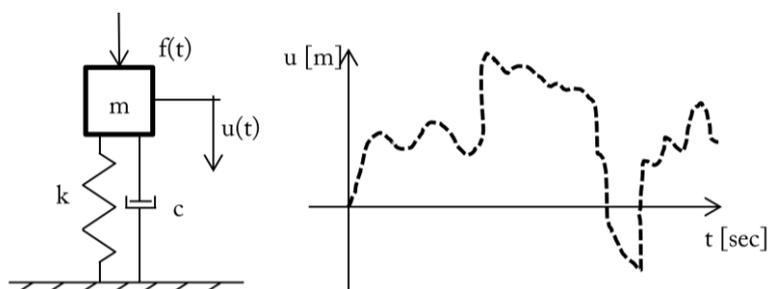
O carregamento $F(t)$ aplicado, provoca deslocamentos na massa (m) em um determinado eixo correspondente, como no exemplo ilustrado acima, ao longo da coordenada x . Em virtude disso, quando o carregamento é de ordem estática, sem variações de intensidade no tempo, a massa do conjunto passa a ser transferida para uma nova posição e nessa permanece, devido a propriedade constante de seu carregamento, como visto na Figura 11, a contraponto do que é observado quando o esforço aplicado é dinâmico, dado que as características de intensidade, direção, sentido e posição são variantes ao longo do tempo, de modo que as partículas de massa apresentem posições distintas no tempo, como apontado pela Figura 12 (BOLMSVIK, 2013).

Figura 11 – Sistema vertical carregado estaticamente, com deslocamento constante.



Fonte: Bolmsvik (2013).

Figura 12 – Sistema vertical carregado dinamicamente, com deslocamento variável no tempo.

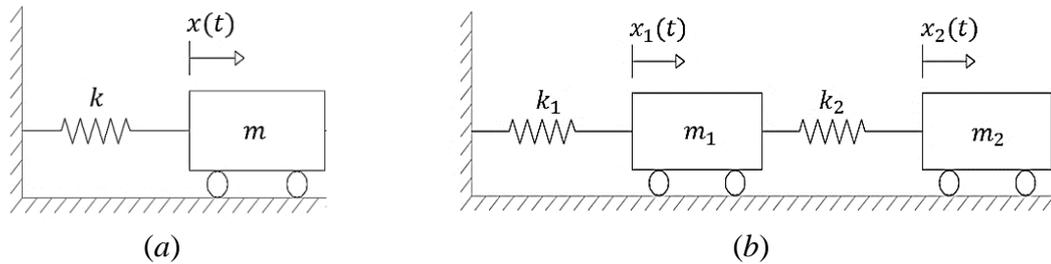


Fonte: Bolmsvik (2013).

Desta forma, quanto ao sistema com cargas dinâmicas, pode-se definir completamente a localização dos pontos de massa que compõem um corpo, através dos números de graus de liberdade, os quais representam o quantitativo numérico de coordenadas independentes necessárias para que se estabeleça corretamente, a posição de todas as massas do conjunto em qualquer instante de tempo (t), dentro do espaço temporal analisado (LIMA; SANTOS, 2008).

Em razão disso, os corpos podem apresentar dois modelos de graus de liberdade, como exemplificado pela Figura 13, onde em (a) demonstra-se um sistema que descreve o deslocamento do conjunto com apenas uma única coordenada, conhecido como *Single Degree-of-Freedom System* (SDOF) ou Sistema de um Grau de Liberdade (SGL); e em (b) o *Multiple Degrees-of-freedom System* (MDOF) ou Sistema com Múltiplos Graus de Liberdade (MGL), no qual variadas coordenadas são empregadas para definir o deslocamento existentes (JARNERÖ, 2014).

Figura 13 – Graus de liberdade de um sistema dinâmico.

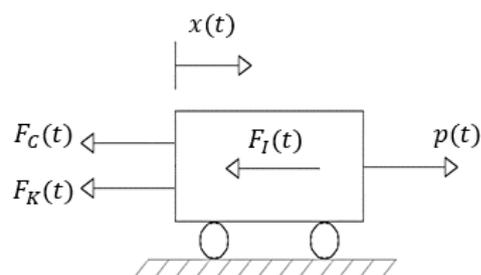


Fonte: Próprio autor (2020).

2.1.1.2 Equilíbrio de um sistema dinâmico

O Princípio de d'Alembert trata-se do parâmetro matemático responsável por estabelecer equilíbrio de sistemas dinâmicos, descritos na seção 2.1.1.1, como pode ser observado no diagrama de corpo livre da Figura 14, por intermédio da equação do movimento retratada pela Equação 5, adicionando às forças que atuam sobre o sistema, determinada carga de excitação dinâmica, em sentido contrário as mesmas (LIMA; SANTOS, 2008; PEREIRA, 2014).

Figura 14 – Equilíbrio de forças de sistemas dinâmicos.



Fonte: Próprio autor (2020).

$$p(t) = F_i(t) + F_c(t) + F_k(t)$$

Equação 5

Onde:

- $p(t)$: carga de excitação dinâmica;
- $F_i(t)$: força de inércia;

- $F_C(t)$: força do amortecedor;
- $F_K(t)$: força da mola (rigidez).

Sendo as forças empregadas pela Equação 5, funções do deslocamento $x(t)$, ao deslocar o corpo que encontrava-se inicialmente em equilíbrio, uma força de reação ocorre em virtude de esforços de tração, compressão ou cisalhamento atuantes no sistema ou devido à ação da gravidade, de forma a fazer com que o mesmo seja deslocado e retorne à sua posição original de equilíbrio. De acordo com a Lei de Hooke, o valor representativo da referida força de reação é proporcional ao deslocamento de um sistema linear-elástico (WECKENDORF, 2009), conforme descreve a Equação 6.

$$F(t) = -kx(t) \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- $F(t)$: força de reação, em N (Newtons);
- k : rigidez do corpo, em N/m ;
- $x(t)$: deslocamento no tempo, em m (metros).

Posto que a força de reação provoca aceleração no sistema ao trazer o corpo de volta à sua posição de equilíbrio, uma vez que esse fator é categorizado como a taxa de variação de velocidade, a Segunda Lei de Newton considera esse efeito (WECKENDORF, 2009), em concordância com a Equação 7.

$$F(t) = m\ddot{x}(t) \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

- $F(t)$: força de reação, em N (Newtons);
- m : massa do corpo, em Kg (Quilogramas);
- $\ddot{x}(t)$: aceleração no tempo, em m/s^2 .

Caso todas as perdas de energias sejam negligenciadas, o sistema reúne impulsos e permanece vibrando, de modo constante, caracterizando oscilações livres não amortecidas.

Para tanto, a Equação do Movimento do corpo é deduzida pelo rearranjo da Equação 6 e Equação 7, compondo uma equação diferencial linear homogênea de segunda ordem, descrita na Equação 8.

$$m\ddot{x}(t) + ky(t) = 0 \quad \text{Equação 8}$$

Em consequência de vibrações livre não amortecidas, a serem descritas na seção 2.1.1.3, acontecerem somente na teoria, todos os sistemas dissipam energia pela fricção, efeito denominado amortecimento, o qual desacelera o movimento vibratório por agir na direção oposta ao movimento e ser proporcional à sua velocidade (WECKENDORF, 2009), consoante com a Equação 9.

$$F(t) = -c\dot{x}(t) \quad \text{Equação 9}$$

Onde:

- $F(t)$: força de reação, em N (Newtons);
- c : massa do corpo, em Kg/s ou Ns/m ;
- $\dot{x}(t)$: velocidade no tempo, em m/s .

Para tanto, equilibrando-se a Equação 8 com a Equação 9, a Equação do Movimento para oscilações de ordem amortecida é deduzida, sendo a mesma apresentada pela Equação 10.

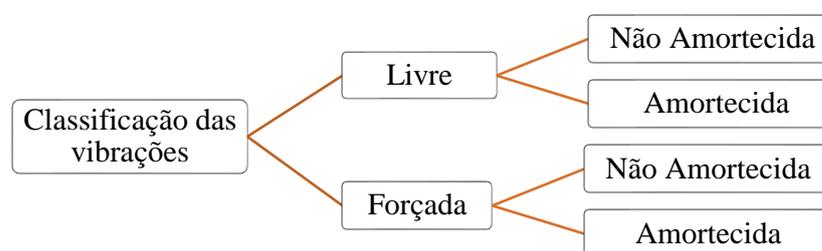
$$F(t) = m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) \quad \text{Equação 10}$$

Tratando-se as forças empregadas pela Equação 5, funções do deslocamento $x(t)$, como retratado anteriormente, as mesmas foram retratadas de acordo com as derivadas do deslocamento, como apontado pela Equação 10, uma vez que a parcela referente à força do amortecedor pode ser descrita pelo produto da primeira derivada do deslocamento, corresponde à velocidade do sistema (\dot{x}) com o amortecimento (c), ao passo que a fração da força de inércia, é representada pelo produto da segunda derivada do deslocamento, relativa a aceleração (\ddot{x}), com a massa (m) do sistema.

2.1.1.3 Classificação das vibrações

As vibrações de um sistema dinâmico são classificadas em livres e forçadas, sendo subdivididas em sistemas que, podem ou não, levar em consideração as propriedades de amortecimento dos materiais que compõem o referido sistema, conforme exposto pelo diagrama da Figura 15.

Figura 15 – Classificação das vibrações



Fonte: Próprio autor (2020).

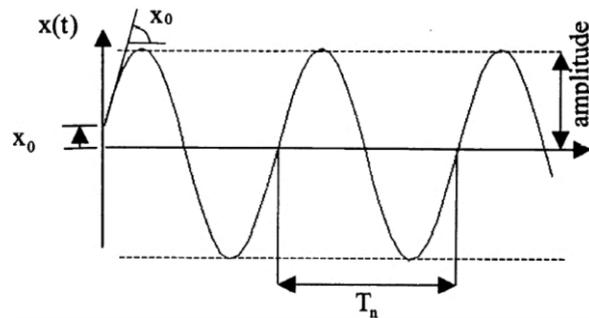
Um sistema de massa quando considerado em vibração livre, tem seu equilíbrio estático desestabilizado no instante inicial ($t=0$), por meio de velocidades e/ou deslocamentos, demonstrando movimentos oscilatórios, sem qualquer excitação dinâmica externa, ao passo que, um sistema submetido a uma vibração forçada, é excitado devido a um carregamento externo com fornecimento contínuo de energia, como forças, acelerações e deslocamentos. Quanto a essa última classificação, deve-se ressaltar que, a natureza do carregamento externo aplicado, acarreta em uma resposta por movimento oscilatório com configurações de mesma natureza (LIMA; SANTOS, 2008).

As subclassificações denominadas como vibrações não amortecidas e amortecidas, são dadas conforme a consideração da propriedade de amortecimento, dos materiais que compõem o sistema, mecanismo que determina a rapidez com que a amplitude dos movimentos vibratório é atenuada, por intermédio da transformação de energia da vibração em calor, cenário que provoca decréscimo na resposta do conjunto (WECKENDORF, 2009; TADEU, 2015).

As vibrações de ordem não amortecida, desconsideram os fatores atrelados ao amortecimento da estrutura, de forma que o movimento oscilatório não dissipe energia,

sendo esse constante e inalterado ao longo do tempo, de modo que após a finalização de um ciclo vibratório, outro idêntico seja iniciado, com mesma amplitude e período, como visualizado na Figura 16.

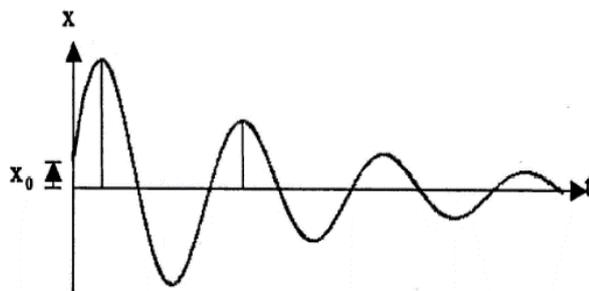
Figura 16 – Comportamento do sinal de vibrações não amortecidas.



Fonte: Adaptado de Lima e Santos (2008).

Já nas vibrações amortecidas, ocorre dissipação da energia atribuída ao movimento oscilatório, o qual passa a apresentar certo grau de decaimento progressivo nos níveis vibratórios, como observado na Figura 17, até que o estado em repouso da estrutura, seja atingido novamente. Em virtude disso salienta-se que, taxas baixas de amortecimento necessitam de maior período de tempo e ciclos de decaimento, para que os movimentos oscilatórios cessem (BRAIDO, 2014).

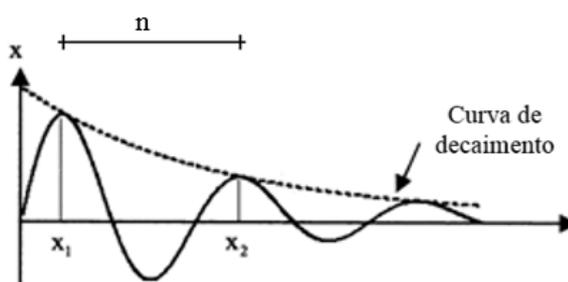
Figura 17 – Comportamento do sinal de vibrações amortecidas.



Fonte: Adaptado de Lima e Santos (2008).

Assim sendo, a taxa adimensional correspondente ao amortecimento da vibração de um sistema estrutural, pode ser determinada analiticamente aplicando-se, como uma das alternativas de mensuração, a metodologia do fator de decremento logarítmico, responsável pelo cálculo do amortecimento do sistema através da atenuação da resposta do mesmo ao longo do tempo (TADEU, 2015), de modo a estabelecer a curva de decaimento do sinal vibratório, mostrada na Figura 18, por meio da correlação entre dois picos de acelerações consecutivas, identificadas como amplitudes inicial (x_1) e final (x_2) (BRAIDO, 2014). A partir disso, através da Equação 11 e Equação 12, são estabelecidos respectivamente, o decremento logarítmico (δ) e a taxa de amortecimento (ξ).

Figura 18 – Metodologia do decremento logarítmico.



Fonte: Adaptado de Lima e Santos (2008).

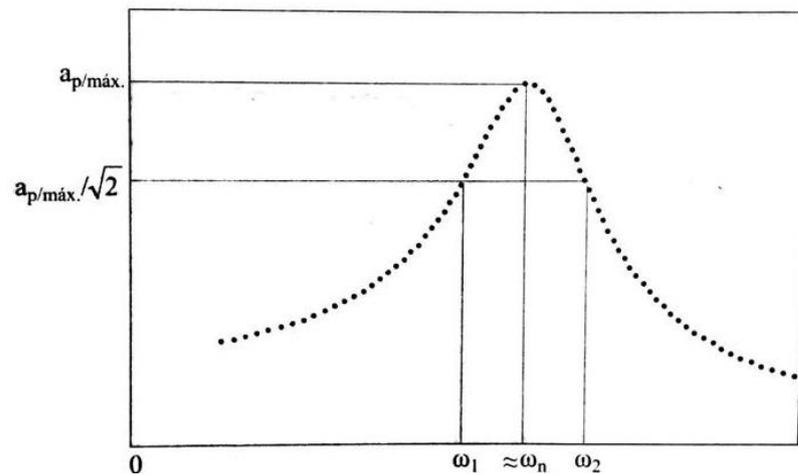
$$\delta = \frac{1}{n} * \ln \frac{(x_1)}{(x_2)} \quad \text{Equação 11}$$

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2 + \delta^2}} \quad \text{Equação 12}$$

Ainda, o amortecimento de sistemas estruturais pode ser determinado por intermédio da aplicação analítica da metodologia da largura de banda ou da meia potência, através da qual o amortecimento dos sistemas é estabelecido, pela análise do sinal vibratório no domínio da frequência. Para tanto, o amortecimento é obtido partindo-se da consideração da frequência natural (ω_n) do sistema e de sua amplitude de pico ($a_{p \text{ máx}}$), associada à duas frequências forçantes, correspondentes à uma amplitude de $1/\sqrt{2}$ vezes ao valor de pico, identificadas como ω_1 e ω_2 , respectivamente situadas abaixo e acima da frequência principal

(SORIANO, 2014; TADEU, 2015), conforme apontado pela Figura 19, de forma a ser aplicada a Equação 13.

Figura 19 – Metodologia da larga de banda.



Fonte: Soriano (2014).

$$\xi = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2 * \omega_n}$$

Equação 13

2.1.1.3.1 Fontes de vibrações forçadas

Quando um determinado conjunto de elementos estruturais é submetido a carregamentos externos de ordem dinâmica, onde o fornecimento de energia é dito contínuo, esse encontra-se em estado de vibração forçada. Deste modo, a avaliação dessa tipologia de vibração requer que as características da procedência e caminho de transmissão do esforço, sejam identificados e qualificados bem como seu elemento receptor (ISO, 2007).

No que diz respeito as estruturas, especificamente em termos de edifícios habitacionais, industriais e comerciais, as fontes de vibrações ditas forçadas, estão intrinsecamente atreladas com o seu ambiente externo e interno. Em termos do espaço circundante das edificações, a origem dos esforços dinâmicos pode ocorrer no solo, subsolo, água e ar, devido a atividades relacionadas com o setor construtivo, exploração de minas e pedreiras, fluxo de ar e água, tráfego rodoviário e ferroviário. Já em seu cenário interno, as

fontes das vibrações em edificações, ocorrem em razão de atividades humanas, como caminhar, pular, correr e dançar, de ferramentas e equipamentos, bem como de atividades construtivas existentes, em determinada área do edifício (ISO, 2007).

Elevados índices de particularidade são visualizados nas tipologias estruturais, dado que essas possuem singularidades subordinadas a aspectos referentes às concepções arquitetônicas, às dimensões e à metodologia empregada na ligação entre os variados elementos estruturais. Devido a isso e ao fato de que cada material, constituinte de um membro específico das edificações, apresenta taxa própria de amortecimento (CHRISTOS; VASSILIKI; EMMANOUIL, 2016), ao longo do caminho de transmissão, os carregamentos dinâmicos sofrem modificações, até chegar em seu componente receptor, o qual pode ser um elemento estrutural, equipamento ou os próprios ocupantes dos edifícios (ISO, 2007).

2.1.2 Carregamentos dinâmicos induzidos por atividades humanas

Os carregamentos dinâmicos comuns e problemáticos em pavimentos constituídos por vigas de materiais projetados à base de madeira, encontrados em empreendimentos habitacionais, comerciais e industriais, são provenientes dos movimentos do corpo humano ao se praticar atividades habituais, como caminhar, correr, saltar e dançar (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009; GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010). Em virtude de que, ao executar tais ações, as pessoas induzem carregamentos aos sistemas estruturais de pisos, resultantes da associação da massa do corpo com a movimentação executada sobre o pavimento, de modo a produção de acelerações corporais transmitidas aos pisos, originam os movimentos vibracionais (SANDOVAL, 2015).

Em razão dos pisos tratarem-se de um dos três sistemas estruturais principais das edificações com contato físico direto e constante com os seres humanos (HU; CHUI; ONYSKO, 2001; OPAZO; BENEDETTI; ROJAS, 2016), os esforços devido a prática de atividades humanas, são caracterizados em três grupos distintos, em virtude da interação de contato entre homem e estrutura. Para isso, considera-se a classificação (*I*) contato intermitente com a estrutura, caracterizado por uma curta exposição temporal e grande intensidade, atrelado as atividades de correr, pular e alguns estilos rítmicos de danças; (*II*) contato permanente com a estrutura, dado por exemplo pelo ato de caminhar, qualificado por ações prolongadas do carregamento sobre a estrutura, configurando situação relevante à análise de desconforto humano; (*III*) contato transiente com a estrutura, em razão de esforços

impulsivos sem repetição regular, onde o amortecimento do movimento vibratório é dado somente pelo elemento estrutural, sem possíveis iterações com o homem, como o caso de plataformas de mergulho e salto ornamental de piscinas (MELLO, 2005; ALMEIDA, 2008).

Sendo os esforços produzidos pelos carregamentos dinâmicos associados com a prática de atividades humanas variáveis no tempo, os mesmos apresentam componentes de ordem vertical, horizontal e transversal. A partir de então, deve-se salientar que a componente de resposta vertical é de maior relevância e importância para estudos e investigações de desempenho vibratório de pisos, uma vez que se trata da parcela do carregamento com valores de maior magnitude (ŽIVANOVIĆ; PAVIC; REYNOLDS, 2005; ALMEIDA, 2008; SANDOVAL, 2015).

Dado a existência de uma grande flutuação de movimentos corporais produzidos pelo ser humano, são variadas as atividades cotidianas humanas que estimulam dinamicamente pavimentos de madeira (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010), categoriza-se a caminhada como o esforço mais comum (CHEN; XU; ZHANG, 2014; TADEU, 2015), seguida da prática de corridas e saltos (ŽIVANOVIĆ; PAVIC; REYNOLDS, 2005).

As divergências entre essas atividades são apontadas por suas funcionalidades, em termos de frequências nominais, conteúdo de frequência e período de tempo que a excitação ocorre (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010), uma vez que suas respostas dinâmicas são totalmente dependentes de parâmetros atrelados ao modo com que os mesmos desenvolvem cada atividade cotidiana e as características corporais de cada indivíduo, como o tamanho da passada, estilo de projeção da passada sobre o pavimento, velocidade do movimento, tempo de contato, estatura física, comprimento dos membros e do tronco, restrições dos movimentos nas articulações, distribuição de massa nos membros, idade e gênero (MELLO, 2005; ŽIVANOVIĆ; PAVIC; REYNOLDS, 2005; ISO, 2007; JARNERÖ, 2014).

Em consequência das explanações realizadas, principais esforços dinâmicos induzidos pelo homem em pisos de madeira, como a caminhada, corrida e saltos, são relatados nas subseções a seguir.

2.1.2.1 Esforço dinâmico da atividade humana de caminhar

A caminhada revela-se como o parâmetro de maior relevância e interesse de estudo, perante o desempenho à vibração de estruturas de pavimentos, dado que verifica-se como o principal esforço dinâmico ocorrente nesses sistemas (JARNERÖ, 2014; ZHANG, 2017).

O ato humano de caminhar, conhecido como marcha no domínio da Biomecânica, ciência que estuda o comportamento mecânico dos organismos vivos, é definido como o estilo ou o modo de locomoção das pessoas, sendo quantificado pelo ponto de vista mecânico, através de medições, descrições e avaliações dos movimentos dos passos (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009), tomando como principais fatores de interesse para esses carregamentos, a frequência dos passos, o ciclo de marcha e o tamanho da passada (SANDOVAL, 2015; ZHANG, 2017).

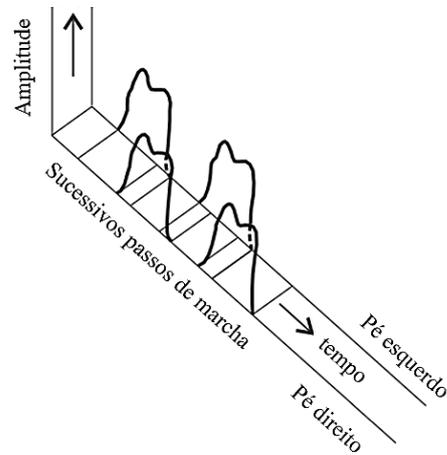
2.1.2.1.1 Frequência de passo

Frequência de passo ou frequência de passada, é descrita como o número de passos produzidos por um ser humano em uma unidade de tempo (segundos), medida em Hertz (Hz). Devido às características próprias do corpo humano como a dimensão e configuração dos osso, movimento das articulações e distribuição de massa nos membros, as marchas possuem grande aleatoriedade de parâmetros entre os indivíduos, em virtude de que cada qual tende a assumir a marcha e a velocidade eficiente para sua estrutura corporal, conseqüentemente fazendo com que a duração das passadas e tempo de apoio dos pés correlacionem-se com a variação da idade, da estatura, da função corporal e peso, cenário onde até mesmo um único indivíduo, não reproduz dois passos idênticos (MELLO, 2005; RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009; SANDOVAL, 2015).

Em virtude dessa peculiaridade atribuída às passadas humanas, observa-se que estudos desenvolvidos consideram distintos valores representativos de frequência de marcha, como pode ser exemplificado ao se comparar as frequências empregadas pelas pesquisas realizadas por Almeida (2008), Chen, Xu e Zhang (2014) e Casagrande *et al.* (2018), onde o primeiro estudo considerou uma média para cálculos a faixa de frequência de caminhada entre 1,6 e 2,4 Hz, enquanto que o segundo adotou valores de frequência inseridos dentro dos limites de 1,3 a 3,0 Hz, determinada experimentalmente, ao passo que a terceira pesquisa citada, assumiu frequência de marcha de 1,8 Hz, valor intermediário da faixa comum de frequência de 1,2 a 2,4 Hz, indicada pela ISO 10137:2007.

Para fins de consideração e atenuação da complexidade da análise da caminhada humana, as frequências de marcha distintas entre os pés, direito e esquerdo, são associadas e representadas por um único valor de frequência, apresentando as mesmas características de comportamento, como mostrado pela Figura 20.

Figura 20 – Frequências idênticas, admitidas para sucessivos passos de marcha.

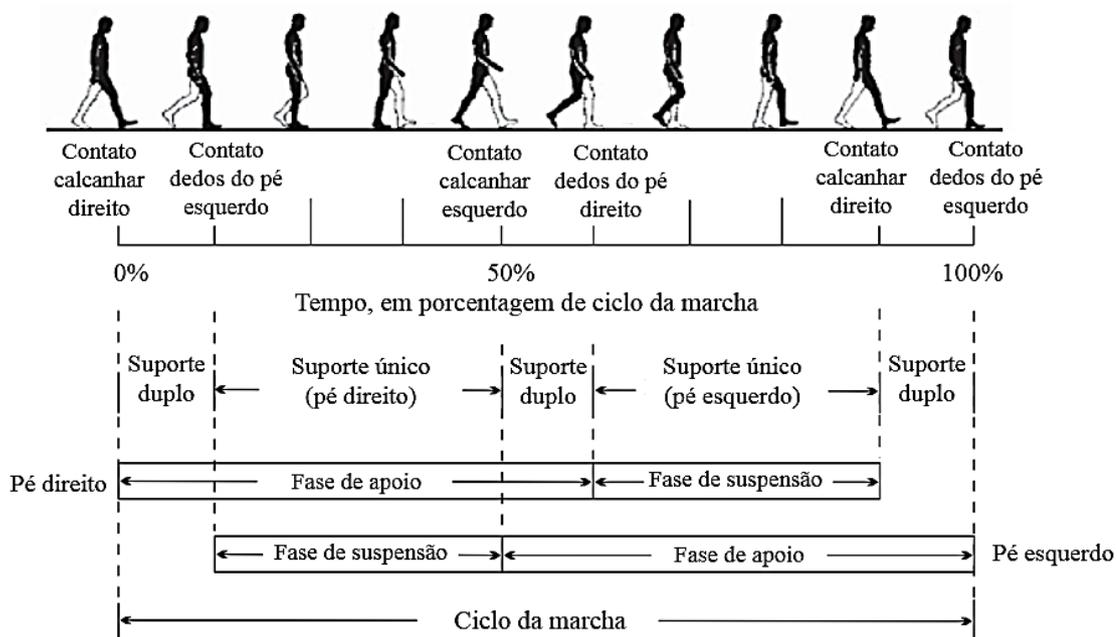


Fonte: Adaptado de Racic, Pavic e Brownjohn (2009).

2.1.2.1.2 Ciclo da marcha

O mecanismo do caminhar dos seres humanos, é dado pela propulsão do indivíduo para a frente, mediante a movimentação contínua de seus membros inferiores, de forma consecutiva e rítmica (MELLO, 2005). Em vista disso, o período de tempo atrelado à ocorrência de dois episódios seguidos de passadas considerados idênticos, com início e conclusão demarcados geralmente, pelo instante em que os pés atingem o pavimento, configura o chamado ciclo de marcha (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009). Esse processo é exemplificado minuciosamente pela Figura 21, com início e fim do ciclo de marcha, dados pelo contato duplo de ambos os pés no solo, através do impacto do calcanhar do pé direito e do toque dos dedos do pé esquerdo.

Figura 21 – Ciclo da marcha.

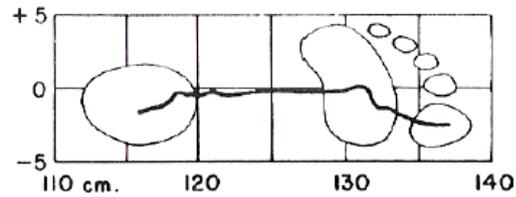


Fonte: Adaptado de Racic, Pavic e Brownjohn (2009).

O ciclo de marcha, como pode ser visualizado, é dividido pelas considerações dos estágios de suspensão e apoio. A etapa de suspensão, representa aproximadamente 40% de todo o ciclo de marcha, tratando dos períodos de tempo em que o pé está no ar, deslocando-se em avanço para a frente, ao passo que a etapa de apoio, também denominada etapa de contato, reflete os 60% restantes do ciclo de marcha, correspondendo aos episódios em que cada um dos pés toca o piso, delineados pela circunstância inicial do impacto do calcanhar e pelo movimento contínuo de disposição do restante do pé sobre o piso, seguido pela quebra respectiva de contato, do calcanhar e dedos do pés, através da suspensão do membro no ar (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009).

Acerca da fase de apoio, ressalta-se que o percurso do contato dos pés com a superfície de apoio, inicia-se no ponto central do calcanhar e move-se para a linha intermediária da planta do pé, permanecendo nesse ponto até que o calcanhar seja elevado, transferindo assim, a região de contato, em direção ao dedo grande dos pés, conforme visualizado na Figura 22.

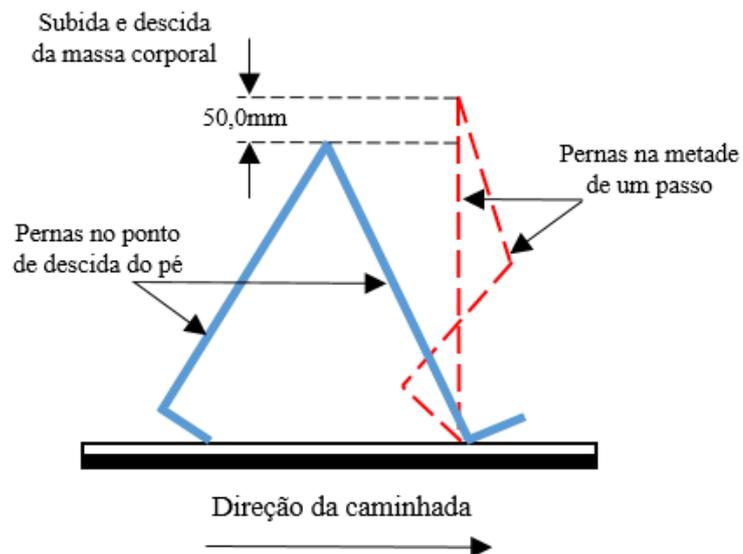
Figura 22 – Percurso de contato dos pés com a superfície, na fase de apoio.



Fonte: Mello (2005).

Em virtude das considerações explanadas acima, ao se executar o contato dos pés com a superfície de apoio, impulsos são transmitidos à mesma, dado que ao se praticar o ato de caminhar pela alternância dos membros inferiores, ocorre uma movimentação de descida e subida da massa corporal efetiva, de uma altura aproximada de 50,0 milímetros, como aponta a Figura 23, podendo esse valor variável ao ângulo formado entre as pernas, quando essas encontram-se afastadas e esticada, seja a execução da caminhada iniciada pela passada direita ou esquerda (MELLO, 2005; ALMEIDA, 2008).

Figura 23 – Impulso gerado na caminhada humana.

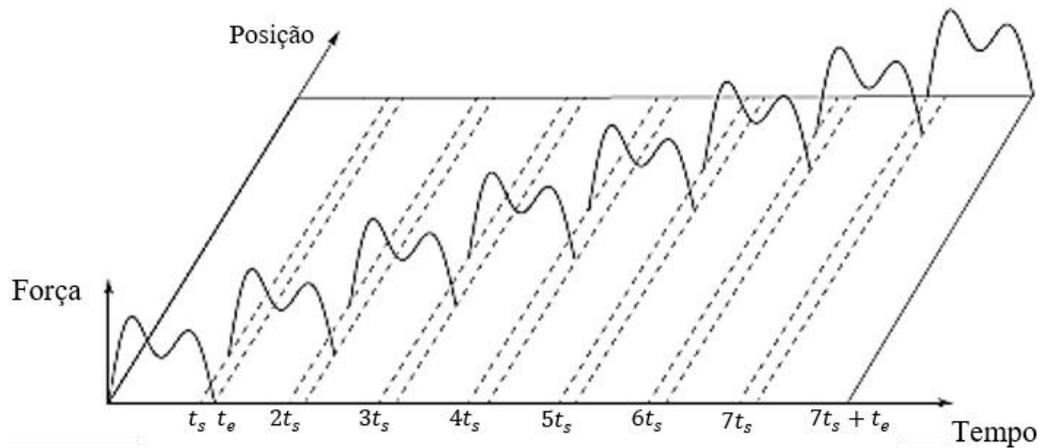


Fonte: Próprio autor (2020).

Considera-se o ato humano de caminhar como uma atividade de ordem periódica, uma vez que, admitem-se pressupostos de que ambos os pés produzem exatamente a mesma força de impulso e que a repetição das passadas é perfeita, como demonstrado no esquema

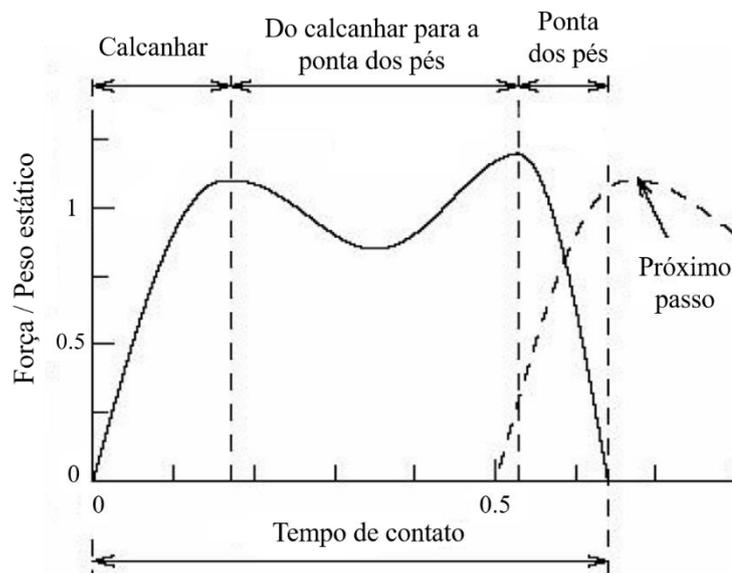
da Figura 24, de modo que a modelagem do ciclo de marcha seja dada simplesmente pela consideração de uma porção do movimento de uma passada (ŽIVANOVIĆ; PAVIC; REYNOLDS, 2005; ALMEIDA, 2008), exemplificada graficamente pelo sinal da Figura 25.

Figura 24 – Esquema de carregamentos do caminhar humano.



Fonte: Adaptado de Zhang (2017).

Figura 25 – Modelo genérico de forças devido ao caminhar.



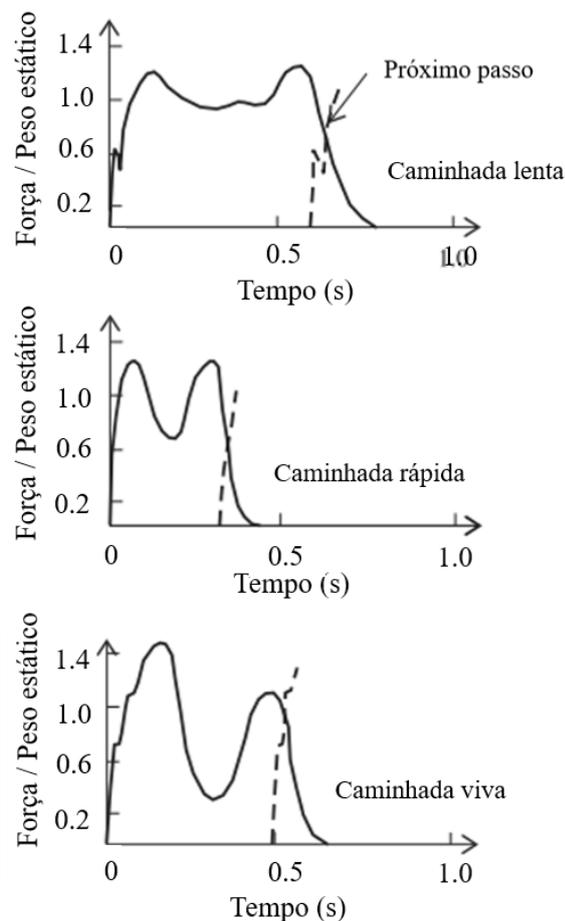
Fonte: Adaptado de Almeida (2008).

Denota-se por meio do modelo ilustrado acima, que a excitação dos pavimentos por uma única passada produzida ao se caminhar, possui dois picos máximos de amplitude do

carregamento vertical, sendo o pico esquerdo correspondente ao impacto do contato inicial do calcanhar no piso e o pico direito corresponde ao esforço de impulsão, relacionado à retirada dos dedos do pé, que ao final da passada, tocam o piso (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009; JARNERÖ, 2014; SANDOVAL, 2015).

Ao passo que a frequência de caminhada é definida pela velocidade que o ser humano atribui a mesma, esse parâmetro pode ser aumentado ou diminuído, sendo modificado o intervalo de tempo entre o pico do calcanhar e o pico relacionado a ponta dos dedos dos pés, relacionado ao modelo de referência da caminhada normal, mostrada pela figura acima, de forma a originar modelos com variações da força vertical típica da caminhada humana, como a caminhada lenta, caminhada rápida e caminhada viva, demonstradas pela Figura 26.

Figura 26 – Variações da força vertical típica normal da caminhada humana.



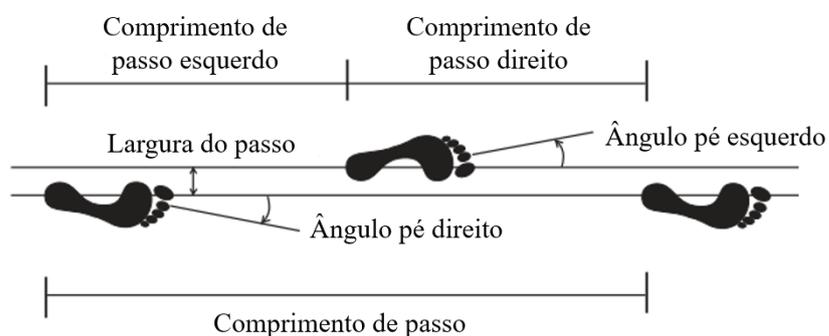
Fonte: Adaptado de Živanović, Pavic e Reynolds (2005).

Em virtude da peculiaridade atribuída aos picos gerados pelo ato de caminhar, aponta-se que as fases de apoio e suspensão do ciclo de marcha, abrangem configurações de suporte unipodal, onde enquanto um dos pés está em contato com o solo, o outro encontra-se suspenso no ar, bem como de suporte duplo, com contato de ambos os pés no solo, ocorrendo uma sobreposição entre passadas consecutivas, como apontada pela ilustração do ciclo de marcha na Figura 21 e pelas linhas tracejadas presentes na Figura 24, Figura 25 e Figura 26, situação observada em determinados intervalos de tempo específicos, como no início e fim do ciclo de marcha e na fase de alternância entre os pés direito e esquerdo, no meio do processo de caminhada (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009; GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; ZHANG, 2017).

2.1.2.1.3 Comprimento da passada

O comprimento da passada configura o critério empregado na modelagem da marcha humana, que determina a distância percorrida entre a realização de duas colocações sucessivas do mesmo pé, geralmente medida em termos de dois golpes de calcanhar sucessivos, compreendendo a somatória do comprimento de passo, relativo ao pé esquerdo e ao pé direito (MELLO, 2005; RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009), como ilustrado na Figura 27.

Figura 27 – Parâmetros relacionados ao comprimento dos passos.



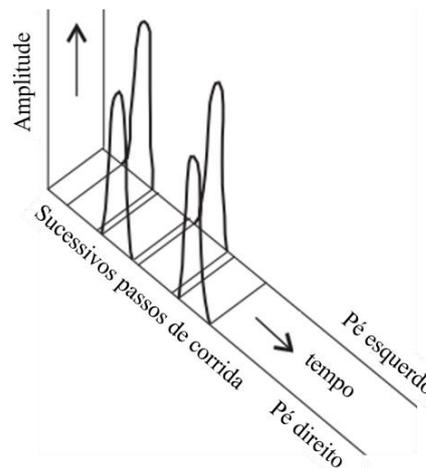
Fonte: Adaptado de Racic, Pavic e Brownjohn (2009).

Ainda está vinculado ao comprimento da passada, a determinação da propriedade secundária de largura da passada, a qual quantifica o afastamento existente entre os caminhos executados pelos dois pés, sendo medida do ponto médio dos calcanhars.

2.1.2.2 Esforço dinâmico da atividade humana de correr

À medida que a execução de uma caminhada é intensificada pelo indivíduo, a execução de passadas alternadas e sucessivas das pernas direita e esquerda, passa a apresentar diminuição de tempo de execução bem como aumento significativo de velocidade, de forma com que os dois picos gerados pelo impulso da caminhada sejam fundidos, apresentando-se no formato de um pico de amplitude singular, situação justificada pelo fato de que o pé entra em contato com o piso em sua totalidade, em um único impacto, como aponta a Figura 28 (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009; GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010; JARNERÖ, 2014).

Figura 28 – Frequências idênticas, admitidas para sucessivos passos de corrida.



Fonte: Adaptado de Živanović, Pavic e Reynolds (2005).

Observa-se acima que, ao longo dos movimentos de uma determinada corrida, existem intervalos observáveis de tempo onde ocorre o contato entre o indivíduo e o sistema de piso, bem como períodos sem contato, onde ambos os pés não tocam a estrutura, situações representadas respectivamente, pelos picos de forças e pelos intervalos entre os referidos picos, configurando as principais distinções entre a marcha do caminhar e do correr.

Em razão disso, a corrida é categorizada como uma atividade de excitação dinâmica descontínua, uma vez que a interação homem e estrutura apresenta grande intensidade de resposta em picos de curta exposição temporal (ALMEIDA, 2008), dado a sua descrição como uma série de saltos em avanço sobre a superfície de apoio, onde o corpo sustenta-se

alternadamente, primeiro sobre um pé e, depois, sobre o outro (MELLO, 2005), sendo configurada pela fase de apoio unipodal e suspensão de ambos os pés, de acordo com a ilustração da Figura 29.

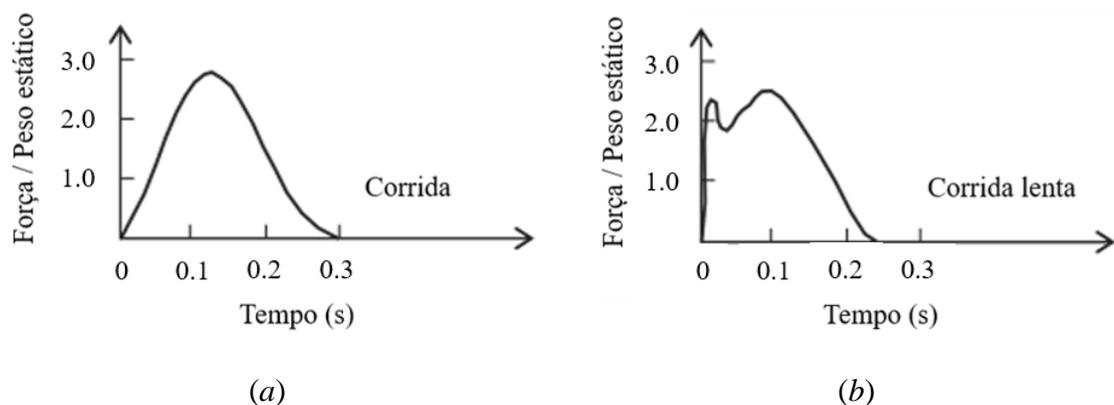
Figura 29 – Fases da corrida.



Fonte: Próprio autor (2020).

De mesmo modo como admitido para a atividade de caminhar, para as componentes verticais dos movimentos de corridas assume-se que ambos os pés ocasionam a mesma força de impacto e que a execução repetitiva das passadas é perfeita, de forma a se modelar as respostas dessa atividade, unicamente pela consideração de uma parcela do movimento, bem como de que a variação da velocidade ao se correr, ocasiona variações do modelo de referência de corrida apontado pela Figura 30 (a), originando o modelo de corrida lenta, ilustrado na Figura 30 (b).

Figura 30 – Forças verticais típicas da corrida humana.



Fonte: Adaptado de Živanović, Pavić e Reynolds (2005).

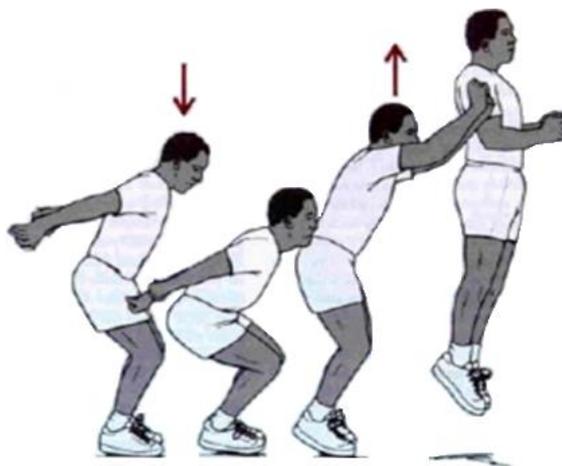
2.1.2.3 Esforço dinâmico da atividade humana de saltar

As atividades relacionadas a execução de pulos, apresentam a distribuição de sua força de impulso ao longo do tempo, qualitativamente semelhante a discutida quanto a prática de corridas, diferindo unicamente no fato de que a força de impacto do salto não se move ao longo da superfície de apoio, posto que o ser humano pula em um único ponto, saindo com ambos os pés do chão.

Nesse cenário, duas tipologias de saltos podem ser identificadas, o denominado salto vertical, no qual o corpo do saltador é projetado para cima, por uma única velocidade; e o salto oblíquo, esse a contraponto do primeiro, é resultante da associação de uma velocidade vertical dirigida para cima e uma velocidade horizontal, dirigida em avanço para a frente (MELLO, 2005).

Durante o período de tempo associado ao ciclo da prática de saltos, esse representado pela Figura 31, dois cenários distintos são identificados, um relacionado com o contato direto do saltador com a superfície, e o outro, quando o mesmo encontra-se voando, perdendo o contato com o piso (ŽIVANOVIĆ; PAVIC; REYNOLDS, 2005; CHEN; LI; RACIC, 2016).

Figura 31 – Movimentos do corpo durante um salto.



Fonte: Adaptado de Almeida (2008).

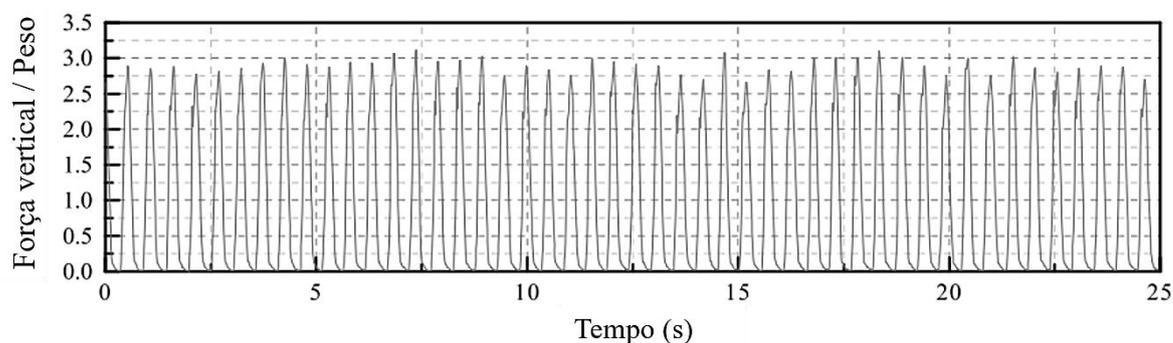
Ao visualizar o processo do ciclo de saltos exposto pela figura acima, denota-se que a ocorrência do mesmo se dá por intermédio de quatro fases distintas de execução. A fase admitida como inicial, também denominada de fase de preparação, corresponde ao instante

em que o indivíduo encontra-se em contato com a superfície de apoio, de forma que a segunda etapa é categorizada como etapa de impulsão, dado a alteração da posição do centro de massa do corpo humano, situado na região abdominal do corpo humano, partindo de uma posição em repouso e em pé sobre a estrutura de apoio, onde o indivíduo impulsiona-se para se mover para cima, através da flexão gradual dos joelhos à angulações aproximadas e 90°, seguida do esticamento dos joelhos, de forma a projetar o corpo a uma determinada altura. Destaca-se que nessa etapa, a elevação dos membros superiores impõe acelerações ao centro de massa corporal, auxiliando no alcance de maiores alturas de salto (MELLO, 2005; ALMEIDA, 2008).

Para tanto, a terceira etapa atribuída à atividade de pular, representa a suspensão do corpo humano, fase onde o mesmo afasta-se da superfície de apoio e segue determinada trajetória no espaço, enquanto que a quarta e última fase, correspondente à retomada de contato dos pés com o solo onde o corpo humano admite uma posição flexionada dos membros inferiores seguida de uma postura ereta, voltando a etapa inicial do ciclo do pulo (MELLO, 2005; ALMEIDA, 2008).

Classifica-se, em razão das explicações feitas acima, os esforços dinâmicos devido a atividade de saltar, como carregamentos de contato intermitente, uma vez que a exposição temporal da estrutura, a esse esforço impulsivo, é curta e de grande magnitude, sendo representada por um modelo com único pico (ALMEIDA, 2008), como aponta a Figura 32, devendo-se ainda salientar que, os impulsos apresentam certo grau de variabilidade, essa atrelada ao fato de que um mesmo ser humano não gera impulsos idênticos ao longo da prática de saltos consecutivos, bem como diferentes indivíduos não originam os mesmos históricos de Força/Tempo de salto, quando pulam na mesma frequência (CHEN; LI; RACIC, 2016).

Figura 32 – Modelo genérico de forças devido a atividade de saltar.



Fonte: Adaptado de Chen, Li e Racic (2016).

2.1.3 Propriedades estruturais influentes no desempenho à vibração

A resposta dinâmica de pavimentos executados pelos novos métodos construtivos em discussão, quando excitados por carregamentos induzidos pelas atividades básicas humanas, é totalmente influenciada pelas propriedades estruturais desses sistemas, como a massa, rigidez e amortecimento (WECKENDORF, 2009; BOLMSVIK, 2013; CHRISTOS; VASSILIKI; EMMANOUIL, 2016).

Visando melhorias de desempenho quanto às vibrações excessivas perceptíveis, tais propriedades podem ser adaptadas e otimizadas, através de práticas e estratégias construtivas de engenharia, de forma a controlar as amplitudes das movimentações oscilatórias e evitar a transmissão desses movimentos entre vários ambientes da edificação (WECKENDORF *et al.*, 2016; TOLEDO *et al.*, 2017). Dentre os procedimentos de controle, destaca-se a tática de incremento de massa, rigidez ou amortecimento aos pisos (JARNERÖ, 2014), entretanto a aplicação dessa, não é facilmente adotada, dado que implica principalmente, no aumento de peso da estrutura global, o que por meio de impasses arquitetônicos, estruturais ou até mesmo econômicos, torna-se inviável (PEREIRA, 2014).

O acréscimo de massa e de rigidez aos pavimentos tratam-se de técnicas para aprimorar o desempenho à vibração, que apresentam maior simplicidade de quantificação e de alteração, posto que com os dados de projetos, são de relativa facilidade de estimar bem como de prever as consequências de suas modificações, ao longo dos cálculos e verificações, abordados pela fase de dimensionamento (JARNERÖ, 2014; CHRISTOS; VASSILIKI; EMMANOUIL, 2016).

Já o amortecimento, propriedade altamente relevante aos sistemas de pisos, visto que converte energia cinética em calor, acarretando na redução das amplitudes de vibrações dos movimentos oscilatórios livres e forçados (TADEU, 2015; WECKENDORF *et al.*, 2016), é dificilmente estimado com precisão por parte dos projetistas, uma vez que cada elemento e tipologia estrutural possui valor característico de amortecimento, visto que em variadas pesquisas foram constatadas uma elevada demanda de inconsistências entre dados coletados em estudos de laboratório e *in-situ*, onde o amortecimento mensurado no local fora significativamente superior ao obtido em condições de laboratório (ZHANG, 2017).

Em virtude disso, o melhoramento das propriedades de amortecimento torna-se dispendioso, uma vez que requer grandes alterações de projeto e as soluções adotadas ainda são incertas quanto ao desempenho (JARNERÖ, 2014), de modo a induzir os projetistas à adoção de valores representativos conservadores, indicados por documentos normativos (CHRISTOS; VASSILIKI; EMMANOUIL, 2016)

Essas circunstâncias ocorrem, dado que o amortecimento estrutural de pavimentos de madeira é oriundo da somatória das contribuições de amortecimento de variadas fontes diferentes, sendo dependente da espécie de madeira empregada, da concepção, qualidade e detalhes do método construtivo, das condições de suporte e da presença de componentes não estruturais, como divisórias, acabamentos, tetos suspensos, mobiliário e equipamentos (JARNERÖ, 2014; SANDOVAL, 2015; TADEU, 2015).

Aliado à esses fatores, a interação das pessoas com os pisos também afeta o valor representativo do amortecimento, dado que o corpo humano tem capacidade de absorver energia cinética dos sistemas vibratórios (WECKENDORF *et al.*, 2016), uma vez que os seres humanos atuam de modo semelhante a um dispositivo de amortecedor de massa sintonizado, posto que as forças de interação apresentam elementos proporcionais à aceleração, velocidade e deslocamento do movimento estrutural, de modo a provocar alterações no amortecimento (SHAHABPOOR; PAVIC; RACIC, 2017).

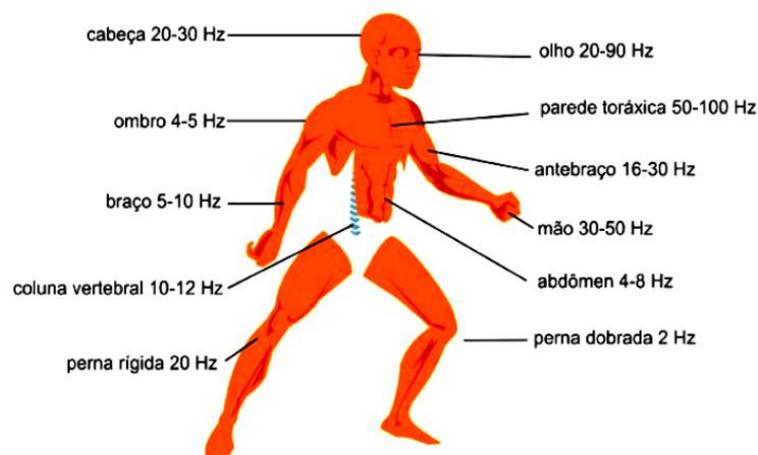
Para tanto, a intensidade da interação dinâmica é significativa quando a massa humana é comparável com a estrutural, cenário observado em pisos leves e com pequenos vãos, ao passo que em pisos pesados com grandes vãos, a interação é mínima, em virtude de a massa humana ser pequena em relação à massa da estrutura (MELLO, 2005; ZHANG, 2017).

2.1.4 Sensibilidade às vibrações

A sensibilidade humana, quanto à percepção dos fenômenos vibratórios, ocorre em virtude da capacidade instintiva do corpo humano, de se adaptar à quaisquer tipologias e níveis de vibrações ocorrentes na natureza (RACIC; PAVIC; BROWNJOHN, 2009), uma vez que o corpo humano trata-se um medidor muito sensível quanto às vibrações (TORATTI; TALJA, 2006), envolvendo variados sistemas sensoriais na sensibilidade às vibrações, sendo eles: o sistema visual, auditivo, vestibular e somático (CRESPO, 2009).

O caráter de auto adaptação descrito acima, é afetado quando o elemento em que o corpo humano está em contato, ao ser excitado, apresenta movimentos vibratórios excessivos que acarretam no surgimento de acelerações intensas ou do fenômeno de ressonância, que operam dentro das faixas limites de vibração dos membros e órgãos humanos, expostas na Figura 33, afetando o ser humano de variadas formas, com minimização dos níveis de conforto, redução a capacidade para a prática de atividades e em situações mais sérias, atuando diretamente na atenuação da qualidade de vida quanto à saúde (MARGARIDO, 2013; TADEU, 2015).

Figura 33 – Diferentes frequências de ressonância do corpo humano.

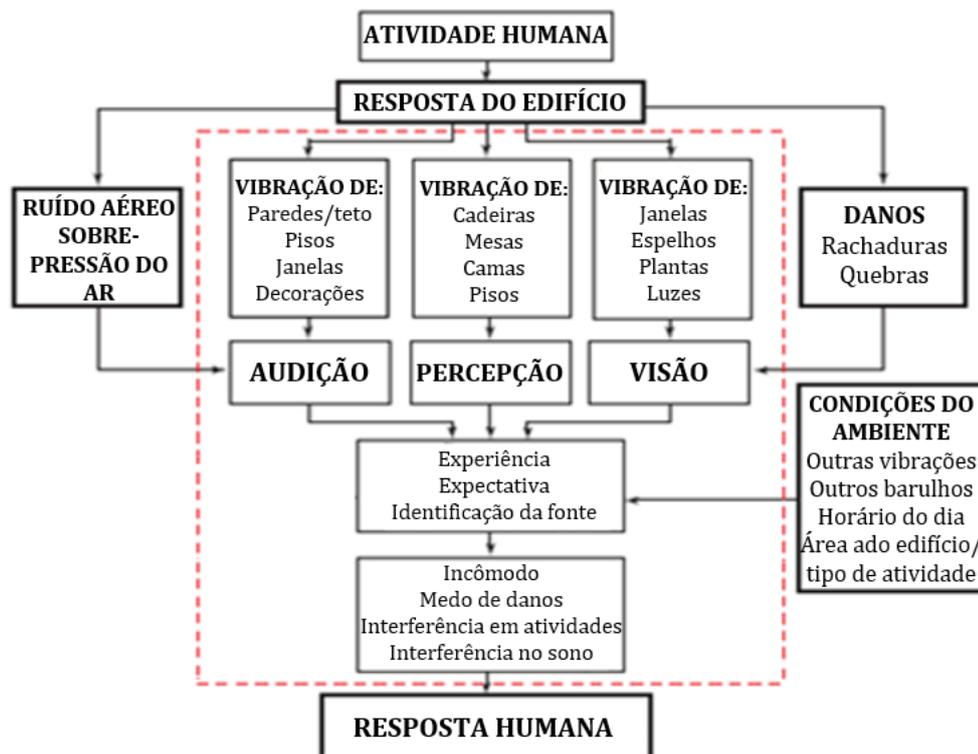


Fonte: Almeida (2008).

Em termos de vibrações em sistemas estruturais de pisos, a sensibilidade humana está interligada com questões problemáticas de desempenho quanto ao desconforto (WECKENDORF, 2009), para as quais a determinação de um limite aceitação para as vibrações é complexo (CRESPO, 2009), posto que a constituição da percepção do ser

humano, demonstrada no esquema da Figura 34, está conectada com o impacto dos movimentos oscilatórios sobre sistemas sensoriais, esses influenciados em níveis particulares e específicos de cada habitante, por variados fatores de ordem extrínseca e intrínseca. Os critérios ditos extrínsecos, englobam os fatores externos, relacionados diretamente com o ambiente e com as características atreladas aos movimentos oscilatórios, ao passo que os princípios intrínsecos, estão interligados inerentemente com parâmetros intra e inter-sujeitos, como idade, gênero, condicionamento físico, postura, localização e condições psicológicas. (CRESPO, 2009; SANDOVAL, 2015; MARGARIDO, 2013).

Figura 34 – Fatores que afetam a aceitabilidade de vibrações em pisos, induzidas por atividades humanas.



Fonte: Adaptado de Zhang (2017).

Diante de tudo, denota-se que a determinação dos índices de tolerância dos seres humanos às vibrações, está diretamente ligada à uma avaliação de ordem subjetiva, a qual comporta-se diferentemente de pessoa para pessoa (CASAGRANDE *et al.*, 2018), dada sua relação direta com uma vasta gama de fatores manipuladores, de modo a não ser realista as

avaliações precisas e quantitativas de sensibilidade, essas podendo ser empregadas, como indicadores gerais de desempenho (ZHANG, 2017).

2.1.5 Considerações de documentos normativos quanto à vibração

Dado que as concepções arquitetônicas modernas passaram a solicitar vãos maiores, visando composições de ambientes mais amplos, os pavimentos em madeiras executados para esses fins e com emprego de metodologias construtivas leves, apresentam vibrações excessivas perceptíveis pelas pessoas, passando a ser objeto para fins de desenvolvimento de pesquisas que concentram estudo em critérios atrelados ao conforto humano, fontes de vibrações, metodologias de quantificação, modelagem e controle de vibrações bem como no comportamento dos pisos quando estimulados dinamicamente, pela prática de atividades humanas (JAAFARI; MOHAMMADI, 2018).

Estudos quanto aos fenômenos de vibrações em termos da percepção das mesmas pelos seres humanos, em esferas clínica, médica, psicológica e de conforto, foram devidamente aprofundados na metade do século XIX, dado o crescimento e desenvolvimento exponencial da urbanização, indústria e transportes, uma vez que as vibrações passaram de pequenas fontes de incômodo e irritação, para fontes potenciais de danos reais tanto em sistemas estruturais e mecânicos, como nos próprios seres humanos (SCHIAVI; ROSSI, 2015).

Apenas em meados dos anos 1920 e 1930, as vibrações em edificações, em decorrências de fontes externas, como perfurações de solos e empilhamentos de materiais, passaram a ser essencialmente consideradas, tem como consequência direta um aumento considerável no quantitativo de novas patentes, relacionadas com o desenvolvimento de novos sistemas e produtos para fins de minimização de vibrações em edifícios e veículos, grande parte em razão da explosão industrial da borracha e termoplásticos sintéticos (SCHIAVI; ROSSI, 2015).

Com o término da Segunda Guerra Mundial (1939-1945), a literatura tecnocientífica passou a pesquisar e discutir a percepção da vibração como uma abordagem multidisciplinar, considerando variadas áreas de pesquisa, como a Medicina, Fisiologia, Psicologia e Mecânica, de forma a direcionar as mesmas ao contexto da Ergonomia, condição que comporta o desenvolvimento de estudos psicofisiológicos dos efeitos das vibrações sobre a saúde e produtividade dos seres humanos (SCHIAVI; ROSSI, 2015).

Quanto a vibração de elementos estruturais propriamente dita, somente na década de 1970, requisitos para a avaliação da exposição humana às mesmas, passaram a ser considerados como base para projetos de edificações, por meio do desenvolvimento de métodos e critérios de avaliação e quantificação do desempenho vibratório, em diretrizes internacionais, por órgãos normativos internacionais e nacionais (SCHIAVI; ROSSI, 2015; OPAZO; BENEDETTI; ROJAS, 2016), cada qual considerando situações particulares e requisitos de verificação específicos, como visualizado na explanação de alguns regulamentos apresentados abaixo, dada a complexidade, sensibilidade, subjetividade e variabilidade do corpo humano, não havendo a definição de limites universais, a serem considerados em projetos, para níveis aceitáveis de vibração (NEGREIRA *et al.*, 2015).

- a) ISO 2631-2:2003 – *Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibration in buildings (1 Hz to 80 Hz)*

Desenvolvida inicialmente em 1989, sendo substituída e atualizada para uma nova versão no ano de 2003, ainda vigente atualmente, a norma internacional ISO 2631-2 de forma geral, aborda questões referentes à exposição humana a vibrações em todo o corpo, em edifícios, tanto em termos de conforto como de incômodo por parte dos ocupantes, de modo a especificar metodologias de medição, avaliação e localização de vibrações, conforme a tipologias dessas e característica ocupacional das edificações, direcionando a padronização da coleta de dados, essa abrangendo a medição da magnitude de vibração bem como a identificação de demais fatores existentes nas edificações, que podem afetar a resposta humana à vibração.

- b) ISO 10137:2007 – *Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibrations*

A primeira versão da norma internacional ISO 10137 data em 1992, passando a ser substituída e modificada somente 15 anos depois, em 2007, para uma nova versão, ainda válida nos dias de hoje, a qual regulamenta os princípios de previsão de vibrações no estágio de projeto e analisa a aceitabilidade de vibrações presentes em sistemas estruturais. Ainda, realiza recomendações quanto a avaliação da capacidade de desempenho de passarelas e de edificações, comportando três sistemas receptores de vibrações: a ocupação humana dos

edifícios e das passarelas, os componentes contidos no interior das edificações e as estruturas constituintes dos mesmos.

c) ABNT NBR 7190:1997 – Projetos de estruturas de madeira

Este documento regulamenta os requisitos necessários ao dimensionamento de estruturas de madeira, em território brasileiro. Em termos do Estado Limite de Serviço, quanto ao desempenho de vibrações em estruturas de pavimentos residenciais e de escritórios, o documento unicamente solicita que a menor frequência fundamental de vibração dos elementos constituintes desses sistemas de piso, seja superior a frequência de 8 Hz.

d) CIRSOC 601: 2016 - *Reglamento argentino de estructuras de madera,*

Apresentando os requisitos necessários ao dimensionamento de estruturas de madeira na Argentina, esse documento estabelece que, para o controle efetivos de vibrações excessivas em pavimentos de madeira, os critérios desempenho devem assegurar que os valores mínimos de frequência fundamental do sistema e de deflexão instantânea, devido a uma carga concentrada de 1 kN, sejam adequadamente atendidos.

Desse modo, a frequência fundamental deve ser determinada conforme a Equação 14, ao passo que a deflexão instantânea no centro do vão da estrutura, não deve exceder os limites estabelecidos pela Equação 15.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * l^2} * \sqrt{\frac{E' * I}{m_{ua}}} > 8Hz \quad \text{Equação 14}$$

$$\Delta_{i(1KN)} \leq \frac{7,5}{l_{1,2}} mm \leq 1,5mm \quad \text{Equação 15}$$

Onde:

- E' – Módulo de elasticidade ajustado, em N/m^2 , com o emprego de fatores de condições de serviço e de temperatura, sendo adotado fator de correção no valor de 1,0, dado que as vigas de piso em estudo, são consideradas em ambiente interno;

- I – Momento de inércia da seção transversal do sistema, considerando largura de 1 m, em $m^4/m = m^3$;
 - m_{ua} – Massa da estrutura, em $Kg/m^2 = Ns^2/m^3$.
- e) EUROCODE 5 – EN 1995-1-1:2004 – *Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings*

Trata-se do documento normativo que regulamenta os critérios de dimensionamento de estruturas em madeira, na Europa. Quanto aos critérios de desempenho vibracional, o referido documento através da Equação 16, estabelece a frequência fundamental (f_1 – em Hz) de sistemas de pisos residenciais, de caráter plano e retangular.

$$f_1 = \frac{\pi}{2 * l^2} * \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad \text{Equação 16}$$

Onde:

- l – Comprimento longitudinal das vigas, em metros;
- $(EI)_l$ – Rigidez à flexão em torno do eixo perpendicular à direção da viga, em Nm^2/m ;
- m – Massa da estrutura, em Kg/m^2

Deste modo, para os pisos com frequência fundamental de intensidade inferior ou iguais a 8 Hz ($f_1 \leq 8 \text{ Hz}$), investigações especiais devem ser realizadas, quanto aos parâmetros vibratórios. Já para pisos com frequência maior que 8 Hz ($f_1 > 8 \text{ Hz}$), os requerimentos apontados respectivamente na Equação 17 e Equação 18, devem ser verificados, considerando-se os pisos descarregados.

$$\frac{w}{F} = a \quad \text{Equação 17}$$

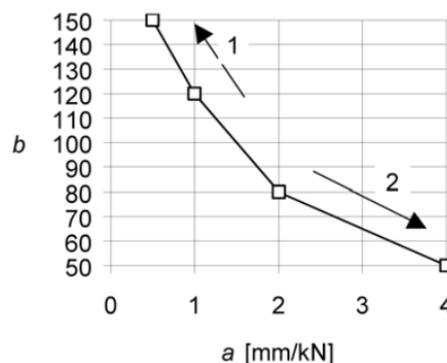
$$v \leq b(f_1^{\xi-1}) \quad \text{Equação 18}$$

Onde:

- w – Máxima deflexão vertical instantânea, em mm ;
- F – Força vertical concentrada, aplicada em qualquer ponto da estrutura, em kN . Deve-se ressaltar que, para a presente pesquisa será considerada carga concentrada no meio do vão, na ordem de 1 kN ;
- v - Resposta de velocidade de impulso unitário, devido a um impulso ideal de 1 Ns , em m/s ;
- ξ - Razão de amortecimento, parâmetro com indicação de valor na ordem de $0,01$ pelo documento normativo, exceto quando outros valores se mostrem mais apropriados.

Salienta-se que, os parâmetros a e b tratam-se de valores limites a serem abordados, de acordo com as relações entre esses, propostas pelo código, conforme aponta a Figura 35. A adoção de uma relação indicada pela seta 1, é tratada como um parâmetro criterioso para uma melhor performance de vibração, ao passo que a seta 2 corresponde a valores de um desempenho de vibrações menos criterioso, dado que quanto maior a deflexão visualizada em um piso, como por exemplo, maiores amplificações dinâmicas são suscetíveis.

Figura 35 – Relação sugerida entre os parâmetros a e b .



Fonte: EUROCODE 5 (2004).

A verificação da Equação 18, ocorre através da definição do parâmetro v (em m/Ns^2) pela Equação 19.

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6 n_{40})}{mbl + 200}$$

Equação 19

Onde:

- m – Massa da estrutura, em Kg/m^2 ;
- b – Largura do elemento, em metros;
- l – Comprimento longitudinal das vigas, em metros;
- E – Módulo de elasticidade longitudinal, em N/mm^2 ;
- I – Momento de inércia da seção transversal do sistema, em mm^4 ;
- v – Resposta de velocidade de impulso unitário, em m/Ns^2 ;
- n_{40} – Número de modos de primeira ordem com frequências naturais até 40 Hz, determinado pela Equação 20, sendo $(El)_b$ a rigidez à flexão em torno do eixo paralelo à direção da viga, em Nm^2/m .

$$n_{40} = \left\{ \left(\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(El)_l}{(El)_b} \right\}^{0,25}$$

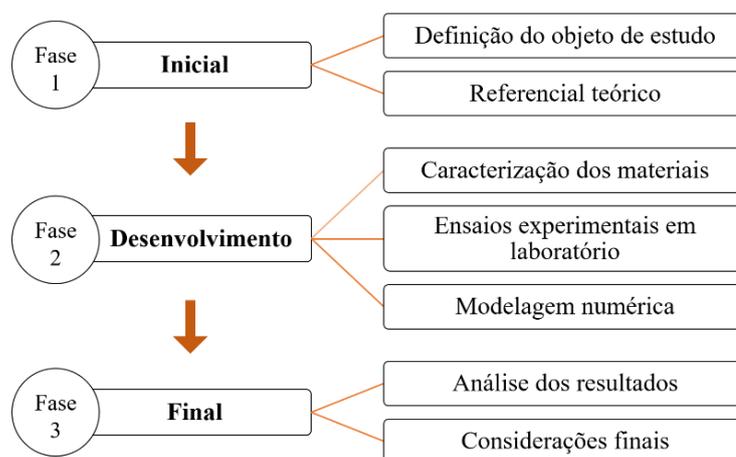
Equação 20

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Perante o desenvolvimento da presente pesquisa, quanto aos seus objetivos apresentados, relacionados com a idealização e quantificação de fenômenos vibracionais em pisos constituídos por produtos à base de madeira específicos, excitados dinamicamente por atividades humanas habituais, a fundamentação teórica referencial com base em trabalhos desenvolvidos por outros pesquisadores e instituições, disponibilizados em bancos de dados de instituições governamentais, livros, teses, dissertações, plataformas de revistas científicas e internet, associada diretamente com a elaboração de experimentos em laboratório e análises de cunho numérico, fora aplicada de modo a auxiliar na definição da metodologia aqui abordada, para a avaliação de vibrações em pisos de Madeira Laminada Colada, provocadas por atividades habituais humanas, por intermédio de medições dos componentes modais da frequência natural (f_1) e do amortecimento (ξ).

Assim sendo, a estrutura da pesquisa é apontada pela Figura 36.

Figura 36 – Estrutura da pesquisa.



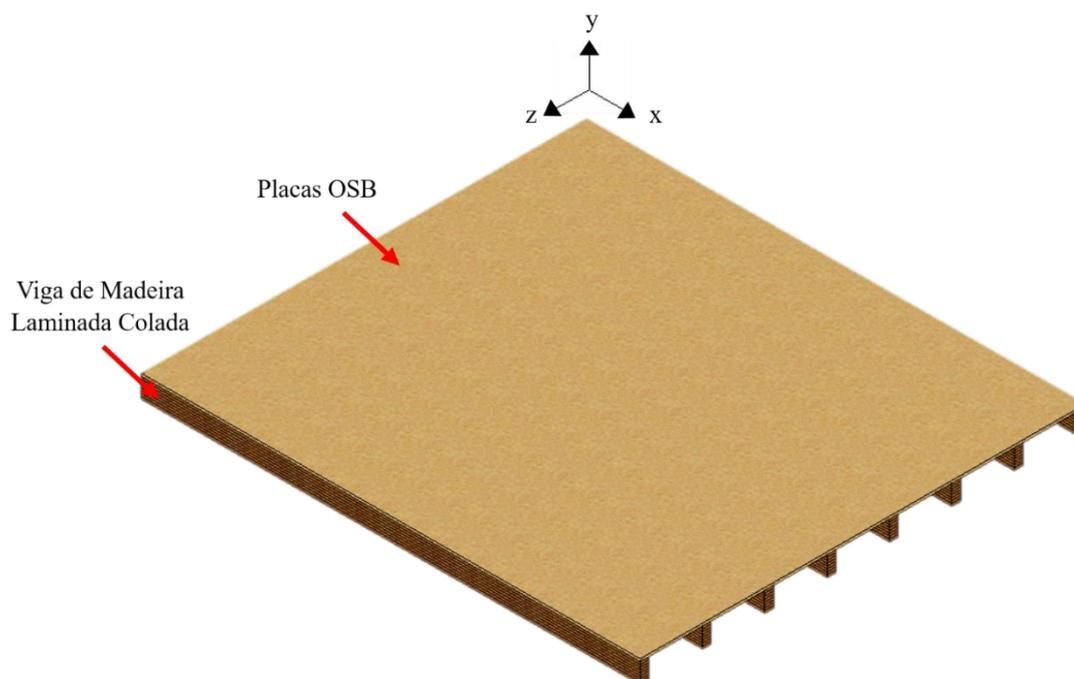
Fonte: Próprio autor (2020).

3.1 ESTRUTURA EM ANÁLISE

O sistema estrutural de piso de madeira adotado pela presente pesquisa, demonstrado no esquema em perspectiva da Figura 37, trata-se da classe de pavimentos constituídos por vigas de Madeira Laminada Colada (MLC), dispostas paralelamente ao sentido longitudinal

do sistema, esse correspondente ao vão do mesmo, sendo interligadas por painéis de OSB (*Oriented Strand Board*), material admitido para compor a estrutura de deck (assoalho) do piso.

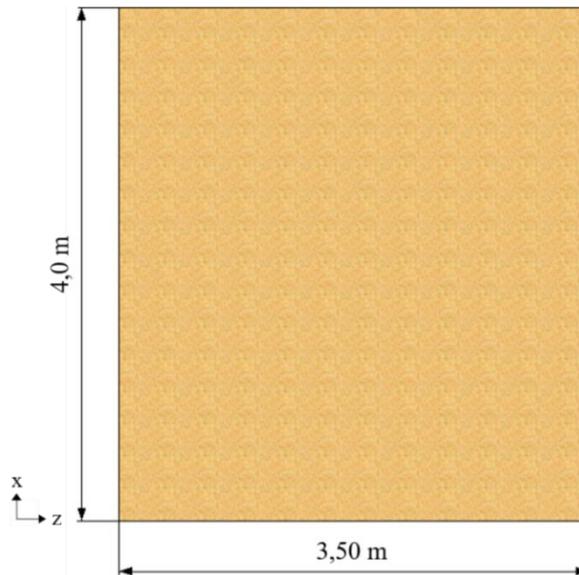
Figura 37 – Vista em perspectiva do piso a ser executado pela pesquisa.



Fonte: Próprio autor (2020).

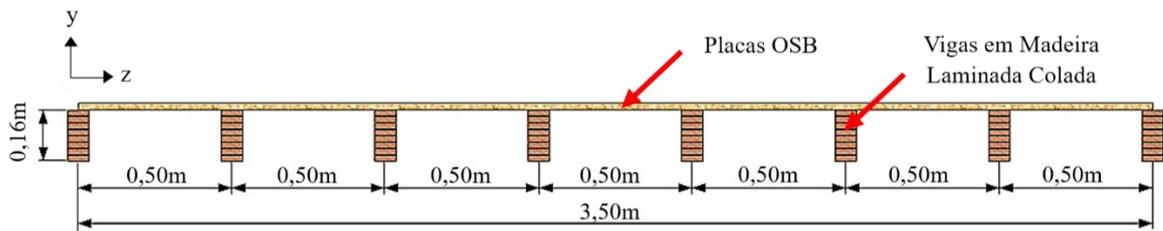
O sistema construtivo em questão, assume como características geométricas, as dimensões quanto à largura (l_z) e comprimento (l_x) apontadas pela vista superior da estrutura na Figura 38, com espaçamento entre vigas conforme a vista frontal da Figura 39, sendo as dimensões correspondentes à seção transversal das vigas expostas pela Figura 40. Destaca-se que, o espaçamento entre vigas de 50,0 centímetros, admitido na pesquisa em questão, trata-se da mesma dimensão adotada pelas pesquisas de Toledo *et al.* (2017) e Toledo, Nallim e Sánchez (2018), bem como de um valor intermediário às pesquisas desenvolvidas em pisos de madeira, por Al-Foqaha'a, Cofer e Fridley (1999), Weckendorf (2009), Sandoval (2015) e Zhang (2017), as quais consideraram espaçamento entre vigas de 40,0 centímetros, ao passo que Weckendorf (2009), Glisovic e Stevanovic (2010) e García, Rosales e Sampaio (2019), admitiram espaçamento de 60,0 centímetros.

Figura 38 – Vista superior: dimensões de largura (l_z) e comprimento (l_x) do piso.



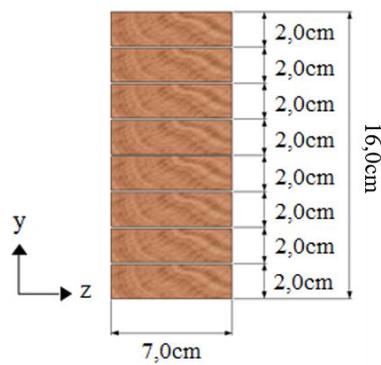
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 39 – Vista frontal: dimensões do espaçamento entre as vigas do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 40 – Dimensão genérica admitida para a seção transversal das vigas de MLC do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Tratando-se o piso em questão, de um sistema construtivo não característico da Construção Civil brasileira, as propriedades das placas de OSB e dos parafusos foram determinadas por documentos internacionais da *American Plywood Association* (APA).

De acordo com o manual *Engineered Wood: Construction Guide* (APA, 2011), a espessura das placas de OSB é dada conforme o espaçamento máximo considerado de centro a centro dos suportes, sobre os quais os painéis serão dispostos. Em virtude desse cenário, as placas são classificadas por um numeral fracionário em polegadas, como visualizado na Tabela 1, sendo a primeira parcela do numeral correspondente ao espaçamento máximo recomendado entre os suportes dos painéis quando empregados na composição de estruturas de fechamento de telhado, ao passo que a segunda parcela trata do espaçamento máximo admitido para situações de uso das placas como fechamento de pisos.

Tabela 1 – Espessuras para placas de OSB.

Polegadas	Milímetros
1/4	6,40
5/16	7,90
11/32	8,70
3/8	9,50
7/16	11,10
15/32	11,90
1/2	12,70
19/32	15,10
5/8	15,90
23/32	18,30
3/4	19,10
7/8	22,20
1	25,40
1-3/32	27,80
1-1/8	28,60

Fonte: Adaptado de APA (2011).

Dado a restrita disponibilidade de variadas espessuras de placas de OSB para o setor de Construção Civil da região, tendo essas pequenas diferenças dimensionais para com as tratadas acima, admitiu-se para a pesquisa placas de OSB com espessura de 15,0 milímetros,

relativa a classificação 19/32 polegadas com espessura de 15,1 milímetros, a qual admite como espaçamento máximo entre os apoios dos painéis a relação 48/81 centímetros, classificação que atende ao espaçamento de 50,0 centímetros, estabelecido para as vigas de MLC do piso em análise.

Acerca dos elementos de fixação dos painéis de OSB nas vigas de MLC, a diretriz *Product Guide: Grades and Specifications* (APA, 1995) demanda que pavimentos executados com placas de OSB comportem elementos de fixação categorizados como *6d* nas extremidades das placas apoiadas nos membros de suporte e elementos *8d* nos apoios intermediários, no caso de placas com espessura acima de 12,70 milímetros. Deste modo, a Tabela 2 apresenta as tipologias de elementos de fixação recomendados, bem como as dimensões dos mesmos.

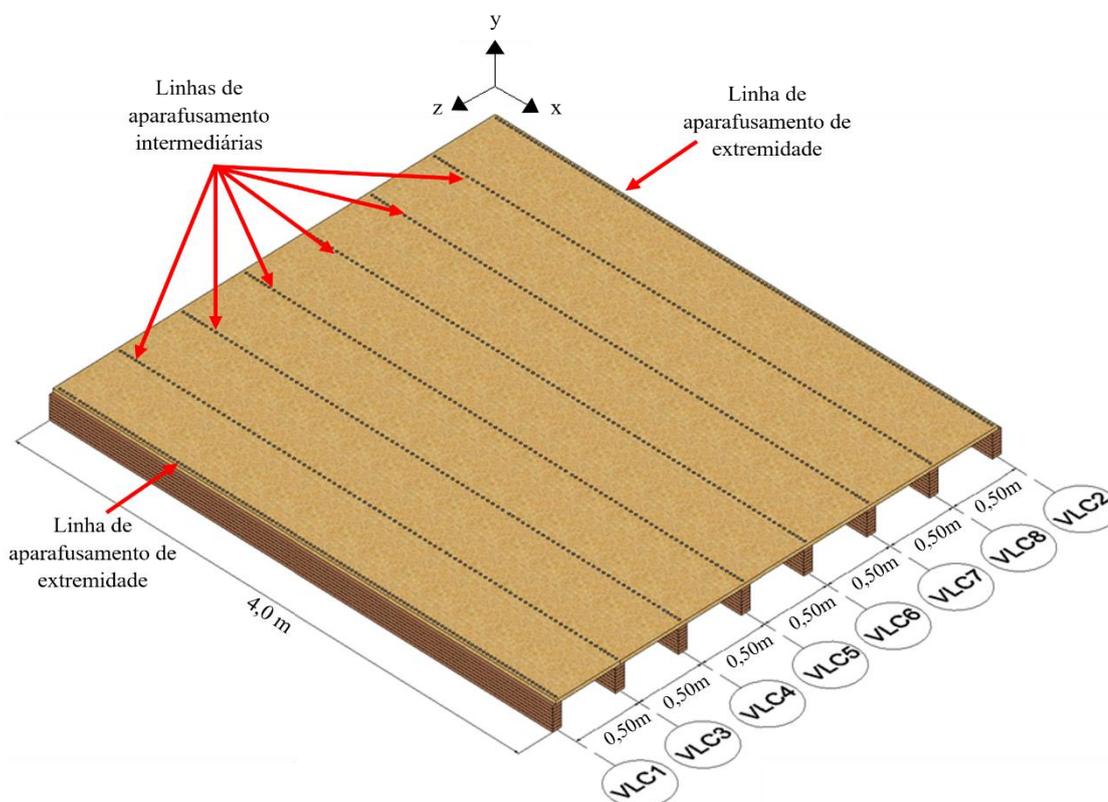
Tabela 2 – Dimensões dos elementos de fixação das placas de OSB.

Espaçamento	Tipo	Comprimento		Diâmetro	
		Pol.	mm	Pol.	mm
6d	Finish	2	50,80	0,092	2,34
	Box and casing	2	50,80	0,099	2,51
	Siding	1-7/8	47,63	0,106	2,69
	Comum	2	50,80	0,113	2,87
	Auto atarraxante	2	50,80	0,120	3,05
8d	Finish	2-1/2	63,50	0,099	2,51
	Box and casing	2-1/2	63,50	0,113	2,87
	Siding	2-3/8	60,33	0,128	3,25
	Comum	2-1/2	63,50	0,131	3,33
	Auto atarraxante	2-1/2	63,50	0,120 ou 0,131	3,05 ou 3,33

Fonte: Adaptado de APA (2011).

Tendo em vista os cinco modelos de elementos de fixação apresentados acima, o modelo de parafuso auto atarraxante em aço e cabeça chata Philips, específico para uso em madeira, fora adotado para compor as oito linhas de aparafusamento paralelas à direção longitudinal do piso, executadas para unir os painéis de OSB com as vigas de MLC, essas localizadas sobre o eixo das vigas, como demonstrado pelo esquema genérico da Figura 41, não sendo executadas linhas de aparafusamento no sentido transversal da estrutura do piso, posto que o mesmo não comporta elementos de viga nesse sentido.

Figura 41 – Localização das linhas de aparafusamento adotadas para a execução do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para tanto, a Tabela 3 apresenta as propriedades dos referidos parafusos adotados, devendo-se ressaltar que para os espaçamentos $6d$ e $8d$, optou-se por operar com o diâmetro de parafuso de 5,0 milímetros, em virtude da disponibilidade dos mesmos na região, para os comprimentos solicitados pela normativa empregada.

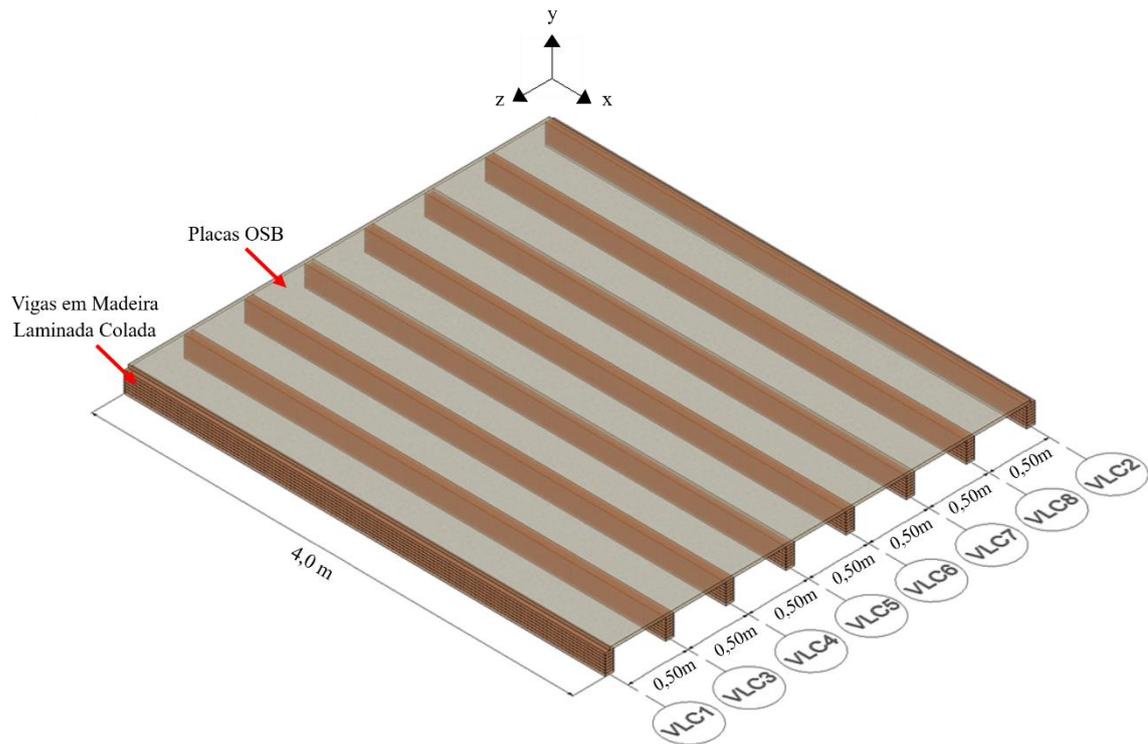
Tabela 3 – Propriedades dos parafusos.

Parafusos	Propriedades	Recomendado (mm)	Adotado (mm)
$6d$	Comprimento	50,80	60,0
	Diâmetro	3,10	5,0
	Espaçamento	18,60	30,0
$8d$	Comprimento	63,50	70,0
	Diâmetro	3,10 ou 3,30	5,0
	Espaçamento	24,80	40,0

Fonte: Próprio autor (2020).

Em razão da configuração do piso proposto compor oito vigas de Madeira Laminada Colada, visando a organização de dados, as mesmas foram identificadas de acordo a sequência de confecção, sendo tratadas ao longo do desenvolvimento da pesquisa, pela nomenclatura nessa etapa atribuída, conforme apontado pelos eixos da Figura 42.

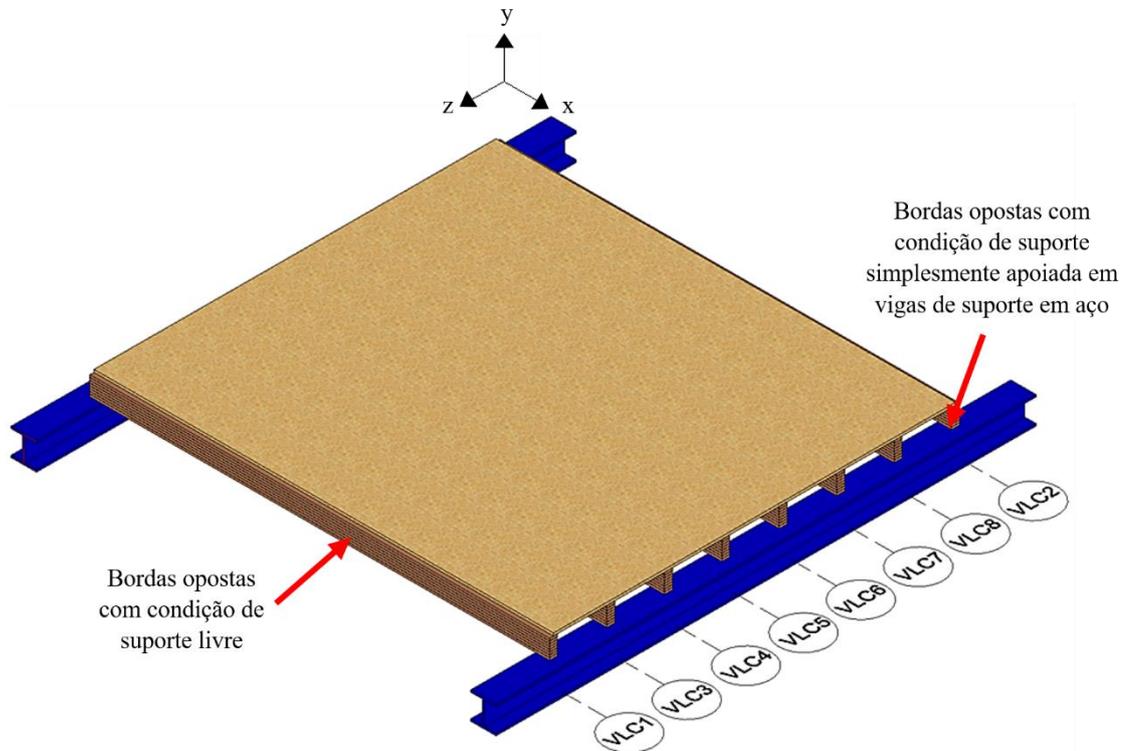
Figura 42 – Identificação das vigas laminadas coladas do piso por eixos.



Fonte: Próprio autor (2020).

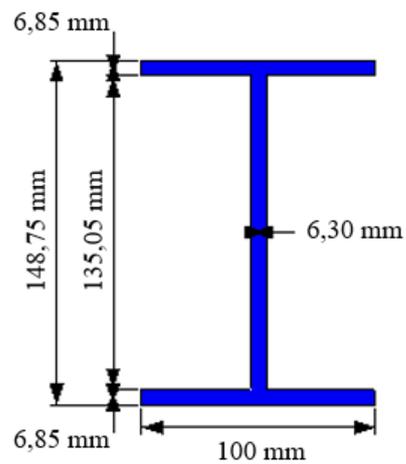
Como condições de suporte, variáveis relevantes sobre o comportamento da resposta dinâmica de sistemas estruturais, admitiu-se para as vigas a circunstância simplesmente apoiada, uma vez que grande parcela dos documentos normativos vigentes assume o referido cenário para a verificação do desempenho de vibrações em pisos. Isso posto, como demonstrado pela Figura 43, admitiu-se como bordas livres, as extremidades da estrutura paralelas ao comprimento do vão, ao passo que as demais bordas comportam restrições translacionais, estando apoiadas sobre vigas de suporte em aço, configuradas por um perfil I, cujas dimensões atribuídas à sua seção transversal, são apresentadas pela Figura 44.

Figura 43 – Condições de suporte do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 44 – Dimensões do perfil I empregado como viga de suporte.



Fonte: Próprio autor (2020).

Denota-se que para a configuração simplesmente apoiada, as vigas de MLC são posicionadas de forma que, em ambos pontos de apoio de cada uma, oito centímetros de viga

estejam em constante contato com as vigas de suporte, caracterizando vão livre experimental de 3,84 metros.

Considerando-se todos os apontamentos detalhados até o momento, o processo executivo do piso abordado pela pesquisa em escala real, esse demonstrado pela Figura 45, ocorreu nas dependências do Laboratório de Ensaio em Sistemas Estruturais – LESE, na Universidade de Passo Fundo – UPF – Campus 1, o qual fora planejado para ser desenvolvido ao longo de cinco etapas, essas descritas em sua totalidade pelo Apêndice B.

Figura 45 – Piso finalizado.



Fonte: Próprio autor (2020).

3.2 MATERIAIS

Esse item apresenta, para a espécie de madeira e o adesivo empregados na confecção das vigas de Madeira Laminada Colada bem como para as placas de OSB, as metodologias de caracterização de propriedades físicas e mecânicas desses materiais constituintes do sistema estrutural de piso proposto, as quais são de extrema relevância para o desenvolvimento da pesquisa.

3.2.1 Caracterização da madeira constituinte das vigas

A madeira, tratando-se de um artefato de cunho natural, como já explanado, possui uma estrutura biológica de alta complexidade, composta por variados elementos químicos e estruturas celulares, sendo a variação do quantitativo desses componentes, o fator responsável pela variabilidade de plantas lenhosas existentes. Em virtude disso, cada espécime de madeira apresenta propriedades, características e fins de utilização particulares, sendo atualmente conhecidas aproximadamente, mais de 30.000 espécies arbóreas (HERZOG *et al.*, 2004; RAMAGE *et al.*, 2017).

Dentre as aplicações da madeira, grande notoriedade é dada ao emprego como matéria-prima industrial, para fins de manufatura de peças estruturais e elementos de vedação, com aplicabilidade de cerca de 1.500 a 3.000 espécies arbóreas (HERZOG *et al.*, 2004), abrindo amplos caminhos para o setor construtivo sustentável, devido a abundância na natureza e vantagens econômicas, estruturais e ambientais, perante os demais materiais básicos de construção.

Dada essa variabilidade quanto às espécies arbóreas disponíveis para o mercado na Construção Civil, definiu-se a madeira de *Pinus*, pertencente à família de madeiras coníferas, categorizada como a classe de madeiras macias, cujo crescimento do tronco ocorre de forma rápida e o material lenhoso apresenta menor densidade, quando comparado com as madeiras ditas duras, para compor as vigas em Madeira Laminada Colada a serem executadas, em virtude da disponibilidade comercial da referida espécie na região sul do Brasil.

Assim, para o desenvolvimento da pesquisa, as peças laminadas empregadas, foram serradas e aplainadas por uma empresa madeireira localizada na cidade de Erechim/RS, figurando a aparência visual demonstrada pela Figura 46, para as dimensões nominais definidas em 2,0 cm de espessura, 7,0 cm de altura e 400 cm de comprimento, sendo devidamente transportadas até o espaço de acondicionamento cedido pelo laboratório LESE, no Campus I da UPF, na cidade de Passo Fundo/RS.

Figura 46 – Aspecto visual final das lâminas de madeira de *Pinus*, a serem empregadas pela pesquisa.



Fonte: Próprio autor (2020).

Salienta-se também que, os parâmetros dimensionais das lâminas, apresentados acima, estão de acordo com os requisitos solicitados pela normativa brasileira NBR 7190:2011 - Projeto de estruturas de madeira, os quais demandam que o comprimento e largura mínimos das lamelas sejam, respectivamente de 100,0 e 5,0 centímetros, admitindo-se espessura máxima de 5,0 centímetros, de modo que madeiras com densidades iguais ou inferiores a $0,50 \text{ g/cm}^3$, possuam área da seção transversal de cada lâmina inferior a $60,0 \text{ cm}^2$, ao passo que madeiras com densidade superior a $0,50 \text{ g/cm}^3$, a seção transversal de cada lamela deve ser de no máximo $40,0 \text{ cm}^2$.

Em virtude da aplicação para fins estruturais, das lâminas mostradas acima, as propriedades físicas de umidade e densidade, bem como as propriedades mecânicas de resistência à compressão paralela às fibras e Módulo de elasticidade, atreladas à espécie de madeira empregada na pesquisa, serão devidamente categorizadas conforme as requisições solicitadas pela normativa brasileira NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira.

3.2.1.1 Umidade

A água trata-se do componente de maior importância para a manutenção da vida das plantas, dada sua relevância na realização do processo de fotossíntese, esse responsável pela produção seiva elaborada, alimento necessário e distribuído a todos os elementos

constituintes das plantas. Devido a isso, as árvores quando cortadas, são classificadas como madeiras verdes ou saturadas, uma vez que apresentam grande quantidade de água impregnadas no interior da cavidade e das paredes das células vegetais, conhecidas respectivamente, como moléculas água livre e água de impregnação. Essas condições, conferem elevados índices de umidade as madeiras recém cortadas, podendo o teor variar de aproximadamente 30% para mais de 200%, dado a variabilidade de teores de umidade entre as espécies arbóreas bem como entre peças individuais oriundas de uma mesma árvore. (USDA, 2010; RAMAGE *et al.*, 2017).

Muitos dos desafios encontrados na aplicabilidade da madeira como material de construção fundamental, surgem devido sua classificação higroscópica, visto que como um material de ordem natural, possui a habilidade peculiar de moldar seu teor de umidade conforme a umidade do ambiente circundante, de forma a absorver ou liberar graus de umidade, ações que provocam de modo respectivo, inchamento e encolhimento das peças de madeira. Dessa forma, ao longo da concepção e execução de projetos em estruturas de madeira, a propriedade de umidade deve ser cuidadosamente considerada, compatibilizando a umidade da madeira com a do ambiente em que será inserida, normalmente obtida com teor de umidade em equilíbrio variando entre 12 e 20% (HERZOG *et al.*, 2004; RAMAGE *et al.*, 2017).

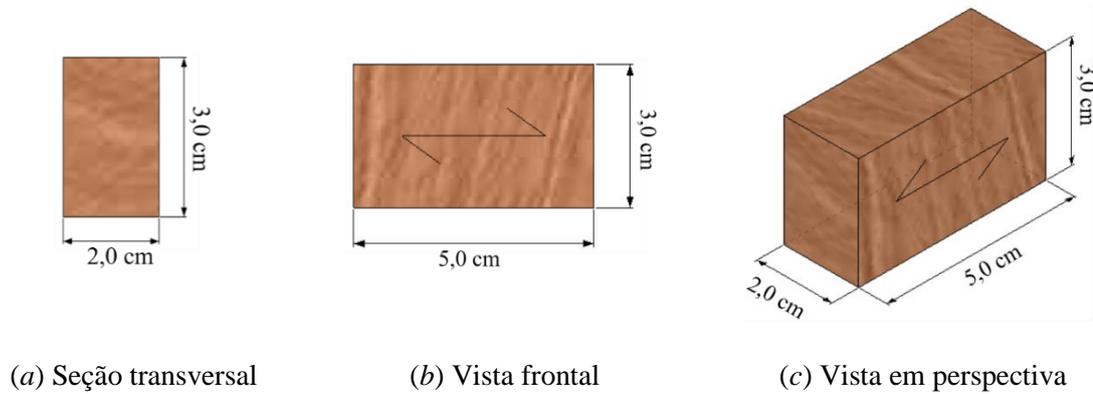
Assim sendo, para fins de consideração da umidade do lote de madeira a ser empregado na presente pesquisa, a mesma deve ser estabelecida conforme os apontamentos regulamentados pela normativa brasileira NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, o qual a define através da Equação 21, como a relação entre a massa de água contida em um corpo-de-prova prismáticos, com seção transversal retangular com dimensões nominais de 2,0 cm e 3,0 cm, para comprimento de 5,0 cm ao longo das fibras da madeira, conforme apresenta a Figura 47, com a massa seca do mesmo.

$$U (\%) = \frac{m_i - m_s}{m_s} * 100 \quad \text{Equação 21}$$

Onde:

- m_i – Massa inicial da madeira, em gramas;
- m_s – Massa da madeira seca, em gramas.

Figura 47 – Corpo-de-prova para ensaio de umidade da madeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para a determinação da massa seca (m_s) dos corpos-de-prova, os mesmos devem ser acondicionados em câmara de secagem, essa com temperatura máxima de $103,0\text{ °C} \pm 2,0^\circ\text{C}$, devendo-se realizar medições da massa a cada 6,0 horas, até que a variação entre as duas últimas medidas consecutivas, seja menor ou igual a 0,5%.

A caracterização do parâmetro físico da umidade do lote de madeira de *Pinus* utilizado na pesquisa, ocorreu por intermédio do ensaio de 9 (nove) corpos-de-prova, mostrados pela Figura 48, oriundos do corte da parte inferior dos corpos-de-prova ensaiados à compressão paralela às fibras, região sem danos na madeira, visando o aproveitamento das peças de madeira. Logo, os corpos-de-prova apresentavam seção transversal quadrada de 5,0 cm e comprimento aproximado de 5,0 cm, dado que o corte ocorreu com equipamentos manuais, sem elevados índices de precisão, sendo essas dimensões divergentes quanto às solicitações da NBR 7190:1997, discutidas anteriormente.

Figura 48 – Corpos-de-prova admitidos para a caracterização da umidade da madeira de *Pinus*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os resultados adquiridos pela caracterização da umidade (U) dos corpos-de-prova considerados, são expostos na Tabela 4, essa também denotando a categorização do lote de madeira utilizado, por uma umidade média representativa de 16,46%.

Tabela 4 – Caracterização da umidade (U) da madeira de *Pinus*.

CP	Umidade (%)
1	16,34
2	16,51
3	16,69
4	15,77
5	16,09
6	16,40
7	16,95
8	16,58
9	16,79
Média (%)	16,46
Desvio padrão (%)	0,36
Coef. variação (%)	2,20

Fonte: Próprio autor (2020).

Uma vez que as propriedades físicas e mecânicas da madeira são suscetíveis ao teor de umidade da mesma, especialmente ao serem atingidos patamares inferiores a 30,0% de umidade (PFEIL; PFEIL, 2003; USDA, 2010), é de extrema importância e considerações para fins de projeto, que o lote de madeira a ser utilizado, tenha seus parâmetros de resistência e rigidez corrigidos, respectivamente pela Equação 22 e Equação 23, quando seus teores de umidades estiverem contidos dentro do intervalo de umidade de 10,0 a 20,0%, para a condição-padrão de referência com teor de 12,0% (ABNT, 1997).

$$f_{12} = f_{u\%} * \left[1 + \frac{3(U\% - 12)}{100} \right] \quad \text{Equação 22}$$

$$E_{12} = E_{u\%} * \left[1 + \frac{2(U\% - 12)}{100} \right] \quad \text{Equação 23}$$

Onde:

- f_{12} e E_{12} – Resistência e rigidez da madeira corrigidos para a condição-padrão de 12,0% de teor de umidade;
- $f_{u\%}$ e $E_{u\%}$ – Resistência e rigidez da madeira em condições reais de teor de umidade;
- $U\%$ – Teor de umidade real da madeira.

3.2.1.2 Densidade básica

A densidade refere-se a um dos parâmetros de ordem física de maior relevância à Engenharia Estrutural, uma vez que por meio de sua definição associada a um determinado teor de umidade, estipulam-se quais são as melhores aplicabilidades dos elementos madeira, das espécies arbóreas de interesse.

Dada a origem natural da madeira, os valores representativos da densidade são específicos de espécies para espécies bem como para elementos oriundos de uma mesma árvore. Isso se deve ao fato de que, a densidade está intimamente associada com as estruturas microscópica e molecular das madeiras, em termos de relações de proporção entre o volume de material contido na parede celular e na cavidade central das células (lúmen), sendo essa proporção totalmente dependente da fração dos lenhos contidos nos anéis de crescimento.

Os lenhos ditos tardios, devido ao seu crescimento lento, apresentam maior densidade, estrutura molecular compacta e menores dimensões de lúmen, ao passo que os lenhos jovens são menos densos, dado que suas cavidades centrais são maiores, vide seu crescimento acelerado (HERZOG *et al.*, 2004; USDA, 2010). Isso posto, a densidade de todas as peças de madeira é maior, à medida que a proporção de células vegetais com parede espessa aumenta.

A densidade básica (ρ_{bas}), de acordo com a NBR 7190:1997 – Projetos de estruturas de madeira, é categorizada como o parâmetro indicador da massa específica convencional dos elementos de madeira, sendo estabelecido pela razão entre a massa seca e o volume completamente saturado, conforme apresenta a Equação 24, de corpos-de-prova prismáticos com a mesma configuração dimensional que os corpos-de-prova empregados no ensaio laboratorial de determinação de umidade da madeira, dada pela Figura 47.

$$\rho_{bas} = \frac{m_s}{V_{sat}} \quad \text{Equação 24}$$

Onde:

- m_s – Massa da madeira seca, em quilogramas;
- V_{sat} – Volume da madeira saturada, em metros cúbicos.

O volume saturado deve ser estabelecido pela coleta das dimensões finais da seção transversal e do comprimento dos corpos-de-prova submersos em água, até o ponto em que a massa obtida seja constante ou com variação máxima de 0,5% em relação à última medida coletada. Ainda, ressalta-se a incumbência de se realizar mais de uma medição das dimensões dos corpos-de-prova, para que as imperfeições ocasionadas pelo inchamento dos mesmos, seja considerada.

Para tanto, a caracterização da densidade básica do lote de madeira de *Pinus* empregado na pesquisa, se deu pelo aproveitamento dos corpos-de-prova utilizados para a caracterização da umidade, os quais encontravam-se em condições de massa seca em estufa, foram submersos em água até o ponto em que a mensuração da massa dos mesmos, fosse constante ou possuísse variação máxima de 0,5%, adquirindo o aspecto visual demonstrado pela Figura 49, objetivando a definição do volume saturado.

Figura 49 – Aspecto dos corpos-de-prova, após finalização do processo de submersão em água.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os resultados obtidos para a caracterização da densidade básica (ρ_{bas}) dos corpos-de prova, são apresentados pela Tabela 5, de forma a se destacar que o lote de madeira utilizado, é classificado por uma densidade média representativa de 791,04 Kg/m³.

Tabela 5 – Caracterização da densidade básica (ρ_{bas}) da madeira de *Pinus*.

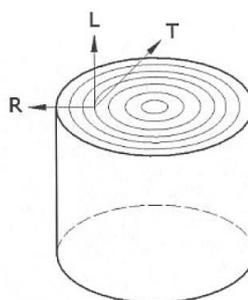
CP	Densidade básica (Kg/m ³)
1	782,08
2	805,55
3	779,71
4	804,57
5	840,90
6	776,34
7	762,78
8	795,50
9	771,97
Média (Kg/m ³)	791,04
Desvio padrão (Kg/m ³)	23,68
Coef. variação (%)	2,99

Fonte: Próprio autor (2020).

3.2.1.3 Resistência à compressão paralela às fibras

As células e fibras que constituem o material lenhoso dos anéis de crescimento das árvores, encontram-se distribuídas ao longo de direções correspondentes a três eixos principais, longitudinal, radial e tangencial, essas perpendiculares entre si, conforme aponta a Figura 50. Conseqüentemente, a madeira é categorizada como um material com estrutura tridimensional de caráter anisotrópico, dado que os atributos mecânicos relativos a cada eixo, são distintos e particulares entre si, denotando a grande peculiaridade da madeira perante os demais materiais básicos da Construção Civil (PFEIL; PFEIL, 2003; USDA, 2010).

Figura 50 – Direções principais atribuídas à madeira, longitudinal (*L*), radial (*R*) e tangencial (*T*).

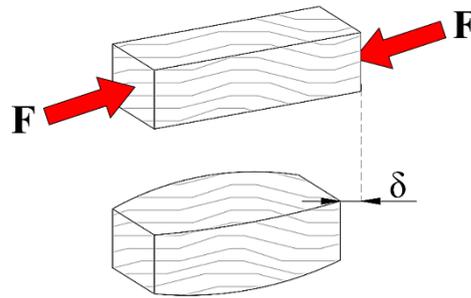


Fonte: Pfeil e Pfeil (2003).

Dada essa estrutura tridimensional, para a Engenharia Estrutural não são atribuídas distinções entre as direções radial e tangencial, sendo ambos os eixos considerados iguais, de modo que as propriedades mecânicas dos elementos de madeira, sejam estipuladas e consideradas na direção paralela aos seus grãos e na direção perpendicular os mesmos (PFEIL; PFEIL, 2003), sendo representadas respectivamente, pelos índices '0' e '90'.

Dentre o amplo campo de solicitações que elementos estruturais em madeira estão suscetíveis, uma vez que podem ser aplicados como elementos estruturais horizontais, verticais e inclinados, em termos de infraestrutura e superestrutura de empreendimentos, membros em madeira apresentam elevados parâmetros resistentes quando solicitados a compressão paralela às fibras, solicitação perpendicular ao plano da seção transversal da peça, com ocorrência de encurtamento do comprimento e aumento da largura, como ilustrado pela Figura 51.

Figura 51 – Efeitos do esforço de compressão paralela às fibras, em peças de madeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

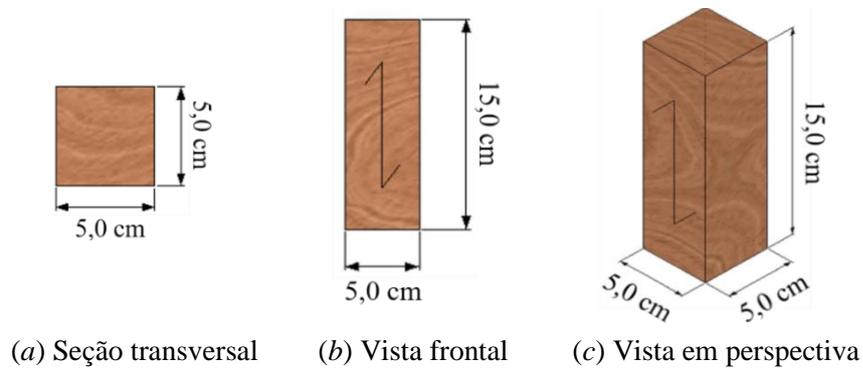
Em razão das explanações descritas acima, a resistência à compressão paralela às fibras ($f_{c,0}$), de acordo com a o código normativo brasileiro NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, é estabelecida pela máxima tensão de compressão, determinada pela Equação 25, em virtude da aplicação monotônica e crescente do carregamento a uma taxa de 10,0 MPa/min, em corpo-de-prova de seção transversal quadrada de 5,0 cm e comprimento de 15,0 cm, vide Figura 52.

$$f_{c0} = \frac{f_{c0,máx}}{A} \quad \text{Equação 25}$$

Onde:

- f_{c0} – Resistência à compressão paralela às fibras, em Megapascals (MPa);
- $f_{c0,máx}$ – Máxima força de compressão aplicada ao corpo-de-prova durante o ensaio, em Newtons (N);
- A – Área inicial da seção transversal comprimida, em metros quadrados (m²).

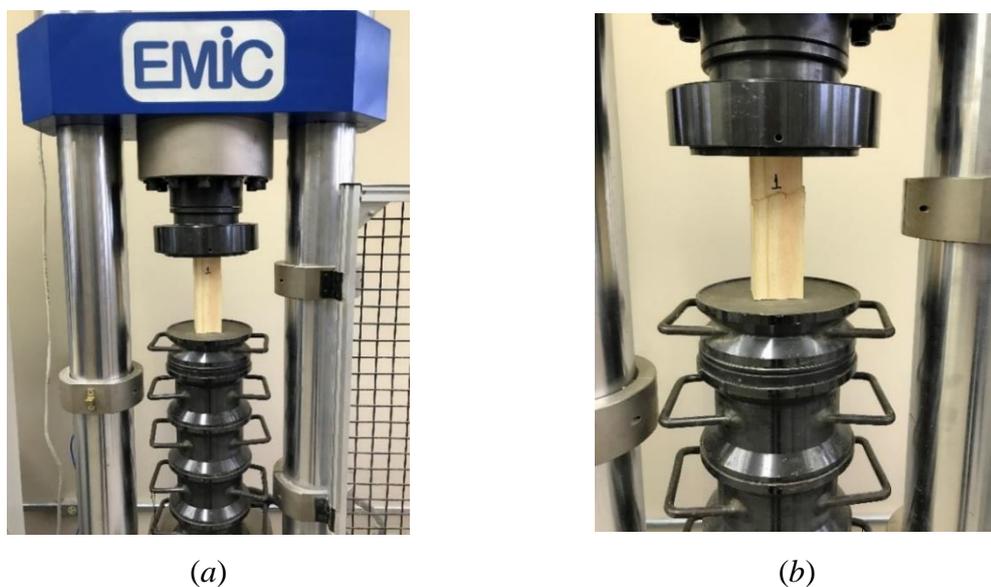
Figura 52 – Corpo-de-prova para ensaio de compressão paralela às fibras da madeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para a caracterização quanto a resistência à compressão paralela às fibras da madeira ($f_{c,0}$), utilizando-se de uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de até 2.000 kN, equipada com sistema de aquisição de dados instantâneos, 9 (nove) corpos-de-prova, devidamente identificados e em conformidade com as dimensões solicitadas pela NBR 7190:1997, foram admitidos para o ensaio, cuja configuração e aspecto final de um dos corpos-de-prova após a finalização do mesmo, são demonstrados de modo consecutivo, pela Figura 53 (a) e Figura 53 (b).

Figura 53 – Realização do ensaio de resistência à compressão paralela às fibras da madeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

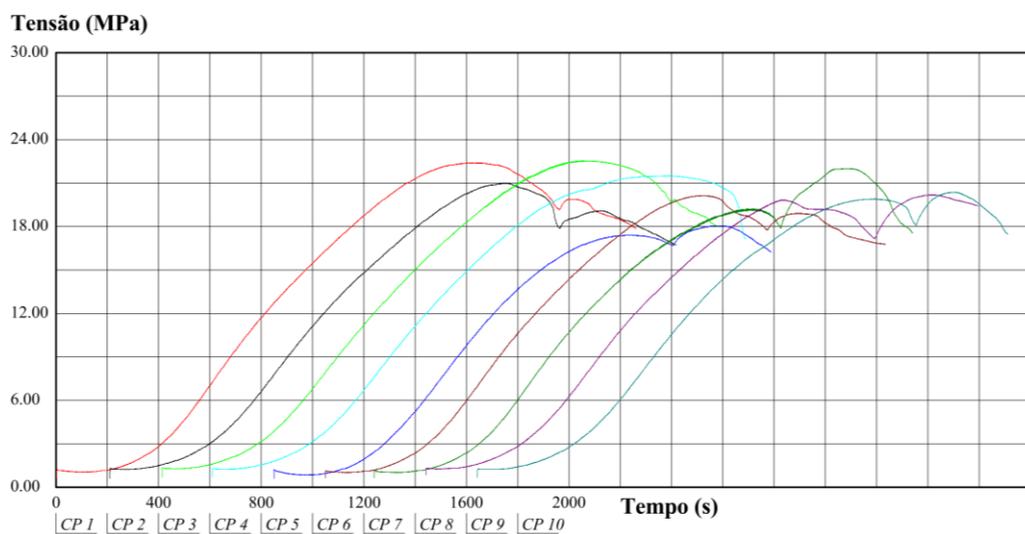
Para tanto, a Tabela 6 aponta os dados obtidos no desenvolvimento do ensaio em questão, através do qual o lote de madeira em análise, fora classificado por um valor representativo de 20,94 MPa, sendo apresentado pela Figura 54, as linhas comportamentais dos corpos-de-prova, do início de aplicação do carregamento até a ruptura.

Tabela 6 – Caracterização da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus*.

Corpo de prova	Área corpo-de-prova (mm ²)	Carga máxima de ruptura (N)	Resistência à compressão (MPa)
CP 1	2492,50	55917,03	22,43
CP 2	2515,00	52831,95	21,01
CP 3	2499,95	56399,12	22,56
CP 4	2489,94	53603,25	21,53
CP 5	2484,94	44926,42	18,08
CP 6	2494,98	50364,60	20,17
CP 7	2492,51	54856,54	22,01
CP 8	2482,50	50228,97	20,23
CP 9	2487,50	50807,37	20,43
Média (MPa)	-	-	20,94
Desvio padrão (MPa)	-	-	1,41
Coef. variação (%)	-	-	6,73

Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 54 – Caracterização de resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Sabendo-se que, o lote utilizado fora caracterizado com umidade de 16,46% e que elementos em madeira destinados a compor sistemas estruturais, com teores de umidades contidos na faixa de limite de valores de 10,0% a 20,0%, devem apresentar a correção dos parâmetros de resistência e rigidez, para o teor de umidade padrão de 12,0%, o parâmetro mecânico da resistência à compressão paralela às fibras da madeira de *Pinus*, fora adequado para atendimento desse requisito normativo, passando o lote utilizado a ser caracterizado pelo valor de 23,74 MPa.

3.2.1.4 Módulo de Elasticidade

As propriedades mecânicas elásticas dos materiais determinam o parâmetro de rigidez dos mesmos, qualificando a características desses de retornar ao seu formato inicial, em termos de dimensões de seção transversal e de comprimento, após a remoção de uma determinada carga de sollicitação, sem apresentar deformações permanentes, seguidas de ruptura. Isso posto, quanto às estruturas de madeira, o critério do Módulo de Elasticidade longitudinal (*MOE*), é de grande destaque.

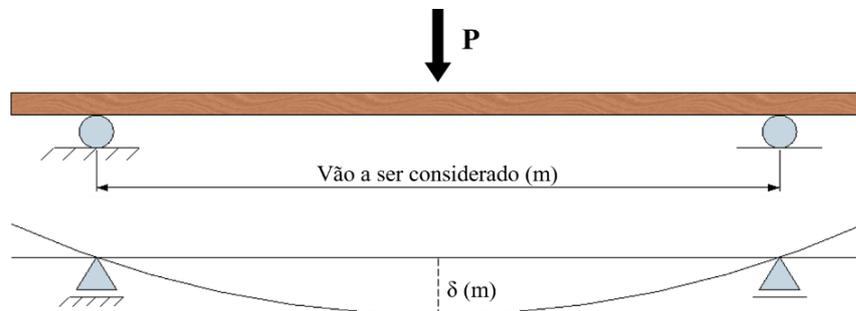
Grande parcela dos materiais de construção são categorizados como elastoplásticos, dado que as deformações ocorrentes possuem caráter reversível ou irreversível respectivo a carregamentos abaixo ou acima do limite de regime elástico. A contraponto desse cenário, a madeira apresenta comportamento viscoelástico, uma vez que além de deformações elásticas, exhibe acréscimo de deformações com o tempo, denominadas deformações reológicas, de modo a ser proeminente a ocorrência dos fenômenos de fluência e fadiga em elementos de madeira, causados mutuamente por sollicitações permanentes atuantes em longos períodos de tempo e sollicitações cíclicas (PFEIL; PFEIL, 2003; USDA, 2010; MELO; MENEZZI, 2010).

Como a madeira trata-se de um material de origem natural, os elementos estruturais desdobrados a partir do lote de uma mesma espécie arbórea, são suscetíveis de apresentar variações dos seus parâmetros elásticos resistentes. Assim sendo, as lamelas constituintes das vigas de Madeira Laminada Colada devem ser previamente classificadas, de modo individual e mecânico não destrutivo, quanto ao Módulo de elasticidade longitudinal, visando uma adequada disposição das lâminas para a manufatura das vigas.

Para a determinação experimental do Módulo de elasticidade das lamelas (MOE_{La}) e, conseqüentemente das vigas (MOE_V), optou-se pela metodologia de caracterização pela

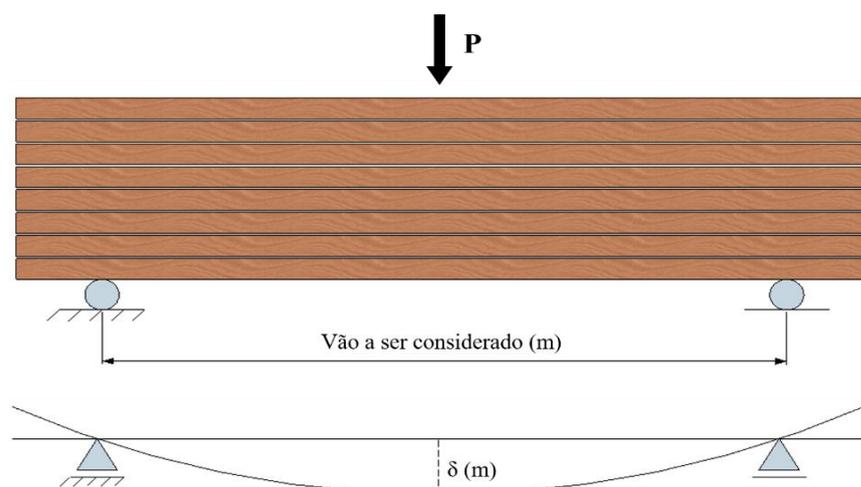
rigidez à flexão, onde os referidos elementos são condicionados à condição de suporte com ambas extremidades simplesmente apoiadas e submetidos à uma carga concentrada (P) no meio no vão e de magnitude conhecida, de modo que o valor médio representativo do deslocamento perpendicular ao eixo (deflexão – δ), de todos os elementos, seja determinado, através de três repetições de cada configuração de ensaio, essas apresentadas pela Figura 55 e Figura 56.

Figura 55 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das lâminas (MOE_{La}).



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 56 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das vigas (MOE_V).



Fonte: Próprio autor (2020).

Em virtude das considerações atreladas a condição de suporte e a carga concentrada aplicada no meio do vão, por intermédio da Equação 26, analiticamente define-se o parâmetro da deflexão estática (δ) de um determinado elemento estrutural. Posto que os deslocamentos verticais são medidos experimentalmente e o parâmetro de rigidez das lamelas e das vigas são desconhecidos, reescrevendo-se a referida equação para a Equação 27, o Módulo de elasticidade longitudinal desses elementos pode ser estabelecido.

$$\delta = \frac{P * L^3}{48 * E * I} \quad \text{Equação 26}$$

$$MOE = \frac{P * L^3}{48 * \delta * I} \quad \text{Equação 27}$$

Onde:

- δ – Deformação do elemento estrutural, em metros;
- P – Carga aplicada, em kN;
- L – Vão livre, em metros;
- MOE – Módulo de elasticidade, em kN/m^2 ;
- I – Momento de inércia da seção transversal do sistema, em m^4 .

A normativa brasileira, NBR 7190:2011 – Projeto de Estruturas de Madeira, solicita que, para a madeira empregada na manufatura de peças de MLC, seja considerado o Módulo de elasticidade médio na flexão como um valor representativo do lote de lâminas da espécie arbórea utilizada, através de um ensaio preliminar de 12 (doze) lamelas escolhidas aleatoriamente. Para o desenvolvimento da presente pesquisa, optou-se pelo conhecimento da rigidez de todas as lamelas a serem empregadas na composição das 8 (oito) vigas do piso proposto, as quais foram aleatoriamente separadas e identificadas, conforme exemplificado pela Figura 57.

Figura 57 – Identificação das lâminas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para a caracterização individual das lamelas de madeira empregadas, quanto ao Módulo de Elasticidade (MOE_{La}) em condições de rigidez à flexão, inicialmente foram qualificadas as dimensões da seção transversal das lâminas, visando a definição do parâmetro do Momento de Inércia (I), fator que considera a distribuição de massa de um elemento em relação ao seu próprio centro de rotação, de modo que quanto maior o seu índice, maior a dificuldade de rotação da peça sobre um determinado eixo. Para tanto, mediram-se as dimensões de largura e espessura das seções das peças em 5 (cinco) pontos determinados ao longo do comprimento (l) de cada laminado.

Logo, em um pórtico de aço situado nas dependências externas do laboratório LESE, conforme a Figura 58, a configuração proposta para a caracterização da rigidez a flexão das lâminas fora executada, sendo o deslocamento vertical (δ), provocados por uma carga concentrada (P) de 560,30 gramas, aplicada no meio do vão por um conjunto de duas placas, mensurado por um relógio comparador com curso de 50,0 mm, instalado por uma base magnética logo abaixo da face inferior do ponto central do laminado. Dadas as condições limites de espaçamentos entre os apoios configurados pelo pórtico, considerou-se um vão livre de 3,47 metros, sendo cada extremidade das lâminas admitida na condição simplesmente apoiada.

Figura 58 – Realização do ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das lâminas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Dado o comportamento reológico da madeira, onde deformações instantâneas ocorrem logo após a aplicação de cargas e deformações permanentes em cenários com aplicação de carga durante elevados períodos de tempo, a medição dos deslocamentos fora realizada em três reproduções do ensaio para cada laminado, com aplicação da carga concentrada relativamente pequena, ao longo de um minuto, visando manter as peças intactas e sem deformações.

Assim sendo, empregando-se a Equação 27, o Módulo de elasticidade individual das lamelas (MOE_{La}) fora calculado, esses apresentados pela Tabela 7 à Tabela 14, respectivamente para as lâminas das vigas VLC1 à VLC8.

Tabela 7 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC1.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L11	17.988,76	18.182,19	17.988,76	18.053,24
L12	17.614,00	17.799,41	17.956,93	14.900,46
L13	13.936,35	14.640,21	14.964,10	10.991,22
L14	19.070,79	19.586,22	19.510,89	16.547,17
L15	23.431,09	23.816,11	24.098,96	20.042,98
L16	24.447,38	23.704,82	24.330,13	20.126,27
L17	17.553,05	17.644,63	17.283,92	15.211,65
L18	22.055,79	22.152,10	22.200,57	18.411,84
Média (MPa)*	-	-	-	16.785,60
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.063,26
Coef. variação (%)	-	-	-	18,25

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC1, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 8 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC2.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L21	19.556,84	20.026,96	19.931,13	19.838,31
L22	17.067,12	17.167,52	17.201,24	17.145,29
L23	12.941,59	12.919,24	13.123,23	12.994,68
L24	12.698,18	12.568,04	12.623,49	12.629,91
L25	15.558,56	15.529,53	15.705,33	15.597,81
L26	18.014,59	18.092,58	18.290,53	18.132,57
L27	11.576,77	11.592,65	11.640,56	11.603,33
L28	12.754,30	12.715,35	12.754,30	12.741,32
Média (MPa)*	-	-	-	15.085,40
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.033,18
Coef. variação (%)	-	-	-	20,11

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC2, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 9 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC3.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L31	13.205,97	13.327,45	13.327,45	13.286,96
L32	19.149,13	19.597,94	19.446,02	19.397,70
L33	10.474,80	10.485,48	10.432,31	10.464,20
L34	18.028,71	18.189,39	18.157,03	18.125,04
L35	17.503,48	17.533,60	17.443,53	17.493,54
L36	8.919,88	8.936,16	8.911,76	8.922,60
L37	12.044,05	12.129,87	12.072,52	12.082,15
L38	8.504,18	8.497,01	8.475,57	8.492,25
Média (MPa)*	-	-	-	13.533,05
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	4.299,76
Coef. variação (%)	-	-	-	31,77

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC3, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 10 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC4.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L41	15.118,03	15.095,30	15.050,03	15.087,79
L42	12.472,60	12.411,61	12.442,03	12.442,08
L43	12.447,43	12.359,36	12.330,28	12.379,02
L44	17.277,54	17.171,54	17.066,84	17.171,97
L45	10.382,35	10.393,01	10.371,71	10.382,35
L46	12.834,12	12.705,78	12.658,31	12.732,74
L47	19.181,86	19.145,80	19.038,44	19.122,03
L48	10.056,63	10.103,52	9.998,64	10.052,93
Média (MPa)*	-	-	-	13.671,37
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.205,87
Coef. variação (%)	-	-	-	23,45

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC4, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 11 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC5.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L51	12.807,25	12.849,10	12.870,13	12.842,16
L52	10.440,47	10.539,49	10.685,87	10.555,28
L53	16.960,17	17.423,24	17.393,56	17.258,99
L54	7.186,28	7.243,77	7.367,00	7.265,68
L55	14.962,60	15.165,71	15.211,60	15.113,30
L56	11.606,76	11.755,40	11.796,59	11.719,58
L57	8.309,47	8.261,52	8.214,11	8.261,70
L58	16.595,61	16.899,36	17.127,34	16.874,11
Média (MPa)*	-	-	-	12.486,35
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.750,77
Coef. variação (%)	-	-	-	30,04

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC5, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 12 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC6.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L61	17.815,92	17.754,70	17.724,24	17.764,95
L62	12.877,57	12.942,61	13.024,83	12.948,34
L63	18.644,72	18.782,32	18.851,88	18.759,64
L64	13.335,27	13.443,10	13.246,72	13.341,70
L65	11.137,03	11.260,78	11.451,64	11.283,15
L66	12.812,19	12.907,68	13.219,70	12.979,86
L67	15.855,52	15.536,44	16.058,47	15.816,81
L68	15.519,76	15.474,44	15.317,91	15.437,37
Média (MPa)*	-	-	-	14.791,48
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	2.595,21
Coef. variação (%)	-	-	-	17,55

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC6, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 13 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC7.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L71	14.838,22	15.317,58	15.340,11	15.165,30
L72	12.452,31	12.607,57	12.670,77	12.576,88
L73	10.695,58	10.597,36	10.773,25	10.688,73
L74	13.541,08	13.798,66	14.144,59	13.828,11
L75	20.683,13	20.852,67	20.641,18	20.725,66
L76	13.062,75	13.129,23	13.162,72	13.118,23
L77	9.686,51	9.925,09	10.808,98	10.140,19
L78	18.446,00	18.217,06	18.646,86	18.436,64
Média (MPa)*	-	-	-	14.334,97
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.665,93
Coef. variação (%)	-	-	-	25,57

Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC7, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 14 – Módulo de elasticidade das lâminas da viga VLC8.

Lâminas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{La} médio (MPa)
L81	17.331,60	17.481,52	17.572,73	17.461,95
L82	7.343,49	7.316,63	7.247,71	7.302,61
L83	11.265,73	11.131,04	11.106,89	11.167,89
L84	17.131,78	17.190,35	17.249,32	17.190,48
L85	14.511,63	14.737,74	14.654,71	14.634,69
L86	18.918,06	19.242,99	19.465,88	19.208,98
L87	12.211,27	12.271,06	12.331,43	12.271,25
L88	14.567,16	14.756,07	14.798,72	14.707,32
Média (MPa)*	-	-	-	14.243,15
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	3.883,89
Coef. variação (%)	-	-	-	27,27

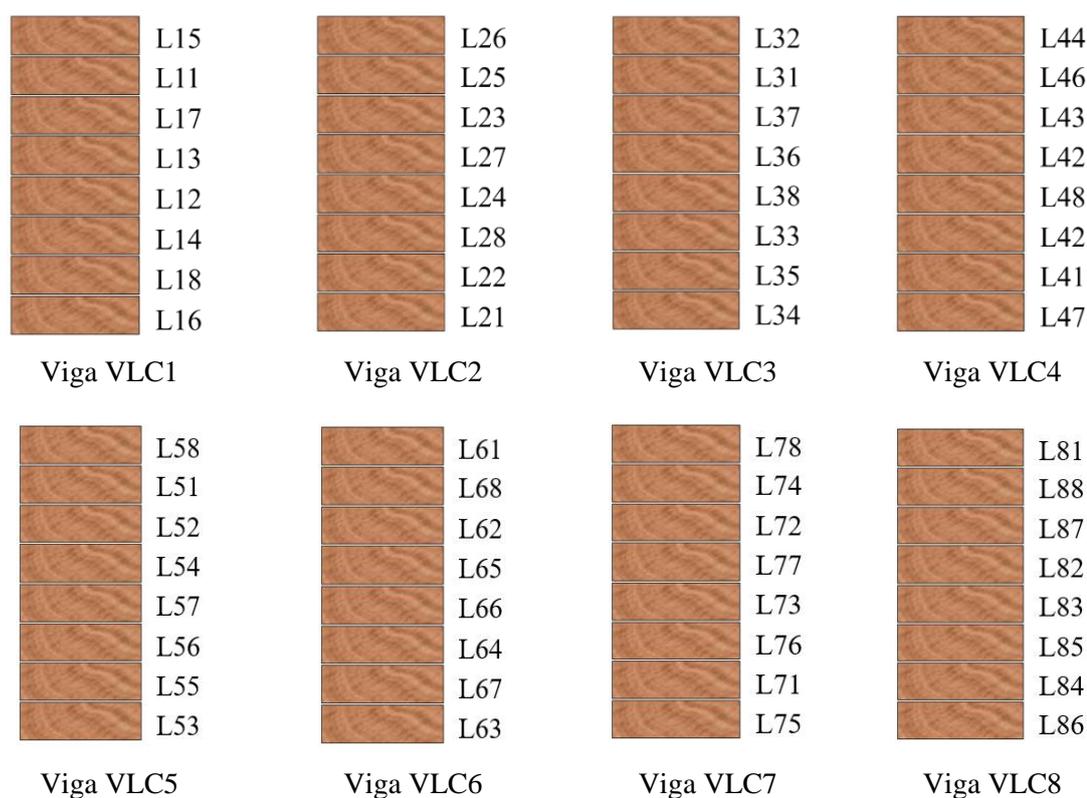
Nota:
* trata-se do parâmetro do Módulo de Elasticidade (MOE_L) da viga VLC8, determinado considerando-se o valor médio do módulo de seus laminados constituintes.

Fonte: Próprio autor (2020).

O processo de composição da seção transversal das vigas de MLC, prescrito pela norma brasileira para estruturas de madeira, a ABNT NRB 7190:1997, ocorre por intermédio da consideração dos valores individuais dos módulos de elasticidade das lamelas constituintes, onde os laminados com valores superiores do módulo são distribuídos nas quartas partes mais afastadas do centro da viga, regiões onde os esforços do binário de tração e compressão são elevados, enquanto que a parcela central da peça é preenchida por lamelas com módulos inferiores.

Logo, com a finalização da caracterização do Módulo de elasticidade das lamelas, a composição das seções transversais das vigas VLC1 à VLC8 fora estabelecida, essa devendo atender à ordem de distribuição dos laminados descrita pela Figura 59, para que o processo de manufatura fosse iniciado, esse explanado no Apêndice B.

Figura 59 – Disposição final das lâminas das vigas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Quanto a determinação experimental do Módulo de elasticidade das vigas de MLC (MOE_V), a caracterização sucedeu do mesmo modo com que a configuração do ensaio

experimental dos laminados de madeira, sendo para esse cenário, o Momento de inércia (I) de cada viga, determinado pela medição da seção transversal em 20 (vinte) pontos distribuídos ao longo do comprimento (l) das mesmas, bem como a aplicação da carga concentrada (P) dada por um macaco hidráulico associado a uma célula de carga com capacidade máxima de 5,0 toneladas, a qual um leitor digital era acoplado, para o registro da magnitude do carregamento aplicado, como visualizado na Figura 60.

Figura 60 – Realização do ensaio de determinação do Módulo de elasticidade das vigas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para cada elemento de viga, três repetições do ensaio descrito acima foram realizadas, visando o registro de dados do deslocamento vertical (δ) a cada incremento de carga de 1,0 kN, admitindo-se como critério de parada, o deslocamento máximo preestabelecido, de acordo com a Equação 28.

$$\delta_{m\acute{a}x} = \frac{l}{250}$$

Equação 28

Onde:

- $\delta_{m\acute{a}x}$ – Deslocamento vertical máximo, em milímetros;

- l – Vão livre considerado para a estrutura, em milímetros.

O limite de deslocamento máximo admitido para o ensaio do Módulo de elasticidade das vigas é de 13,88 milímetros, devendo-se ressaltar que, o referido valor de deslocamento supera em 19,96% o valor de deslocamento máximo estabelecido pelas solicitações do Estado Limite de Serviço da NBR 7190:2011, obtido pela condição limite de $l/300$ (11,57 milímetros). Essa situação decorre, para que o comportamento da relação de carga x deslocamento seja avaliado, após ser ultrapassado o limite determinado pelo Estado Limite de Serviço, temática que não será abordada na presente pesquisa.

Aplicando-se a Equação 27, o Módulo de elasticidade experimental das vigas (MOE_V) fora mensurado, esse caracterizado pelo valor médio dos índices obtidos pelas três repetições do ensaio experimental proposto, como apresentado pela Tabela 15.

Tabela 15 – Módulo de elasticidade das vigas (MOE_V), medido experimentalmente.

Vigas	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_V médio (MPa)
VLC1	15.638,27	15.702,98	15.702,98	15.739,05
VLC2	14.891,47	15.058,56	14.975,02	14.975,02
VLC3	14.152,05	14.406,13	14.406,13	14.321,43
VLC4	14.050,42	14.329,90	14.380,72	14.253,68
VLC5	13.821,75	13.923,38	13.872,56	13.872,56
VLC6	14.253,68	14.482,35	14.558,57	14.431,53
VLC7	14.787,24	14.838,05	14.888,87	14.838,05
VLC8	15.447,84	15.549,47	15.574,88	15.524,06

Fonte: Próprio autor (2020).

3.2.2 Caracterização da cola

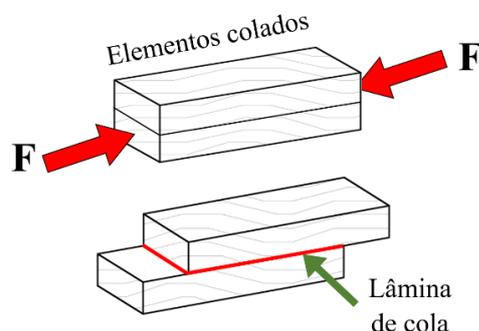
Uma vez que peças de madeira serrada possuem comprimentos limitados ao crescimento longitudinal dos troncos das árvores, foram desenvolvidos ao longo dos anos, variados dispositivos com o intuito de unir e transmitir esforços entre elementos estruturais, conhecidos como ligações, visando a obtenção de peças com maiores comprimentos, contemplando as demandas de espaços mais amplos pelo alcance de maiores vãos.

Dentre as referidas metodologias, as ligações por aderência com aplicação de finas películas de adesivo, visando a ligações de elementos em madeira pela colagem, são empregadas em grandes escalas, especialmente na indústria da manufatura de Madeira Laminada Colada e madeira reconstituída, dadas as propriedades de elevada rigidez com pequenas deformações e distribuição dos esforços em superfícies formadas por áreas conectadas pelo adesivo, relativamente grandes.

Dado que os componentes adesivos desempenham papel fundamental para a eficiência do método construtivo da Madeira Laminada Colada, devem apresentar padrões de resistência compatíveis com a madeira, posto que são responsáveis pela distribuição e transferência de esforços entre os laminados bem como com as condições ambientais a que os membros estruturais serão submetidos ao longo de suas vidas úteis (ABNT, 2011). Em vista disso, o desempenho das ligações é diretamente afetado pelo tipo e tática de aplicação do adesivo, qualidade da superfície das lâminas e em especial, pela porosidade da espécie arbórea, uma vez que as melhores ligações, em termos de durabilidade e resistência à água, são dadas em situações de penetração total do adesivo nas cavidades centrais e paredes das células vegetais (ABBOTT; WHALE, 1987; USDA, 2010; KUZMAN; OBLAK; VRATUŠA, 2010).

Em virtude disso, os adesivos aplicados para fins estruturais devem promover ligações resistentes e duráveis entre membros de madeira, de modo que a integridade da união seja mantida ao longo da vida útil projetada para o sistema estrutural, de acordo com as classes de serviços estabelecidas (ABNT, 1997). Assim sendo, a ligação por aderência está sujeita a carregamentos cisalhantes, compostos por dois esforços desalinhados dispostos na mesma direção e em sentidos contrários, sendo a ocorrência da solicitação na direção paralela às fibras da madeira, categorizada como a mais crítica, já que provocam o deslizamento entre elementos colados, como exposto pela Figura 61.

Figura 61 – Efeitos do esforço de cisalhamento paralela às fibras, em peças de madeira coladas.



Fonte: Próprio autor (2020).

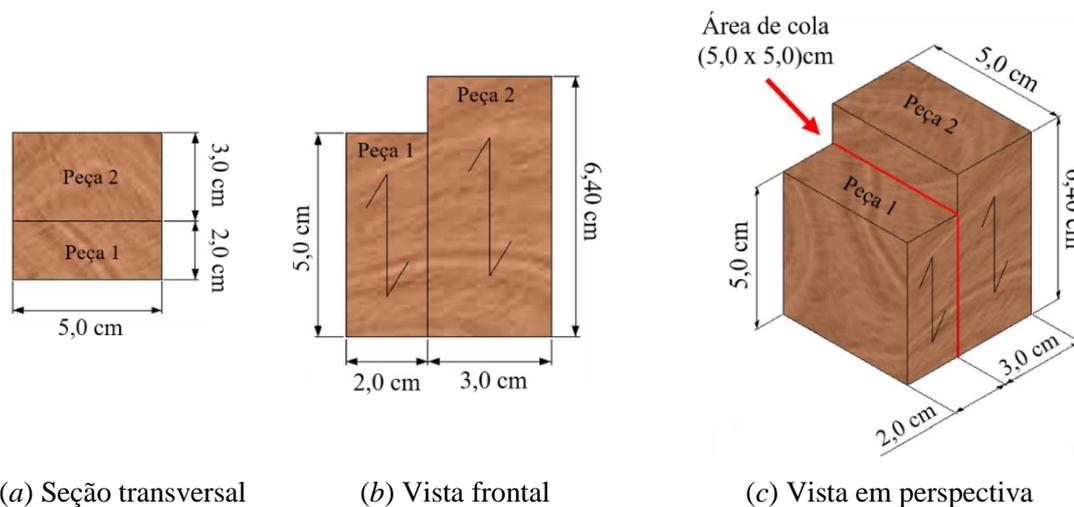
Para isso, a resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras da madeira (f_{gv}), conforme trata o código brasileiro NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, é definida pela máxima tensão de cisalhamento, dada pela Equação 29, devido a aplicação de um esforço monotônico de ordem crescente à uma taxa de 2,50 MPa/min, em um corpo-de-prova prismático composto por duas peças coladas entre si, de acordo com a Figura 62, na qual observa-se que a Peça 1 apresenta seção transversal de 2,0 x 5,0 cm, com comprimento de 5,0 cm ao longo das fibras da madeira, ao passo que a Peça 2 comporta seção transversal de 3,0 x 5,0 cm, para comprimento de 6,40 cm.

$$f_{gv} = \frac{f_{v0,máx}}{A_{gv,0}} \quad \text{Equação 29}$$

Onde:

- f_{gv} – Resistência ao cisalhamento na lâmina de cola paralelo às fibras da madeira, em Megapascals (MPa);
- $f_{v0,máx}$ – Máxima força cisalhante aplicada ao corpo-de-prova, em Newtons (N);
- $A_{gv,0}$ – Área inicial da lâmina de cola do corpo-de-prova, em um plano paralelo às fibras, em metros quadrados (m²).

Figura 62 – Corpo-de-prova para ensaio de cisalhamento na lâmina de cola, na direção paralela às fibras da madeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para o desenvolvimento da presente pesquisa, dois materiais adesivos indicados por profissionais de empresas especializadas na manufatura de MLC, a cola Cascamite e a Cola PUR-501, consecutivamente mostradas pela Figura 63 e Figura 64, com propriedades descritas no Quadro 4 e Quadro 5, foram avaliadas visando estabelecer o material adesivo a compor o processo de colagem das vigas constituintes do sistema estrutural do piso proposto.

Figura 63 – Cola Cascamite.



Fonte: Próprio autor (2020).

Quadro 4 – Propriedades técnicas da cola Cascamite.

Composição	<ul style="list-style-type: none"> • Produto à base de formol e uréia, com necessidade de adição de farinha de trigo, água e catalisador; • Proporções da mistura: 100 partes de cola Cascamite, 20 partes de farinha de trigo, 20 partes de água e 3 partes de catalisador.
Fins de uso	<ul style="list-style-type: none"> • Colagem de madeiras e seus derivados, como compensados, aglomerados e MDF; • Revestimento de painéis com lâminas de madeira ou papel melamínico; • Colagens de peças de marcenaria em semicírculo e arcos; • Colagem de inúmeros materiais porosos, com pressão.
Detalhes da aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de Aplicação: +20 °C; • O tempo mínimo de cura sob pressão: 24 horas; • Após a mistura dos componentes, a cola deve ser aplicada e o processo de colagem com pressão, devem ser finalizados dentro de um intervalo de tempo de 2 horas; • Inicialmente mistura-se as partes referentes a cola e a farinha, devendo-se, após a homogeneização completa desses produtos, adicionar a água e o catalisador na mistura.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Solúvel em água; • Fácil aplicação; • Elevada resistência mecânica; • Boa resistência à umidade.

Fonte: Próprio autor (2018).

Figura 64 – Cola PUR-501.



Fonte: Próprio autor (2020).

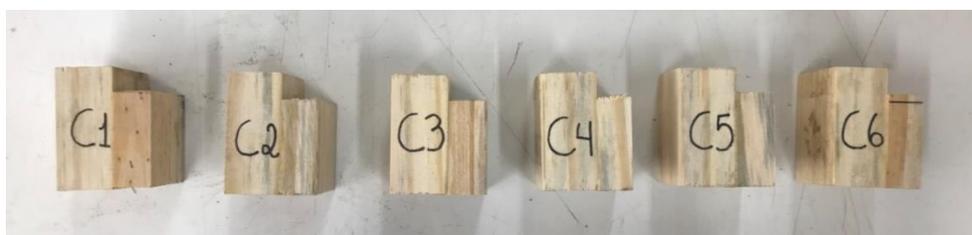
Quadro 5 – Propriedades técnicas da cola PUR-501.

Composição	<ul style="list-style-type: none"> • Base de poliuretano monocomponente, com cura à umidade do ar;
Fins de uso	<ul style="list-style-type: none"> • Construção e reparação de barcos; • Fabricação de móveis, portas e janelas de madeira; • Colagem de todos os tipos de madeiras; • Colagem de materiais porosos e não porosos.
Detalhes da aplicação	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura de Aplicação: +5 °C a + 35 °C; • O tempo mínimo de cura sob pressão: 30 minutos; • A superfície de aplicação deve ser sólida e deve estar limpa, seca, livre de poeira, óleo ou graxa; • Limpar o excesso com acetona antes da cura do produto.
Vantagens	<ul style="list-style-type: none"> • Alta resistência às intempéries e à água, podendo ser utilizado em superfícies que ficarão permanentemente submersas; • Fácil aplicação; • Cura rápida e alto poder de adesão; • Resistente a umidade e a químicos.

Fonte: Próprio autor (2020).

Ambas as colas, foram caracterizadas quanto a resistência ao cisalhamento da lâmina de cola paralelo às fibras da madeira (f_{gv}), por intermédio de 6 (seis) corpos-de-prova para cada tipo de adesivo, esses devidamente identificados, admitindo-se como parâmetro, a letra inicial do nome da cola Cascamite e PUR-501, como pode ser visto respectivamente, na Figura 65 e Figura 66.

Figura 65 – Corpos-de-prova da cola Cascamite.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 66 – Corpos-de-prova da cola PUR-501.



Fonte: Próprio autor (2020).

Dessa forma, a execução do ensaio ocorreu em uma prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de até 1.200 kN, equipada com sistema de aquisição de dados instantâneos, pelo uso de uma célula de carga com leitor digital e capacidade para 5,0 toneladas, sendo a configuração final do ensaio realizado, exibida na Figura 67.

Figura 67 – Realização do ensaio de determinação do cisalhamento da lâmina de cola paralela às fibras.



Fonte: Próprio autor (2020).

A Tabela 16, aponta os valores de resistência ao cisalhamento da lâmina de cola paralela às fibras (f_{gv}) dos corpos-de-prova confeccionados com uso de cola Cascamite e PUR-501, juntamente com o valor médio característico estabelecido para cada material adesivo.

Tabela 16 – Resistência ao cisalhamento na lâmina da cola paralelo às fibras da madeira, do adesivo Cascamite e PUR-501.

CP	Resistência ao Cisalhamento (MPa)	
	Cascamite	PUR-501
C1	9,44	4,36
C2	5,56	4,80
C3	5,64	4,24
C4	4,92	4,00
C5	5,60	4,00
C6	5,84	5,04
Média (MPa)	6,17	4,41
Desvio padrão (MPa)	1,63	0,43
Coef. de variação (%)	26,42	9,75

Fonte: Próprio autor (2020).

Perante os resultados obtidos, a resistência ao cisalhamento da lâmina de cola paralela às fibras (f_{gv}) aplicando-se o adesivo Cascamite é representada por um valor característico de 6,17 MPa, ao passo que 4,41 MPa qualifica o mesmo parâmetro resistente com emprego da cola PUR-501, categorizando a cola Cascamite como a mais resistente, na ordem de 39,91% perante o adesivo PUR-501.

A contraponto desse cenário, dado o fato de que a confecção das vigas de Madeira Laminada Colada necessárias à pesquisa, decorrer ao longo do período do ano da transição da estação do outono para o inverno, as condições climáticas serão caracterizadas por baixas temperaturas. Assim sendo, definiu-se para a manufatura das vigas de MLC, a cola PUR-501, em virtude da faixa de temperatura que pode ser manuseada atrelada a seu reduzido tempo de cura sob pressão, cenário que facilita e otimiza a período de manufatura de todas as vigas.

3.2.3 Caracterização das placas de OSB

Os painéis para fins estruturais denominados *Oriented Strand Board* (OSB), no ambiente atual da Construção Civil mundial, são amplamente empregados na composição

da camada de revestimento de telhados, paredes e pisos, de edificações de ordem residencial e comercial (USDA 2010).

Grande notoriedade é dada aos referidos painéis, em virtude dos mesmos serem compostos por elementos longos e finos de madeira, denominados fios, com dimensões médias de 114,0 a 152,0 mm de comprimento, 12,70 mm de largura e 0,60 a 0,70 mm de espessura, misturados com resina resistente à água e dispostos em três camadas, as faces externas com fios mais longos paralelos ao eixo longitudinal das placas e o núcleo com fios menores distribuídos aleatoriamente, característica que aprimora propriedades de resistência à flexão e resistência à rigidez (USDA 2010).

Em virtude da aplicação de painéis de OSB como estrutura de deck do piso da presente pesquisa, a propriedade física de massa específica aparente bem como a propriedade mecânica resistente do Módulo de elasticidade, foram devidamente categorizadas devido a extrema importância das mesmas para elementos de madeira, como já explanado na seção 3.2.1, empregando-se nessa ocasião, as requisições descritas por normativas internacionais, dada a inexistência de códigos brasileiros que regulamentam a caracterização adequada do material em questão.

3.2.3.1 Massa específica aparente

A propriedade física da massa específica aparente do lote de painéis de OSB empregado na presente pesquisa, é estabelecida em conformidade com exigências da normativa internacional *EN 323:2000 – Wood-based panels – Determination of density*, por intermédio da relação, apresentada pela Equação 30, entre a massa e o volume de corpos-de-prova prismáticos e seção transversal retangular com dimensões nominais de $5,0 \pm 0,2$ de largura, $10,0 \pm 0,2$ cm de comprimento e $1,50 \pm 0,2$ cm de espessura, como mostrado pela Figura 68 (EN 323:2000, EN 326-1:1994 *apud* BASTOS, 2009).

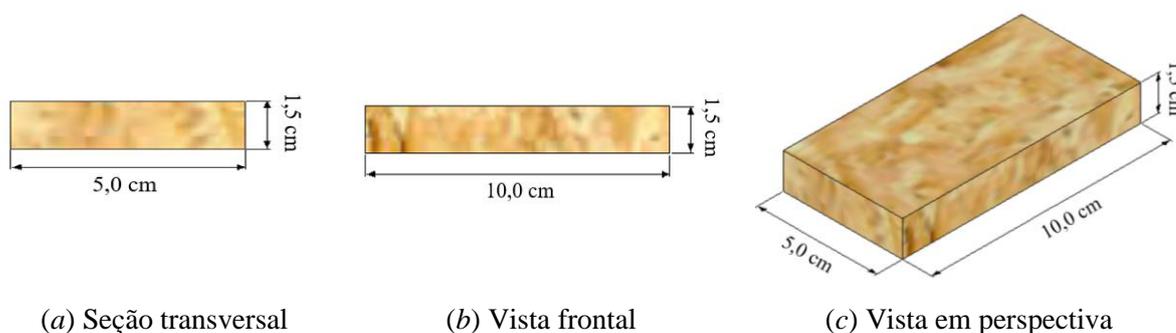
$$m_{aOSB} = \frac{m}{c*b*e} \quad \text{Equação 30}$$

Onde:

- m_{aOSB} – Massa específica aparente, em g/cm^3 ;
- m – Massa do corpo-de-prova, em gramas;
- c – Comprimento do corpo-de-prova, em centímetros;

- b – Largura do corpo-de-prova, em centímetros;
- e – Espessura do corpo-de-prova, em centímetros.

Figura 68 – Corpo-de-prova para ensaio de massa específica aparente das placas de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

A adequada realização do referido ensaio, requer que os corpos-de-prova sejam previamente acondicionados e mantidos em câmara de secagem, com temperatura máxima de $20,0\text{ °C} \pm 2,0\text{ °C}$ e umidade relativa do ar de $65,0 \pm 5,0\%$, até que o ponto de constância de massa seja atingido, no qual a variação entre as duas últimas medidas de massa consecutivas é inferior ou igual a 0,1% (EN 310:1993).

Logo, para a caracterização do lote de placas de OSB empregados como o material da subestrutura do piso analisada na presente pesquisa, quanto a massa específica aparente (m_{aOSB}), ensaiaram-se um total de 9 (nove) corpos-de-prova, identificados conforme demonstrado pela Figura 69.

Figura 69 – Corpos-de-prova para a determinação da massa específica aparente das placas de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os resultados adquiridos pela caracterização da massa específica aparente (m_{aOSB}), são expostos na Tabela 17, sendo o lote das placas de OSB utilizado, qualificado por uma massa específica aparente média de 615,93 Kg/m³.

Tabela 17 – Caracterização da massa específica aparente (m_{aOSB}) das placas de OSB.

CP	Massa esp. aparente (Kg/m ³)
1	618,90
2	557,34
3	657,88
4	665,93
5	600,83
6	643,07
7	570,24
8	607,34
9	621,81
Média (Kg/m ³)	615,93
Desvio padrão (Kg/m ³)	36,85
Coef. variação (%)	5,98%

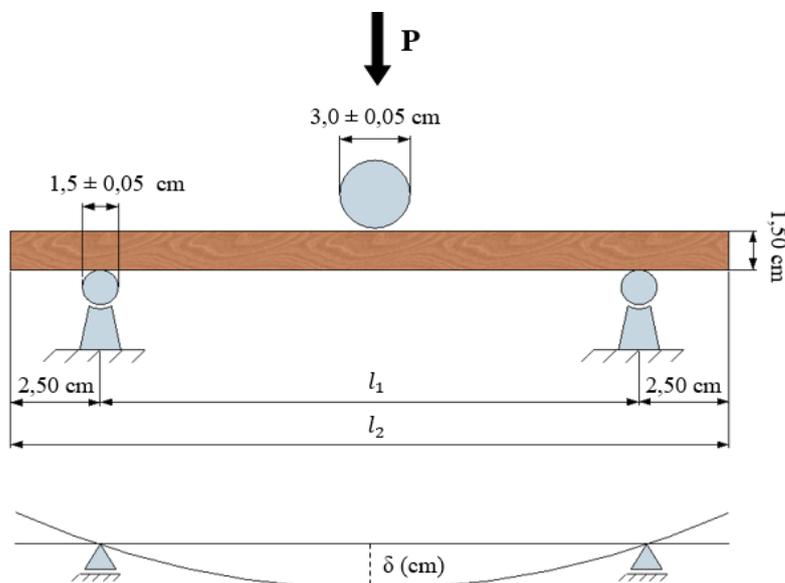
Fonte: Próprio autor (2020).

3.2.3.2 Módulo de Elasticidade (MOE_{OSB})

A propriedade mecânica resistente do Módulo de elasticidade representativo do lote de painéis de OSB (MOE_{OSB}), empregado na execução da presente pesquisa, é determinada de acordo com os requisitos apresentados pela normativa internacional *EN 310:1993– Wood-based panels – Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength*.

A metodologia retratada pelo referido código, consiste em um ensaio onde os corpos-de-prova são submetidos à condição de flexão com extremidades simplesmente apoiadas, admitindo-se a aplicação de uma determinada carga concentrada (P) no meio do vão, a qual provoca correspondente deslocamento perpendicular ao eixo (deflexão – δ), ambos parâmetros de magnitude conhecida, conforme ilustrado pela Figura 70.

Figura 70 – Configuração proposta para o ensaio de determinação do Módulo de elasticidade dos painéis de OSB (MOE_{OSB}).



Fonte: Próprio autor (2020).

A determinação das dimensões l_1 e l_2 , correspondentes ao vão livre considerado e ao comprimento total dos corpos-de-prova, é dada pela aplicação respectiva da Equação 31 e Equação 32, uma vez que o estabelecimento desses parâmetros é fundamental para a configuração adequada do ensaio, já que considera a espessura nominal das placas de OSB.

$$l_1 = 20 * e \quad \text{Equação 31}$$

$$l_2 = l_1 + (2 * 2,50) \quad \text{Equação 32}$$

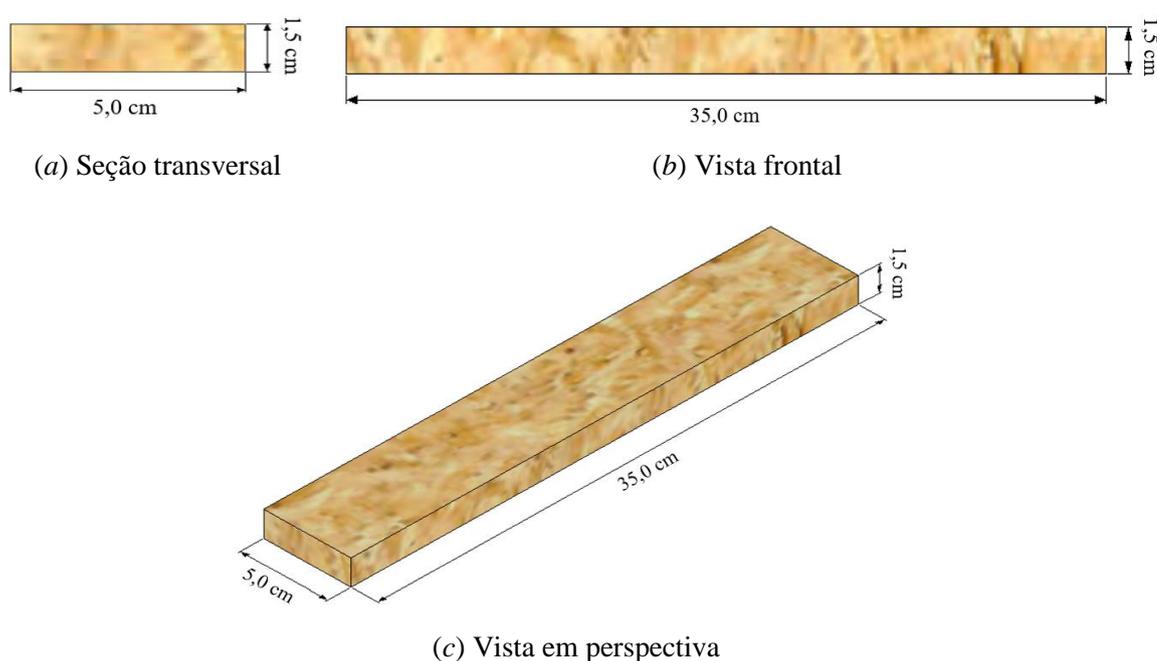
Onde:

- l_1 – Massa específica aparente, em *cm*;
- e – Massa específica aparente, em *cm*;
- l_2 – Massa do corpo-de-prova, em *cm*.

Os corpos-de-prova para o ensaio, configuram formato prismático e seção transversal retangular, como demonstrado pela Figura 71, devendo atender aos limites de comprimento

máximo de 105,0 cm e o mínimo de 15,0 cm, admitindo-se $5,0 \pm 0,1$ cm de largura, bem como para uma adequada realização do ensaio, ser acondicionados e mantidos em câmara de secagem, com temperatura máxima de $20,0 \text{ }^\circ\text{C} \pm 2,0 \text{ }^\circ\text{C}$ e umidade relativa do ar de $65,0 \pm 5,0\%$, até que o ponto de constância de massa seja atingido, onde a variação entre as duas últimas medidas de massa consecutivas é inferior ou igual a 0,1% (EN 310:1993).

Figura 71 – Corpo-de-prova para ensaio de Módulo de Elasticidade das placas de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

Assim sendo, a determinação do Módulo de Elasticidade representativo do lote de painéis de OSB é dada pela Equação 33, para a qual são registradas as cargas e seus respectivos deslocamentos, após a aplicação de determinado incremento de carga, salientando-se que esses parâmetros são retirados da região linear da curva de carga-deflexão dos corpos-de-prova ensaiados (EN 310:1993).

$$MOE_{OSB} = \frac{l^3 * (P_2 - P_1)}{(4be^3) * (\delta_2 - \delta_1)} \quad \text{Equação 33}$$

Onde:

- MOE_{OSB} – Módulo de elasticidade, em N/mm^2 ;

- l – Vão livre, em mm ;
- e – espessura do corpo-de-prova, em mm ;
- b – largura do corpo-de-prova, em mm ;
- $P_2 - P_1$ – Incremento de carga, no trecho reto da curva força-deflexão, determinando P_1 a 10% e P_2 a 40% da carga de ruptura, em N ;
- $\delta_2 - \delta_1$ – Incremento de deflexão, no ponto central do vão, correspondente a $P_2 - P_1$

Posto que, a equação acima correlaciona as parcelas de incremento de carga com a carga de ruptura do lote de placas de OSB, a qual não é abordada pela etapa de caracterização em pauta, o Módulo de Elasticidade (MOE_{OSB}) fora estabelecido pelo valor representativo médio de três repetições do ensaio em questão, obtido pela Equação 27, discutida na subseção 3.2.1.4, uma vez que os corpos-de-prova de OSB também encontram-se em condição de suporte simplesmente apoiado em ambas extremidades e sujeitos à aplicação de carga concentrada no centro do vão, como admitido para a determinação do Módulo de Elasticidade das lâminas e das vigas de MLC.

Assim, para a caracterização do lote das placas de OSB empregado, quanto ao Módulo de Elasticidade (MOV_{OSB}), consideraram-se 9 (nove) corpos-de-prova identificados conforme a Figura 72.

Figura 72 – Corpos-de-prova para a determinação do Módulo de Elasticidade das placas de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

Em virtude da indisponibilidade das peças cilíndricas com dimensões específicas, empregadas na configuração da condição de suporte dos corpos-de-prova, bem como do elemento de aplicação da carga concentrada no meio do vão dos mesmos, requeridos pela metodologia do ensaio, adequações foram realizadas. Para tanto, foram admitidos artefatos cilíndricos de apoios dos corpos-de-prova com diâmetro de 1,20 centímetros e elemento da aplicação de carga de 3,10 centímetros de diâmetro.

Logo, o ensaio fora realizado na prensa hidráulica com capacidade de aplicação de carga de até 2.000 kN, equipamento já utilizada na determinação da resistência à compressão paralela às fibras da madeira ($f_{c,0}$) constituinte das vigas da pesquisa. Em virtude da configuração do ensaio submeter os corpos-de-prova à condição de flexão, a carga concentrada aplicada pela prensa hidráulica fora mensurada por uma célula de carga, com capacidade máxima de 5,0 toneladas, a qual um leitor digital era acoplado, de modo que o deslocamento vertical (δ) provocado, fora mensurado por um relógio comparador com curso de 10,0 mm, instalado por uma base magnética logo abaixo da face inferior dos corpos-de-prova, como visualizado na Figura 73.

Figura 73 – Realização do ensaio de Módulo de Elasticidade das placas de OSB.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor (2020).

Deste modo, empregando-se a Equação 27, o Módulo de elasticidade do lote de placas de OSB (MOE_{OSB}) fora calculado, sendo os resultados obtidos apresentados pela

Tabela 18, os quais qualificam o referido lote por um valor representativo médio de 2.310,08 MPa.

Tabela 18 – Módulo de elasticidade das placas de OSB.

CP	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	MOE_{OSB} médio (MPa)
1	1.987,19	2.080,06	2.152,81	2.073,36
2	2.397,81	2.460,43	2.522,30	2.460,18
3	2.582,13	2.465,19	2.622,95	2.556,76
4	2.152,17	2.248,34	2.239,50	2.213,33
5	1.943,02	1.984,36	2.023,50	1.983,63
6	2.256,07	2.305,60	2.342,57	2.301,41
7	2.072,28	2.165,85	2.416,82	2.218,32
8	2.573,57	2.673,10	2.563,37	2.603,35
9	2.288,49	2.320,46	2.532,29	2.380,42
Média (MPa)	-	-	-	2.310,08
Desvio padrão (MPa)	-	-	-	210,59
Coef. variação (%)	-	-	-	9,12

Fonte: Próprio autor (2020).

3.3 MÉTODOS

Esse item apresenta a configuração dos procedimentos experimentais desenvolvidos para a identificação e avaliação dos parâmetros vibracionais em pisos de madeira constituídos por vigas de Madeira Laminada Colada, por intermédio da aquisição de dados acerca do componente modal da frequência natural (f_p) e do amortecimento (ξ), admitindo-se para esse sistema estrutural, variados cenários de excitação dinâmica proporcionadas por atividades humanas como caminhar, correr, saltar e impacto de calcanhar, sendo as vibrações provocadas pelas referidas atividades, de ordem forçada.

Denota-se que, para o registro dos sinais oriundos das vibrações forçadas, atreladas aos procedimentos metodológicos de ordem experimental, três dispositivos distintos de medição serão admitidos. Em virtude disso, os dispositivos serão identificados e tratados ao longo da pesquisa, conforme a nomenclatura dada abaixo, juntamente com a especificação dos mesmos.

- Acelerômetro 1

Conjunto composto por dois acelerômetros desenvolvidos pela *Silicon Designs Inc*, mostrados pela Figura 74 (a), acoplados ao sistema de coleta de dados da Figura 74 (b), apresentando capacidade de taxa de aquisição de dados de 1.200 Hz, calibrada e certificada pelo fabricante, abrangendo frequências inseridas no intervalo de 0 a 1.000 Hz. O equipamento registra acelerações nos eixos principais *X*, *Y* e *Z*, correspondentes às direções transversal, longitudinal e vertical, armazenando-as em um arquivo de texto na extensão **xlsx*.

Figura 74 – Dispositivo de medição 1: Conjunto de acelerômetros da *Silicon Designs*.



(a)



(b)

Fonte: Próprio autor (2020).

- Acelerômetro 2

Acelerômetro GP2-LX desenvolvido pela SENSAR, apresentado pela Figura 75, com leitura realizada por um sistema de coleta de dados acoplado, comportando taxa de aquisição de dados de 400 Hz, calibrada e certificada pelo fabricante. O dispositivo registra as acelerações nos eixos principais *X*, *Y* e *Z*, correspondentes às direções transversal, longitudinal e vertical, armazenando-as em um arquivo de texto na extensão **csv*.

Figura 75 – Dispositivo de medição 2: Acelerômetro GP2-LX.

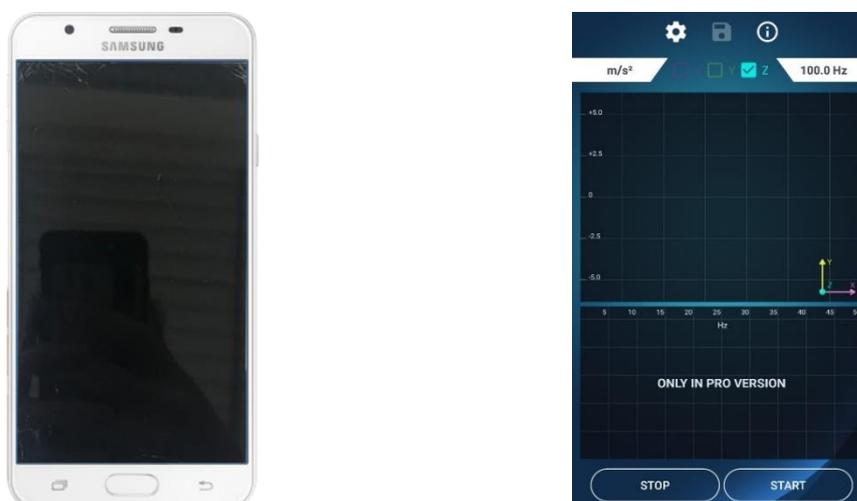


Fonte: Próprio autor (2020).

- Acelerômetro 3

Desenvolvido pela APPtodate para sistemas Android, o aplicativo *myFrequency*, instalado em um Smartphone equipado com acelerômetro, com a interface apresentada pela Figura 76, viabiliza o registro de acelerações nos eixos principais X, Y e Z, os quais comportam respectivamente, as direções transversal, longitudinal e vertical, de forma a analisar em tempo real o sinal medido, determinando o critério de frequência fundamental juntamente com o amortecimento estrutural.

Figura 76 – Dispositivo de medição 3: aplicativo *myFrequency* instalado em Smartphone.



Fonte: Próprio autor (2020).

O Smartphone é munido de um sensor de aceleração *K2HH Accelerometer*, com resolução de 0,0012 m/s² e faixa de amplitude de aceleração dada pelo limite de $\pm 39,2266$ m/s², sendo 100,0 Hz a máxima taxa de aquisição de dados do espectro de frequência, a qual registra 100 (cem) amostras por segundo. Aponta-se que, a determinação da taxa de aquisição de dados é calibrada manualmente pelos usuários.

Para a determinação da taxa de amostragem máxima do Smartphone, o referido aplicativo aplica a Equação 34, devendo-se sempre atentar para que a taxa seja adequada para mapeamento no espectro das frequências desejadas.

$$f_{nyquist} = \frac{f_{sample}}{2} \quad \text{Equação 34}$$

Onde:

- $f_{nyquist}$ – Frequência máxima detectável pelo sensor, em Hertz (Hz);
- f_{sample} – Taxa de amostragem máxima do dispositivo, em Hertz (Hz).

Acerca dos três dispositivos de medição descritos acima, denota-se que os sinais são registrados no domínio do tempo, para a análise dos mesmos, o método da *Fast Fourier Transform (FFT)*, também conhecido como Transformada Rápida de Fourier, fora aplicado para a conversão dos sinais no domínio do tempo para o domínio da frequência, viabilizando a análise dos mesmos.

Ainda, salienta-se que a fixação do *Acelerômetro 1* e *Acelerômetro 3* no piso, ocorreu com a aplicação de fita adesiva dupla fase, ao passo que o dispositivo *Acelerômetro 2* empregou-se a dupla face associada com o aparafusamento das extremidades do dispositivo, o qual era apropriado para a realização dessa segunda medida de fixação.

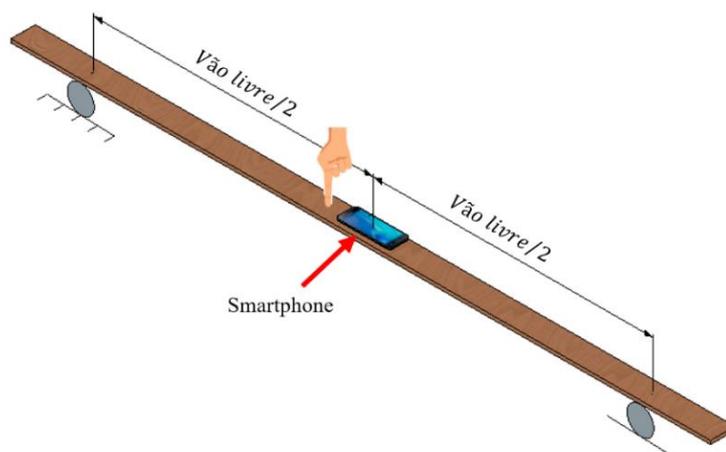
3.3.1 Frequência fundamental das lâminas (f_L) e vigas (f_V)

A determinação do parâmetro dinâmico da frequência fundamental das lamelas de madeira consiste na aplicação do dispositivo identificado por *Acelerômetro 3*, ao passo que para os elementos de vigas de MLC, o *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3* foram admitidos, devendo nos cenários de medição em pauta, ser instalados no ponto central das peças, dado

que para a efetividade das medidas, recomenda-se que os mesmos sejam dispostos nas zonas com maiores níveis de movimentos oscilatórios verticais, correspondentes a área central das estruturas, preferencialmente dentro da faixa de 1/3 e 2/3 de seu comprimento e largura (SANDOVAL, 2015).

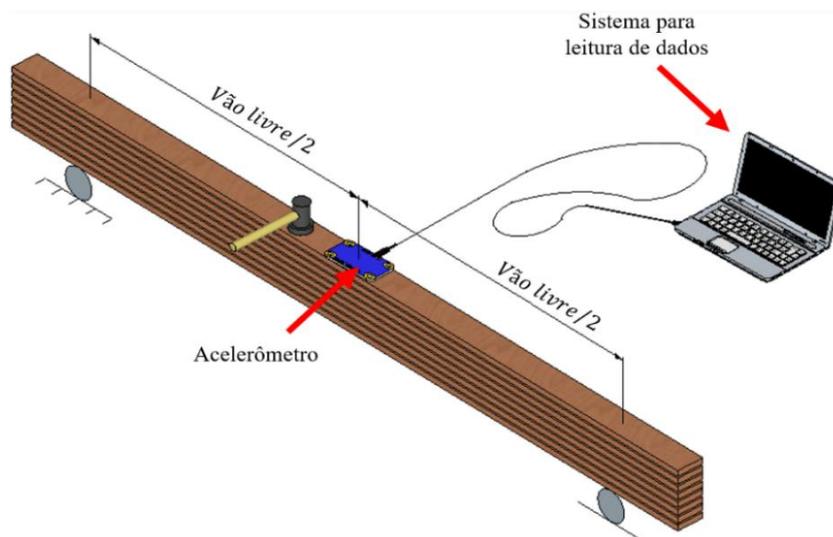
Admitindo-se as lamelas de madeira e as vigas de MLC em condições de suporte biapoiadas, esses elementos são respectivamente estimulados, pela batida do dedo indicador e de um martelo de borracha, em um ponto próximo do meio do vão livre considerado, o registro dos sinais ocorre ao longo de 20 (vinte) segundos em três repetições, sendo a configuração dos referidos ensaios quanto os laminados, apresentada pela Figura 77, ao passo que a Figura 78 e Figura 79, demonstram a configuração do ensaio de frequência natural das vigas de MLC.

Figura 77 – Configuração da medição experimental da frequência natural das lâminas (f_L) com o *Acelerômetro 3*.



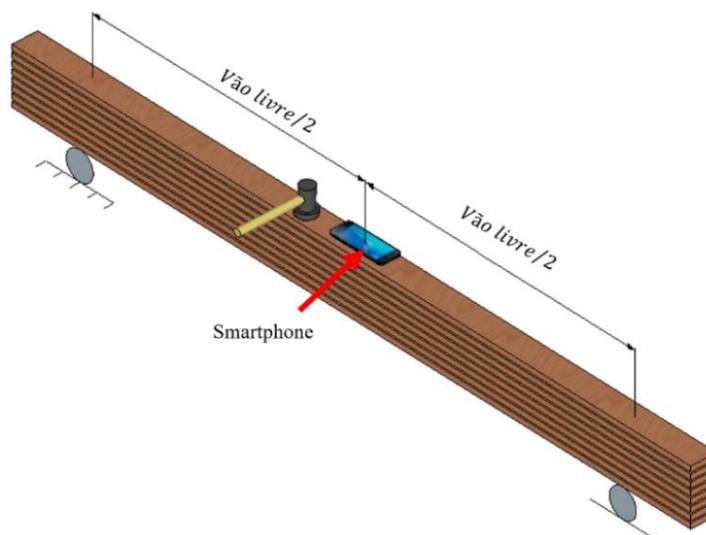
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 78 – Configuração da medição experimental da frequência natural das vigas (f_{VA}), com o *Acelerômetro 2*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 79 – Configuração da medição experimental da frequência natural das vigas (f_{VS}), com o *Acelerômetro 3*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Atrelada à obtenção experimental das frequências fundamentais dos laminados de madeira e das vigas de MLC, a metodologia de previsão analítica proposta pela Teoria Clássica de Vigas fora aplicada. Dado que, para a obtenção experimental configurou medições na condição de flexão, com ambas extremidades simplesmente apoiadas, a

Equação 35 descreve a referida proposição analítica para essas circunstâncias (CLOUGH; PENZIEN, 2010; SORIANO, 2014).

$$f = \frac{\pi^2}{2\pi} * \sqrt{\frac{E * I}{m * l^4}} \quad \text{Equação 35}$$

Onde

- E – Módulo de elasticidade, em $(Kg * cm)/s^2$;
- I – Momento de inércia da seção do elemento estrutural, em cm^4 ;
- m – Massa do elemento estrutural, em Kg/cm ;
- l – Vão livre considerado, em cm .

3.3.2 Frequência fundamental do piso (f_p)

A metodologia acerca da obtenção do parâmetro de frequência fundamental do sistema estrutural do piso proposto, comporta testes de estímulo dinâmico do mesmo por intermédio da prática de atividades humanas habituais, como o caminhar, correr e saltar, por indivíduos de teste que representam ocupantes ativos das edificações, posto que eles próprios realizam as referidas atividades, a contraponto de ocupantes passivos ou estacionários, os quais encontram-se sentados ou em pé sobre o sistema estrutural do piso, quando outro ser humano pratica as ações cotidianas humanas (ZHANG, 2017). Associado às referidas atividades humanas, o teste de impacto de calcanhar, internacionalmente conhecido como *Heel drop test*, também será realizado.

Para tanto, as medições experimentais atreladas à frequência fundamental do piso (f_p) em análise, são fragmentadas em quatro fases distintas, essas descritas pelo Quadro 6 na ordem em que serão desenvolvidas experimentalmente.

Quadro 6 – Descrição das fases de medição, para a determinação da frequência fundamental do piso.

Fase	Identificação	Descrição
1	Teste de caminhada individual	Dois indivíduos de teste caminham sobre o piso de modo individual, tomando o sentido longitudinal do mesmo como percurso.
2	Teste de caminhada em grupo	Grupo de dez indivíduos de teste caminham aleatoriamente sobre o piso.
3	<i>Heel drop test</i>	Um único indivíduo de teste executa o teste de impacto de calcanhar sobre o piso, em nove pontos preestabelecidos.
4	Teste de atividades humanas	24 indivíduos de teste executam individualmente, o ato de caminhar, correr e saltar, bem como o teste de impacto de calcanhar sobre o piso, ao longo de um percurso longitudinal e outro transversal.

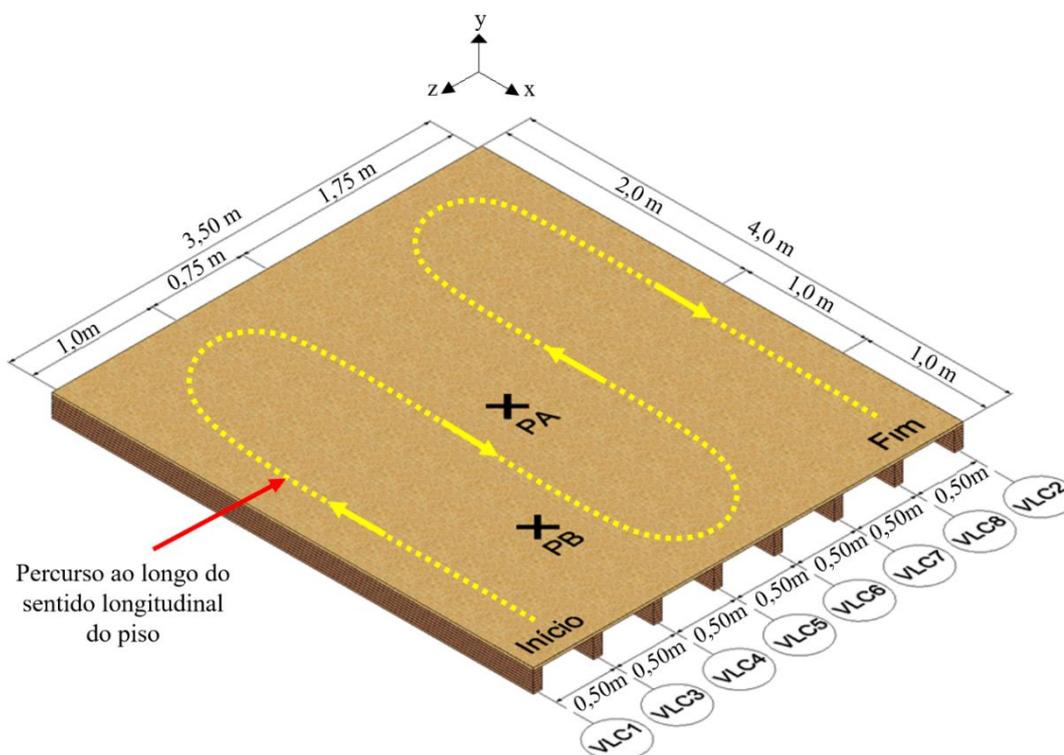
Fonte: Próprio autor (2020).

3.3.2.1 Fase 1: Teste de caminhada individual

Sendo a atividade humana de caminhar categorizada como o esforço mais comum a ocorrer sobre sistemas estruturais de pisos (CHEN; XU; ZHANG, 2014), a primeira fase atrelada a determinação da frequência fundamental do piso em análise, comporta a execução da ação de caminhar por um indivíduo de teste do sexo masculino e outro do sexo feminino.

Como os seres humanos caminham aleatoriamente pelos espaços, mudando de direção e sentido inesperadamente, para a fase de medição em questão, um percurso de caminhada fora preestabelecido, no qual os indivíduos são convidados a caminhar normalmente, em três repetições do ensaio, sem medir o comprimento e ritmo das passadas, visando a efetividade da coleta de dados e da resposta das medições. O referido percurso, exposto pela Figura 80, inicia-se na extremidade esquerda inferior do piso, de modo a atingir o ponto de finalização, localizado no canto direito inferior, pela caminhada ao longo do sentido longitudinal da estrutura, esse correspondente ao maior vão do sistema.

Figura 80 – Percurso ao longo do sentido longitudinal do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

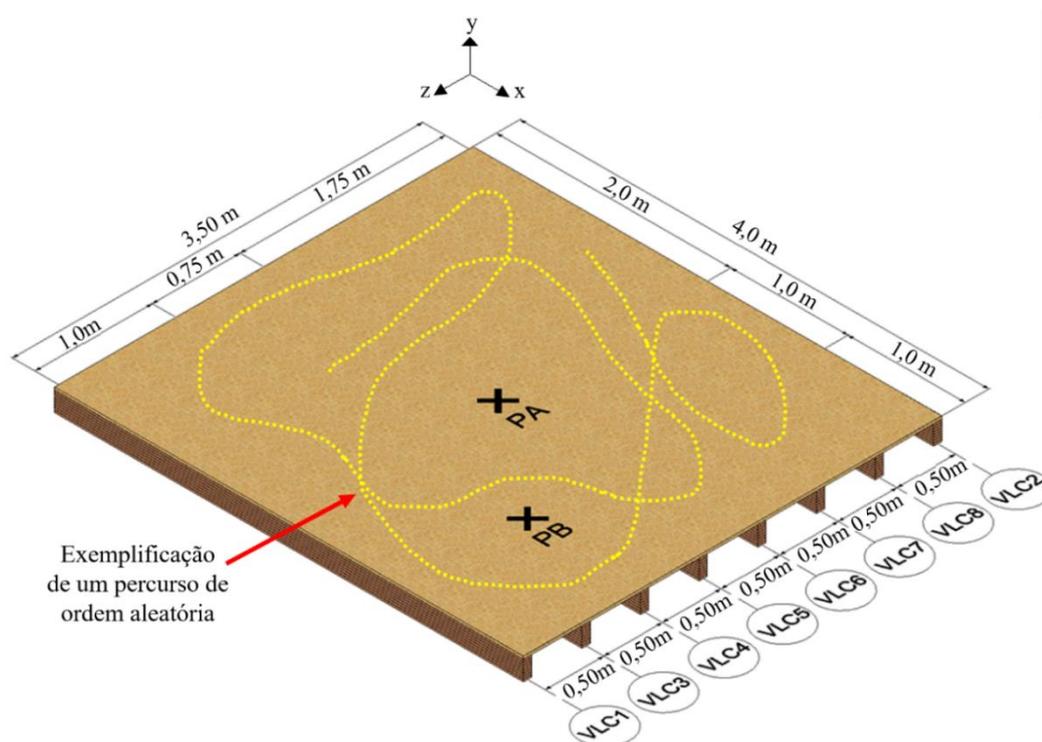
Empregando-se o *Acelerômetro 1*, a determinação da frequência natural da estrutura fora realizada, sendo admitido dois pontos de medição simultânea, identificados como ponto *PA* e ponto *PB*, como pode ser visto na figura acima. Denota-se que, o ponto *PA* está situado no ponto central do piso (2,0m x 1,75m), ao passo que o ponto *PB* encontra-se situado a uma distância de um metro de comprimento e 0,75 metros de largura em relação ao primeiro ponto, próximo à extremidade esquerda inferior da estrutura, configuração adotada visando a avaliação da existência de contraste entre os valores obtidos da frequência natural, coletados simultaneamente para ambos os pontos de medição.

3.3.2.2 Fase 2: Teste de caminhada em grupo

Associada à primeira fase de medição da frequência natural do piso com vigas de Madeira Laminada Colada, a segunda fase comporta a aferição do referido parâmetro dinâmico quando originado pela caminhada de um grupo de pessoas, esse composto aleatoriamente, por 10 (dez) indivíduos de teste.

Nesse cenário, a contraponto da adoção de um determinado percurso na Fase 1, todos os indivíduos são convidados a caminhar normalmente sobre o piso ao longo de três repetições do ensaio, essas com 10 (dez) segundos de duração, através de percursos aleatórios, iniciados na localização em que o indivíduo desejar, de modo a mudar de direção e sentido quando necessário, evitando possíveis choques com os demais indivíduos de teste ou quedas do piso, como o percurso exemplificado pela Figura 81.

Figura 81 – Exemplificação de um percurso de ordem aleatória.



Fonte: Próprio autor (2020).

Como visualizado, na Fase 2 foram considerados os mesmos pontos de medição adotados pela Fase 1 de medição, esses identificados como ponto *PA* e ponto *PB*, de forma a ser novamente empregado o *Acelerômetro 1*.

3.3.2.3 Fase 3: *Heel drop test*

O *Heel drop test* ou teste de impacto de calcanhar, como também é conhecido, trata-se de uma relevante metodologia de análise de parâmetros dinâmicos de resposta de sistemas

estruturais de piso, uma vez que simula um padrão de excitação dinâmica semelhante a uma pessoa andando ou correndo (AL-FOQAHA'A; COFER; FRIDLEY, 1999; MELLO, 2005), pela queda rápida dos calcanhares de um determinado indivíduo de teste, o qual encontrava-se inicialmente, posicionado com o peso do corpo sobre as pontas dos pés e com calcanhares levantados a uma altura aproximada de 65,0 milímetros do piso (GLISOVIC; STEVANOVIC, 2010), como demonstra a Figura 82.

Figura 82 – Configuração da execução do ensaio de *Heel drop test*.

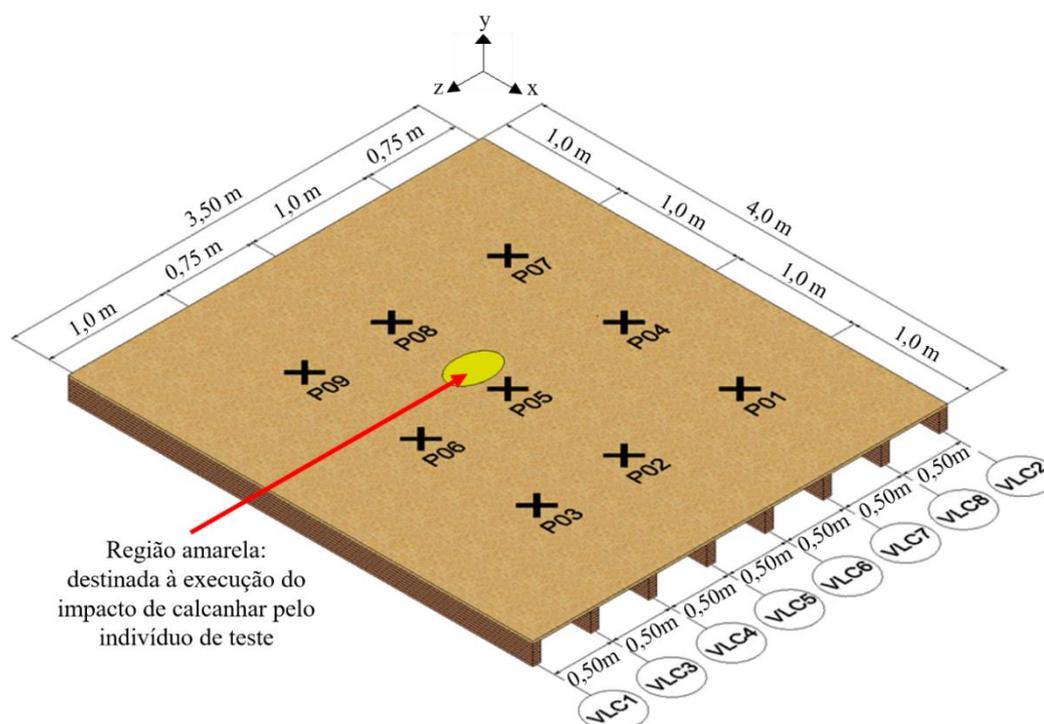


Fonte: Fahmy e Sidky (2012).

Para essa etapa, os dispositivos de medição *Acelerômetro 1*, *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, foram empregados para o registro dos sinais provocados pela atividade de impacto de calcanhar.

Isso posto, considerando-se um total de nove pontos de medição estrategicamente determinados, esses identificados pela nomenclatura *P01* a *P09*, a medição da frequência natural do piso pelos referidos dispositivos, fora dada por uma repetição do *heel drop test* para cada qual, por um único indivíduo de teste situado na região destacada em amarelo, vide Figura 83, relativa ao ponto *P05*, correspondente ao ponto central da estrutura, espaço caracterizado pela ocorrência das maiores deflexões. Deve-se ressaltar que, a área indicada para a realização do estímulo dinâmico em questão, fora determinada de forma a se evitar interferências na coleta de dados, especialmente quanto à ocorrência de impacto dos sujeitos de teste com os equipamentos de medição.

Figura 83 – Identificação e localização dos pontos de medição do *Heel drop test*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Diante disso, com o equipamento *Acelerômetro 1*, realizou-se a medição simultânea de dois pontos, estando os dispositivos instalados na área central de cada ponto de medição, de forma a se considerar a mensuração simultânea do ponto P05 com os demais, a contraponto desse cenário, as medições com o *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3* ocorreu de forma paralela entre ambos dispositivos, os quais foram dispostos lado a lado, dividindo a área central dos pontos, sem que estivessem em contato um com o outro.

Observando-se no sentido longitudinal do piso em ambas as figuras apresentadas acima, denota-se que os pontos P01, P04 e P07 são dispostos no vão entre as vigas VLC7 e VLC8, os pontos P02, P05 e P08 encontram-se localizados na linha central do piso e os pontos P03, P06 e P09 estão situados sobre a viga VLC4, cenário devidamente estabelecido com o intuito de aferir a existência de divergências entre os valores da frequência fundamental do piso, entre as diferentes regiões correspondentes à cada ponto de medição.

3.3.2.4 Fase 4: Teste de atividades humanas

A quarta e última fase de determinação da frequência natural do piso, abrange a prática de atividades humanas de caminhar, correr e saltar, essas tratando-se dos esforços dinâmicos comuns e problemáticos a pavimentos de madeira, bem como do *Heel drop test*, o qual simula o padrão de estímulo dinâmico de uma pessoa caminhando ou correndo.

Desta etapa, 24 (vinte e quatro) indivíduos de teste participam, grupo composto aleatoriamente por 58,33% homens e 41,67% mulheres, com idade e o peso médios de 24 anos e 72.4 Kg, cujas características demográficas são apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19 – Características dos indivíduos de teste.

Indivíduo de teste	Gênero	Idade	Peso (K_g)
01	Masculino	28	110
02	Feminino	22	55
03	Masculino	20	91
04	Masculino	20	78
05	Masculino	21	75
06	Masculino	22	76
07	Masculino	23	78
08	Feminino	25	55
09	Masculino	30	105
10	Masculino	31	94
11	Feminino	22	68
12	Masculino	21	74
13	Feminino	21	98
14	Feminino	22	50
15	Masculino	24	72
16	Masculino	55	102
17	Feminino	26	74
18	Masculino	22	76
19	Masculino	21	60
20	Feminino	23	53
21	Feminino	23	62
22	Masculino	24	94
23	Feminino	24	54
24	Feminino	21	50

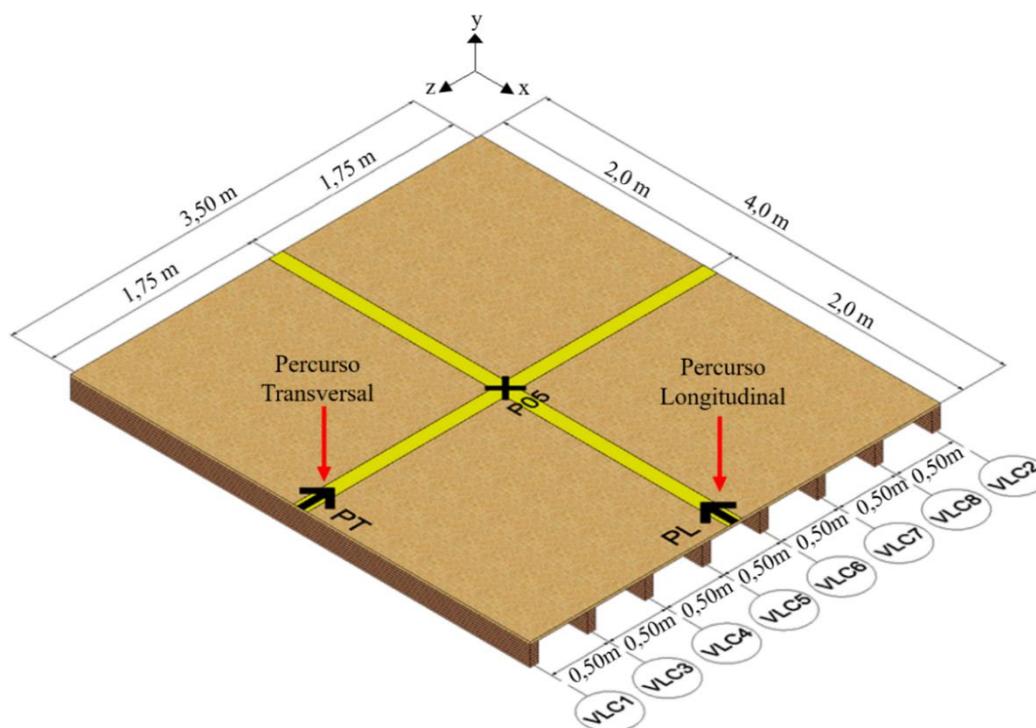
Fonte: Próprio autor (2020).

Aspirando-se pela efetividade de todas as medições atreladas à Fase 4, as atividades citadas anteriormente, são realizadas de modo individual em três repetições, sem que os aspectos naturais e particulares de cada qual, sejam alteradas, como por exemplo, a velocidade e comprimento da passada, além da altura do salto.

Dada a aleatoriedade de direções e sentidos que é atribuída à execução das atividades humanas relatadas acima, percursos destinados às atividades de caminhar e correr foram preestabelecidos, juntamente com a determinação de uma área destinada à realização da ação de saltar e para o teste de calcanhar, todos dispostos de modo a comportar a zona central do sistema estrutural, essa caracterizada pela ocorrência de maiores deflexões.

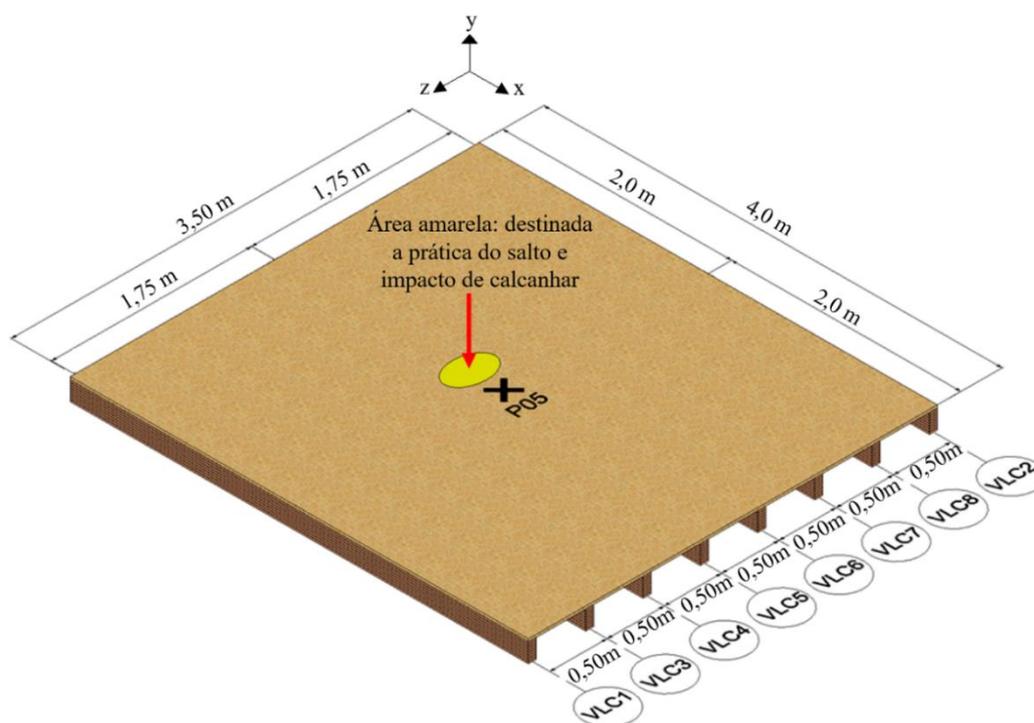
Para as ações de caminhar e correr, foram definidos dois percursos retilíneos, conforme Figura 84, o primeiro paralelo ao comprimento do piso, identificado como percurso longitudinal (*PL*), ao passo que o outro percurso é perpendicular à referida dimensão, esse nomeado como percurso transversal (*PT*). Quanto às ações de saltar e impacto de calcanhar, foram realizadas de modo estacionário, somente considerando movimentações de elevação vertical do corpo, na região apontada pela Figura 85.

Figura 84 – Percursos longitudinal (*PL*) e transversal (*PT*), destinados a prática das atividades de caminhada e corrida.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 85 – Área destinada a prática das atividades de salto e impacto de calcanhar.



Fonte: Próprio autor (2020).

Observa-se que o ponto de medição admitido na Fase 4, trata-se do ponto identificado com *P05*, com mesma nomenclatura do ponto central de medição considerado pela Fase 3. Para tanto, as metodologias de aferição com aplicação do *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3* foram empregadas simultaneamente, sendo os dispositivos instalados lado a lado, sem contato direto entre ambos. Nesse cenário, os indivíduos de teste foram orientados a praticar as atividades nas áreas devidamente demarcadas, sem que impactos diretos com os equipamentos ocorressem, situação que provocaria a interferência na coleta de dados.

3.3.3 Amortecimento do piso (ξ)

O amortecimento estrutural trata-se de uma propriedade extremamente relevante aos sistemas estruturais de pisos, posto que é responsável pela minimização das amplitudes das vibrações de ordem livre e forçada (TADEU, 2015; WECKENDORF *et al.*, 2016). Logo, para a obtenção do amortecimento do sistema estrutural proposto, empregou-se o método do decremento logarítmico, discutido na subseção 2.1.1, o qual determinada analiticamente o parâmetro do amortecimento, através da análise do sinal vibratório no domínio do tempo.

Assim sendo, os sinais vibratórios obtidos pela prática do caminhar, por um grupo composto aleatoriamente por 10 (dez) sujeitos, bem como pela execução individual de atividades humanas de caminhar, correr, saltar e impacto de calcanhar, por 24 indivíduos de teste, circunstâncias vinculadas respectivamente, à segunda e quarta fase de determinação da frequência natural do piso, explanadas na subseção 3.3.2, foram empregados para a determinação experimental do amortecimento da estrutura em pauta.

3.3.4 Avaliação do conforto quanto às vibrações

A vibração de sistemas estruturais de pisos, à qual os seres humanos estão sujeitos nas edificações, são em grande parte, provocadas pelas atividades humanas dos próprios ocupantes, como já explanado. Assim sendo, quando as vibrações ultrapassam o limiar da percepção humana, afetam negativamente os indivíduos que as provocam bem como os demais habitantes, através da redução do conforto e qualidade de vida (ISO, 2003).

Por intermédio de verificações de projeto atreladas ao Estado Limite de Serviço (ELS), o qual comporta critérios de segurança relacionados ao conforto dos usuários, além de critérios voltados à durabilidade estrutural e estética, os esforços vibracionais são devidamente identificados e verificados, de forma a garantir a coibição de sua ocorrência.

A normativa brasileira para estruturas em madeira, quando em contraste com demais documentos normativos vigentes, como visualizado na seção 2.1.5, apresenta caráter brando em suas verificações do estado limite de vibrações, as quais unicamente indicam que os pisos devem apresentar frequência natural superior a 8 Hz, a contraponto dos demais códigos citados, onde a verificação das vibrações demanda do envolvimento da associação da frequência fundamental com outro parâmetro, como por exemplo, a deflexão do piso e a velocidade de resposta aos impulsos dinâmicos.

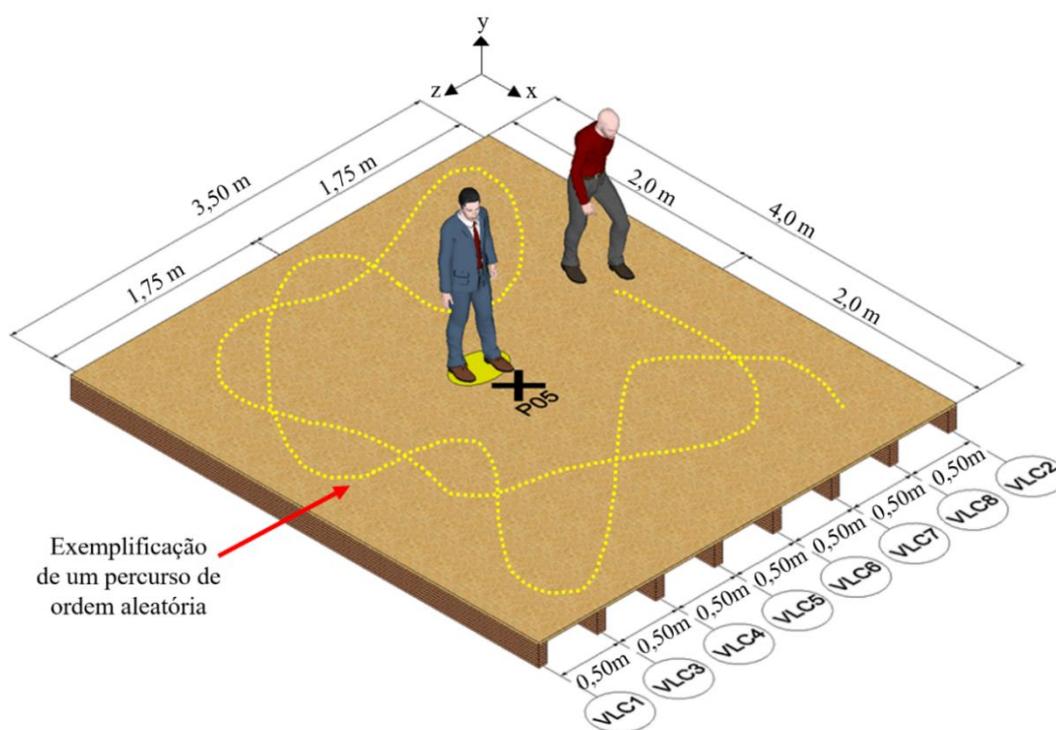
Diante disso, o objetivo principal do experimento em questão, é classificar a estrutura em análise, por intermédio de uma avaliação subjetiva de vibrações provocadas por atividades humanas, considerando-se como fator de avaliação a frequência natural e a categorização do conforto e da aceitabilidade das mesmas por indivíduos de teste, de forma a se avaliar o atendimento das recomendações da normativa brasileira.

Para atender o referido objetivo, o procedimento experimental 3 comportou a participação dos 24 (vinte e quatro) indivíduos de teste, considerados para a Fase 4 do segundo experimento de determinação da frequência fundamental do piso, para os quais fora

designado o papel de ocupante estacionário, cuja atribuição é experienciar as vibrações do piso, quando estimulado quando estimulada dinamicamente por outro sujeito praticante das atividades de impacto de calcanhar, caminhada, corrida e salto.

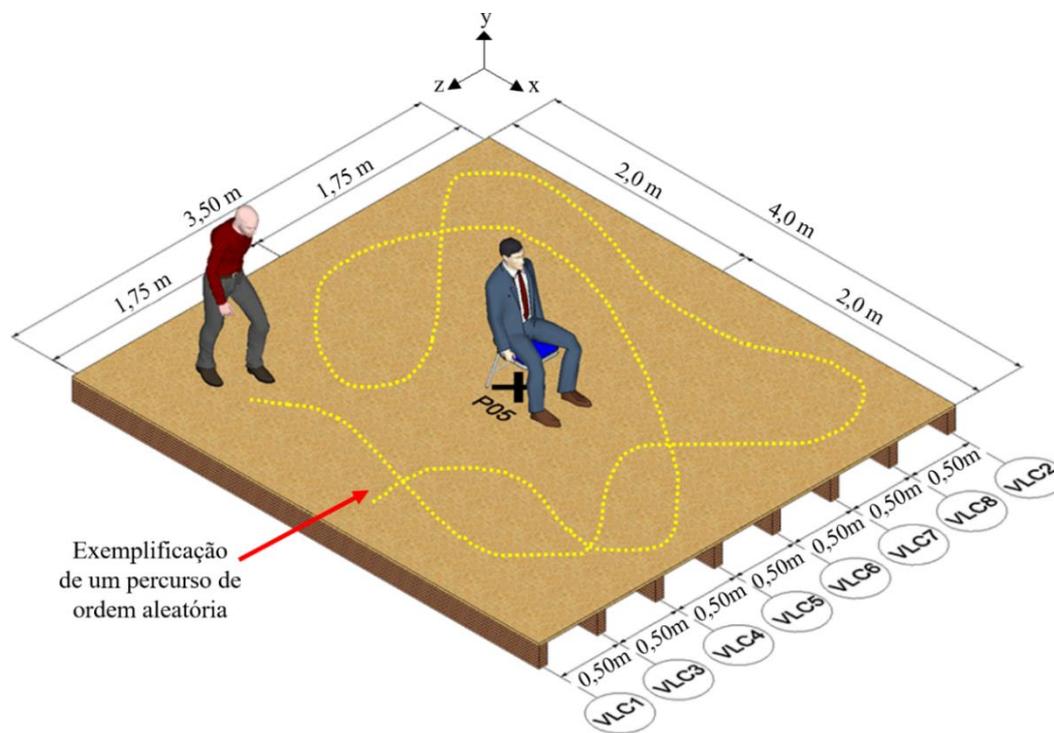
Nesse contexto, dois estágios de medição e experienciação das respostas de vibração foram considerados, o primeiro admitindo os indivíduos de teste em pé como exemplificado pela Figura 86, ao passo que para o segundo estágio, unicamente fora modificada a postura do sujeito de teste, o qual agora encontra-se sentado em uma cadeira com encosto e assento estofados, vide Figura 87. Para tanto, também fora considerado nesse cenário, o ponto de medição *P05*, relativos às Fase 3 e Fase 4, do procedimento experimental 2, estando sobre o mesmo, instalado do *Acelerômetro 2*, para o registro dos sinais das vibrações provocadas.

Figura 86 – Configuração da avaliação da vibração do piso, com indivíduo de teste em pé.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 87 – Configuração da avaliação da vibração do piso, com indivíduo de teste sentado em uma cadeira.



Fonte: Próprio autor (2020).

Ressalta-se que, percursos de ordem aleatória foram definidos para ambas etapas de medição, quando as ações de caminhar e correr forem executadas, em virtude de se promover um cenário próximo ao real encontrado em edificações, onde os ocupantes tomam variados caminhos, mudando de sentido e direção de forma inesperada. Quanto às atividades de salto e impacto de calcanhar, as mesmas foram realizadas em pontos aleatórios do piso, sem a predefinição de uma localização específica.

Em concordância com o objetivo do experimento, a medição da frequência natural do piso, fora associada ao preenchimento de um questionário online, disponibilizado aos indivíduos de teste e apresentado na íntegra no Apêndice C, de modo que as características demográficas, quanto à gênero, idade e peso do grupo de teste fossem coletadas bem como as vibrações vivenciadas pelos mesmos ao longo desse experimento, fossem avaliadas no domínio do conforto, categorizado pelo incômodo gerado pelas vibrações, bem como no domínio da aceitabilidade das mesmas. Para tanto, as perguntas desenvolvidas para ambos os campos admitidos na análise subjetiva das vibrações, abrangem uma escala, exposta pelo

Quadro 7, com seis níveis de classificação, em conformidade com a pesquisa subjetiva desenvolvida por Negreira *et al.* (2015).

Quadro 7 – Níveis de classificação admitidos para a avaliação do conforto e aceitabilidade das vibrações, por questionário.

Avaliação do conforto	Avaliação da aceitabilidade
• Não é desconfortável	• Definitivamente não é aceitável
• Um pouco desconfortável	• Pouco aceitável
• Razoavelmente desconfortável	• Razoavelmente aceitável
• Desconfortável	• Aceitável
• Muito desconfortável	• Muito aceitável
• Extremamente desconfortável	• Definitivamente aceitável

Fonte: Próprio autor (2020).

3.3.5 Modelagem numérica

Atualmente, a modelagem computacional, como ferramenta numérica, permite que qualquer tipologia de sistema estrutural seja discretizadas matematicamente, de modo a apresentar por intermédio computacional, os referidos sistemas em um cenário muito aproximado de suas condições reais, uma vez que o avanço da tecnologia possibilitou a melhoria do processamento de dados para a resolução de cálculos matemáticos, viabilizando a consideração de todas as particularidades dos sistemas estruturais, de modo a auxiliar na avaliação das respostas comportamentais dos mesmos e no reconhecimento de adequados critérios de projeto (MELLO, 2005).

Diante disso, objetiva-se o desenvolvimento de uma análise numérica de ordem modal, na qual nenhuma tipologia de carregamento é imposta ao modelo estrutural, de forma a se determinar o comportamento dinâmico do piso proposto, através dos parâmetros da frequência natural e suas respectivas formas ou modos de vibração, uma vez que cada frequência fundamental instiga distintas conjunturas de deformações na estrutura, de modo a permitir a comparação com as frequências fundamentais obtidas experimentalmente.

Logo, o software comercial ANSYS versão 19.1 fora empregado, o qual faz parte do pacote de softwares da *ANSYS Inc*, sendo aplicada a interface para a linguagem *ANSYS Parametric Design Language*, também conhecida como APDL.

Na elaboração do modelo numérico, visando a simplificação do mesmo, elementos finitos de casca foram aplicados para a discretização das vigas de Madeira Laminada Colada bem como da subestrutura em placas de OSB, respeitando-se as propriedades geométricas bem como o critério físico da densidade e do critério mecânico do módulo de elasticidade dos materiais que compõem a estrutura, os quais são sumarizados nas Tabela 20 e Tabela 21.

Tabela 20 – Dados de entrada das vigas de MLC.

Elemento	Largura (m)	Altura (m)	Módulo de Elasticidade (N/m^2)	Densidade (N/m^3)
VLC1	0,0665	0,1749	$1,5739 \cdot 10^{10}$	7910,40
VLC2	0,0664	0,1738	$1,4975 \cdot 10^{10}$	
VLC3	0,0654	0,1629	$1,4321 \cdot 10^{10}$	
VLC4	0,0654	0,1657	$1,4254 \cdot 10^{10}$	
VLC5	0,0656	0,1649	$1,3873 \cdot 10^{10}$	
VLC6	0,0654	0,1629	$1,4432 \cdot 10^{10}$	
VLC7	0,0654	0,1628	$1,4838 \cdot 10^{10}$	
VLC8	0,0655	0,1631	$1,5524 \cdot 10^{10}$	

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 21 – Dados de entrada das placas de OSB.

Módulo de Elasticidade (N/m^2)	Densidade (N/m^3)	Espessura (mm)
$2,3101 \cdot 10^9$	6159,27	15,0

Fonte: Próprio autor (2020).

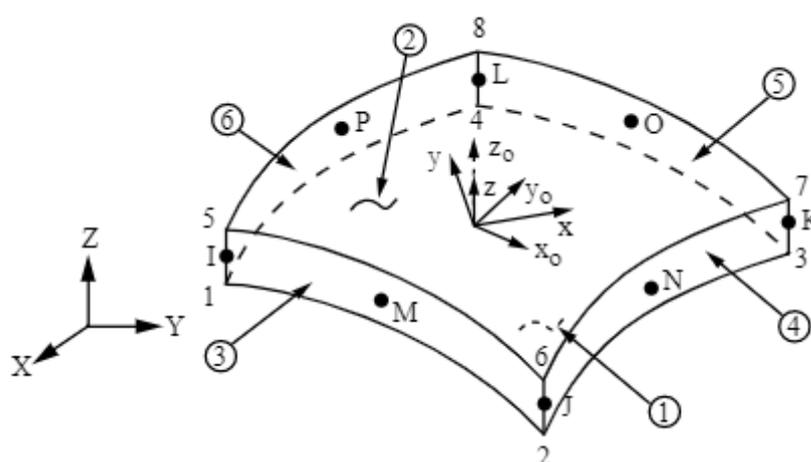
Posto que as vigas moldadas em laboratório não foram aplainadas para a uniformização de suas dimensões, cenário que proporcionaria perdas relativas de seções,

dados que os laminados apresentavam pequenas variações de largura e espessura, para a modelagem numérica foram considerados os valores médios das seções transversais das vigas de MLC, expostos pela tabela acima, esses determinados através da aferição de 20 (vinte) pontos ao longo do comprimento (l) das vigas.

Acerca da propriedade do Coeficiente de Poisson (ν), o qual representa a relação entre a deformação elástica tangencial e a deformação longitudinal dos materiais, outro parâmetro mecânico necessário ao desenvolvimento do procedimento em pauta, para as vigas de MLC em madeira de *Pinus* e as placas de OSB, admitiu-se o valor padrão de 0,30, consoante aos valores aplicado na modelagem desenvolvida na pesquisa de Ebadi, Doudak e Smith (2019).

Para tanto, a discretização fora dada pela aplicação do elemento de casca *shell281*, o qual é considerado adequado para a análise de estruturas com espessura fina a moderadamente espessas. A Figura 88 apresenta a geometria do elemento *shell281*, esse composto por seis faces indicadas pelos algarismos circulados, bem como por oito nós, identificados pelas letras *I, J, K, L, M, N, O* e *P*, cada qual comportando seis graus de liberdade correspondentes às translações nos eixos x, y e z , e rotações em torno dos mesmos eixos.

Figura 88 – Geometria do elemento *SHELL281*.



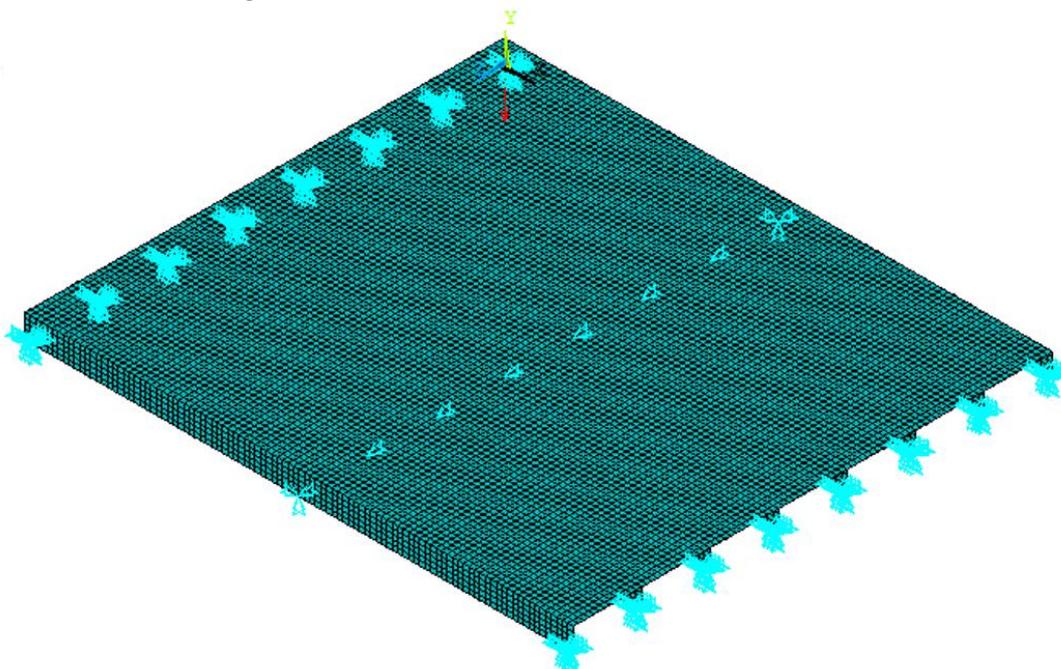
Fonte: Adaptado de ANSYS (2018).

Levando-se em consideração, o fato de que a densidade da malha em modelos de elementos finitos opera como um fator determinante para a obtenção de resultados efetivos,

associada às propriedades geométricas do piso juntamente com o espaçamento entre vigas estabelecido, para a discretização dos elementos de vigas de MLC e das placas de OSB, adotou-se elementos quadráticos especificamente de 5,0 x 5,0 centímetros.

Aliada a esses fatores, admitiu-se como condições de suporte da estrutura, para as bordas compostas pelas extremidades das vigas de MLC, essas apoiadas sobre as vigas de suporte em aço, restrições dos movimentos de translação nos eixos x e y para todas as vigas de MLC, nas quais 8,0 centímetros em cada extremidade eram considerados nessa circunstância, esses relativos à região de contato das mesmas com as vigas de suporte. Assim sendo, a Figura 89 ilustra a estrutura modelada numericamente. Atesta-se que a restrição do movimento no meio das vigas, trata-se de uma medida adotada visando a restrição da movimentação lateral das vigas

Figura 89 – Estrutura do piso modelada numericamente.

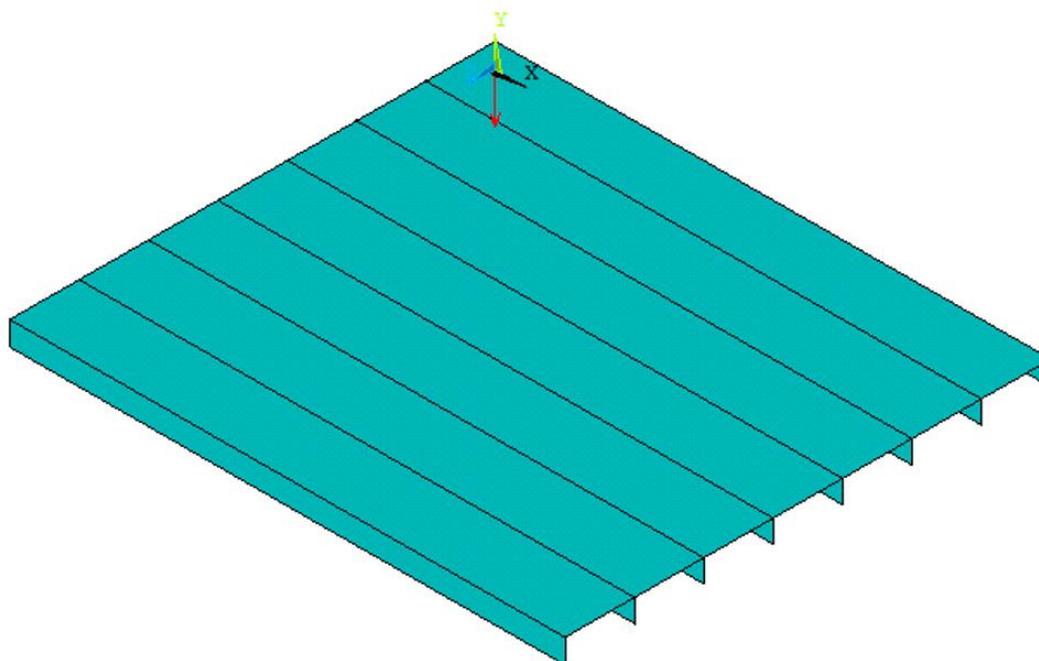


Fonte: Próprio autor (2020).

É importante salientar que na etapa de discretização dos elementos, o plano de corte das placas de OSB não fora considerado. Esse contexto ocorreu devido ao fato de que as peças de OSB comportam peças com dois a quatro apoios, circunstância que requer a discretização de cada elemento, por um tamanho distinto de malha, impossibilitando a conexão direta entre os elementos de vigas e da subestrutura. Ao passo que os parafusos não

foram modelados numericamente, dado que a adoção do padrão de malha de 5,0 x 5,0 centímetros promovia a conexão entre as vigas e a subestrutura, o deck fora modelado considerando as peças de OSB com comprimento de 4,0 metros e largura de 0,50 metros, dimensões correspondentes ao comprimento do piso ao espaçamento entre o eixo das vigas, como exposto pela Figura 90.

Figura 90 – Áreas admitidas para a modelagem das peças de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Esse item apresenta os resultados obtidos pelo desenvolvimento dos métodos de caracterização da madeira e adesivo empregados na confecção do piso proposto e dos procedimentos experimentos realizados para a medição do componente modal de frequência natural (f_p) do piso, admitindo-se variados cenários de excitação dinâmica por atividades humanas, bem como por intermédio da metodologia analítica do decremento logarítmico, da propriedade do amortecimento estrutural (ξ).

Visando a avaliação da confiabilidade dos resultados das referidas propriedades dinâmicas, realizou-se um controle estatístico, comportando a determinação da medida de dispersão de dados pelo coeficiente de variação (CoV), que mede o grau de dispersão dos dados em termos relativos do valor representativo médio, sendo expresso em porcentagem (%), para o qual, quanto mais baixo o seu valor, menor é a dispersão de dados e maior a homogeneidade dos mesmos. Denota-se que, para a pesquisa em pauta, admitiu-se as faixas de valores de coeficiente de variação proposto por Pimentel-Gomes (2009), essas descritas pelo Quadro 8.

Quadro 8 – Descrições do coeficiente de variação (CoV).

Coeficiente de variação (CoV)	Dispersão dos dados	Homogeneidade dos dados
< 10,0%	Baixa	Alta
10,0% a 20,0%	Média	Média
20,0% a 30,0%	Alta	Baixa
> 30,0%	Muito alta	Muito baixa

Fonte: Próprio autor (2020).

4.1 Frequência fundamental das lâminas (f_L) e vigas (f_V)

Em conformidade com o planejamento apresentado na subseção 3.3.1, a determinação experimental da frequência natural média das lamelas de madeira (f_L), fora desenvolvida com estímulo dinâmico provocado pela batida do dedo indicador, como mostrado pela Figura 91, sendo os sinais registrados pelo *Acelerômetro 3*. Deste modo, a

Tabela 22 a Tabela 29 descrevem os resultados acerca da frequência natural estabelecida por vias da determinação experimental e da formulação analítica, respectivamente para as lamelas das vigas VLC1 à VLC8.

Figura 91 – Frequência fundamental das lâminas, medida com *Acelerômetro 3*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 22 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC1.

Lâmina	Método experimental $f_{média}$ (Hz)	Método analítico f_{L_VCL1} (Hz)
L11	3,63	3,73
L12	3,67	4,09
L13	3,23	3,80
L14	3,77	4,25
L15	4,20	4,72
L16	4,17	4,83
L17	3,53	4,03
L18	3,93	4,57
Média (Hz)	3,77	4,25
Desvio padrão (Hz)	0,33	0,41
Coef. variação (%)	8,64	9,73

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 23 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC2.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL2} (Hz)
L21	3,97	4,79
L22	3,73	4,30
L23	3,73	4,22
L24	3,33	3,74
L25	3,80	4,29
L26	4,10	4,56
L27	3,40	3,67
L28	3,53	3,83
Média (Hz)	3,70	4,18
Desvio padrão (Hz)	0,27	0,40
Coef. variação (%)	7,19	9,54

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 24– Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC3.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL3} (Hz)
L31	3,43	3,42
L32	3,70	4,18
L33	2,60	3,02
L34	3,60	3,99
L35	3,57	3,92
L36	2,73	2,88
L37	3,13	3,25
L38	2,63	2,75
Média (Hz)	3,18	3,43
Desvio padrão (Hz)	0,46	0,54
Coef. variação (%)	14,57	15,90

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 25 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC4.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL4} (Hz)
L41	3,53	3,68
L42	3,20	3,32
L43	3,23	3,23
L44	3,73	4,43
L45	3,00	3,03
L46	3,10	3,35
L47	3,67	4,11
L48	3,13	3,31
Média (Hz)	3,33	3,56
Desvio padrão (Hz)	0,28	0,48
Coef. variação (%)	8,38	13,56

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 26 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC5.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL5} (Hz)
L51	3,73	4,05
L52	3,00	3,08
L53	3,57	3,89
L54	2,40	2,57
L55	3,50	3,68
L56	3,27	3,23
L57	2,63	2,73
L58	3,60	3,86
Média (Hz)	3,21	3,39
Desvio padrão (Hz)	0,49	0,56
Coef. variação (%)	15,22	16,63

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 27 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC6.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL6} (Hz)
L61	3,67	3,91
L62	3,27	3,36
L63	3,73	4,06
L64	3,23	3,48
L65	3,00	3,16
L66	3,53	3,33
L67	3,53	3,76
L68	3,53	3,58
Média (Hz)	3,44	3,58
Desvio padrão (Hz)	0,25	0,31
Coef. variação (%)	7,21	8,64

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 28 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC7.

Lâmina	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_{L_VCL7} (Hz)
L71	3,33	3,59
L72	3,23	3,34
L73	3,07	3,03
L74	3,17	3,49
L75	3,70	4,26
L76	3,20	3,37
L77	2,83	3,01
L78	3,77	4,00
Média (Hz)	3,29	3,51
Desvio padrão (Hz)	0,31	0,44
Coef. variação (%)	9,50	12,49

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 29 – Medições da frequência fundamental das lâminas da viga VLC8.

Lâmina	Método experimental $f_{média}$ (Hz)	Método analítico f_{L_VCL8} (Hz)
L81	3,80	3,94
L82	2,73	2,56
L83	3,17	3,12
L84	3,40	3,91
L85	3,30	3,53
L86	3,67	4,14
L87	2,87	3,33
L88	3,67	3,58
Média (Hz)	3,33	3,52
Desvio padrão (Hz)	0,39	0,51
Coef. variação (%)	11,65	14,55

Fonte: Próprio autor (2020).

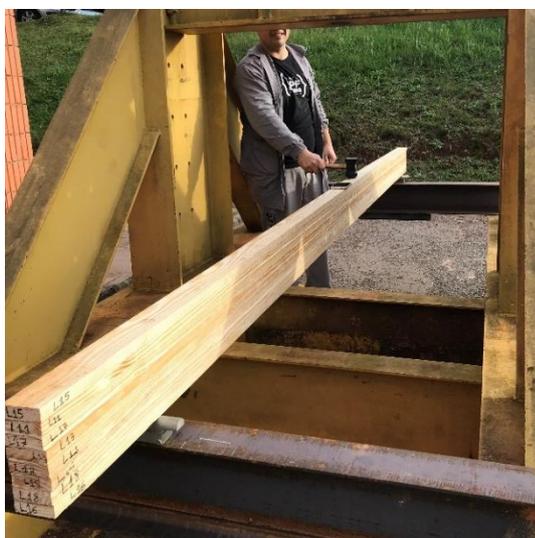
Acerca dos elementos de vigas de MLC, o critério dinâmico da frequência fundamental (f_V), fora coletada perante a medição experimental com o emprego dos *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, respectivamente demonstradas pela Figura 92 e Figura 93, partindo-se se do estímulo dinâmico pelo impacto de um martelo de borracha.

Figura 92 – Frequência fundamental das vigas, medida com *Acelerômetro 2*.



Fonte: Próprio autor (2020).

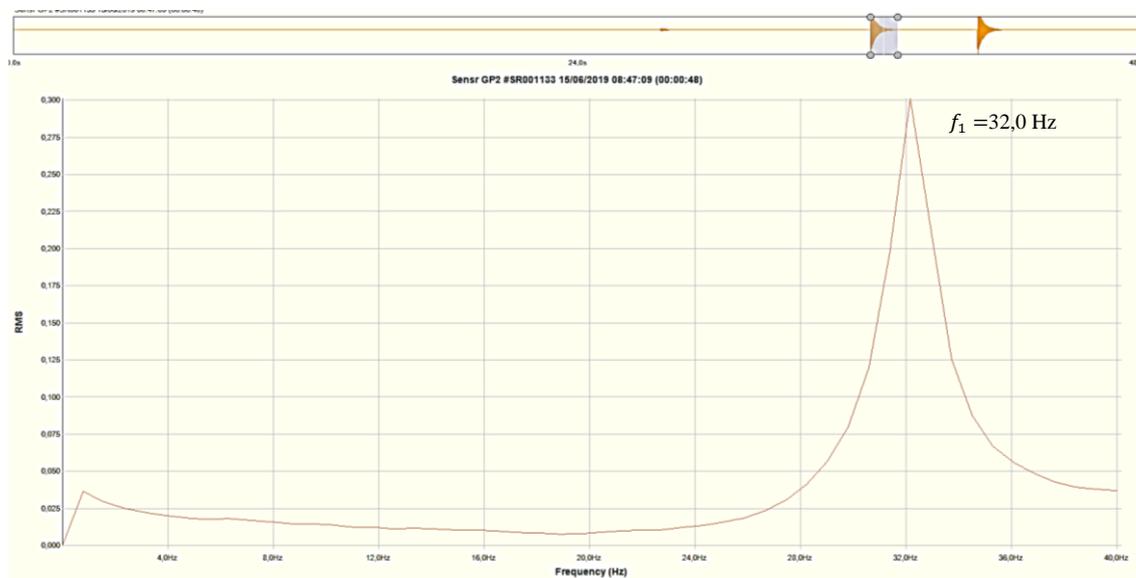
Figura 93 – Frequência fundamental das vigas, medida com *Acelerômetro 3*.



Fonte: Próprio autor (2020).

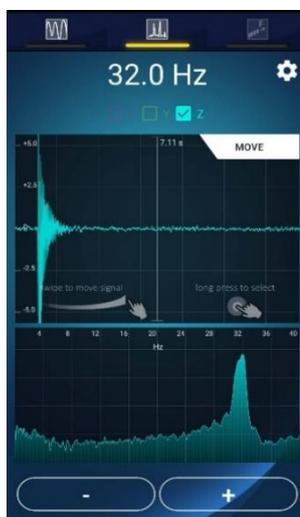
Observando-se a Figura 94 e Figura 95 mutuamente vinculadas à medição da viga VLC1, com o *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, denota-se pelo sinal que ambas as metodologias registraram valores representativos idênticos da frequência natural, circunstâncias que apontaram para a validação do uso do aparelho de Smartphone (*Acelerômetro 3*) como instrumento de medição de sinais vibratórios das demais vigas.

Figura 94 – Sinal vibratório e frequência natural da viga VLC1, pelo *Acelerômetro 2*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 95 – Sinal vibratório e frequência natural da viga VLC1, pelo *Acelerômetro 3*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Associado ao exposto acima acerca da medição experimental, ressalta-se que para a previsão analítica da frequência natural das vigas de MLC, as mesmas considerações de determinação dos critérios geométricos e resistentes, adotadas para os elementos laminados, foram empregadas.

Assim sendo, a Tabela 30 exibe os valores representativos do fator dinâmico da frequência natural das vigas de MLC (f_V), obtidos pelos métodos experimental e analítico.

Tabela 30 – Frequência fundamental das vigas VLC1 à VLC8.

Vigas	Método experimental	Método analítico
	$f_{média}$ (Hz)	f_V (Hz)
VLC1	32,00	28,66
VLC2	28,77	28,58
VLC3	28,30	26,37
VLC4	29,63	26,59
VLC5	28,83	26,23
VLC6	29,73	26,32
VLC7	28,73	26,69
VLC8	29,60	27,38
Média (Hz)	29,45	27,10
Desvio padrão (Hz)	1,15	1,00
Coef. variação (%)	3,92	3,70

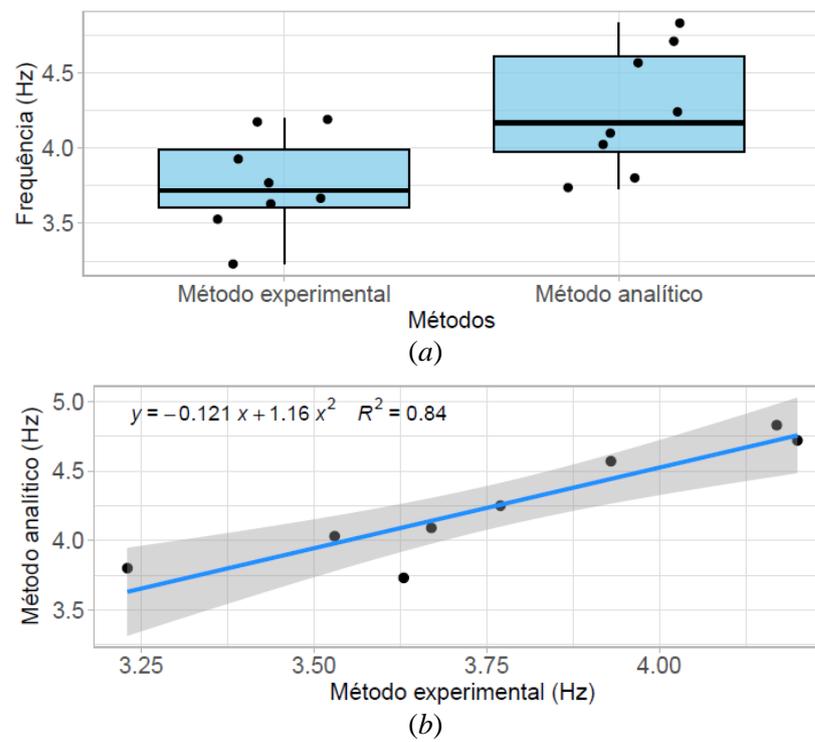
Fonte: Próprio autor (2020).

Perante os resultados apresentados acerca das medições da frequência natural dos laminados de madeira bem como das vigas de MLC manufaturadas respetivamente, ambos os processos realizados de modo experimental por um dispositivo de Smartphone munido do aplicativo *myFrequency* e analiticamente, duas análises estatística foram efetuadas, visando uma adequada aferição dos conjuntos de dados coletados. A primeira análise trata de uma análise de variância ANOVA para nível de significância de 5,0%, ao passo que a segunda comporta o desenvolvimento de uma regressão linear simples, adotada como ferramenta de auxílio na visualização do comportamento, em termos da correlação existente entre os mesmos.

Diante disso, a Figura 96 à Figura 103 plotam em forma gráfica, os resultados obtidos respectivamente para as lâminas das vigas VLC1 à VLC8, enquanto que a Figura 104 traz os resultados das análises estatísticas das vigas de MLC em escala real. Nas referidas figuras,

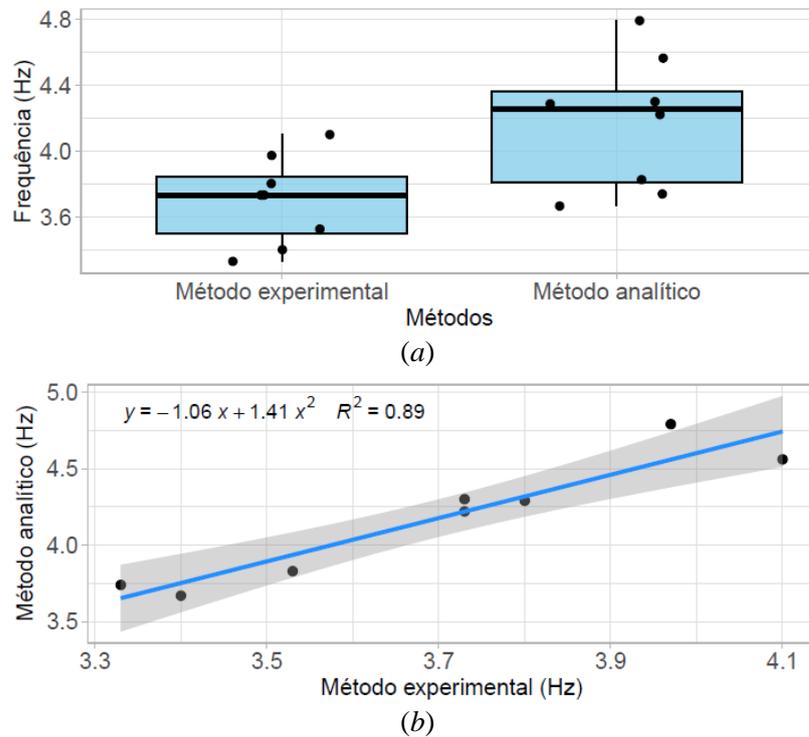
os índices (a) e (b) correspondem à análise de variância ANOVA e à regressão linear simples, respectivamente.

Figura 96 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC1 (f_{L_VCL1}).



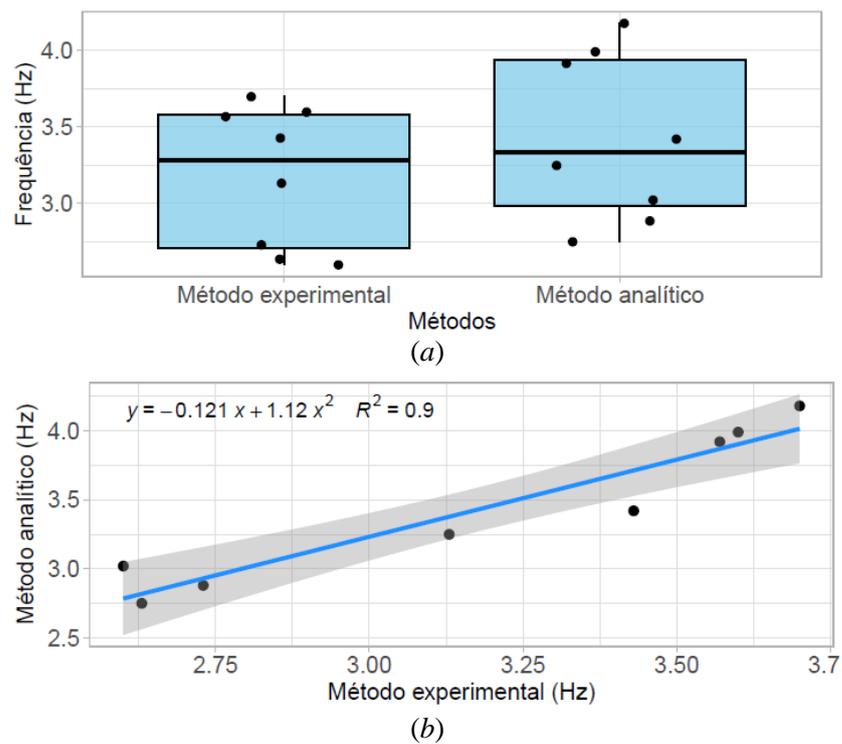
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 97 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC2 (f_{L_VCL2}).



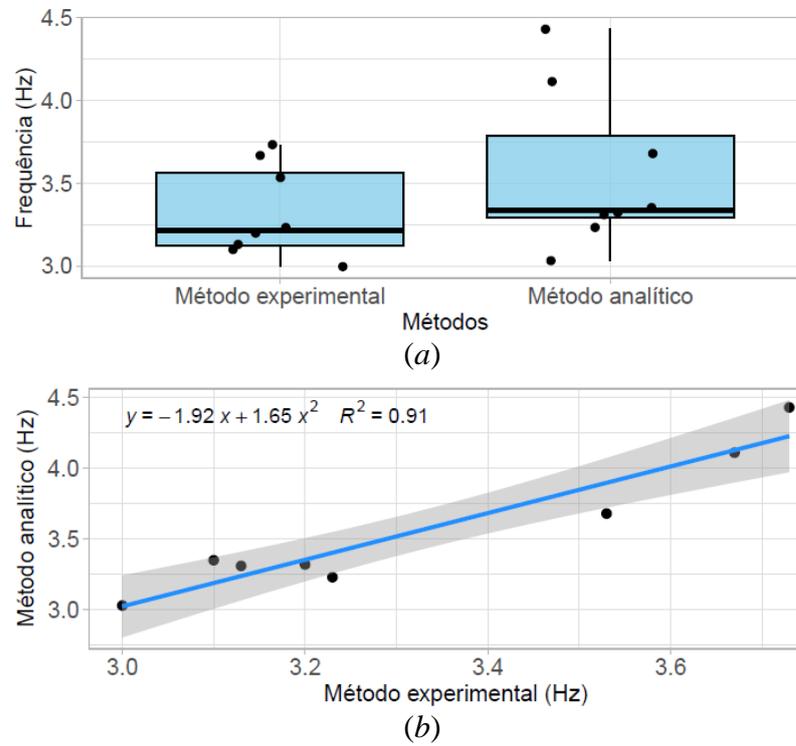
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 98 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC3 (f_{L_VCL3}).



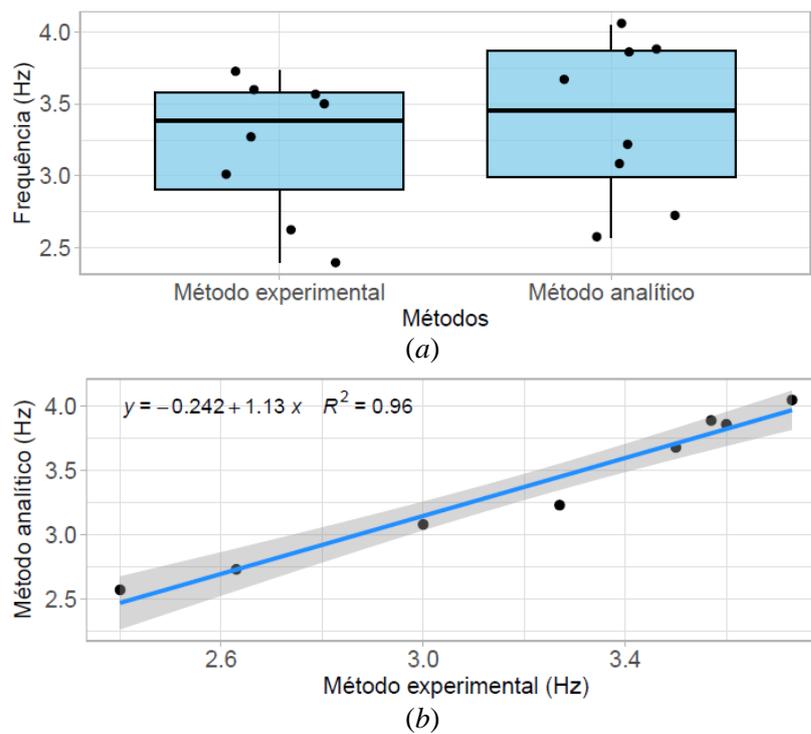
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 99 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC4 (f_{L_VCL4}).



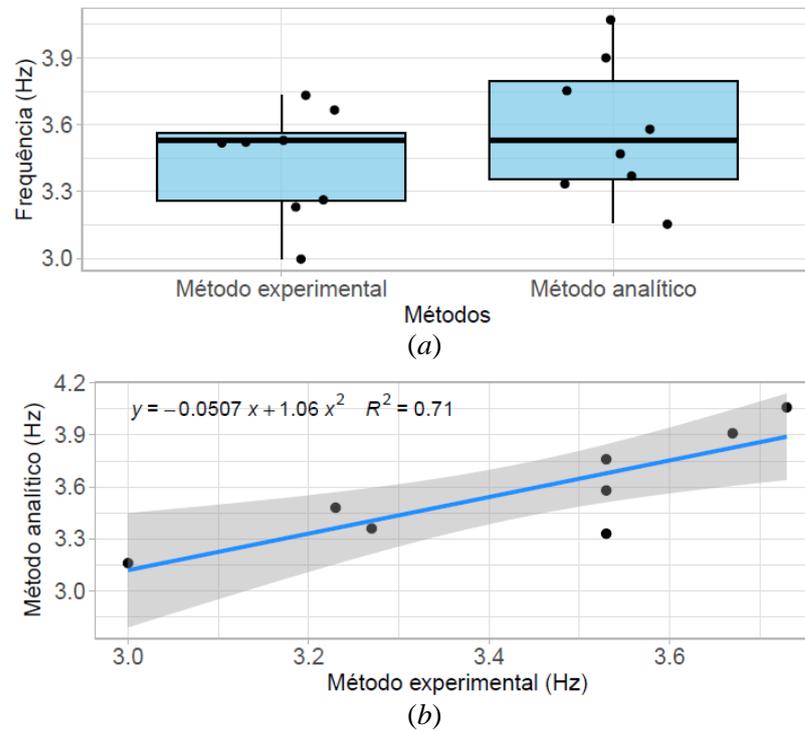
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 100 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC5 (f_{L_VCL5}).



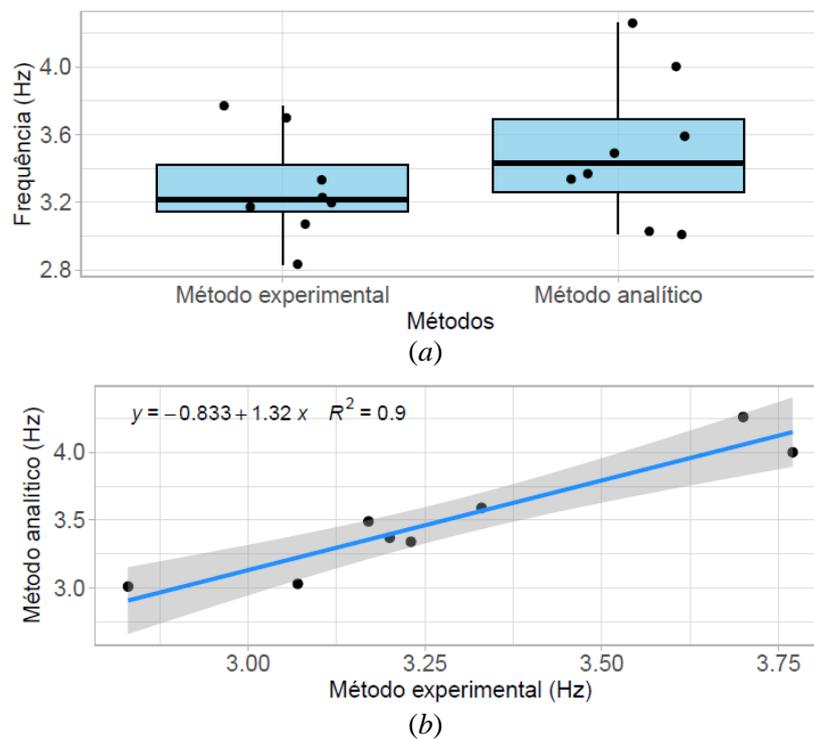
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 101 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC6 (f_{L_VCL6}).



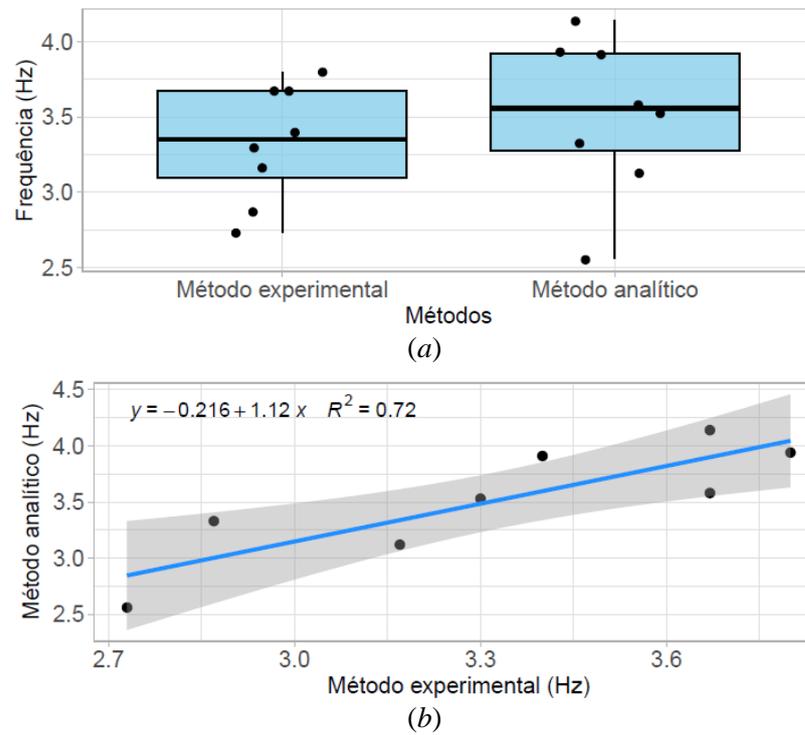
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 102 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC7 (f_{L_VCL7}).



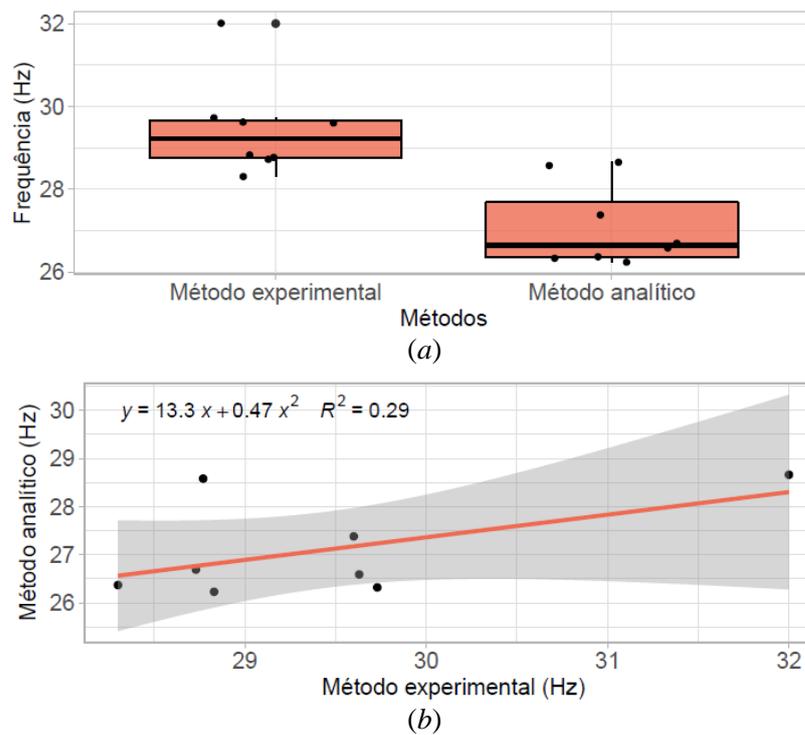
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 103 – Análises estatísticas da frequência fundamental das lâminas da viga VLC8 (f_{L_VLC8}).



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 104 – Análises estatísticas da frequência fundamental das vigas de MLC (f_V).



Fonte: Próprio autor (2020).

Partindo da visualização das apresentações gráficas da análise de variância, atrelada à frequência natural dos laminados de madeira, atesta-se que os conjuntos de dados relativos às vigas VLC3 à VLC8 são categorizados estatisticamente como equivalentes a um nível de significância de 5,0 %, circunstância observada pela disposição das medianas e tendência central correspondentes a cada metodologia de medição, estão projetadas em pontos muito aproximados, no gráfico. A contraponto dessas circunstâncias, as vigas VLC1 e VLC2 apresentam as medianas de tendência central, de cada conjunto de dados, dispostas com elevado contraste, de modo que os conjuntos não atingem validação estatística para o nível de significância de 5,0 %.

Quanto à regressão linear simples, observou-se que a estimativa experimental correlaciona-se fortemente com os dados aferidos pela previsão analítica, dado o fato de que o coeficiente de determinação R^2 abrange valores elevados, inseridos no intervalo de 0,72 a 0,96.

Acerca das análises estatísticas desenvolvidas para a aferição dos conjuntos de dados de frequência das vigas de MLC em escala real, também determinadas de modo experimental e analítico, constatou-se através análise de variância, que os grupos de dados não comportam-se com equivalência estatística a um nível de 5,0% de significância, uma vez que a medição experimental possui baixa variabilidade de dados, esses relativamente superiores aos obtidos pela previsão analítica, a qual é caracterizada por dados com maior variabilidade de valores, condições que apontam à existência de um contraste entre as medianas de tendência central, como visualizado. Aponta-se que, esse contexto é fortemente evidenciado pela análise estatística de regressão linear simples, representada por um baixo coeficiente de determinação, na ordem de 0,29.

Essas circunstâncias evidenciadas, estão diretamente relacionadas com o fato de que peças de Madeira Laminada Colada tratam-se de um material compósito, o qual emprega a associação entre colagem adesiva e madeira para compor elementos com propriedades aprimoradas, de forma que, características como a interação entre a película adesiva e elementos de madeira, bem como o grau de penetração no material, não são consideradas nas previsões de cunho analítico. É importante destacar que, o material adesivo empregado na confecção das vigas de MLC, apresentou alta penetração nas lâminas e caráter expansivo nos períodos de cura.

Para tanto, demarca-se a importância da caracterização não-destrutiva de elementos de madeira projetada em dimensões estruturais quanto aos parâmetros dinâmicos, posto que

determinações analíticas podem operar como um critério indicativo dos mesmos, ao passo que na caracterização experimental, as propriedades reais dos componentes estruturais são devidamente estabelecidas, dada a consideração de todos os fatores envolvidos, cenário que proporciona o aprimoramento da concepção e confiabilidade estrutural, bem como amplificando o aproveitamento sustentável e efetivo de elementos estruturais em madeira.

4.2 Frequência fundamental do piso (f_p)

4.2.1 Fase 1: Teste de caminhada individual

A primeira fase de medições da frequência natural do piso em pauta, comportou a execução da ação de caminhar, ao longo de um percurso no sentido longitudinal do piso, iniciado na extremidade esquerda inferior da estrutura e finalizado no canto direito inferior. por dois indivíduos de teste, cada qual executando três repetições do ensaio, como visualizado na Figura 105 e Figura 106.

Figura 105 – Indivíduo de teste 01, praticando o teste de caminhada individual.



Fonte: Próprio autor (2020).

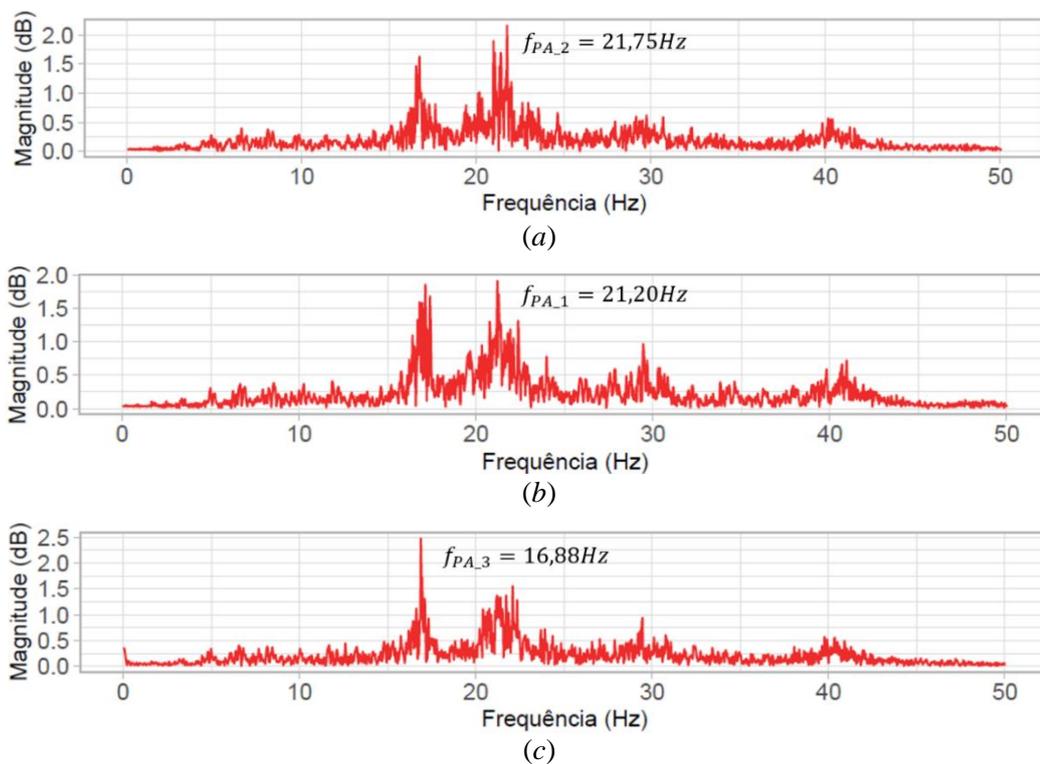
Figura 106 – Indivíduo de teste 02, praticando o teste de caminhada individual.



Fonte: Próprio autor (2020).

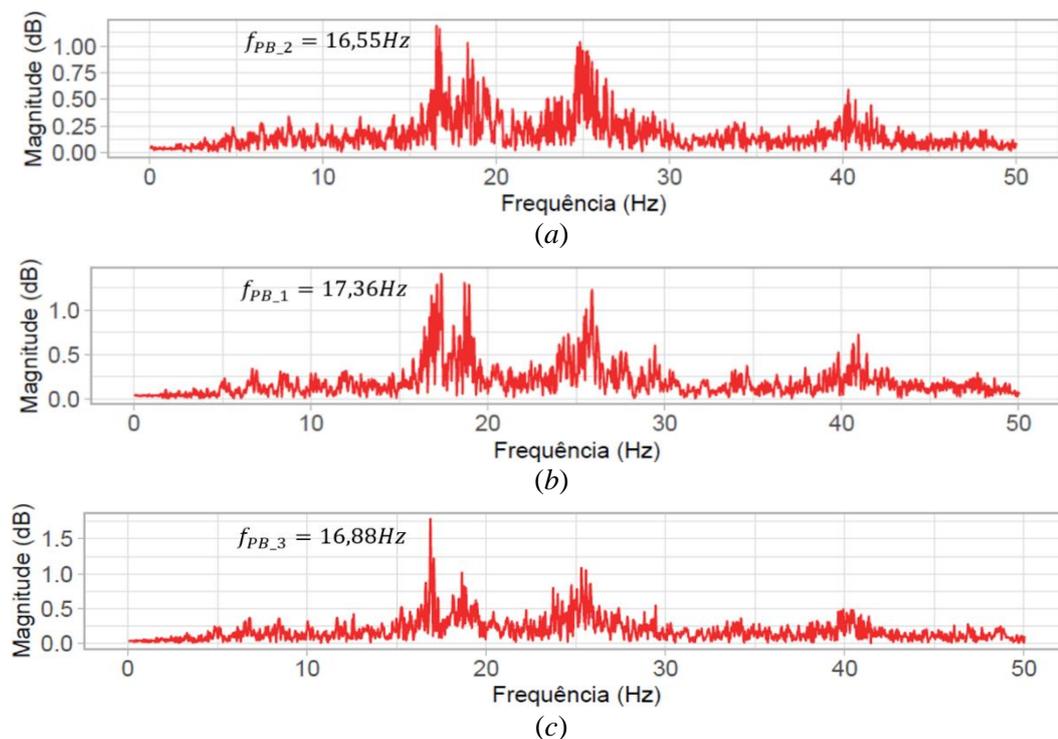
Em conformidade com o planejamento descrito na subseção 3.3.2.1, os sinais gravados pelo equipamento do *Acelerômetro 1*, simultaneamente nos pontos de medição *PA* e *PB*, relativos aos indivíduos de teste 01 e 02, são mutuamente ilustrados de forma gráfica, da Figura 107 à Figura 110, para as quais os índices (*a*), (*b*) e (*c*) fazem alusão às três reproduções do procedimento experimental para cada sujeito de teste, sendo os dados coletados sumarizados pela Tabela 31.

Figura 107 – Frequências naturais do piso no ponto *PA*, devido ao caminhar do *Indivíduo 01*.



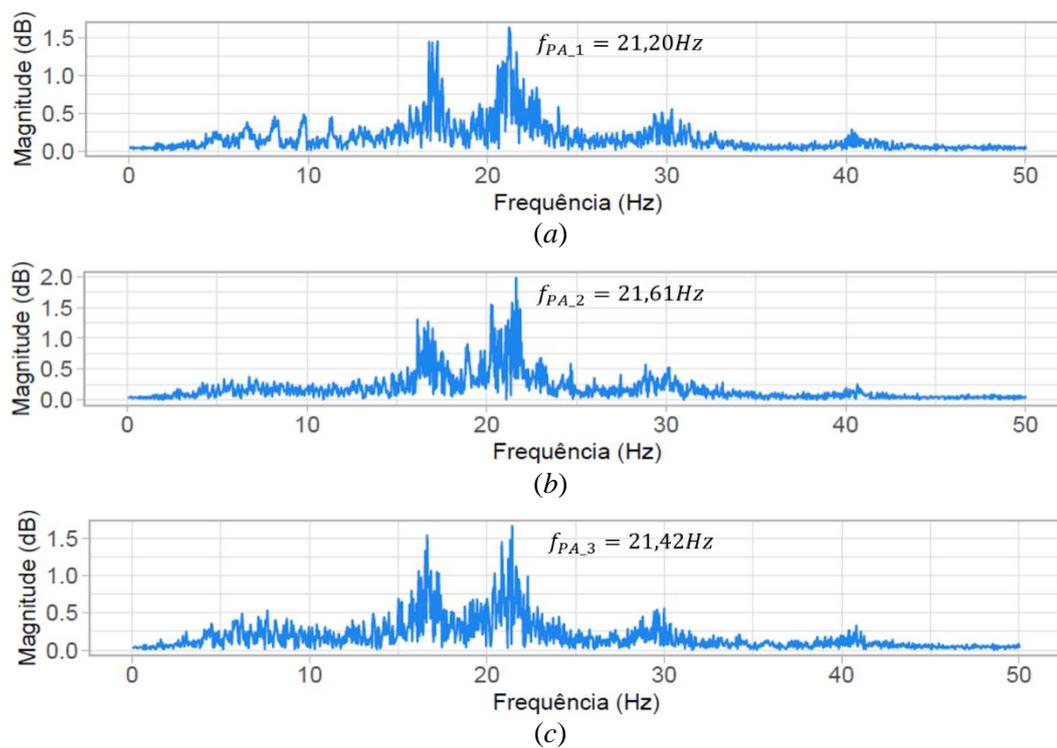
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 108 – Frequências naturais do piso no ponto *PB*, devido ao caminhar do *Indivíduo 01*.



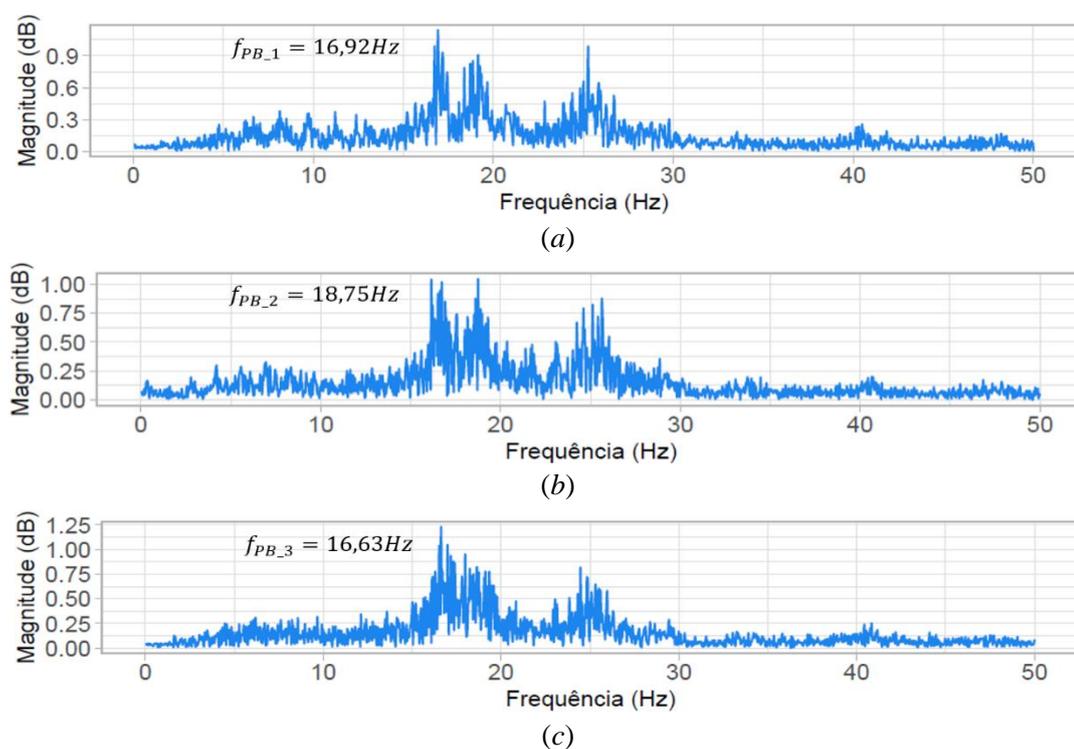
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 109 – Frequências naturais do piso no ponto *PA*, devido ao caminhar do *Indivíduo 02*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 110 – Frequências naturais do piso no ponto *PB*, devido ao caminhar do *Indivíduo 02*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 31 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no sentido longitudinal da estrutura.

Pontos de medição	PA (Hz)	PB (Hz)
Indivíduo 01	21,75	21,20
	16,88	21,42
Indivíduo 02	16,55	16,92
	17,32	18,75
	16,88	16,63
Média (Hz)	20,68	17,88
Desvio padrão (Hz)	1,87	0,82
Coef. variação (%)	9,06	4,58

Fonte: Próprio autor (2020).

Averiguando-se os conjuntos de dados, quanto a medida de dispersão do coeficiente de variação, nota-se que a dispersão dos dados é baixa em relação ao valor tomado como referência, esse tratando-se da média aritmética dos conjuntos, uma vez que os coeficientes de variação expostos pela tabela acima, são inferiores à 10,0%, indicando assim, alta precisão dos resultados coletados.

Em termos dos valores para a frequência natural, denota-se que a medição simultânea dos pontos *PA* e *PB* aponta contrastes entre os valores obtidos, uma vez que, tomando-se como exemplo os primeiros sinais vibratórios apresentados para a caminhada dos dois indivíduos de teste, para o *Indivíduo 01* obteve-se frequência natural de 21,75 Hz e de 16,55 Hz, respectivamente para o ponto *PA* e *PB*, enquanto que nos mesmos pontos de medição, a caminhada do *Indivíduo 02* é caracterizada por frequências de 21,20 Hz e 16,92 Hz, circunstâncias que apontam o estímulo dos dois primeiros modos de vibração da estrutura, dados os picos de frequência observados nas demonstrações gráficas dos sinais vibratórios.

Esses cenários são elucidados pelo fato de que, o primeiro ponto de medição fora situado na região central do piso, relativa ao vão entre as vigas VLC5 e VLC6, ao passo que o segundo encontra-se sobre a viga VLC4, a um metro de distância da extremidade inferior esquerda da estrutura, bem como pela própria natureza humana, posto que a atividade de caminhar possui grande aleatoriedade de características entre os seres humanos, como discutido na subseção 2.1.2.1, cada qual assumindo a marcha e a velocidade eficiente para sua estrutura corporal, sendo a duração das passadas realizadas e o tempo de apoio dos pés

no solo, consequência da variação da idade, da estatura, da função corporal e peso, fatores determinantes na frequência do caminhar e nas reações da estrutura, influenciando diretamente nos parâmetros da excitação dinâmica e em qual forma modal que as estruturas vibram.

4.2.2 Fase 2: Teste de caminhada em grupo

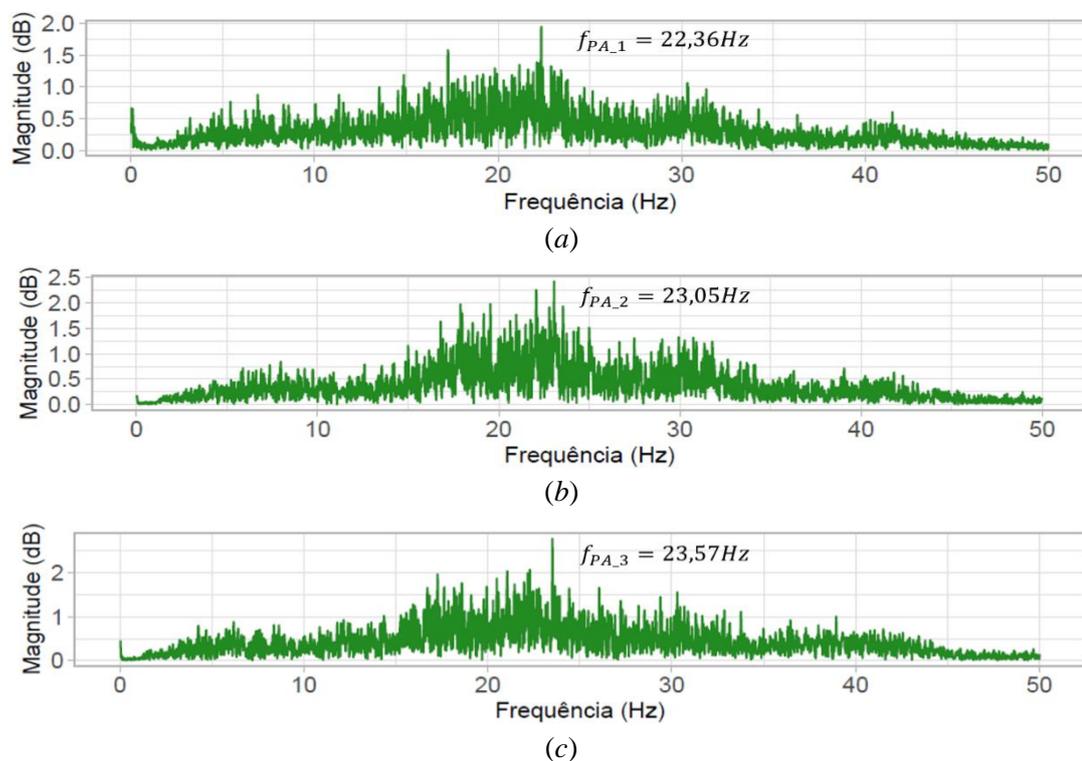
A segunda fase do procedimento experimental ligado a determinação da frequência natural do piso em análise, é diretamente conectada com a fase 1, discutida na subseção acima, devido ao fato de também abordar a atividade de caminhar como carregamento dinâmico, entretanto esse ocasionado por um grupo de dez pessoas formado casualmente, como mostrado pela Figura 111.

Figura 111 – Quadro de dez indivíduos praticando o teste de caminhada em grupo.

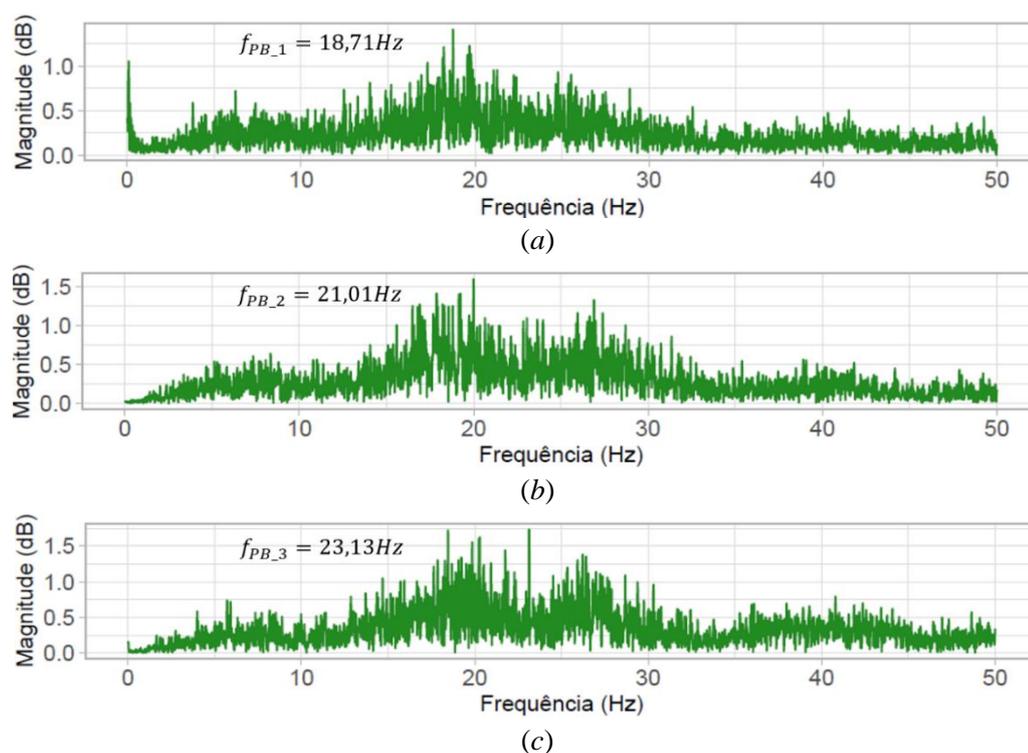


Fonte: Próprio autor (2020).

Como já explanado na subseção 3.3.2.2, os sinais registrados pelo equipamento do *Acelerômetro 1*, concomitantemente nos pontos *PA* e *PB*, são reciprocamente exibidos em formato gráfico, pela Figura 112 e Figura 113, onde a rotulagem (*a*), (*b*) e (*c*) correspondem às três repetições admitidas para o procedimento experimental em discussão. Para tanto, a Tabela 32 apresenta os dados concentrados.

Figura 112 – Frequências naturais do piso no ponto *PA*, devido ao caminhar de um grupo de pessoas.

Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 113 – Frequências naturais do piso no ponto *PB*, devido ao caminhar de um grupo de pessoas.

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 32 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada de um grupo de pessoas.

Pontos de medição	<i>PA</i> (Hz)	<i>PB</i> (Hz)
	22,36	18,71
Grupo	23,05	21,01
	23,57	23,13
Média (Hz)	22,99	20,95
Desvio padrão (Hz)	0,61	2,21
Coef. variação (%)	2,64	10,55

Fonte: Próprio autor (2020).

Analisando-se os dados em termos da medida de dispersão do coeficiente de variação, destaca-se que os resultados do conjunto de dados correspondente ao ponto *PA*, são classificados com baixa dispersão e alta precisão, posto que o valor do *CoV* é inferior à 10,0% e o conjunto comporta somente valores de frequência natural referentes ao segundo modo de vibração da estrutura. A contraponto disso, os dados do conjunto do ponto *PB* são categorizados com dispersão e precisão média, pois o coeficiente de variação encontra-se no intervalo de 10,0% a 20,0%, em virtude desse conjunto comportar frequências fundamentais dos dois primeiros modos de vibração do piso, situação que amplia a região de distribuição dos dados.

A respeito das frequências fundamentais mensuradas, observa-se que a medição paralela dos pontos *PA* e *PB* apresenta a distinção entre os valores obtidos, quadro exemplificado pelos valores referentes à primeira reprodução do ensaio, onde as frequências de 22,63 Hz e 18,71 Hz foram coletadas respectivamente para o ponto *PA* e *PB*, contexto justificado pelas localizações dos pontos de medição sobre o piso, associadas às peculiaridades atreladas à natureza dos seres humanos quando executam o ato de caminhar, como discutido na fase do teste de caminhada individual.

Constata-se ainda que, as frequências naturais provocadas pela caminhada humana em grupo, são superiores às relacionadas com o caminhar individual do teste da fase 1 de medição. Esse contexto ocorre em virtude da interação dinâmica significativa da massa dos sujeitos de teste para com o sistema estrutural, os quais ao se encontrarem todos dispostos sobre o mesmo, proporcionam certo incremento de massa, o qual influencia diretamente a resposta dinâmica do piso, aprimorando seu desempenho às vibrações forçadas impostas.

Fase 3: Heel drop test

O teste de impacto de calcanhar fora realizado por um único indivíduo de teste, na região correspondente à área central da estrutura, considerando-se um total de nove pontos localizados estrategicamente no piso, vide as explicações já realizadas na subseção 3.3.2.3. Para uma adequada logística dessa fase, em virtude da definição prévia de três equipamentos distintos de medição, inicialmente estabeleceu-se a aferição dos estímulos dinâmicos pelo equipamento *Acelerômetro 1*, como apresenta a Figura 114, ao passo que na sequência vide Figura 115, foram aplicados de modo paralelo, o *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, empregados até então, somente na aferição da frequência natural dos laminados de madeira e das vigas de MLC.

Figura 114 – *Heel drop test* mensurado pelo *Acelerômetro 1*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 115 – *Heel drop test* mensurado simultaneamente pelo *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Por conseguinte, em virtude da estratégia de medição com aplicação *Acelerômetro 1*, mensurar dois pontos de medições em paralelo, admitindo o ponto situado na área central do piso (ponto *P05*), associado a um dos demais pontos estabelecidos, ao passo que a tática de medição com os dispositivos *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, era simultânea entre os mesmos, para a aferição do sinal dos pontos de medição *P01* ao *P09*, foram coletados 34 sinais vibratórios do teste de impacto de calcanhar, para os quais, as frequências fundamentais da estrutura do piso, são exibidas pela Tabela 33. Dado o considerável quantitativo de sinais vibratórios coletados no procedimento experimental em questão, a plotagem gráfica desses não fora apresentada na presente pesquisa, de modo que a visualização dos mesmos pode ser dada através do contato com os autores¹.

¹ Dados para contato com os autores:
Jéssica Maria Bresolin, e-mail: je.bresolin@hotmail.com;
Zacarias M. Chamberlain Pravia, e-mail: zacarias@upf.br.

Tabela 33 – Frequências naturais do piso devido ao *heel drop test*, medidas por três equipamentos distintos.

Ponto	<i>Acelerômetro 1</i> Silicon Designs (Hz)	<i>Acelerômetro 2</i> GP2-LX (Hz)	<i>Acelerômetro 3</i> Smartphone (Hz)
P01	17,00	16,81	17,02
P02	16,41	16,61	15,85
P03	17,00	17,00	16,86
P04	17,00	16,81	16,83
P05	16,41	16,03	15,46
P06	17,00	17,20	17,25
P07	17,00	16,81	17,02
P08	16,41	16,61	15,46
P09	17,00	16,81	16,86
Média (Hz)	16,80	16,74	16,51
Desvio padrão (Hz)	0,30	0,32	0,71
Coef. variação (%)	1,76	1,93	4,31

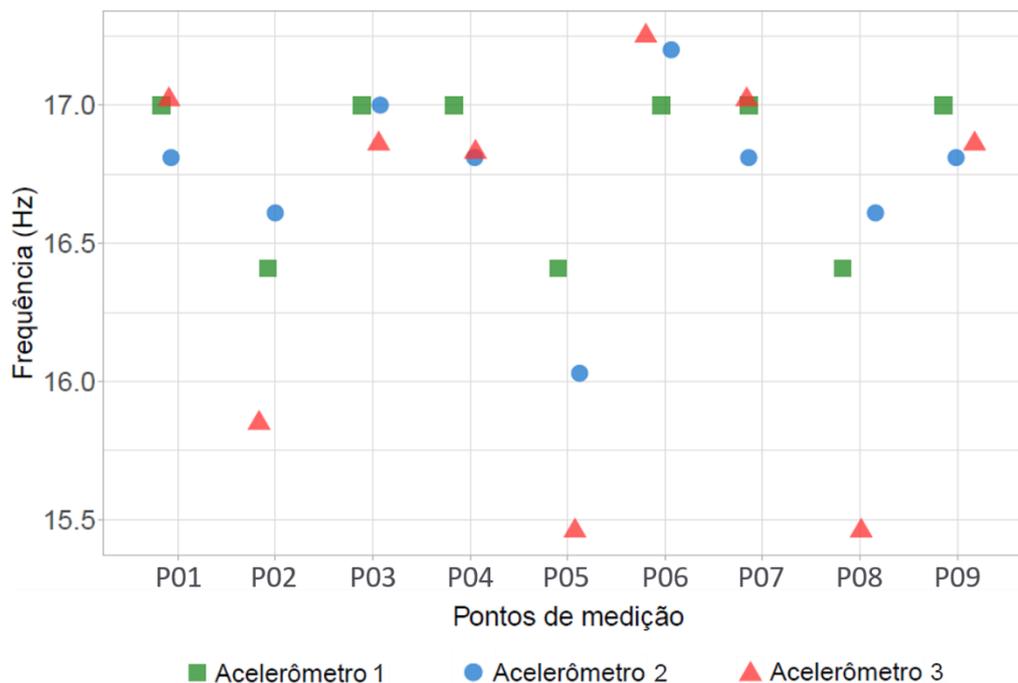
Fonte: Próprio autor (2020).

Acerca da tabela apresentada acima, destaca-se que apenas 27 dados da frequência natural do piso foram apresentados, em razão da metodologia de aferição pelo *Acelerômetro 1*, mensurar paralelamente o ponto P05 com os demais pontos um de cada vez, sendo o ponto central medido oito vezes por esse sistema. Logo, como a análise dos sinais no domínio da frequência, esses relativos às oito medições, constatou que os mesmos identificaram a frequência natural na ordem de 16,41 Hz, um único valor fora disposto na tabela.

Analisando-se a medida de dispersão dos conjuntos de dados, apresentado na tabela acima, pelo coeficiente de variação, aponta-se que os resultados dos três conjuntos de dados descritos, são categorizados com baixa dispersão e alta precisão, dado seus correspondentes valores inferiores ao limite de 10,0%.

Para tanto, tencionando-se à uma efetiva visualização da distribuição dos dados coletados, a Figura 116 expõe graficamente, as frequências fundamentais da estrutura, mensuradas pelos três dispositivos aplicados.

Figura 116 – Frequências naturais do piso devido ao *heel drop test*, medidas por três equipamentos distintos.



Fonte: Próprio autor (2020).

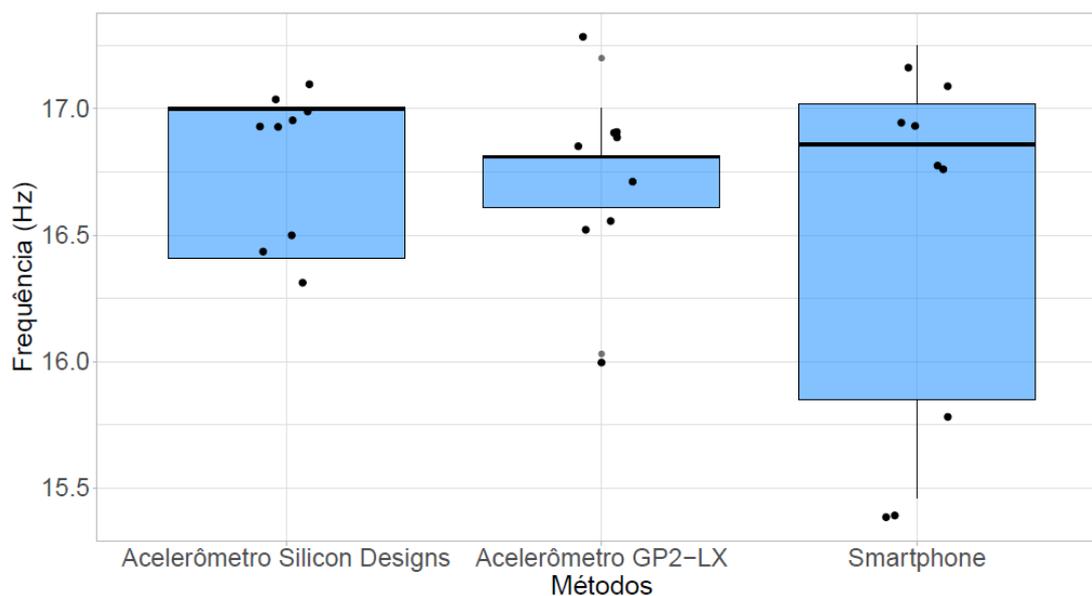
Avaliando-se, em termos dos valores coletados em cada ponto de medição, denota-se um contraste divergente dos pontos *P02*, *P05* e *P08* para com os demais, esses caracterizados por uma notável inferioridade de seus valores representativos, estando dispostos nos intervalos de frequência de 15,40 Hz a 16,70 Hz, ao passo que os valores correspondentes aos demais pontos de medição, encontram-se distribuídos na faixa de frequências naturais de 16,80 Hz a 17,25 Hz.

Observando a distribuição dos pontos de medição no sentido longitudinal da estrutura, esse cenário ocorre, posto que os pontos *P02*, *P05* e *P08* são situados na faixa central do piso, a qual é alusiva a ocorrência das maiores deflexões do mesmo, o que provoca a redução da propriedade dinâmica em pauta.

Ainda, pela visualização dos dados na figura acima, constata-se que a medição em alguns pontos, apresentou disparidades entre os resultados obtidos pelos três dispositivos de medição empregados, cenário evidenciado pelas frequências fundamentais alusivas aos pontos *P02*, *P05* e *P08*. Para tanto, posto que o dispositivo da *Silicon Designs* (*Acelerômetro 1*), o *GP2-LX* (*Acelerômetro 2*) e o *Smartphone* (*Acelerômetro 3*), continham taxas de aquisição distintas, essas respectivamente de 1.200 Hz, 400 Hz e 100 Hz, uma análise

estatística de variância ANOVA com nível de significância de 5,0% fora desenvolvida, essa ilustrada pela Figura 117.

Figura 117 – Análise estatística dos dispositivos de medição da frequência natural do piso, devido ao *heel drop test*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Partindo da visualização da distribuição dos dados, através da apresentação gráfica da análise de variância, atesta-se que o conjunto de dados obtido pelo dispositivo de Smartphone, apresenta grande variabilidade de valores quando comparado com os demais equipamentos empregados, ao passo que as medianas de tendência central dos três conjuntos, encontram-se no intervalo de 16,75 Hz à 17,0 Hz. Para tanto, através da análise de variância ANOVA, averigua-se que as três metodologias de medição se comportam com equivalência estatística a um nível de 5,0% de significância considerado.

4.2.3 Fase 4: Teste de atividades humanas

A última fase de aferição da frequência natural do piso, comportou a execução de atividades humanas de caminhar, correr e saltar, juntamente com a prática do impacto de calcanhar, por um conjunto formado aleatoriamente por 24 indivíduos de teste, como meio de estímulo dinâmico da referida estrutura. Buscando-se a efetividade das medições, essas

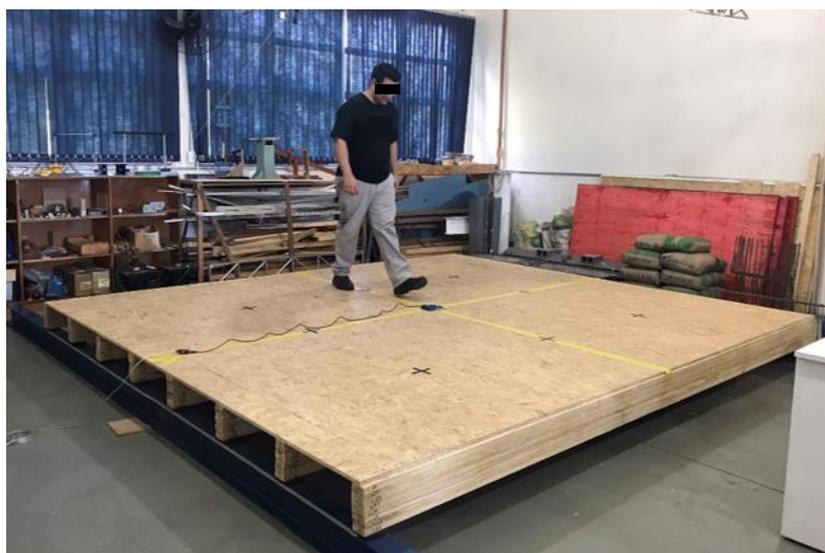
foram desenvolvidas de acordo a subseção 3.3.2.4, sendo as atividades de caminhar e correr executadas em percursos longitudinal e transversal preestabelecidos, bem como a prática do salto e impacto de calcanhar em uma região específica, como demonstrados da Figura 118 à Figura 123.

Figura 118 – Indivíduo de teste caminhando pelo percurso longitudinal *PL*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 119 – Indivíduo de teste caminhando pelo percurso transversal *PT*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 120 – Indivíduo de teste correndo pelo percurso longitudinal *PL*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 121 – Indivíduo de teste correndo pelo percurso transversal *PT*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 122 – Indivíduo de teste saltando na região central do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 123 – Indivíduo de teste realizando o *Heel drop* test na região central do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para o procedimento experimental em questão, um total de 864 sinais vibratórios da estrutura em análise foram coletados paralelamente pelos *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*. Logo, as frequências naturais mensuradas para as ações de caminhar, correr, saltar e impacto de calcanhar, possuem respectivamente, seus valores expostos da Tabela 34 à Tabela 39.

Tabela 34 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso *PL*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	21,49	21,49	21,49	16,84	17,11	17,05
02	17,39	17,20	16,61	17,11	17,30	17,50
03	17,00	16,81	16,81	16,88	17,01	16,00
04	17,00	16,81	18,76	17,59	16,91	17,28
05	21,49	21,10	21,49	21,72	21,14	16,86
06	16,81	16,02	16,61	15,44	16,06	16,84
07	22,08	17,00	17,00	16,91	17,11	16,45
08	15,83	15,83	15,83	15,87	16,03	16,12
09	16,61	17,00	17,20	17,22	16,65	15,61
10	16,41	16,61	16,41	16,52	16,84	16,57
11	16,61	16,61	16,61	16,72	15,97	16,62
12	21,50	21,50	21,69	21,69	21,77	21,14
13	20,91	22,08	16,41	21,21	20,72	16,48
14	21,49	21,10	16,22	17,00	16,66	16,26
15	20,91	21,30	21,10	21,29	21,36	20,63
16	20,52	21,30	21,49	21,00	20,90	21,52
17	16,02	15,63	16,81	16,52	16,52	14,66
18	15,63	21,10	16,22	15,64	15,77	16,38
19	15,83	16,22	16,41	15,48	16,16	16,50
20	16,22	16,22	16,61	16,31	16,32	16,65
21	16,02	16,22	20,71	16,19	16,59	16,19
22	21,49	20,71	20,91	21,31	20,71	21,17
23	16,61	16,41	16,22	16,42	16,62	16,08
24	16,41	16,61	16,61	16,81	16,74	16,76
Média (Hz)	18,26	18,09	18,02	17,74	17,71	17,22
Desvio padrão (Hz)	2,47	2,34	2,22	2,21	2,05	1,87
Coef. variação (%)	13,51	12,92	12,33	12,46	11,55	10,85

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 35 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso *PT*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	21,30	17,20	-	21,41	17,30	16,71
02	17,20	17,20	17,20	17,20	17,40	17,11
03	16,81	16,61	17,20	17,42	17,02	17,22
04	21,89	16,81	16,41	17,03	16,89	16,53
05	21,30	21,49	20,52	20,71	21,53	19,18
06	16,61	16,41	16,41	16,67	16,52	16,03
07	16,81	20,91	17,00	17,30	16,65	17,24
08	15,83	16,81	16,81	16,13	16,76	16,88
09	16,61	16,61	17,00	16,81	16,57	17,24
10	16,02	16,41	16,41	17,01	16,74	17,53
11	15,83	17,00	16,02	17,69	17,03	16,32
12	20,91	21,49	21,10	21,21	21,60	21,19
13	16,81	16,81	21,69	16,97	21,51	21,77
14	16,81	16,61	16,61	17,13	16,89	16,62
15	21,10	21,30	21,30	21,19	21,27	21,24
16	17,00	20,71	20,71	16,62	20,90	19,45
17	16,22	16,22	16,22	16,91	16,35	16,32
18	16,41	16,02	16,02	16,69	16,89	16,81
19	16,61	16,41	15,83	16,74	16,30	16,02
20	17,00	16,41	16,81	16,67	16,42	16,74
21	16,81	16,02	16,22	17,07	16,31	16,71
22	21,50	20,32	16,61	20,14	20,52	16,86
23	16,41	16,81	15,83	16,59	16,88	16,24
24	16,61	15,63	16,02	16,89	16,62	15,77
Média (Hz)	17,77	17,68	17,97	17,76	17,87	17,49
Desvio padrão (Hz)	2,14	2,03	3,10	1,71	2,01	1,74
Coef. variação (%)	12,02	11,46	17,24	9,60	11,23	9,93

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 36 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso *PL*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	16,61	16,61	17,00	16,91	17,01	17,01
02	17,20	17,20	17,39	17,30	17,13	17,52
03	16,41	16,81	15,83	16,52	16,65	15,93
04	16,03	16,41	16,03	16,37	16,74	15,85
05	16,61	16,61	16,41	17,05	17,03	16,47
06	16,02	16,22	16,81	16,42	16,35	16,86
07	15,83	16,02	16,61	16,03	16,45	16,74
08	16,22	16,22	16,61	16,81	16,45	16,81
09	16,02	16,61	16,61	16,13	16,03	16,76
10	16,22	15,44	16,81	16,23	15,87	17,05
11	16,81	16,61	16,41	16,96	16,91	16,38
12	15,63	16,22	16,02	15,81	16,40	16,52
13	15,63	16,02	16,02	15,90	16,23	15,99
14	16,81	16,41	16,41	16,65	16,67	16,70
15	16,22	16,61	15,63	16,35	16,76	15,58
16	15,63	16,41	15,63	15,83	16,03	15,68
17	17,00	16,22	16,02	15,77	16,00	16,03
18	16,02	16,22	16,22	16,81	16,35	16,23
19	16,02	16,02	20,71	16,00	16,06	16,38
20	16,41	16,22	16,02	16,62	16,65	16,88
21	16,22	16,41	16,22	16,44	16,45	16,27
22	15,83	16,41	16,22	15,74	16,45	14,86
23	16,61	16,61	16,22	17,01	16,84	16,21
24	16,02	15,83	16,22	15,74	16,13	16,16
Média (Hz)	16,25	16,35	16,50	16,39	16,49	16,37
Desvio padrão (Hz)	0,44	0,35	0,99	0,48	0,36	0,57
Coef. variação (%)	2,68	2,17	6,00	2,91	2,18	3,49

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 37 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso *PT*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	15,63	16,61	16,61	15,44	16,62	16,62
02	16,81	16,81	17,39	16,94	17,13	17,45
03	16,41	16,81	16,81	16,42	16,86	16,62
04	16,81	16,02	16,81	16,63	16,27	16,88
05	16,42	16,42	16,61	16,68	16,72	17,05
06	20,32	16,22	16,22	17,46	16,72	16,37
07	15,63	16,22	16,61	17,23	17,05	16,61
08	16,61	16,41	16,61	17,11	16,74	16,96
09	-	16,61	16,02	15,93	16,81	16,02
10	17,00	17,00	17,20	16,91	17,03	14,94
11	16,22	16,61	17,00	17,17	16,53	16,91
12	16,61	16,22	15,44	16,62	16,35	16,67
13	16,81	16,61	16,41	16,42	16,82	16,16
14	16,81	16,61	16,22	16,42	16,62	16,26
15	16,41	15,83	16,41	16,38	16,32	16,26
16	15,83	15,44	15,44	15,61	15,46	16,23
17	16,41	16,22	15,44	16,45	16,62	15,35
18	16,61	17,00	16,61	16,96	16,97	17,27
19	16,22	16,02	16,61	16,31	16,03	16,25
20	16,81	21,10	16,10	16,32	16,81	16,52
21	16,41	16,42	16,41	16,32	16,06	16,35
22	16,61	16,41	16,41	16,94	16,57	16,59
23	16,41	20,91	16,61	16,42	17,03	16,96
24	16,22	16,61	16,22	16,31	16,72	16,23
Média (Hz)	17,11	16,80	16,43	16,56	16,62	16,48
Desvio padrão (Hz)	2,58	1,35	0,50	0,49	0,39	0,55
Coef. variação (%)	15,09	8,01	3,03	2,94	2,32	3,36

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 38 – Frequências naturais do piso, devido ao salto na região central da estrutura.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	16,41	15,63	16,61	16,42	16,23	15,54
02	16,22	16,61	16,42	16,03	16,23	16,44
03	16,42	16,42	16,61	16,47	15,92	15,59
04	16,22	16,42	16,42	17,42	16,36	15,64
05	15,44	15,05	15,64	15,34	15,00	15,95
06	14,46	14,85	15,05	14,20	14,87	14,09
07	16,02	16,22	14,66	14,08	16,06	12,77
08	15,63	15,63	15,63	15,74	15,69	15,53
09	16,22	16,41	14,86	16,13	17,03	16,76
10	16,02	15,24	15,24	16,03	15,05	13,74
11	16,61	17,00	16,02	16,81	15,10	16,06
12	15,83	16,41	15,63	15,71	15,65	15,30
13	14,85	16,41	16,22	16,29	16,55	16,25
14	16,41	16,22	16,61	16,38	15,19	16,67
15	15,83	16,41	16,41	16,09	17,01	16,35
16	16,41	16,42	16,03	16,45	16,09	15,83
17	16,22	16,22	15,25	15,77	15,69	15,54
18	15,83	15,44	16,41	15,97	15,36	15,21
19	16,02	16,42	16,41	16,13	16,38	16,80
20	16,61	16,22	16,03	16,55	16,97	16,54
21	15,64	16,42	15,64	16,02	16,32	15,89
22	15,63	15,83	16,22	15,80	15,83	16,13
23	16,41	16,22	16,02	16,59	16,63	16,11
24	15,83	16,61	15,63	15,90	15,30	15,90
Média (Hz)	15,97	16,11	15,90	16,01	15,94	15,69
Desvio padrão (Hz)	0,52	0,54	0,58	0,72	0,66	0,96
Coef. variação (%)	3,27	3,34	3,63	4,47	4,14	6,15

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 39 – Frequências naturais do piso, devido ao *heel drop test* na região central da estrutura.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)	Medição 1 (Hz)	Medição 2 (Hz)	Medição 3 (Hz)
01	16,03	15,64	15,25	-	17,11	15,35
02	16,03	16,61	16,81	15,85	16,05	16,24
03	16,42	16,81	16,81	16,24	15,53	16,91
04	16,81	16,81	16,03	15,50	15,15	15,69
05	16,03	16,42	16,42	17,85	16,63	15,50
06	15,63	15,44	16,61	-	15,34	16,68
07	14,86	16,42	16,42	14,47	15,10	16,00
08	15,63	15,83	16,41	15,11	15,38	15,97
09	16,42	16,42	16,81	15,67	16,34	16,72
10	16,41	16,02	16,41	16,23	15,87	17,24
11	16,81	16,03	16,81	16,38	15,67	16,53
12	16,22	16,02	15,44	16,06	15,52	14,89
13	15,83	16,41	16,03	14,96	16,06	15,42
14	16,41	16,42	16,42	16,14	16,42	14,90
15	16,41	16,41	16,42	15,04	16,57	16,32
16	16,42	16,03	15,64	16,81	16,80	13,60
17	15,64	15,83	16,41	15,92	15,25	13,12
18	16,22	16,81	16,42	17,11	15,48	16,52
19	16,42	16,42	16,42	17,09	15,73	17,45
20	16,81	16,42	16,42	16,62	15,30	16,09
21	16,81	16,81	16,42	16,57	15,55	16,53
22	15,24	16,03	16,02	14,71	16,48	17,16
23	16,42	16,81	16,42	16,24	15,79	16,18
24	16,42	16,41	16,41	15,84	16,06	16,38
Média (Hz)	16,18	16,30	16,32	15,69	15,88	15,97
Desvio padrão (Hz)	0,50	0,39	0,41	1,38	0,57	1,05
Coef. variação (%)	3,11	2,40	2,49	8,80	3,56	6,60

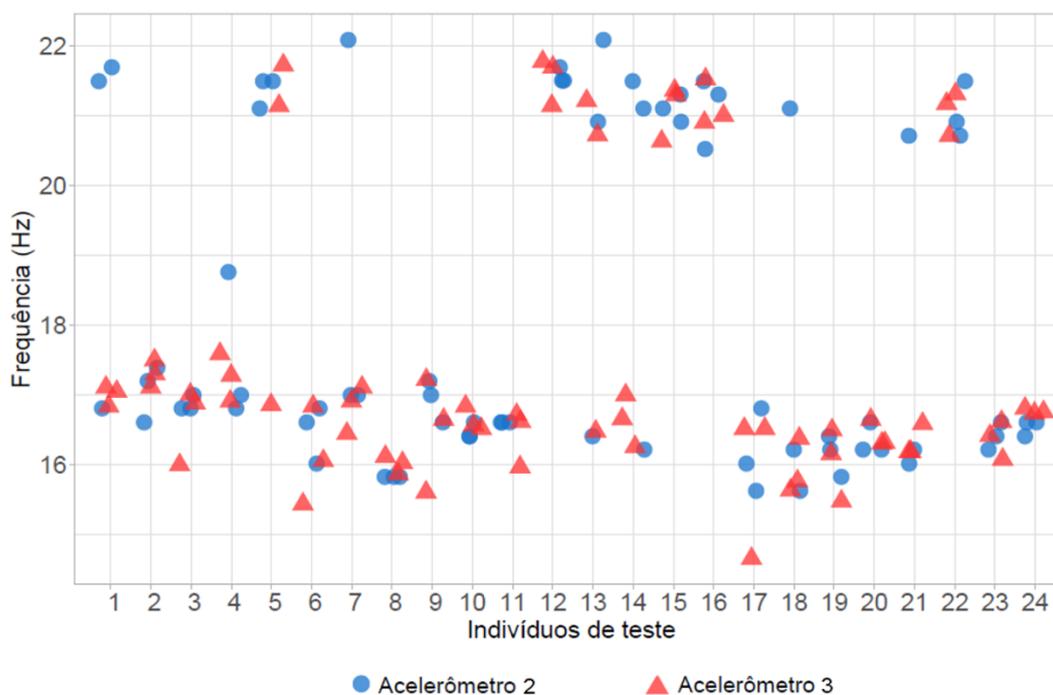
Fonte: Próprio autor (2020).

Avaliando-se as medidas de dispersão do coeficiente de variação nas tabelas mostradas acima, destaca-se que os conjuntos de resultados referentes à todas as medições realizadas para a atividade de caminhar no *percurso PL*, as medições as medição 1, 2 e 3

(Acelerômetro 2) e medição 2 (Acelerômetro 3) da caminhada no percurso PT, bem como a medição 1 (Acelerômetro 2) da atividade de correr no Percurso PT, são caracterizados por uma dispersão e precisão média, visto que seus correspondentes coeficientes de variação, estão distribuídos no intervalo de 10,0% a 20,0%, ao passo que os demais conjuntos de resultados, são categorizados com baixa dispersão e alta precisão, dado o *CoV* ser inferior à 10,0%.

Logo, aspirando por uma efetiva visualização da dispersão dos conjuntos de resultados coletados, a Figura 124 à Figura 129 exibem respectivamente, as representações gráficas da distribuição das frequências fundamentais aferidas, para ambas as metodologias empregadas, acerca do estímulo dinâmico atrelado à caminhada, corrida, salto e impacto de calcanhar. Em consequência da gama de sinais vibratórios obtidos, a plotagem gráfica desses não fora apresentada na presente pesquisa, de modo que a visualização dos mesmos pode ser dada através do contato com os autores².

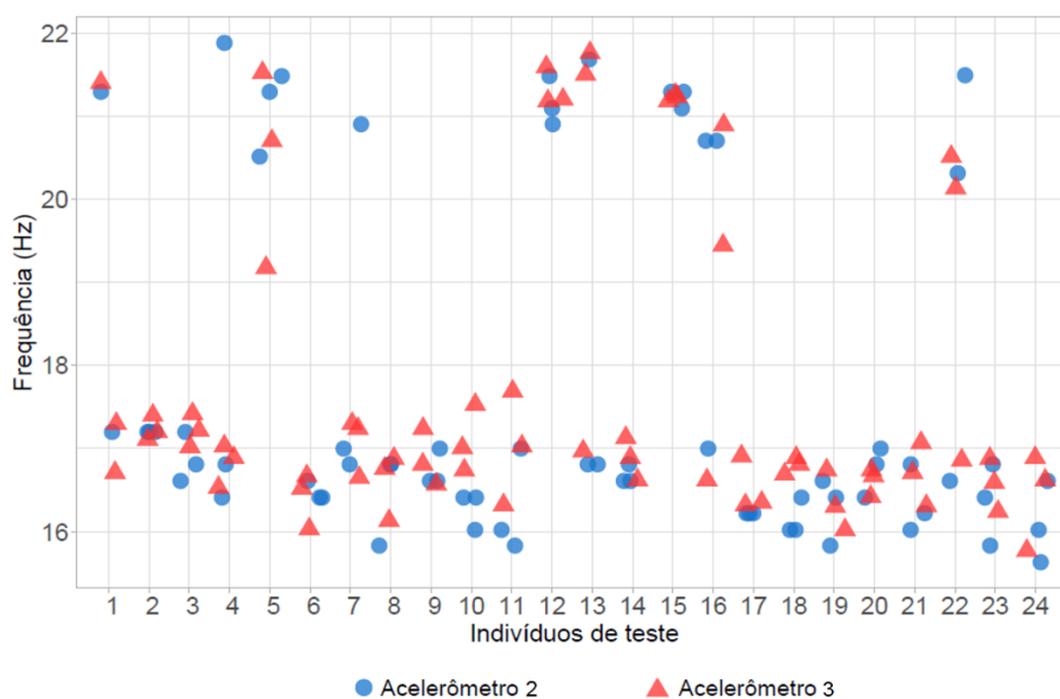
Figura 124 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso PL.



Fonte: Próprio autor (2020).

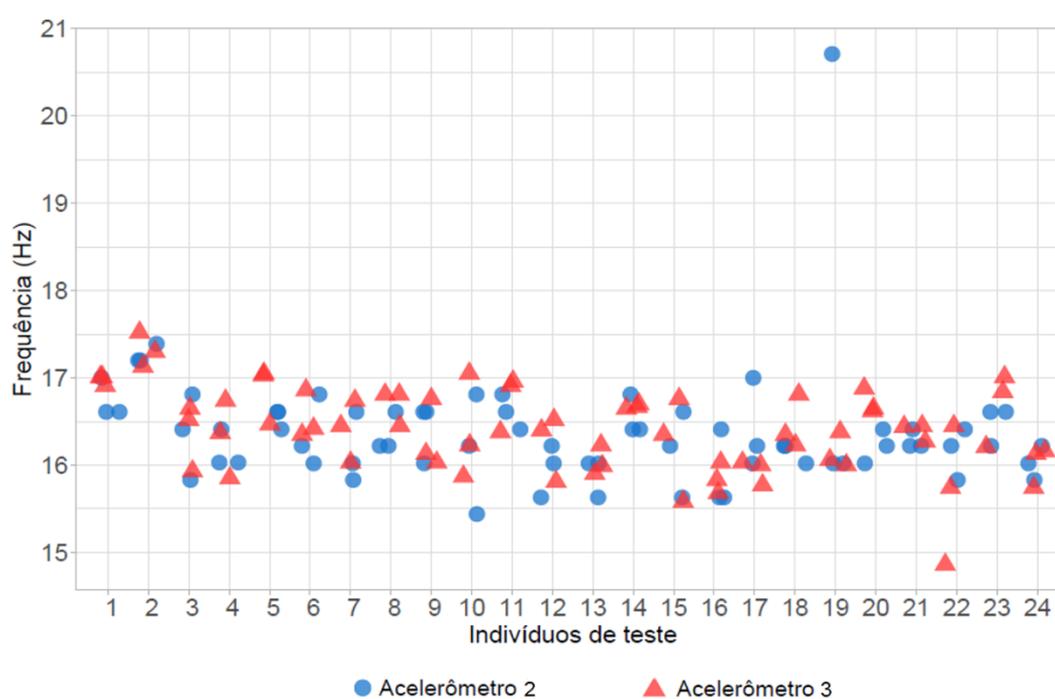
² Dados para contato com os autores:
 Jéssica Maria Bresolin, e-mail: je.bresolin@hotmail.com;
 Zacarias M. Chamberlain Pravia, e-mail: zacarias@upf.br.

Figura 125 – Frequências naturais do piso, devido à caminhada no percurso *PT*.



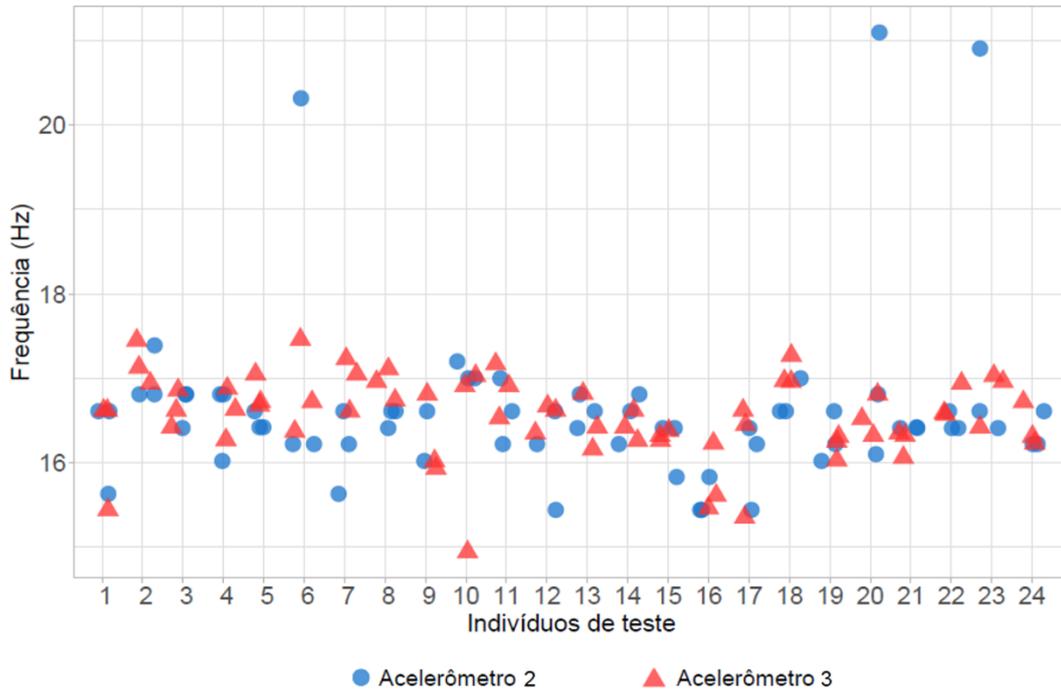
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 126 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso *PL*.



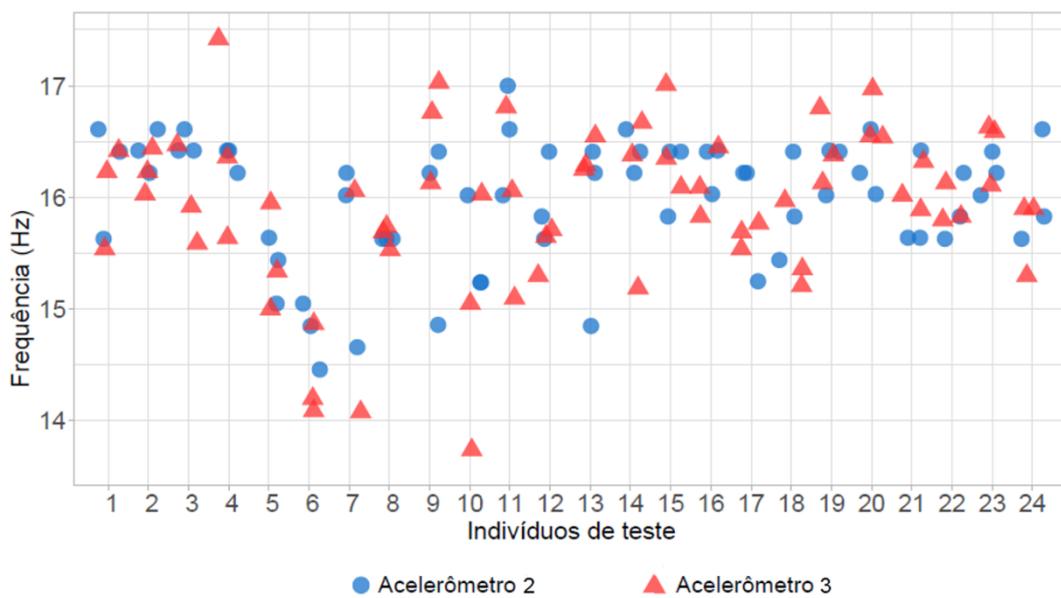
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 127 – Frequências naturais do piso, devido à corrida no percurso *PT*.



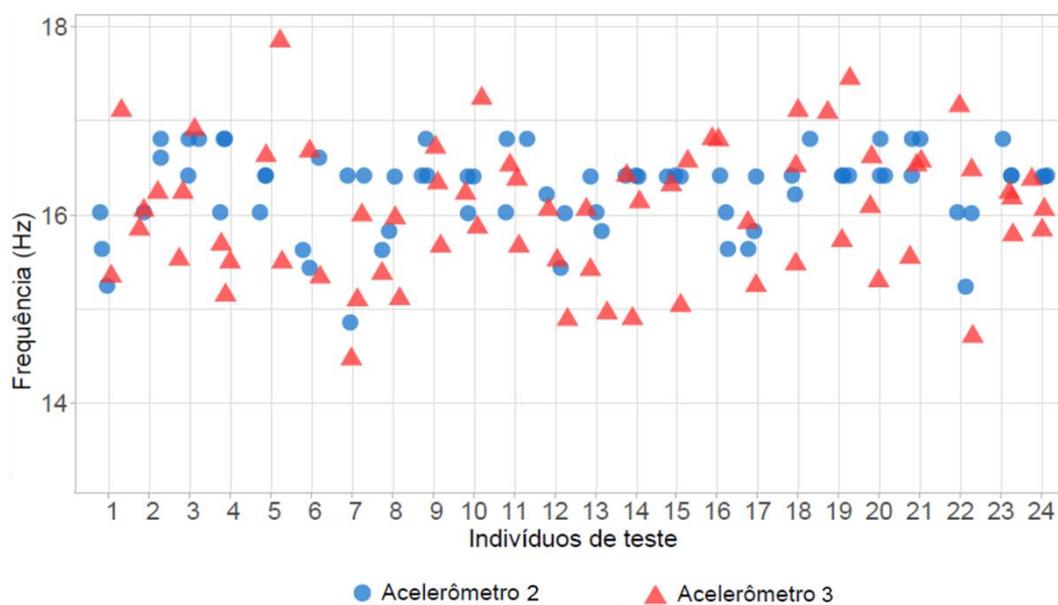
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 128 – Frequências naturais do piso, devido ao salto na região central da estrutura.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 129 – Frequências naturais do piso, devido ao *heel drop test* na região central da estrutura.



Fonte: Próprio autor (2020).

Em face das frequências naturais obtidas através de excitações dinâmicas provocadas pelas atividades humanas habituais, analisando-se as formas gráficas acima, constata-se que, ao longo do desenvolvimento das ações de caminhar e correr através dos percursos longitudinal e transversal predefinidos, os dois primeiros modos de vibração do piso foram estimulados, posto que os conjuntos de dados encontram-se distribuídos em duas faixas de valores, essas correspondentes aos intervalos aproximados de 15,0 Hz a 18,0 Hz e de 19,0 Hz a 22,0 Hz, enquanto que as ações de saltar e de impacto de calcanhar, somente o primeiro modo de vibração foi incitado, estando suas respectivas frequências dispostas entre os valores de 14,0 Hz a 18,0 Hz.

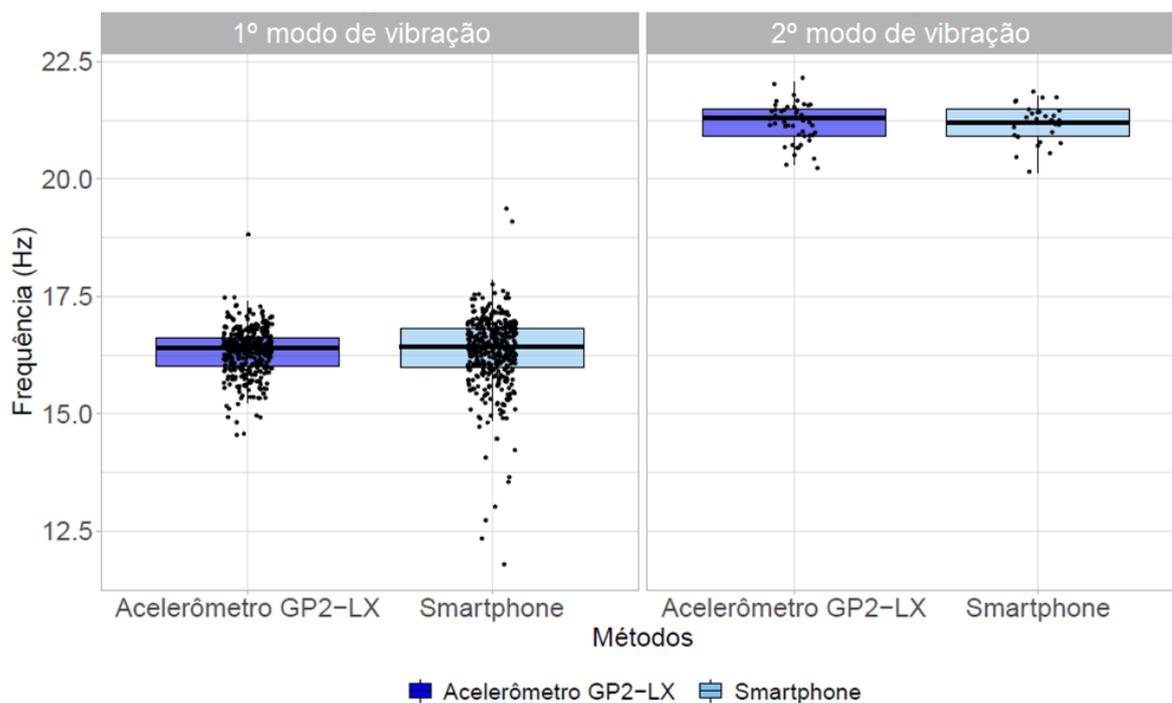
Acerca dos valores médios representativos obtidos para cada atividade, denota-se que a prática da caminhada e corrida, proporcionaram estímulos dinâmicos relativos às frequências naturais inseridas no intervalo de 16,25 Hz a 18,26 Hz, essas moderadamente superiores às frequências médias observadas no tratamento dos sinais vibratórios registrados para o salto e impacto de calcanhar, as quais encontram-se distribuídas na faixa de valores de 15,69 Hz a 16,32 Hz.

Diante dessas constatações, aponta-se que esse quadro é esclarecido pela própria natureza humana, em virtude das atividades humanas de caminhar, correr, saltar e a prática do impacto de calcanhar apresentam grande aleatoriedade de características entre os seres

humanos, como discutido na seção 2.1.2, uma vez que cada indivíduo assume marcha e a velocidade, para a execução do caminhar e do correr, bem como a melhor forma para projetar seu corpo no ato de saltar e realizar o impacto de calcanhar, todas essas características em conformidade com sua estrutura corporal, fatores determinantes na frequência de desenvolvimento de cada atividade e nas reações da estrutura, influenciando diretamente nos parâmetros da excitação dinâmica e em qual forma modal que as estruturas vibram.

Sendo as ações realizadas pelos indivíduos de teste mensuradas de forma paralela pelo dispositivo GP2-LX (*Acelerômetro 2*) e Smartphone (*Acelerômetro 3*), esses com as taxas de aquisição de dados de 400 Hz e 100 Hz respectivamente, para a realização da aferição de ambos dispositivos aplicados, uma análise estatística de variância ANOVA com nível de significância de 5,0% fora desenvolvida, essa ilustrada pela Figura 130. Denota-se que, como a realização das atividades por alguns indivíduos de teste, incitou o primeiro e segundo modo de vibração da estrutura em pauta, para a efetividade da análise estatística, os dados coletados foram averiguados separadamente, considerando-se os referidos modos de vibração.

Figura 130 – Análise estatística dos dispositivos de medição da frequência natural do piso, devido à prática das atividades humanas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Observando-se inicialmente a distribuição dos dados da demonstração gráfica da figura acima, evidencia-se que os conjuntos de dados atrelados às medições por ambos os equipamentos de medição aplicados, em termos do primeiro e do segundo modo de vibração, possuem variabilidade de valores muito baixa, juntamente com a localização aproximada das medianas para ambos os cenários.

Diante disso, atesta-se pela análise de variância ANOVA, que os dispositivos de medição são estatisticamente válidos e equivalentes a um nível de significância de 5,0%, embora os mesmos contenham taxa de aquisição de dados diferentes, onde o acelerômetro emprega uma taxa de aquisição na ordem de 400 Hz, ao passo que o Smartphone apenas usa 100 Hz. Essas circunstâncias evidenciam a efetividade da aplicação de dispositivos móveis como uma ferramenta alternativa e ágil para a leitura e interpretação de sinais vibratórios em tempo real, ao longo da realização de medições de parâmetros dinâmicos em elementos e sistemas estruturais.

4.3 Amortecimento do piso (ξ)

O objetivo atrelado ao procedimento experimental em foco, abordou a determinação do amortecimento do piso em análise, por intermédio do método analítico do decremento logarítmico, quando a estrutura era estimulada dinamicamente pela prática de atividades humanas.

Uma vez que a metodologia analítica aplicada avalia o sinal vibratório no domínio do tempo, para a obtenção do amortecimento, os cenários de estímulo dinâmico admitidos na Fase 2 e 4 do procedimento experimental de determinação da frequência fundamental do piso, esses respectivamente alusivos à prática do ato de caminhar por um grupo de 10 (dez) indivíduos de teste e à prática de atividades de caminhada, corrida, salto e impacto de calcanhar individualmente por 24 sujeitos, foram aqui também considerados.

Averiguando-se inicialmente as atividades humanas praticadas de modo individual pelos sujeitos de teste, circunstâncias correlacionadas à Fase 4 referida acima, denota-se que os 864 sinais vibratórios coletados paralelamente pelo *Acelerômetro 2* e *Acelerômetro 3*, foram considerados na determinação analítica do amortecimento, sendo os valores resultantes apresentados da Tabela 40 à Tabela 45, reciprocamente para as ações humanas de caminhar, correr, saltar e impacto de calcanhar, desenvolvidas vide apontamentos da subseção 3.3.2.4.

Tabela 40 – Amortecimento do piso, devido à caminhada no percurso *PL*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	1,40	1,72	1,64	1,73	1,80	1,80
02	1,15	1,19	1,20	1,38	1,40	1,44
03	1,24	1,38	1,54	1,48	1,42	1,39
04	1,00	1,23	1,70	1,67	1,44	1,40
05	1,73	1,91	1,38	1,24	1,20	1,37
06	1,25	1,40	1,74	1,87	1,58	1,62
07	1,14	1,11	1,35	1,49	1,57	1,43
08	1,92	1,84	1,80	1,43	1,57	1,30
09	1,11	1,62	1,56	1,36	1,37	1,44
10	1,50	1,48	1,14	1,69	1,54	1,57
11	1,40	1,64	1,37	1,39	1,30	1,31
12	1,38	1,81	2,02	1,57	1,67	1,55
13	1,75	1,62	1,77	1,31	1,45	1,37
14	1,45	1,45	1,24	1,64	1,73	1,69
15	1,57	1,61	1,33	1,34	1,50	1,60
16	1,56	1,69	1,51	1,21	1,31	1,41
17	1,53	1,42	1,60	1,58	1,54	1,49
18	1,94	1,89	1,76	1,47	1,41	1,45
19	1,26	1,32	1,23	1,60	1,69	1,37
20	1,38	1,13	1,60	1,42	1,35	1,42
21	1,29	1,26	1,31	1,25	1,35	1,40
22	1,38	1,48	1,39	1,34	1,35	1,25
23	1,17	1,29	1,05	1,42	1,45	1,42
24	1,64	1,61	1,51	1,35	1,24	1,35
Média (%)	1,42	1,50	1,49	1,47	1,47	1,45
Desvio padrão (%)	0,25	0,24	0,24	0,17	0,16	0,13
Coef. variação (%)	17,53	15,90	16,17	11,54	10,57	8,87

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 41 – Amortecimento do piso, devido à caminhada no percurso *PT*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	1,98	2,33	-	1,44	1,79	1,60
02	1,09	1,31	1,53	1,52	1,63	1,51
03	1,58	1,30	1,07	1,89	1,82	1,67
04	1,12	1,90	2,10	1,95	1,76	1,87
05	2,08	2,06	1,57	1,95	2,05	2,13
06	1,66	1,34	1,57	1,88	1,69	1,42
07	1,65	1,11	1,68	1,60	1,64	1,60
08	2,06	1,60	1,20	1,70	1,56	1,50
09	1,74	1,43	1,34	1,64	1,59	1,39
10	1,50	1,18	1,27	1,40	1,46	1,41
11	1,27	1,48	1,85	1,90	1,84	1,78
12	1,43	1,54	1,80	1,61	1,58	1,77
13	2,36	2,19	1,86	1,80	1,61	1,92
14	1,33	1,82	1,58	1,74	1,77	1,58
15	2,07	1,97	1,55	1,83	1,80	1,83
16	1,70	1,66	1,70	1,39	1,50	1,54
17	1,43	1,43	1,87	1,78	1,64	1,79
18	2,39	2,55	2,55	1,61	1,56	1,71
19	1,24	1,08	1,18	1,79	1,65	1,61
20	1,19	1,44	1,41	1,77	1,67	1,70
21	1,23	1,40	1,30	1,79	1,80	1,86
22	1,50	1,40	1,59	1,53	1,41	1,49
23	1,29	1,81	1,59	1,63	1,70	1,78
24	1,44	1,51	1,67	1,54	1,51	1,77
Média (%)	1,60	1,62	1,60	1,70	1,67	1,68
Desvio padrão (%)	0,38	0,39	0,33	0,17	0,14	0,18
Coef. variação (%)	23,90	23,86	20,39	10,03	8,62	10,91

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 42 – Amortecimento do piso, devido à corrida no percurso *PL*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	1,08	1,98	1,77	1,91	1,74	1,83
02	1,60	1,80	1,78	1,67	1,63	1,86
03	1,69	2,03	2,12	1,85	1,76	1,84
04	2,61	2,07	1,36	1,66	1,75	1,72
05	1,53	1,55	1,66	2,06	1,87	2,04
06	1,55	1,44	1,35	1,73	1,72	1,78
07	1,44	1,76	1,71	1,83	1,62	1,59
08	2,58	1,92	2,10	1,67	1,61	1,72
09	1,48	2,09	1,83	1,71	1,95	1,80
10	1,73	2,31	1,93	1,71	1,80	1,69
11	1,83	1,52	1,42	1,74	1,73	1,71
12	1,87	1,71	1,91	1,80	1,89	1,74
13	1,84	2,33	2,02	1,42	1,56	1,42
14	1,33	1,91	1,72	1,71	1,77	1,76
15	1,71	1,89	1,88	1,87	1,98	1,82
16	1,77	1,41	1,84	1,44	1,34	1,36
17	1,66	1,94	1,63	1,46	1,54	1,47
18	2,07	2,07	1,81	1,46	1,56	1,53
19	2,07	1,84	1,68	1,63	1,45	1,57
20	1,28	1,37	1,14	1,61	1,61	1,57
21	1,87	1,43	1,43	1,57	1,64	1,50
22	1,99	1,76	1,89	1,77	1,81	1,76
23	2,05	2,18	1,82	1,32	1,55	1,47
24	1,51	1,53	1,65	1,20	1,50	1,45
Média (%)	1,76	1,83	1,73	1,66	1,68	1,67
Desvio padrão (%)	0,36	0,28	0,24	0,20	0,16	0,17
Coef. variação (%)	20,64	15,60	14,15	11,97	9,48	10,23

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 43 – Amortecimento do piso, devido à corrida no percurso *PT*.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	2,28	2,05	1,45	2,08	2,20	1,98
02	1,56	1,23	1,67	2,03	2,12	2,13
03	2,13	1,98	1,91	1,92	2,03	1,90
04	2,44	1,70	3,00	1,77	1,90	2,01
05	1,44	1,95	1,52	2,48	2,50	2,29
06	2,10	1,69	2,03	1,66	1,56	1,57
07	1,87	2,07	1,40	2,28	2,20	2,39
08	1,52	1,65	1,63	1,93	1,96	1,90
09	-	2,13	1,77	2,09	1,94	1,90
10	2,78	2,68	2,11	1,83	1,89	1,79
11	2,10	2,22	1,91	1,64	1,73	1,90
12	1,55	1,76	2,71	1,82	1,79	1,72
13	2,28	2,09	1,73	1,96	1,84	1,74
14	2,03	1,91	2,35	1,71	1,72	1,80
15	1,81	1,82	1,92	2,14	1,95	2,10
16	2,06	2,12	2,03	1,89	1,69	1,79
17	2,04	1,93	1,98	1,84	1,76	1,77
18	2,25	2,11	2,21	1,89	1,89	1,79
19	1,66	1,57	1,52	1,86	1,76	1,93
20	1,67	1,57	1,34	1,64	1,67	1,52
21	2,18	1,56	2,28	1,78	1,69	1,75
22	1,82	1,93	1,73	1,90	1,86	1,91
23	1,85	2,03	2,15	1,65	1,65	1,73
24	2,01	1,69	1,54	1,96	1,73	1,71
Média (%)	1,98	1,89	1,91	1,91	1,88	1,88
Desvio padrão (%)	0,33	0,29	0,41	0,21	0,22	0,20
Coef. variação (%)	16,56	15,45	21,36	10,78	11,47	10,85

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 44 – Amortecimento do piso, devido ao salto na região central da estrutura.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	2,55	2,89	2,74	3,61	3,80	3,65
02	2,61	2,18	3,10	2,60	2,74	2,55
03	2,80	2,49	2,45	2,87	3,09	2,63
04	2,42	2,20	1,85	2,13	2,54	2,94
05	2,24	2,26	2,22	3,12	3,12	3,45
06	2,31	2,25	2,48	3,03	2,93	3,12
07	2,20	2,20	2,47	3,28	3,36	3,29
08	2,89	2,62	3,06	2,45	2,91	2,53
09	2,37	2,78	2,68	2,99	2,90	3,14
10	2,77	2,71	2,67	2,81	3,19	2,64
11	1,77	2,09	2,91	2,16	2,09	2,13
12	2,86	2,95	2,84	2,77	2,61	2,94
13	3,00	2,62	2,89	2,98	2,61	2,69
14	2,87	2,78	2,77	2,31	2,71	2,56
15	2,57	2,64	2,71	2,34	2,55	2,46
16	2,54	2,81	2,45	2,57	2,55	2,61
17	2,62	2,67	2,92	2,45	2,31	2,49
18	2,62	2,86	2,96	2,70	2,87	2,76
19	2,47	2,79	2,96	2,28	2,39	2,47
20	2,36	2,73	2,47	2,33	2,37	2,34
21	2,67	2,33	2,47	2,46	2,30	2,45
22	2,34	2,47	2,37	2,72	2,97	2,71
23	2,12	2,67	2,60	2,57	2,47	2,42
24	2,74	2,58	2,72	2,18	2,19	2,04
Média (%)	2,53	2,57	2,66	2,65	2,73	2,71
Desvio padrão (%)	0,29	0,26	0,29	0,38	0,40	0,39
Coef. variação (%)	11,32	10,05	10,93	14,31	14,72	14,55

Fonte: Próprio autor (2020).

Tabela 45 – Amortecimento do piso, devido ao *heel drop test* na região central da estrutura.

Indivíduos de teste	<i>Acelerômetro 2 – GP2-LX</i>			<i>Acelerômetro 3 – Smartphone</i>		
	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)	Medição 1 (%)	Medição 2 (%)	Medição 3 (%)
01	2,14	2,09	2,49	3,17	3,44	3,46
02	2,72	2,35	2,75	2,50	2,66	2,60
03	2,38	2,17	2,42	2,34	2,35	2,33
04	2,87	2,44	1,98	2,65	2,57	2,90
05	2,57	2,17	2,11	2,65	2,44	2,71
06	2,60	2,67	2,73	-	2,49	2,68
07	2,82	2,97	2,92	3,10	2,95	2,98
08	3,81	3,24	2,93	2,78	2,96	2,66
09	2,97	2,35	2,78	2,93	2,84	2,90
10	2,65	2,71	2,51	2,74	2,97	2,96
11	2,78	2,77	2,78	2,51	2,61	2,73
12	2,99	2,52	2,51	2,63	2,74	2,71
13	2,90	2,97	2,99	2,51	2,52	2,68
14	2,85	2,94	2,38	2,71	2,80	2,78
15	2,51	2,40	2,73	2,55	2,41	2,57
16	2,82	2,88	2,80	2,74	2,65	2,64
17	2,99	2,91	2,99	2,49	2,62	2,54
18	3,14	2,55	3,02	2,38	2,45	2,45
19	2,09	2,91	2,90	2,27	2,25	2,23
20	2,56	2,36	2,66	2,51	2,51	2,52
21	2,47	2,95	2,51	2,37	2,53	2,30
22	2,58	2,43	2,47	2,53	2,61	2,44
23	2,56	2,71	2,45	2,30	2,41	2,34
24	2,55	2,26	2,72	2,08	2,14	2,11
Média (%)	2,72	2,61	2,65	2,58	2,62	2,63
Desvio padrão (%)	0,35	0,31	0,27	0,26	0,28	0,29
Coef. variação (%)	12,74	12,04	10,24	9,97	10,54	10,98

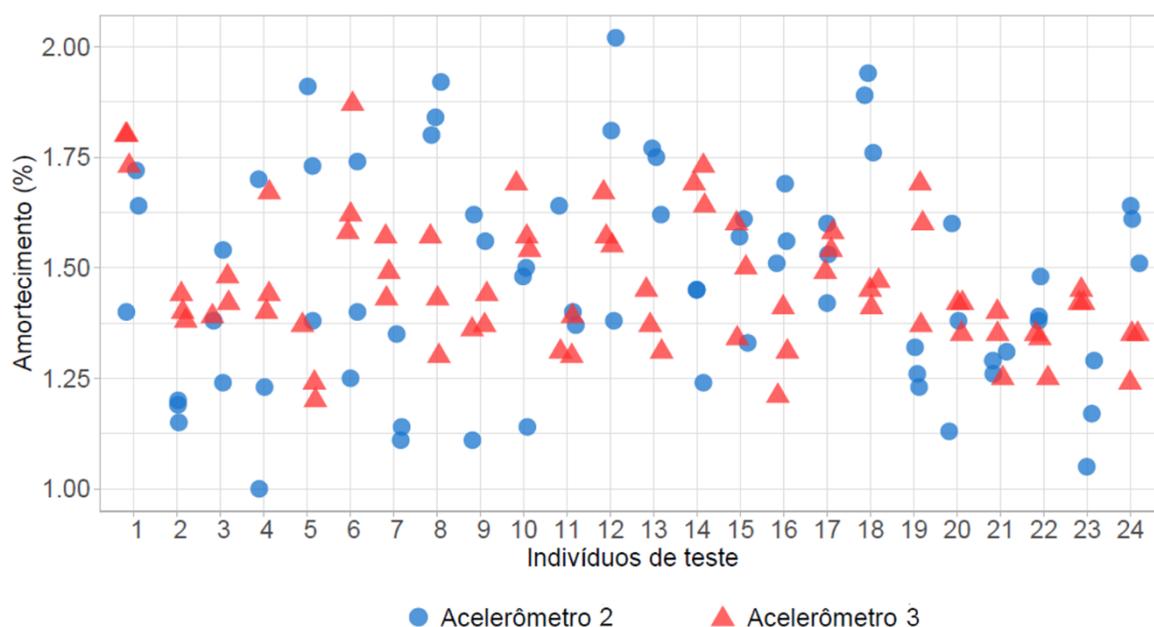
Fonte: Próprio autor (2020).

Averiguando-se as medidas de dispersão do coeficiente de variação nas tabelas expostas acima, é possível denotar que os conjuntos de resultados comportam categorizações distintas, quanto à distribuição dos dados. Aponta-se que, a medição 3 da caminhada no

percurso PL, medição 2 do caminhar no *percurso PT*, medição 2 da corrida no *percurso PL* e a medição 1 do impacto de calcanhar, todas correspondentes ao dispositivo *Acelerômetro 3*, apresentam baixa dispersão e alta precisão, posto que seus correspondentes coeficientes de variação, são inferiores à 10,0%, enquanto que todas as medições da caminhada no *percurso PT*, a medição 1 da corrida no *percurso PL* e a medição 3 do correr no *percurso PT*, mensuradas pelo equipamento *Acelerômetro 2*, apresentam alta dispersão e baixa precisão, conjuntos de resultados com *CoV* inseridos no limite de 20,0% a 30,0%. Diferente de ambos os cenários, as demais medições apresentam dispersão e precisão média, visto que o *CoV* encontra-se entre 10,0% a 20,0%.

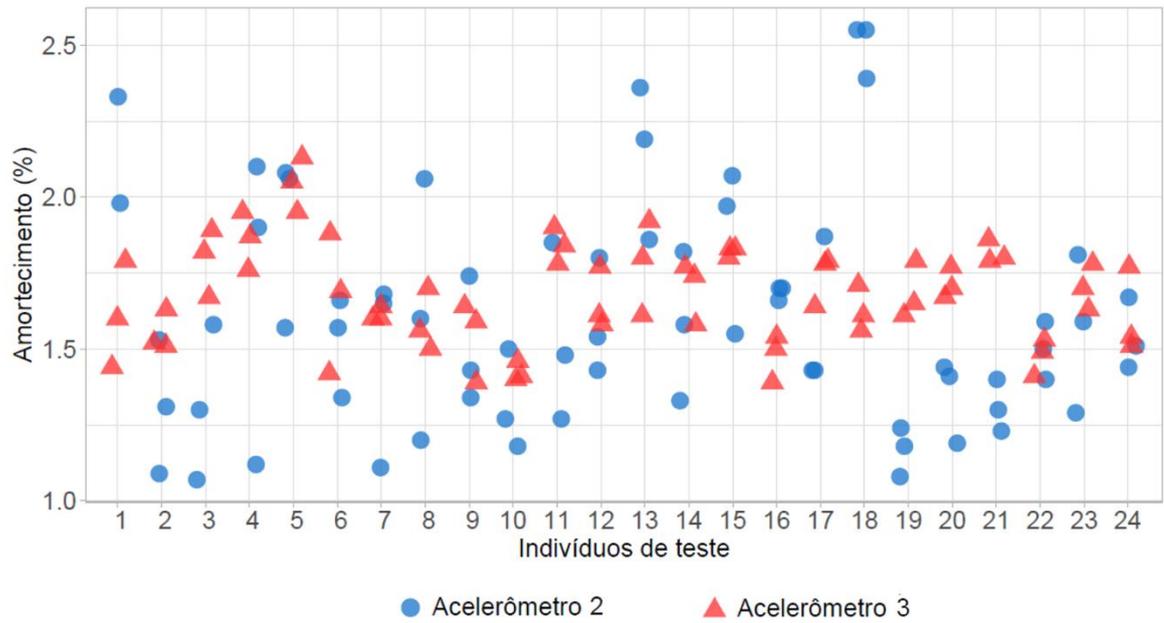
Logo, visando por uma concreta visualização dos dados coletados, a Figura 131 à Figura 136 demonstram respectivamente, as representações gráficas da distribuição dos amortecimentos mensurados, através da análise dos sinais vibratórios ocasionados pela prática da caminhada, corrida, salto e impacto de calcanhar, esses registrados por ambos dispositivos de medição empregados.

Figura 131 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada no *percurso PL*.



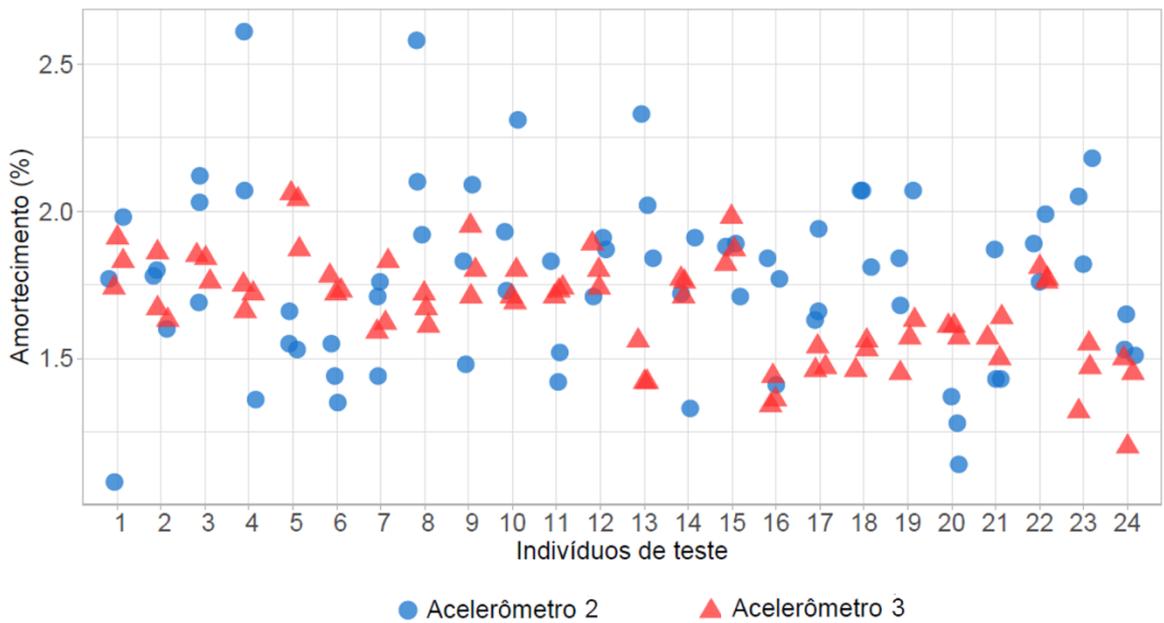
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 132 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada no percurso *PT*.



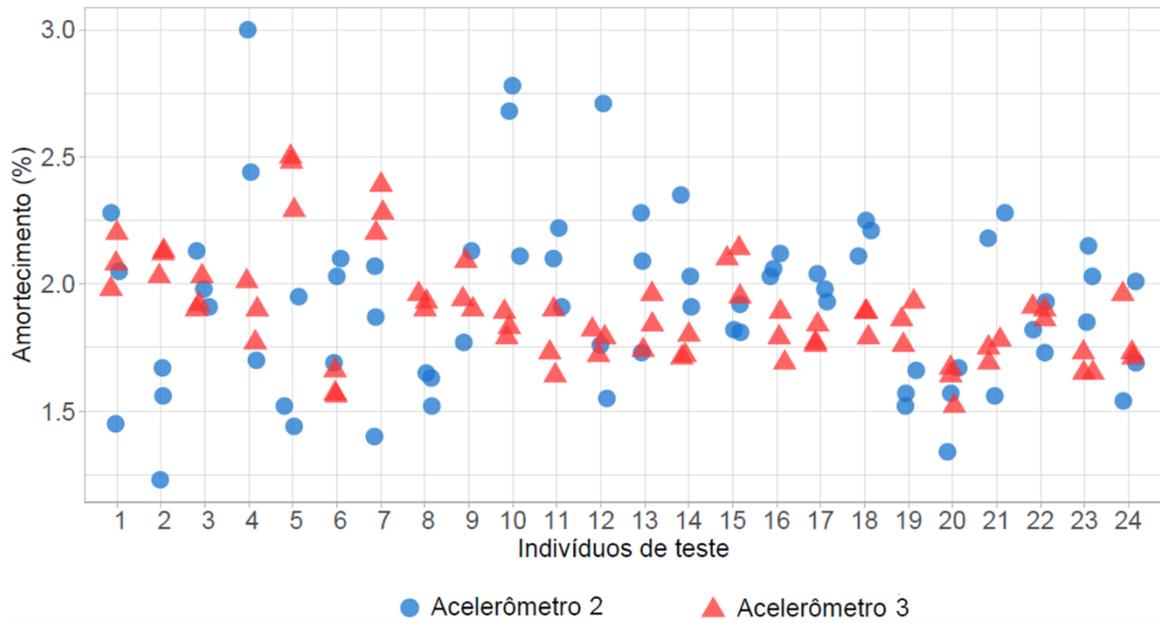
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 133 – Amortecimentos do piso, devido à corrida no percurso *PL*.



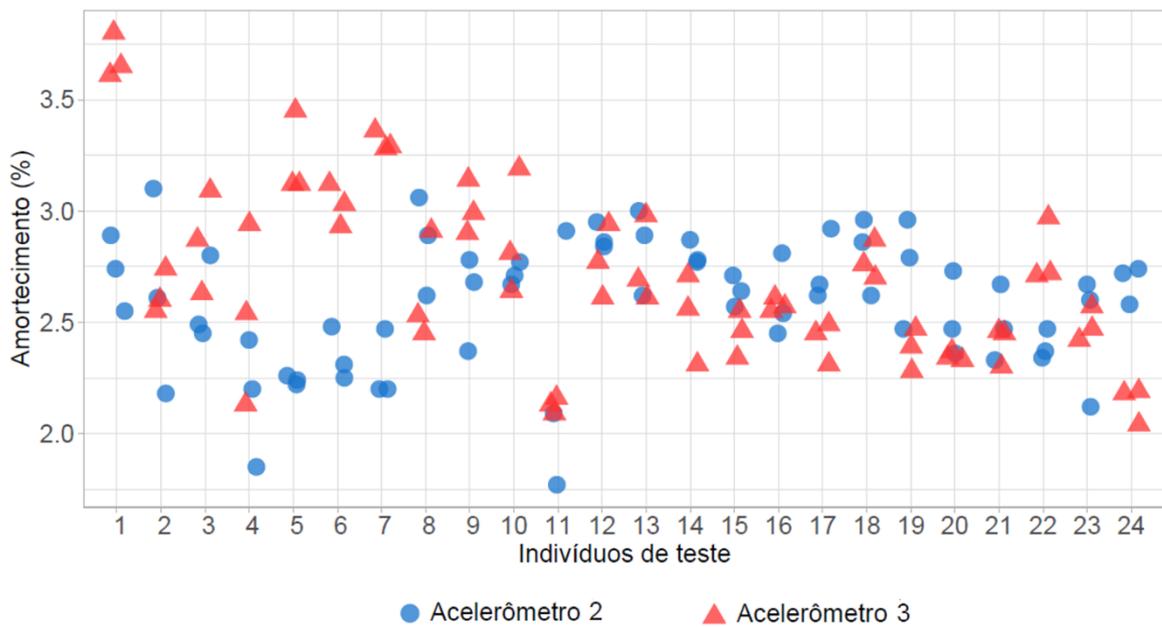
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 134 – Amortecimentos do piso, devido à corrida no percurso *PT*.



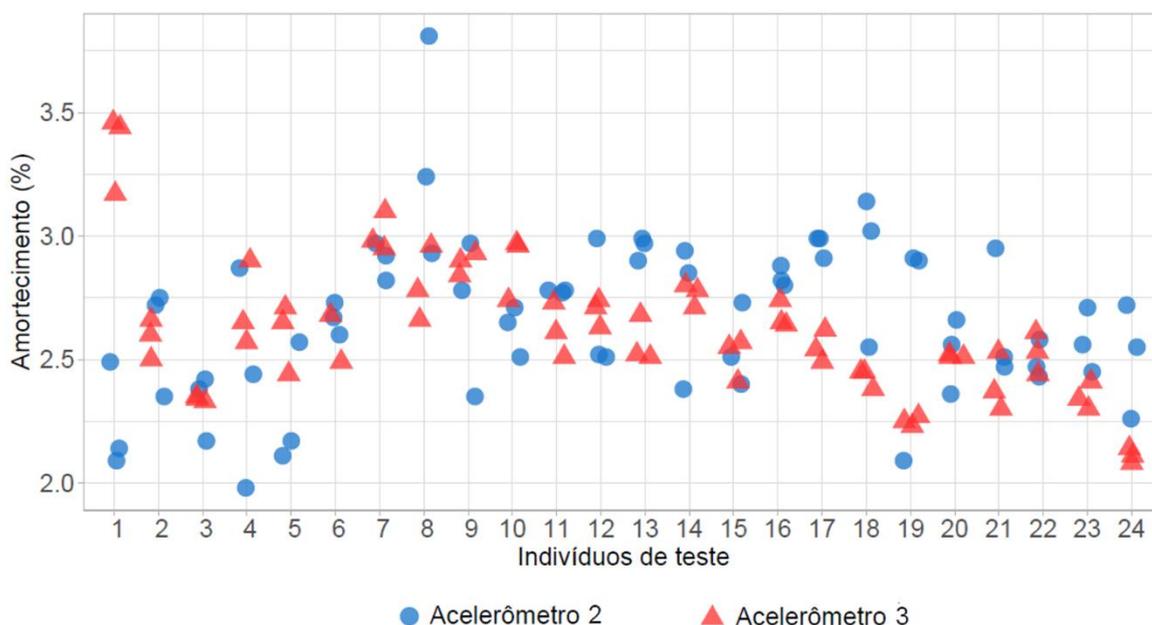
Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 135 – Amortecimentos do piso, devido ao salto na região central da estrutura.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 136 – Amortecimentos do piso, devido ao *heel drop test* na região central da estrutura.



Fonte: Próprio autor (2020).

Defronte dos valores de amortecimento obtidos, por intermédio da excitação dinâmica do piso por atividades humanas, averiguando-se as distribuições dos valores através das representações gráficas, denota-se que os valores correspondentes às atividades de caminhada e corrida ao longos do *Percurso PL* e *Percurso PT*, encontram-se situados em um intervalo de 1,0% a 4,0%, ao passo que a prática do salto e do impacto de calcanhar, resultaram na distribuição de grande parcela de dados, em um intervalo mais contido, esse na ordem de 2,0% a 3,5%. Logo, o piso em pauta apresenta taxa de amortecimento satisfatórias e adequadas para pisos executados com vigas de madeira, perante as prescrições da normativa internacional ISO 10137 (2007), a qual estabelece os limites de 1,0% a 5,5% como faixa de valores para pisos madeira.

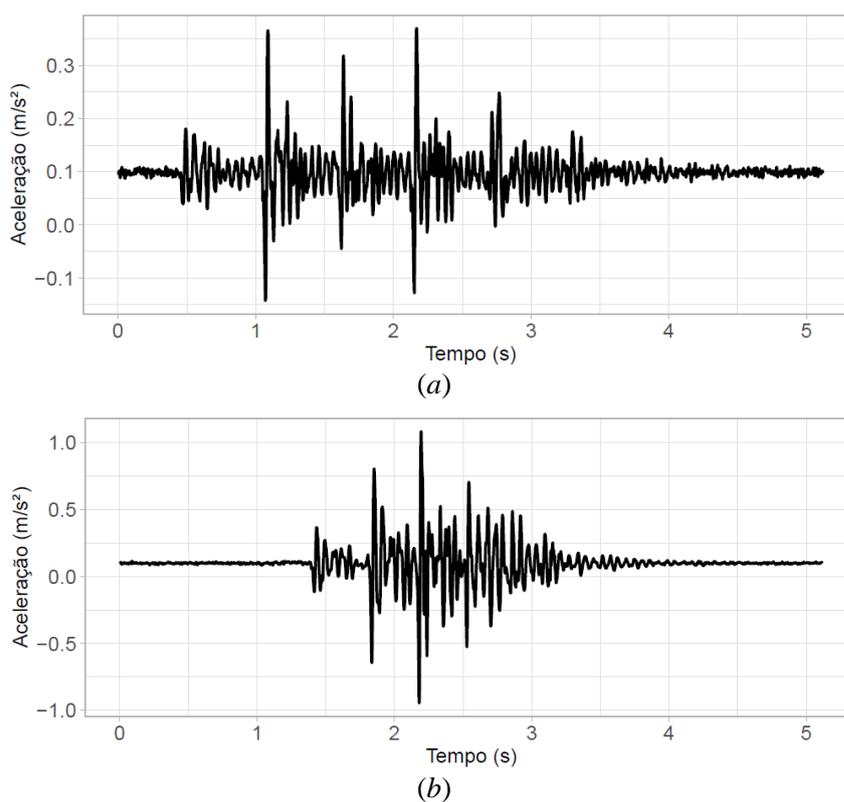
Averiguando-se os valores médios representativos exposto nas tabelas, constata-se que as ações de caminhar e correr apresentam valores médios inseridos no intervalo entre 1,42% e 1,98%, enquanto que o salto e impacto de calcanhar estão situados na faixa de valores entre 2,53% e 2,73%.

Evidencia-se que esse cenário está diretamente interligado com as particularidades de execução entre as referidas atividades, posto que a caminhada e a corrida foram desenvolvidas considerando-se as passadas características de cada indivíduo de teste, sendo

os sinais vibratórios no domínio do tempo compostos pela sobreposição do impacto de passadas consecutivas, cada qual com um pico de aceleração, como visualizado na Figura 137, onde (a) é correspondente ao sinal da caminhada e (b) da corrida, configurando uma atividade de excitação contínua.

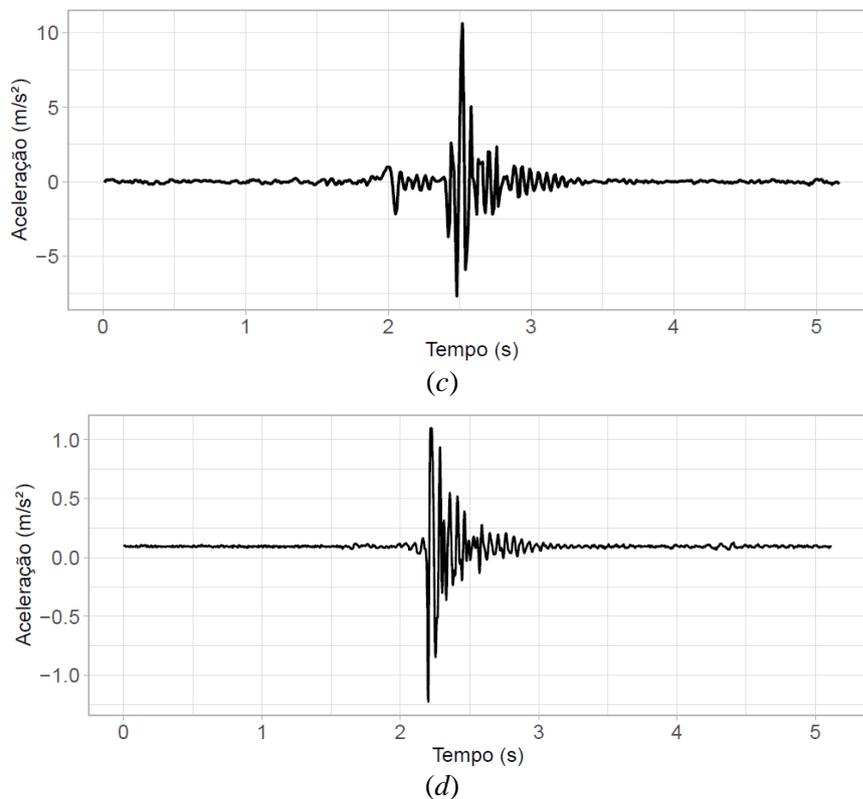
A contraponto disso, as atividades de salto e impacto de calcanhar, cujos sinais são alusivos aos índices (a) e (b) da Figura 138, foram executadas na região central do piso, considerando-se unicamente o deslocamento vertical do corpo, o que configura uma excitação de impacto, sendo o sinal vibratório categorizado por um único pico de aceleração. Devido a isso, essas atividades após o impacto, entram em vibração livre, resultando em valores superiores de amortecimento.

Figura 137 – Sinais vibratórios no domínio do tempo: (a) caminhada, (b) corrida.



Fonte: Próprio autor (2020).

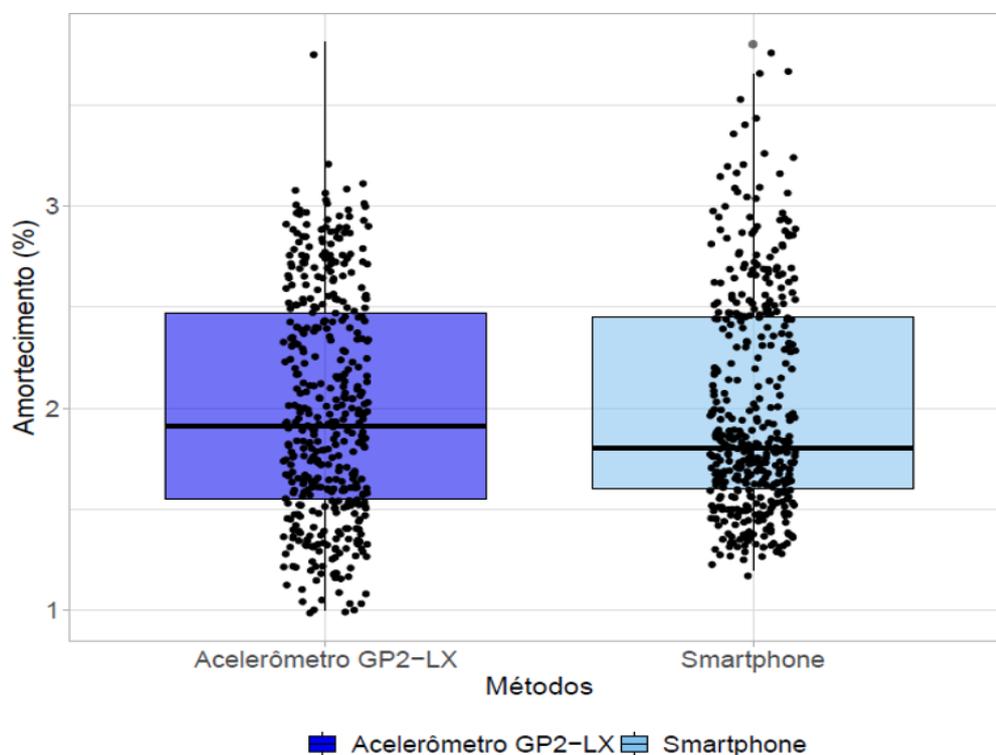
Figura 138 – Sinais vibratórios no domínio do tempo: (a) salto, (b) *heel drop test*.



Fonte: Próprio autor (2020).

Como as ações desenvolvidas pelos sujeitos de teste foram registradas paralelamente pelo equipamento GP2-LX (*Acelerômetro 2*) e pelo Smartphone (*Acelerômetro 3*), esses respectivamente com taxas de aquisição de dados na ordem de 400 Hz e 100 Hz, visando a aferição da efetividade de ambos os equipamentos de medição, uma análise estatística de variância ANOVA com nível de significância de 5,0% fora realizada, essa apresentada na Figura 139.

Figura 139 – Análise estatística dos dispositivos de medição do amortecimento do piso, devido à prática das atividades humanas.



Fonte: Próprio autor (2020).

À frente da análise estatística, novamente destaca-se a grande variabilidade na distribuição dos dados de amortecimento, coletados paralelamente por ambos equipamentos empregados. Quanto às medianas dos conjuntos de dados, observa-se que as mesmas estão dispostas próxima à mesma região do gráfico, sendo atestado pela análise ANOVA, a equivalência estatística entre ambos os conjuntos. Nessas circunstâncias, novamente é evidenciada a efetividade da aplicação dos dispositivos móveis como um instrumento alternativo e ágil para a leitura e interpretação de sinais vibratórios em tempo real, ao longo de medições de parâmetros dinâmicos em elementos e sistemas estruturais.

Agora, partindo-se para a avaliação dos amortecimentos do piso, quando a estrutura fora estimulada dinamicamente pela caminhada de um grupo, formado aleatoriamente por 10 (dez) sujeitos de teste, cenário admitido na Fase 2 do procedimento experimental de determinação da frequência fundamental, aponta-se que os seis sinais foram registrados pelo *Acelerômetro 1*, foram admitidos para o estabelecimento do amortecimento estrutural, dados resultados sumarizados na Tabela 46.

Tabela 46 – Amortecimentos do piso, devido à caminhada de um grupo de pessoas.

Pontos de medição	<i>PA</i> (%)	<i>PB</i> (%)
	6,38	6,25
Grupo	6,59	6,63
	6,09	6,10
Média (%)	6,35	6,33
Desvio padrão (%)	0,25	0,27
Coef. variação (%)	3,95	4,32

Fonte: Próprio autor (2020).

Averiguando-se ambos os conjuntos de resultados acima, quanto a medida de dispersão do coeficiente de variação, observa-se que a dispersão dos dados é baixa em relação à média aritmética, valor tomado como de referência, posto que os valores correspondentes ao *CoV* são inferiores à 10,0%, circunstância que indica a alta precisão dos resultados coletados.

A prática da ação de caminhar pelo grupo de 10 (dez) pessoas em pauta, é caracterizada por valores de amortecimento superiores aos registrados pela realização do ato de caminhar, correr, saltar e impacto de calcanhar, de modo individual por cada sujeito de teste, discutidos anteriormente. Esse contexto é elucidado em virtude da propriedade do amortecimento ser diretamente influenciada pelo tipo de madeira empregada na execução do piso, concepção estrutural, detalhes vinculados à metodologia construtiva, condições de suporte e componentes de ordem não estrutural, além da presença de ocupantes, como já explanado na subseção 2.1.3.

Logo, a razão pela qual os amortecimentos nessa fase de medição, comportam valores superiores, está diretamente interligada com as forças oriundas da interação do grupo de teste com o piso, as quais manifestam-se como alterações no amortecimento estrutural, posto que os seres humanos têm a capacidade de auxiliar na absorção da energia cinética gerada pelos movimentos vibratórios, de forma a operar como um dispositivo de massa sintonizado. Logo, como na fase de medição em pauta, dez indivíduos de teste encontravam-se em movimento sobre o piso, auxiliaram no incremento do amortecimento da estrutura, circunstância que conseqüentemente, alterou as frequências naturais do sistema.

4.4 Avaliação do conforto quanto às vibrações

Sabendo-se que as vibrações induzidas em estruturas de pisos, através da prática de atividades humanas habituais, configuram questões problemáticas de desempenho estrutural, em termos do conforto, o objetivo vinculado ao procedimento experimental em questão, tratou da classificação do piso, através da aplicação de uma análise subjetiva das vibrações provocadas por atividades humanas, de forma a coletar a opinião dos indivíduos de teste participantes, quanto ao conforto e aceitabilidade das vibrações experienciadas, por intermédio do questionário exposto no Apêndice C, juntamente com a frequência natural do sistema estrutura, para a aferição do atendimento das recomendações da normativa brasileira, em conformidade com a subseção 3.3.4.

Isto posto, foram admitidos dois estágios de medição e experiencição das vibrações provocadas por um sujeito estimulador, sendo no primeiro os indivíduos de teste admitidos em pé sobre o piso em pauta, como mostrado na Figura 140, ao passo que no segundo ciclo, os mesmos passavam à uma postura sentada, em uma cadeira com encosto e assento estofados, vide Figura 141, estando em ambos os cenários, situados na região central do piso.

Figura 140 – Indivíduo de teste em pé durante a avaliação subjetiva do piso, quanto à prática de atividades humanas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 141 – Indivíduo de teste sentado em uma cadeira durante a avaliação subjetiva do piso, quanto à prática de atividades humanas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Atentando-se para que as avaliações não fossem comprometidas severamente, dado todos os fatores que afetam a sensibilidade humana, retratados na subseção 2.1.4, as opiniões foram formadas sem que interrupções ocorressem, estando o laboratório onde o procedimento experimental fora desenvolvido, com as janelas e persianas fechadas e silencioso, de forma a privar os indivíduos de testes de sinais visuais e sonoros externos, os quais também tinham os olhos vendados para inibir a visualização da prática das atividades pelo sujeito estimulador.

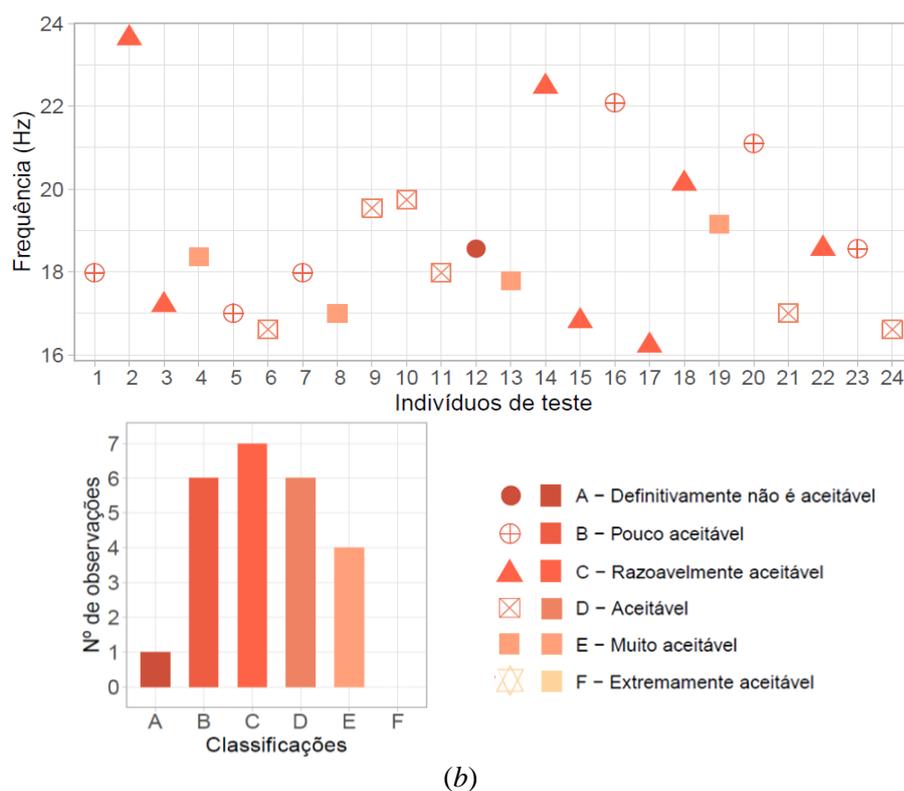
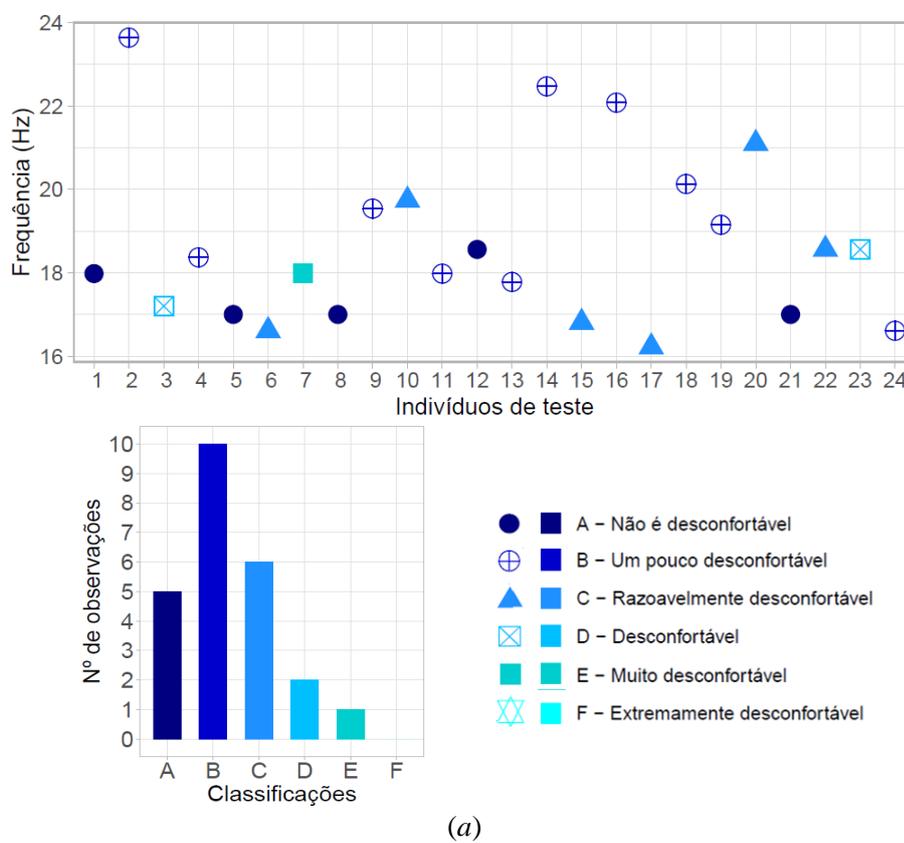
Além disso, os indivíduos de teste eram expostos às vibrações provocadas pelas atividades humanas por um período máximo de 10 (dez) segundos, uma vez que quanto maior o período de exposição, maior é a familiarização dos seres humanos com a mesma, cenário que pode afetar a classificação das vibrações experienciadas, de modo a torná-las cada vez mais toleráveis.

Uma vez que as avaliações envolvem a subjetividade dos participantes, após a prática de cada ação, os indivíduos respondiam as questões atreladas ao conforto e à aceitabilidade das vibrações experienciadas, iniciando pelo estágio com postura em pé seguido da postura sentada na cadeira, com as atividades humanas praticadas considerando a ordem de impacto

de calcanhar, caminhada, corrida e salto, de modo que as opiniões não fossem comprometidas pela confusão de sentimentos e sensações dos participantes, caso o questionário fosse respondido ao final de todos os testes.

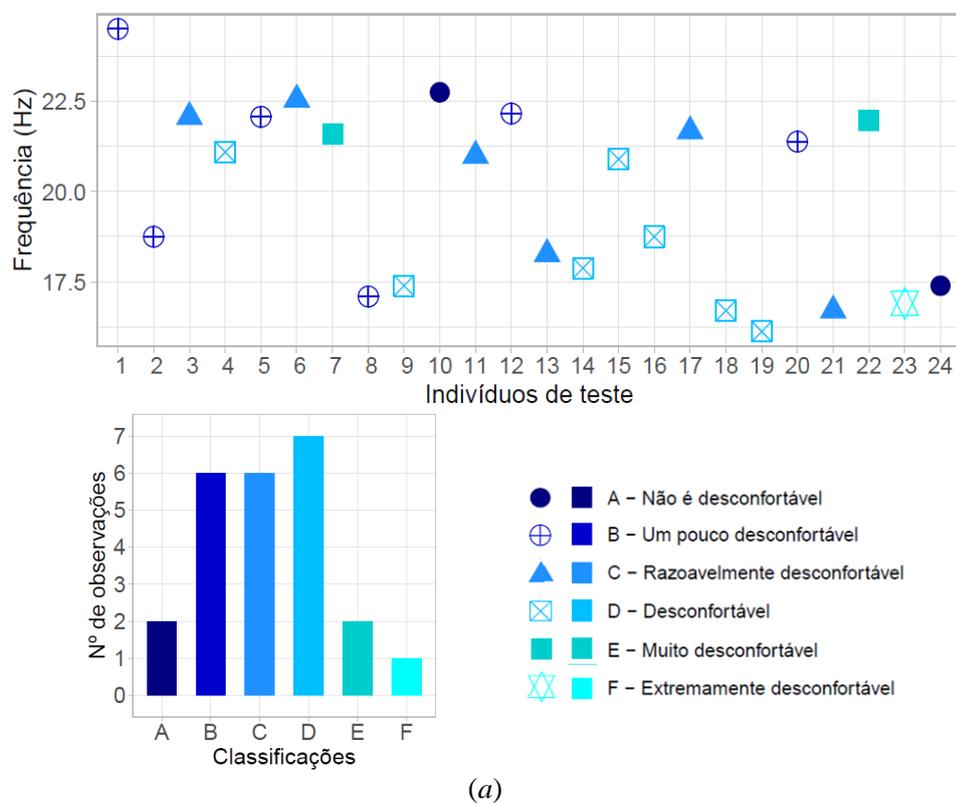
Para tanto, as plotagens gráficas da Figura 142 à Figura 145 exibem as opiniões dos participantes quando dispostos na postura em pé, ao passo que os pareceres com a postura sentados em uma cadeira, são apresentados da Figura 146 à Figura 149, acerca das ações de impacto de calcanhar, caminhar, correr e saltar, juntamente com as frequências fundamentais aferidas pelo dispositivo do *Acelerômetro 2*, sendo os indicadores *(a)* e *(b)*, alusivos às avaliações do conforto e da aceitabilidade, respectivamente.

Figura 142 – Avaliação da vibração devido ao *heel drop* com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).

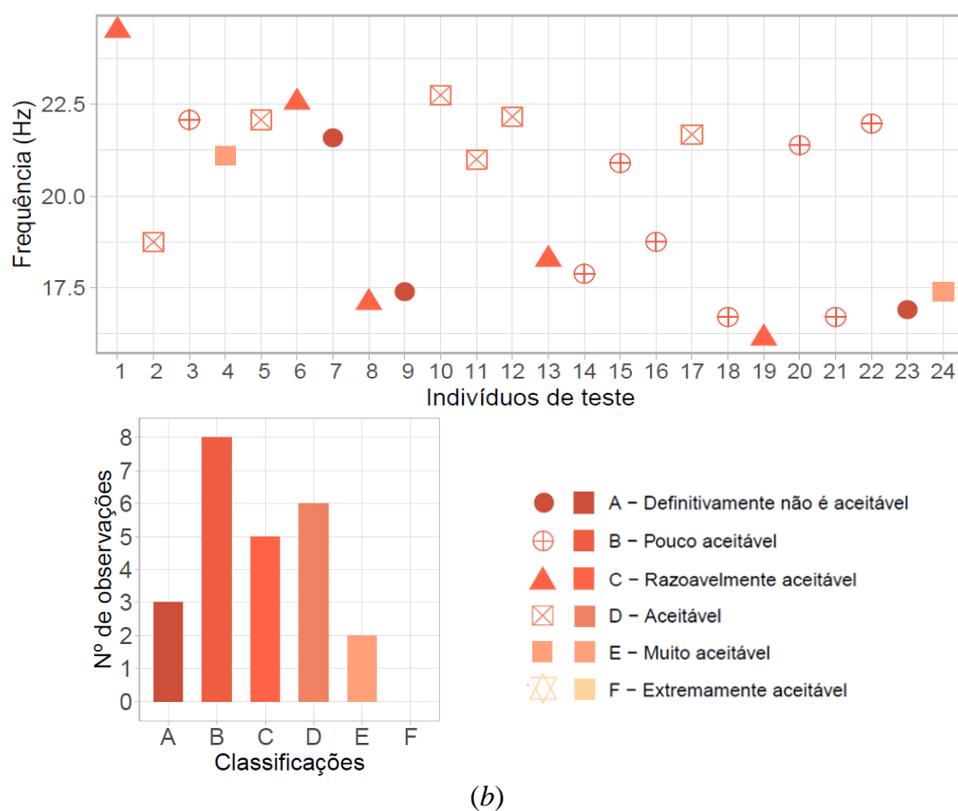


Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 143 – Avaliação da vibração devido à caminhada com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).



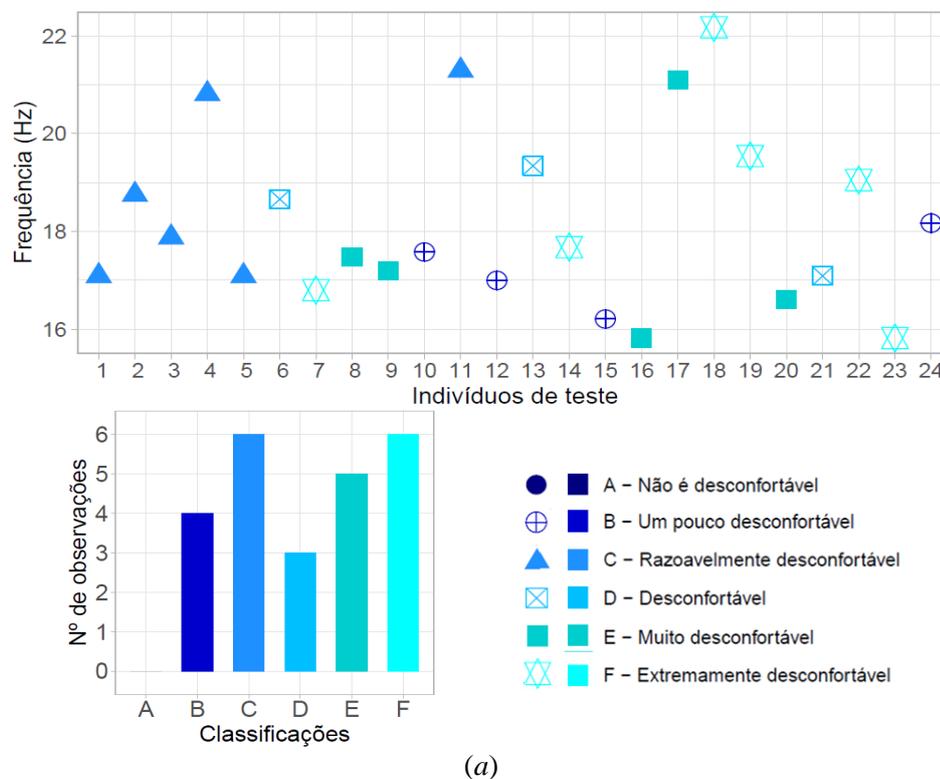
(a)



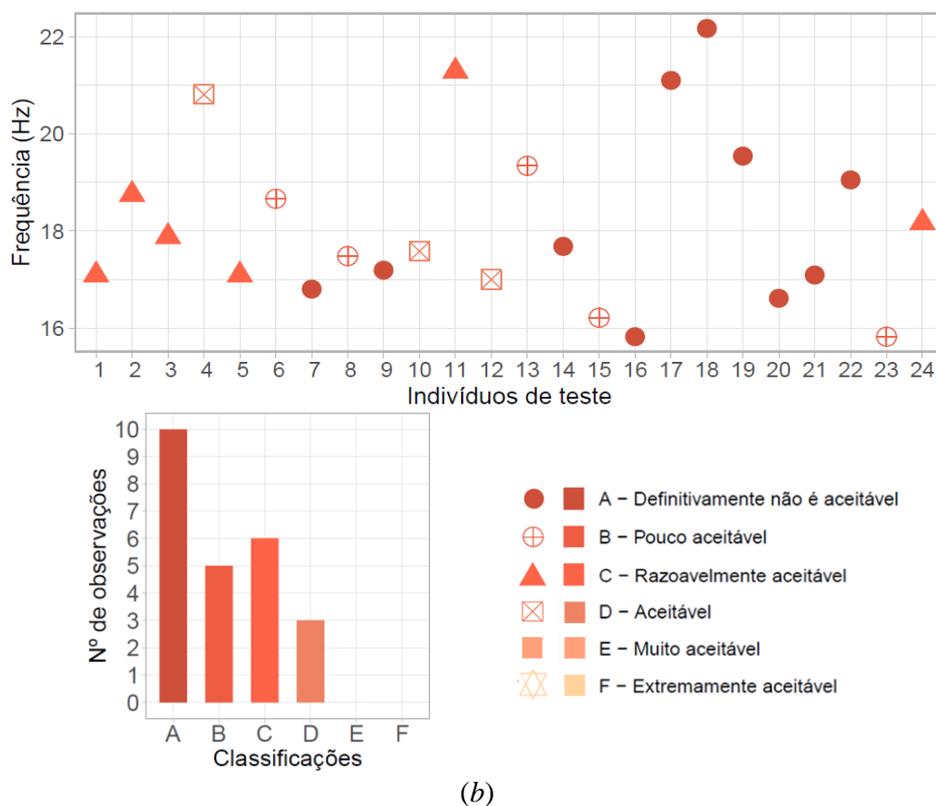
(b)

Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 144 – Avaliação da vibração devido à corrida com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).

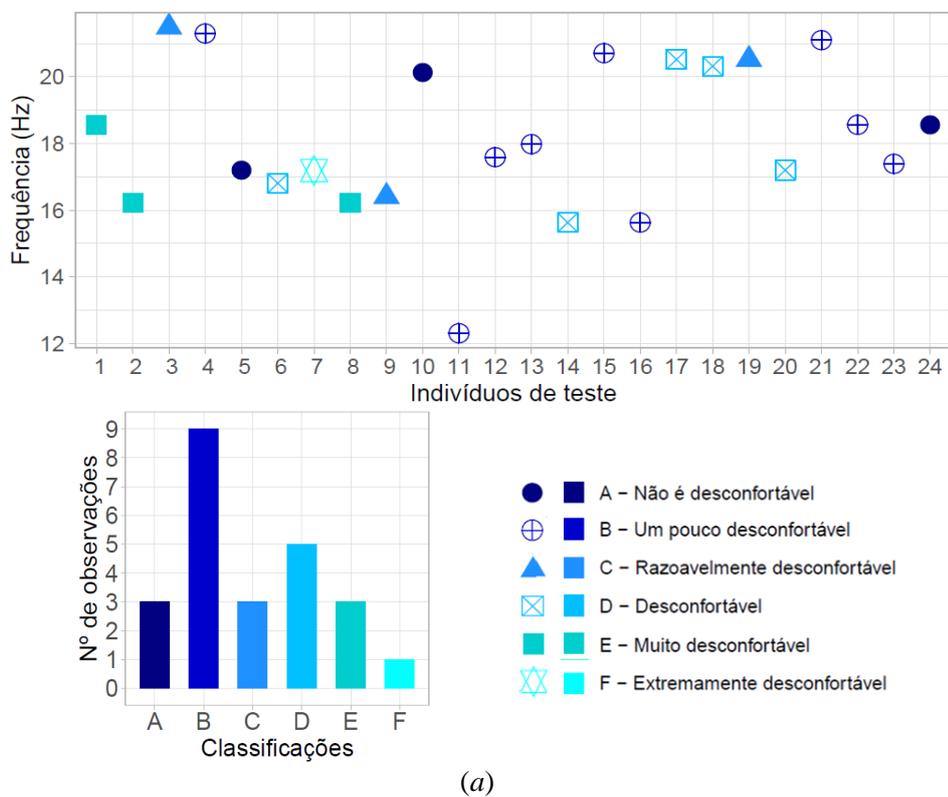


(a)

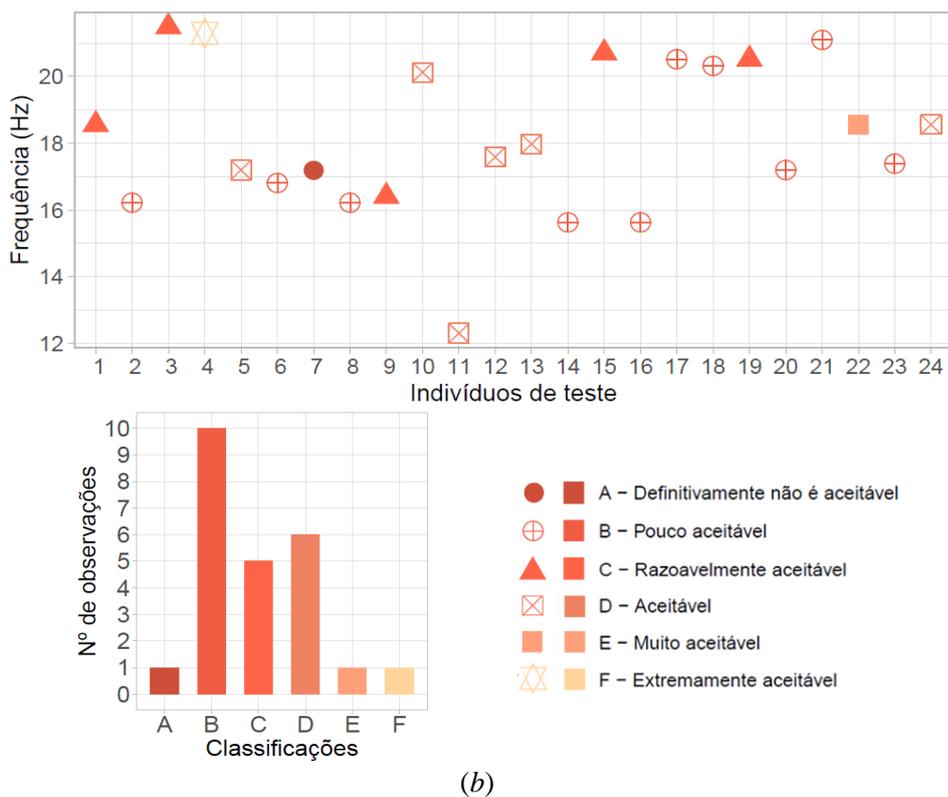


(b)

Figura 145 – Avaliação da vibração devido ao salto com os indivíduos de teste em pé, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).

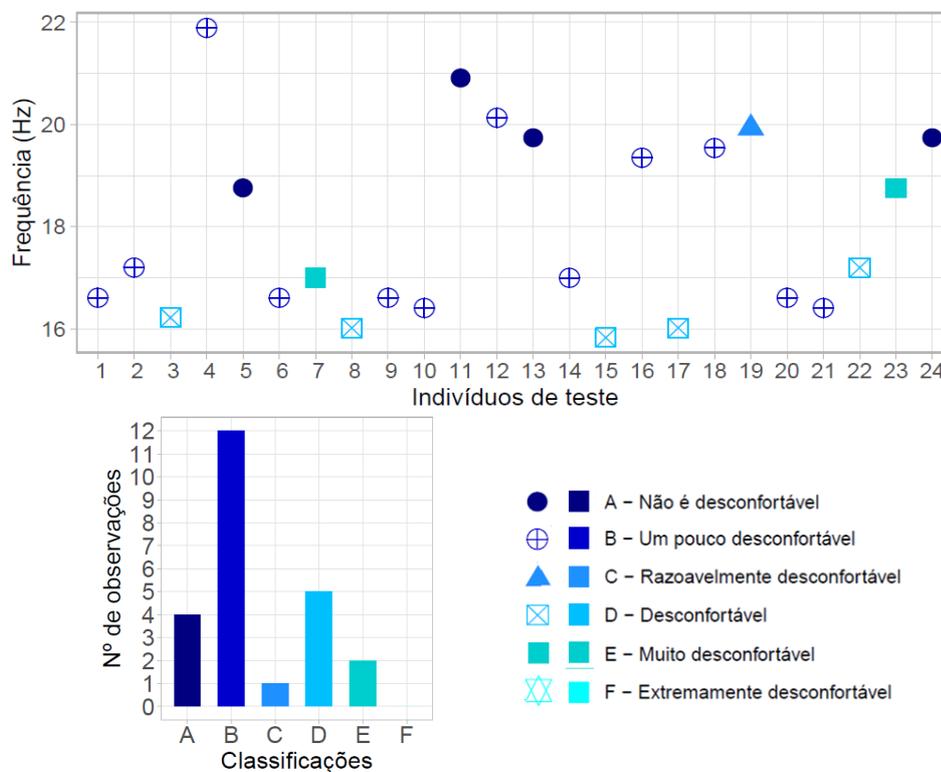


(a)

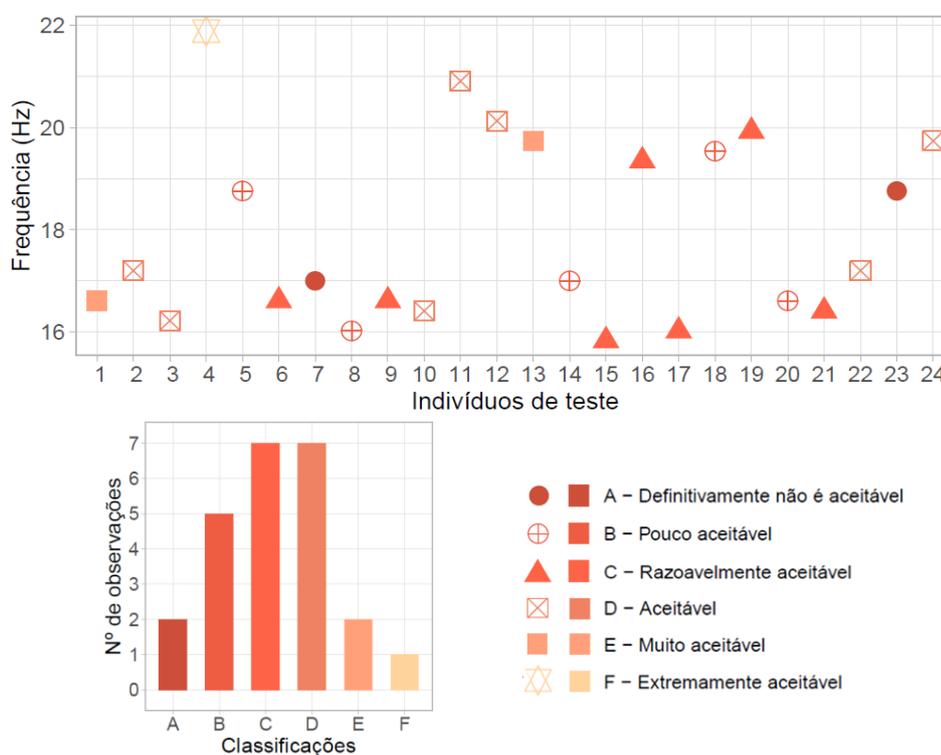


(b)

Figura 146 – Avaliação da vibração devido ao *heel drop* com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).

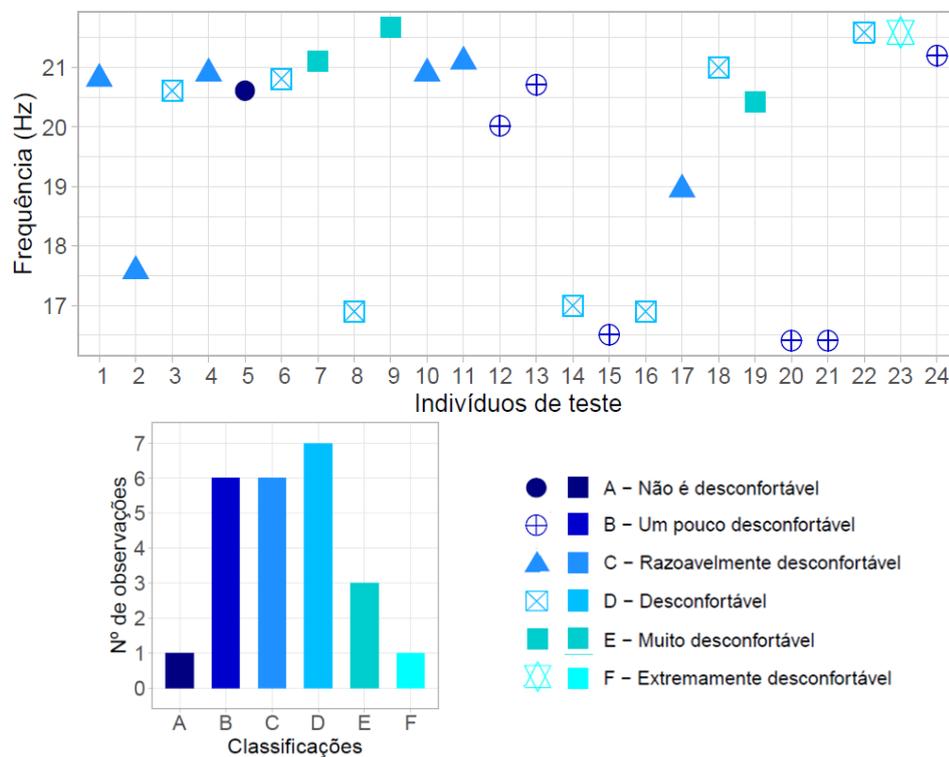


(a)

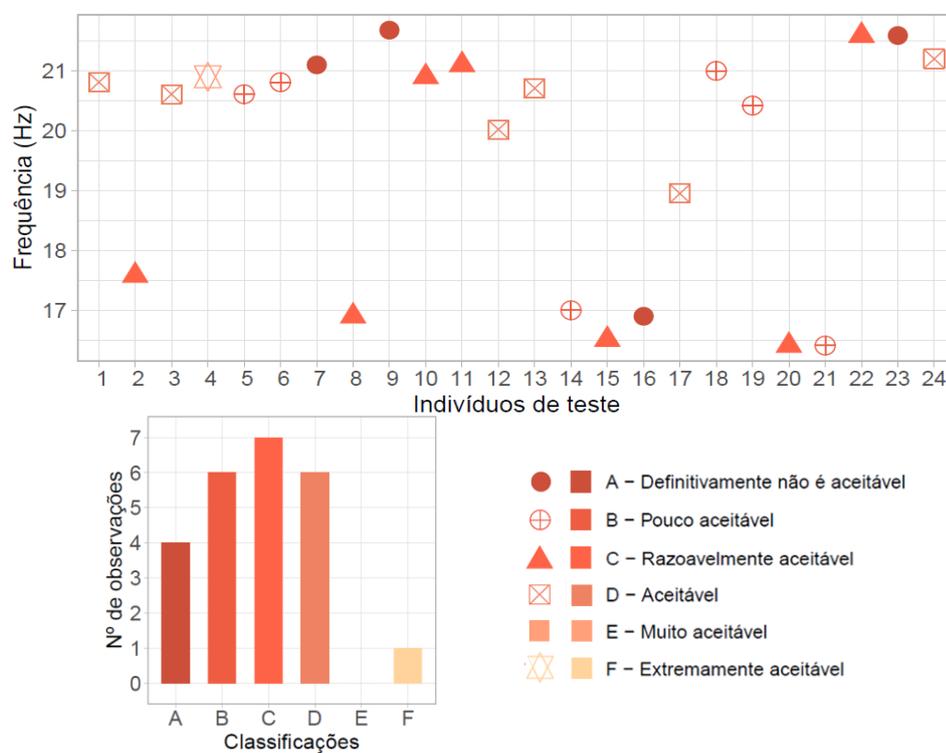


(b)

Figura 147 – Avaliação da vibração devido à caminhada com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).



(a)



(b)

Figura 148 – Avaliação da vibração devido à corrida com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).

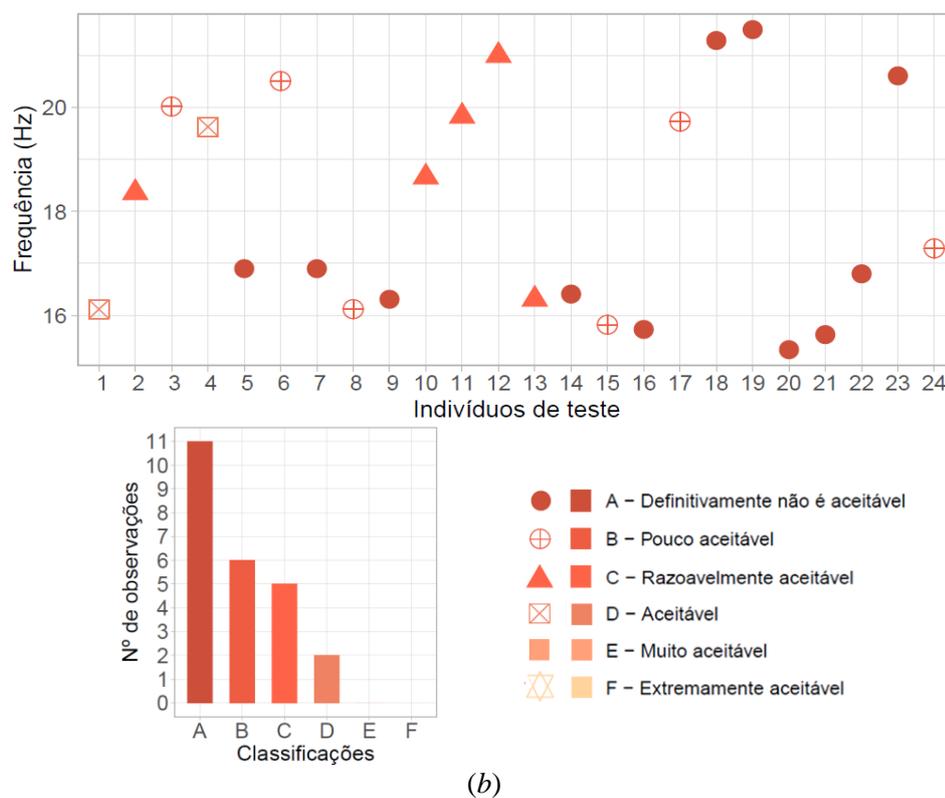
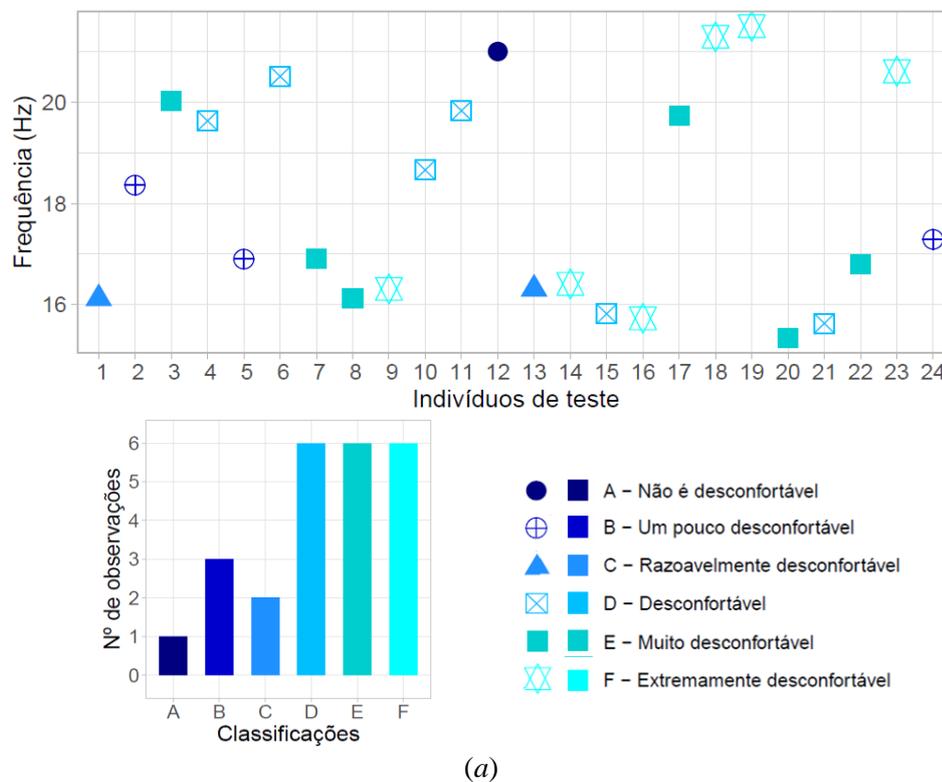
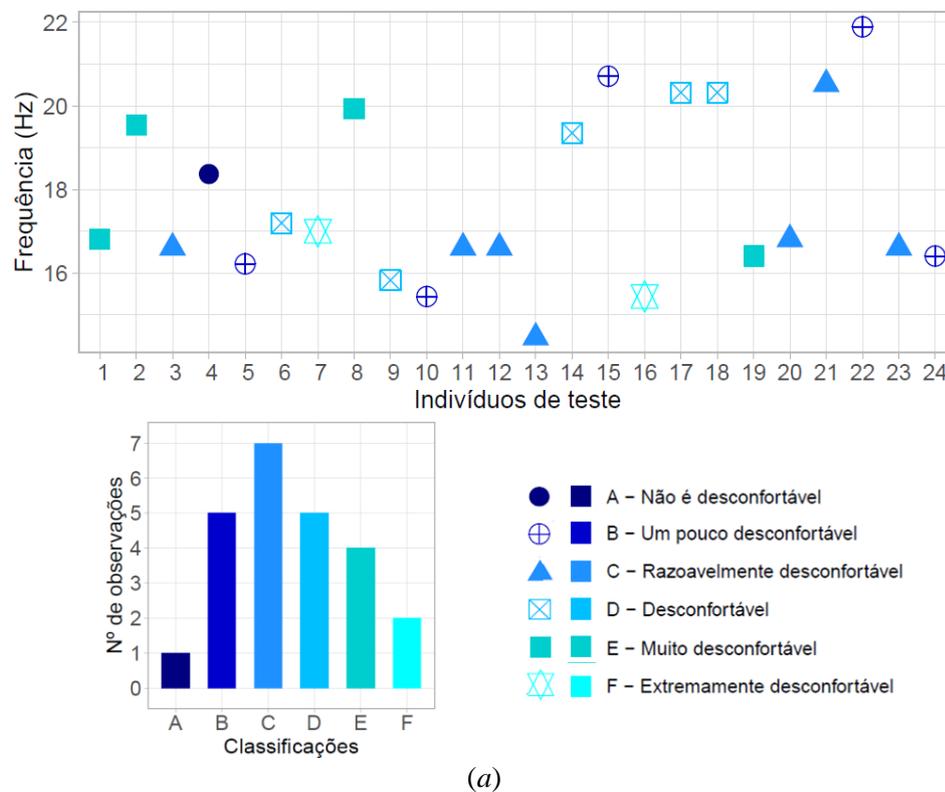
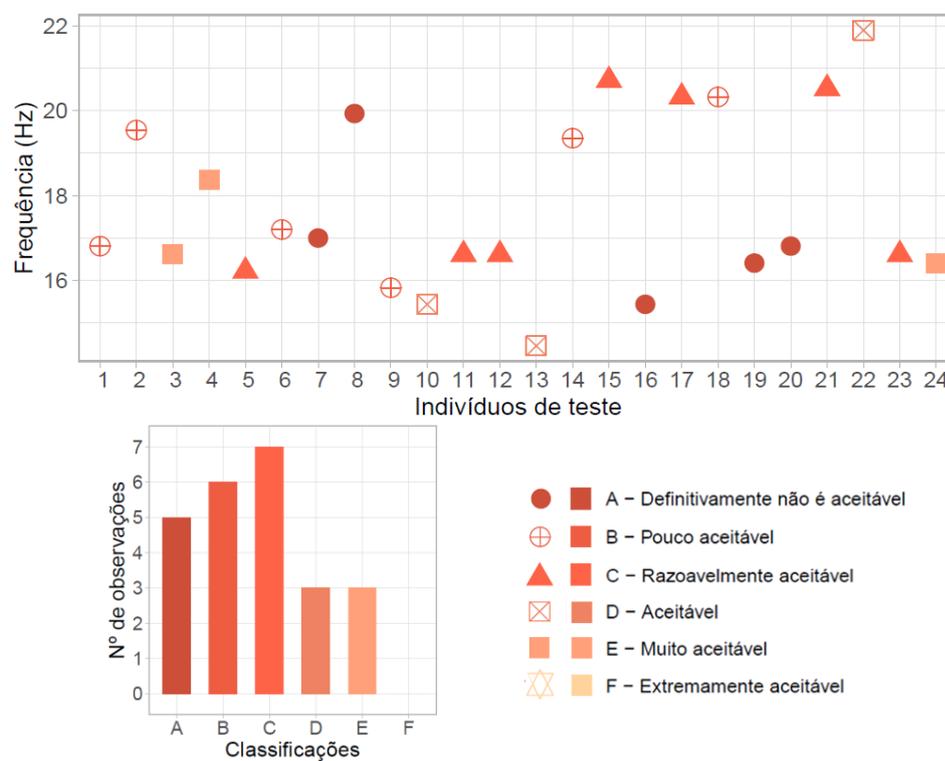


Figura 149 – Avaliação da vibração devido ao salto com os indivíduos de teste sentados, em relação ao incômodo (a) e à aceitabilidade (b).



(a)



(b)

Analisando-se as apresentações gráficas da avaliação subjetiva dispostas acima, averigua-se elevada variabilidade nas respostas dos indivíduos de teste, quanto às classificações acerca do conforto e da aceitabilidade das vibrações experienciadas, circunstância corroborada pela subjetividade particular vinculada à cada ser humano, cenário que inviabiliza a determinação precisa e quantitativa da sensibilidade humana.

Diante disso, dado o objetivo do procedimento experimental em questão, de analisar as opiniões das vibrações experienciadas atreladas à frequência fundamental da estrutura, o conjunto de opiniões coletadas fora empregado como um indicador geral de desempenho quanto ao parâmetro dinâmico da frequência natural. Assim sendo, o Quadro 9 e o Quadro 10, evidenciam respectivamente, as classificações finais do piso quanto ao conforto, em termos do incômodo, e à aceitabilidade das vibrações originadas pela prática de ações de impacto de calcanhar, caminhar, correr e saltar, essas experienciadas por indivíduos de teste em pé e sentados em uma cadeira.

Quadro 9 – Classificações do piso quanto ao incômodo das vibrações.

Atividades	Indivíduos em pé	Indivíduos sentados
<i>Heel drop test</i>	Um pouco desconfortável	Um pouco desconfortável
Caminhada	Desconfortável	Desconfortável
Corrida	Razoavelmente desconfortável e extremamente desconfortável*	Desconfortável a extremamente desconfortável**
Salto	Um pouco desconfortável	Razoavelmente desconfortável
Nota: * A estrutura do piso fora classificada como desconfortável e extremamente desconfortável, mesmo quantitativo de indivíduos de teste (seis pessoas). ** A estrutura do piso fora classificada como desconfortável, muito desconfortável e extremamente desconfortável, pelo mesmo quantitativo de indivíduos de teste (seis pessoas).		

Fonte: Próprio autor (2020).

Quadro 10 – Classificações do piso quanto à a aceitabilidade das vibrações.

Atividades	Indivíduos em pé	Indivíduos sentados
<i>Heel drop test</i>	Razoavelmente aceitável	Razoavelmente aceitável e aceitável*
Caminhada	Pouco aceitável	Razoavelmente aceitável
Corrida	Definitivamente não é aceitável	Definitivamente não é aceitável
Salto	Pouco aceitável	Razoavelmente aceitável
Nota: * A estrutura do piso fora classificada como razoavelmente aceitável e aceitável, mesmo quantitativo de indivíduos de teste (sete pessoas).		

Fonte: Próprio autor (2020).

Através de ambos os quadros apresentados acima, esses sumarizando as classificações finais do piso pela avaliação subjetiva, denota-se que a postura dos indivíduos sentados em uma cadeira apresenta relativamente, uma maior sensibilidade às vibrações experienciadas, pela prática das ações de impacto de calcanhar, caminhar, correr e saltar, por um sujeito estimulador da estrutura.

Esse contexto ocorre, devido ao fato de que na postura sentada, a transmissão e propagação dos movimentos vibratórios pela cadeira ao corpo humano, ocorre através de superfícies de contato com as costas e com a região posterior das coxas, a contraponto da postura em pé, na qual unicamente os pés encontram-se em contato direto com o elemento em vibração. Ainda, ressalta-se que na postura em pé, a sensibilidade às vibrações é inferior à postura sentado, posto que o sistema nervoso, por estar habituado com as acelerações provocadas pelo caminhar do próprio indivíduo, é capaz de desconsiderar as mesmas, quando o indivíduo encontrar-se em pé, experienciando as vibrações de outras pessoas.

Para tanto, averiguando em um âmbito geral, denota-se que as vibrações provocadas na estrutura em pauta, classificam o piso como um sistema incomodativo e inaceitável, a contraponto disso, as verificações de projetos vinculadas ao Estado Limite de Serviço (ELS), que abrange critérios voltados à durabilidade estrutural e estética bem como critérios de segurança relacionados ao conforto dos usuários, categorizam a estrutura em pauta como um piso de alta frequência, com frequências fundamentais superiores à 8,0 Hz, de modo a não comportar falhas de desempenho de vibrações.

Sendo a resposta humana às vibrações de pavimentos muito complexa, não se pode justificar o grau de incômodo e aceitabilidade dos ocupantes, dada a gama de fatores que

afetam a sensibilidade, unicamente admitindo a magnitude vibração experienciada, outros fatores vinculados à resposta dinâmica da estrutura bem como parâmetros físicos dos ocupantes e do ambiente circundante, devem ser consideradas, para que a verificação de projeto completa e efetiva do sistema estrutural, seja desenvolvida.

Reconhece-se que as opiniões coletadas pela análise subjetiva realizada na presente pesquisa, são insuficientes para a proposição de uma metodologia de verificação de desempenho de vibração, uma vez que as respostas obtidas no laboratório não são diretamente correspondes às opiniões formadas a longo prazo por parte dos ocupantes das edificações. Entretanto, as opiniões operam como parâmetros de indicação para a necessidade de reavaliação dos critérios do estado limite de vibrações da normativa brasileira, para que o mesmo torne-se mais rigoroso e efetivo na verificação dos sistemas estruturais.

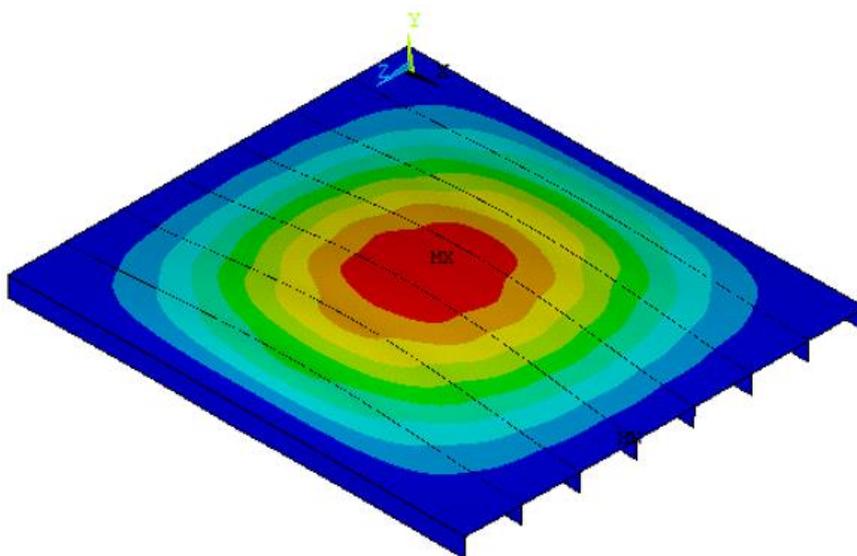
4.5 Modelagem numérica

Dadas as vantagens atreladas ao Método dos Elementos Finitos para a modelagem de elementos estruturais, pela aplicação do uso do Software *ANSYS Inc* versão 19.1, com a interface para a linguagem *ANSYS Parametric Design Language* (APDL), o piso em foco na presente pesquisa, fora caracterizado quanto a seu comportamento dinâmico, por intermédio de uma análise de ordem modal, visando a comparação dos resultados aqui obtidos, com os conjuntos de dados determinados experimentalmente.

Utilizando-se o elemento do tipo casca *shell281*, os elementos de viga em Madeira Laminada Colada bem como da estrutura de fechamento em OSB, foram modelados aplicando-se a linguagem APDL, estando essa descrita na íntegra pelo Apêndice D. Aponta-se que, as propriedades geométricas das vigas de MLC e das placas de OSB, bem como as propriedades físicas e mecânicas desses elementos, essas em conformidade com a subseção 3.3.5, foram consideradas, visando uma adequada calibração do modelo numérico.

Logo, a Figura 150 à Figura 152 apresentam as três primeiras frequências naturais e seus respectivos modos de vibração do piso em pauta, modelado numericamente.

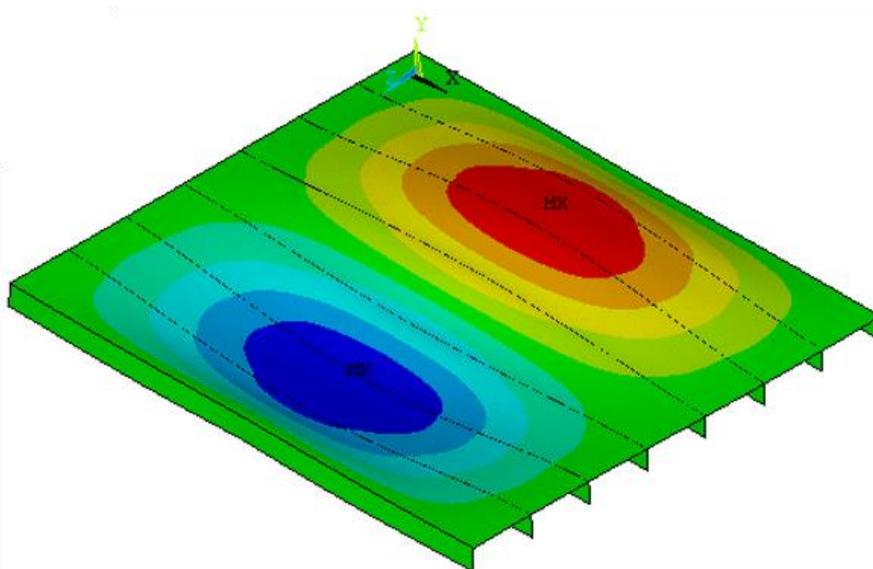
Figura 150 – Primeiro modo de vibração do piso.



1º modo: $f_1 = 14,76 \text{ Hz}$

Fonte: Próprio autor (2020).

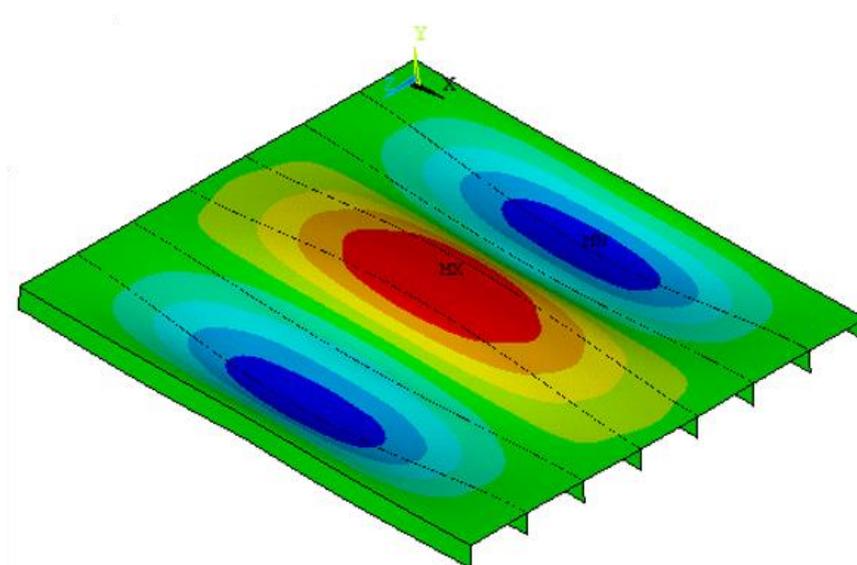
Figura 151 – Segundo modo de vibração do piso.



2º modo: $f_2 = 17,35 \text{ Hz}$

Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 152 – Terceiro modo de vibração do piso.



3º modo: $f_3 = 20,71 \text{ Hz}$

Fonte: Próprio autor (2020).

Uma vez que, análises do comportamento dinâmico de sistemas estruturais, quando desenvolvidas no caráter de avaliação modal, como no caso da presente pesquisa, as frequências naturais e as formas modais são obtidas em circunstâncias onde nenhuma tipologia de carregamento é imposta ao modelo, ao se analisar as respostas dinâmicas da estrutura em pauta, denota-se que para as três primeiras frequências naturais características da mesma, os modos de vibração correspondentes são de flexão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Através do desenvolvimento da pesquisa em pauta, na qual por intermédio da execução em escala real, de um piso com vigas de Madeira Laminada e Colada e estrutura de cobertura composta por placas de OSB, os parâmetros de vibração, em termos da frequência fundamental (f_p) e taxa de amortecimento (ξ), foram estabelecidos, mediante a prática de procedimentos experimentais, admitindo vibrações forçadas oriundas da prática de atividades humanas de caminhar, correr e saltar, além do teste de impacto de calcanhar, o qual simula o carregamento dinâmico de uma indivíduo caminhando ou correndo, bem como pela realização de uma análise de caráter numérica.

Para tanto, observando-se os resultados obtidos acerca do comportamento dinâmico do piso, quanto à frequência natural, através das metodologias descritas no procedimento experimental 2, referente à subseção 3.3.2, constata-se que as aferições voltadas à caminhada individual de dois sujeitos de teste, à caminhada coletiva de um grupo formado por 10 (dez) pessoas, ao teste de impacto de calcanhar desenvolvido por um único indivíduo e ao teste admitindo a prática de atividades de caminhar, correr, saltar e de impacto de calcanhar por 24 (vinte e quatro) sujeitos, apresentam valores médios representativos do referido parâmetro dinâmico, distribuídos de um modo geral, no intervalo de 15,69 Hz a 22,99 Hz.

Analisando os limites apontados acima, sejam eles em termos da distribuição dos dados no conjunto mensurado ou quanto aos valores médios representativos, conclui-se que a estrutura analisada é categorizada como um piso de alta frequência, dado que apresenta frequências naturais superiores à faixa limite de 8 a 10 Hz, em conformidade com as prescrições da normativa internacional ISO 10137 (2007), de modo a não exibir falhas de desempenho vibracional, uma vez que os esforços produzidos pelo impacto de cada passada com a estrutura, é dominado pela resposta transiente, sendo dissipada pela massa e rigidez do sistema estrutural, antes que o impacto da próxima passada ocorra.

Acerca da propriedade dinâmica do amortecimento estrutural, o piso estimulado pela prática de atividades por um único sujeito de teste, fora categorizado por valores médios representativos disposto no limite de 1,42% a 2,73%, ao passo que em circunstâncias de carregamento dinâmico por um grupo de pessoas, a taxa de amortecimento média de 6,34% fora estabelecida. Logo, as taxas de amortecimento estabelecidas para o piso são satisfatórias e adequadas para pisos executados com vigas de madeira, perante as prescrições da

normativa internacional ISO 10137 (2007), a qual estabelece os limites de 1,0% a 5,5% como faixa de valores para pisos madeira.

Associada às determinações objetivas da frequência fundamental e da taxa de amortecimento do piso em pauta, essas discutidas até o momento, uma análise de ordem subjetiva fora realizada, essa considerando a classificação da estrutura, quanto ao incômodo e aceitabilidade das vibrações experienciadas por indivíduos de teste em pé sobre o piso bem como sentados em uma cadeira de encosto estofado, ao passo que um sujeito estimulador praticava o impacto de calcanhar, caminhada, corrida e salto. Assim, por intermédio do preenchimento de um questionário, as vibrações experienciadas pelos sujeitos de teste, foram classificadas, de forma que a análise e avaliação posterior das mesmas, categorizou subjetivamente o pavimento em pauta, como uma estrutura com desempenho insatisfatório.

Denota-se que, a referida classificação subjetiva da estrutura contesta os requisitos de verificação do estado limite de vibração do código normativo brasileiro ABNT NBR 7190:1997 – Projeto de estruturas de madeira, posto que esse unicamente requer, que os sistemas estruturais de pisos de madeira apresentem o fator objetivo da frequência fundamental superior ao valor limite de 8,0 Hz, para o atendimento das verificações de vibrações excessivas. Em virtude dessas constatações, as opiniões subjetivas coletadas em ambiente de análise da estrutura em laboratório, trabalham como parâmetros indicadores da necessidade de reavaliação dos critérios do estado limite de vibrações da normativa brasileira, para que o mesmo torne-se mais rigoroso e efetivo na verificação dos sistemas estruturais em madeira.

Voltando-se ao campo do desenvolvimento de pesquisas experimentais e de modelagens numéricas, na presente pesquisa os dados coletados por métodos experimentais foram corroborados pelas determinações numéricas. Isto posto, destaca-se que a área experimental proporciona avaliações efetivas e precisas dos parâmetros em análise, dado que os testes são todos realizados nas estruturas em escala real, considerando o cenário real de carregamentos atuantes bem como determinada gama de fatores influentes. Quanto ao modelagem numérica, esse método permite que qualquer tipologia de sistema estrutural seja discretizadas matematicamente, de modo a apresentar por intermédio computacional, os referidos sistemas em um cenário muito aproximado de suas condições reais, uma vez que o avanço da tecnologia possibilita a melhoria do processamento de dados para a resolução de cálculos matemáticos, viabilizando a consideração de grande parcela das particularidades

dos sistemas estruturais, de modo a auxiliar na avaliação das respostas comportamentais desses.

Em termos dos dispositivos móveis aplicados para o registro dos sinais vibratórios provocados pelas atividades humanas, declara-se que os mesmos tratam de uma alternativa efetiva de medição, dada a alta correlação com os acelerômetros com taxa de aquisição de dados superiores. Assim sendo, usando-se de leituras com Smartphone, as medições de ordem experimental são incentivadas, tanto em circunstâncias de desenvolvimento de pesquisas em laboratório bem como em caracterizações estruturais em escala real e *in-loco*, proporcionando um cenário otimizados, dada à redução de preparo dos ensaios solicitados e da execução dos mesmos, em virtude da agilidade instantânea da leitura e interpretação dos sinais vibratórios, proporcionadas por esse dispositivo presente ativamente, no cotidiano da população.

5.1 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir do desenvolvimento das análises de ordem experimental e numérica pela presente pesquisa, acerca dos parâmetros de vibração em piso constituído por vigas de Madeira Laminada e Colada, associadas à estrutura de cobertura em OSB, em circunstâncias de estímulo dinâmico do referido sistema por atividades humanas de caminhar, correr e saltar, bem como pelo teste de impacto de calcanhar, atesta-se que investigações complementares são de grande valia para a efetividade da investigação dessa tipologia construtiva de pavimento em madeira.

Para tanto, seguem recomendações para a continuidade da investigação do sistema estrutural em pauta:

- Mensurar os parâmetros dinâmicos da estrutura, em termos da frequência natural e taxas de amortecimento, considerando carregamentos dinâmicos oriundos da prática de atividades humanas rítmicas, como a dança;
- Avaliar as respostas dinâmicas do piso, admitindo-se cenários que configuram cargas de ocupação de ambientes, de ordem residencial e comercial, visando determinar a influência dos elementos não-estruturais sobre os caracteres dinâmicos estruturais;

- Remover uma parcela dos parafusos empregados na fixação entre as vigas de MLC com as placas de OSB, com o intuito de aferir a influência desse cenário nas respostas dinâmicas da estrutura;
- Instalar um dispositivo de massa sintonizada na face inferior do piso e no ponto central do mesmo, de modo a se analisar o comportamento e as respostas dinâmicas da estrutura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, A. R.; WHALE, L. R. J. An overview of the use of glued laminated timber (glulam) in the UK. **Construction and Building Materials**, v. 1, n. 2, p. 104–110, 1987.
- AL-FOQAHA’A, A. A.; COFER, W. F.; FRIDLEY, K. J. Vibration Design Criterion for Wood Floors Exposed to Normal Human Activities. **Journal of Structural Engineering**, n. 1, p. 1401–1406, dez. 1999.
- ALMEIDA, R. R. de. Análise de vibrações em sistemas estruturais para pisos mistos com *joists* submetidos a atividades humanas rítmicas. 2008. 91 f. Dissertação (Mestrado em Estruturas) – Faculdade de Engenharia, Centro de Tecnologia e Ciências, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION. **Engineered Wood**: Construction Guide, [S. l.], v. 30, 2011.
- AMERICAN PLYWOOD ASSOCIATION. **Product Guide**: Grades and Specifications, [S. l.], 1995.
- ANSYS, Inc. ANSYS Help Viewer. Version 19.1, 2018.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/1997**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7190/2011**: Projeto de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 2011.
- BASTOS, E., F. **Caracterização física e mecânica de painel de OSB do tipo form**. 2009. 113 f. Dissertação (Mestrado em Concentração de Estruturas) – Departamento de Estruturas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, Brasil, 2009.
- BOLMSVIK, A. **Structural-acoustic vibrations in wooden assemblies: experimental modal analysis and finite element modelling**. 2013. 85 f. Dissertação (Doutorado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Linnaeus, Växjö, Suécia, 2013.
- BRAIDO, J. D. **Avaliação da superestrutura de pontes através de parâmetros dinâmicos**. 2014. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, Brasil, 2014.
- CASAGRANDE *et al.* Analytical, numerical and experimental assessment of vibration performance in timber floors. **Engineering Structures**, v. 168, p. 748–758, 2018.
- CENTRO DE INVESTIGACIÓN DE LOS REGLAMENTOS NACIONALES DE SEGURIDAD PARA LAS OBRAS CIVILES. **CIRSOC 601**: Disposiciones generales y requisitos para el diseño y la construcción de estructuras de madera em edificaciones.

Buenos Aires, 2016.

CHEN, J.; LI, G.; RACIC, V. Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants jumping. **Engineering Structures**, v. 112, p. 71–80, 1 abr. 2016.

CHEN, J.; XU, R.; ZHANG, M. Acceleration response spectrum for predicting floor vibration due to occupants walking. **Engineering Structures**, v. 333, p. 3564–3579, 2014.

CHRISTOS, Z.; VASSILIKI, Z.; EMMANOUIL, V. Design of timber beam floors against vibrations. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON SOUND AND VIBRATION: FROM ANCIENT TO MODERN ACOUSTICS, 23, 2016, Atenas. *Artigo...* Atenas: ICSV, 2016.

CLOUGH, R. W.; PENZIEN, J. **Dynamics of structures**. 2ª ed. Berkeley: Computers and Structures Inc. 2010.

CRESPO, J. A. **Measurements of vibrations in wooden floors induced by walking**. 2009. 48 f. Dissertação (Graduação em Engenharia Acústica) - Departamento de Ciências das Construções, Universidade de Lund, Lund, Suécia, 2009.

CRUZ, M. M. B. C. W. Serviceability limit state of timber floors: vibrations and comfort. Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa, Portugal. p. 1–10, 2013. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395145925918/Resumo.pdf>. Acesso em: 13 ago. 2018.

EBADI, M. M.; DOUDAK, G.; SMITH, I. **Dynamic characteristics of glulam beam and deck-element floors**. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 14, 2016, Viena, *Anais...* Viena: WCTE, 2016.

EBADI, M. M.; DOUDAK, G.; SMITH, I. Vibration responses of glulam beam-and-deck floors. **Engineering Structures**, v. 156, p. 235–242, 2018.

EBADI, M. M.; DOUDAK, G.; SMITH, I. Evaluation of floor vibration caused by human walking in a large glulam beam and deck floor. **Engineering Structures**, v. 196, p. 109349, 1 out. 2019.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 1995-1-1**: EUROCODE 5: Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. 2004.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 300**. Oriented Strand Boards (OSB) – Definitions, classification and specification. 2007.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 310**. Determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. 1993.

EUROPEAN COMMITTEE STANDARDIZATION. **EN 323**. Wood-based panels – Determination of density. 1993.

FAHMY, Y. G. M.; SIDKY, A. N. M. An experimental investigation of composite floor vibration due to human activities. A case study. **HBRC Journal**, v. 8, n. 3, p. 228–238, 1 dez. 2012.

GARCÍA, D. A.; ROSALES, M. B.; SAMPAIO, R. Dynamic behaviour of a timber footbridge with uncertain material properties under a single deterministic walking load. **Structural Safety**, v. 77, p. 10–17, 1 mar. 2019.

GLISOVIC, I.; STEVANOVIC, B. **Vibrational behaviour of timber floors**. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 10, 2010, Riva del Garda, *Anais...Riva del Garda*: WCTE, 2010.

HERZOG, T. *et al.* Timber construction manual. Berlin: Walter de Gruyter; 2004.

HOW, S. S.; SIK, H. S.; UYUP, M. K. A. An overview of manufacturing process of glued-laminated timber. *Timber Technology Bulletin*. v. 2016, n 63, p. 139-258, 2016.

HU, L. J.; CHUI, Y. H.; ONYSKO, D. M. Vibration serviceability of timber floors in residential construction. *Progress in Structural Engineering and Materials*, v. 3, n. 3, p. 228–237, 1 jul. 2001.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório 2017. 2017. Disponível em: https://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf. Acesso em: 3 out. de 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **2631:2** – Mechanical vibration and shock – Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 2: Vibrations in buildings (1 to 80 Hz). Geneva, Switzerland: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **10137** – Bases for design of structures - Serviceability of buildings and walkways against vibrations. Geneva, Switzerland: ISO, 2007.

JAAFARI, C.; MOHAMMADI, J. Floor vibration control as a serviceability requirement in design standards and practices: Review. **Practice Periodical on Structural Design and Construction**, v. 23, n. 2, p. 1-11, 2018.

JARNERÖ, K. Vibrations in timber floors: Dynamic properties and human perception. 2014. 54 f. Dissertação – Universidade Linnaeus, Växjö, Suécia, 2014.

JELEČ, M.; VAREVAC, D.; RAJČIĆ, V. Cross-laminated timber (CLT) – a state of the art report. **Grđevinar**, v. 70, n.2, p. 75-95, 2018.

KUZMAN, M. K.; OBLAK, L.; VRATUŠA, S. Glued laminated timber in architecture. **Drvna Industrija**, v. 61, n. 3, p. 197–204, 2010

LIMA, S. de S. SANTOS, S. H. de C. **Análise dinâmica das Estruturas**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2008.

- MARGARIDO, D. dos R. **Metodologias para a avaliação dos níveis de vibração em estruturas do ponto de vista do conforto humano**. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, Porto, Brasil, 2013.
- MELLO, A. V. de A. **Vibrações em pisos de edificações induzidas por atividades humanas**. 2005. 189 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia, Centro de tecnologia e Ciência, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, 2005.
- MELO, R. R. de; MENEZZI, C. H. S. D. Comportamento reológico da madeira e derivados. **Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)**, v. 1, n. 1, p. 25–40, 2010.
- MILNER, H. R.; WOODARD, A. C. Sustainability of engineered wood products. In: KHATIB, J. M. (ed). *Sustainability of Construction Materials*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2016. cap. 8, p. 159–180.
- MIOTTO, J. L.; DIAS, A. A. Produção e avaliação de vigas de madeira laminada colada confeccionadas com lâminas de eucalipto. **Revista Tecnológica Edição Especial ENTECA**, p. 35–45, 2009.
- NEGREIRA, J. *et al.* Psycho-vibratory evaluation of timber floors - Towards the determination of design indicators of vibration acceptability and vibration annoyance. **Journal of Sound and Vibration**, v. 340, p. 383–408, 2015.
- ONG, C. B. Glue-laminated timber (Glulam). In: ANSELL, M. P. (ed.). **Wood Composites**. [S.l.]: Elsevier, 2015. cap 7, p. 123-140.
- OPAZO, A.; BENEDETTI, F.; ROJAS, J. Experimental evaluation of the vibration serviceability of timber floor systems in Chilean Social Housing. In: WORLD CONFERENCE ON TIMBER ENGINEERING, 14, 2016, Viena, *Anais...*Viena: WCTE, 2016.
- PEREIRA, F. C. **Estudo do controle de vibrações em pisos por meio de absorvedores de massa sintonizado**. 2014. 78 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento Acadêmico de Construção Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil, 2014.
- PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2003.
- PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. 15. ed. Piracicaba: Fealq, 2009.
- R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- RACIC, V.; PAVIC, A.; BROWNJOHN, L. M. W. Experimental identification and analytical modelling of human walking forces: Literature review. **Journal of Sound and**

Vibration, v. 326, p. 1-49, 2009.

RAMAGE, M. H. *et al.* The wood from the trees: The use of timber in construction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 68, p. 333-359, 2017.

RIBEIRO, P. I dos S. *et al.* Uma revisão sobre vibrações em sistemas de piso em aço induzidas por carregamentos oriundos de atividades humanas. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 15, n. 1, p. 21–38, 2018.

RIJAL, R. *et al.* Experimental and analytical study on dynamic performance of timber-concrete composite beams. **Construction and Building Materials**, v. 75, p. 46–53, 2016.

SANDOVAL, J. M. R. **Análisis experimental de vibraciones em sistema de piso de madera**. 2015. 74 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Faculdade de Engenharia, Universidade do Bío-Bío, Concepción, Chile, 2015.

SCHIAVI, A.; ROSSI, L. vibration perception in buildings: a survey. From the historical origins to the present day. **Energy Procedia**, v. 78, p. 2-7, 2015

SORIANO, H. L. **Introdução à dinâmica das estruturas**. 1ª ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.

TADEU, D. M. F. **Atenuação de vibrações em pavimentos: Estudo experimental**. 2015. 63 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal, 2015.

TOLEDO, M. W. E. *et al.* Evaluación de la serviceabilidad vibratória de entresijos de madera. In: CONGRESO LATINOAMERICANO DE ESTRUCTURAS DE MADERA e CONGRESO IBERO-LATINOAMERICANO DE LA MADERA EN LA CONSTRUCCIÓN, 2, 2017, Buenos Aires. *Artigo...* Buenos Aires: CLEM e CIMAD, 2017.

TOLEDO, M. W. E.; NALLIM, L. G.; SÁNCHEZ, E. D. Evaluación de las características dinámicas y serviciabilidad vibratoria de entresijos de madera. **Revista Sul-Americana de Engenharia Estrutural**, v. 15, n. 3, p. 27–47, 2018.

TORATTI, T.; TALJA, A. Classification of human induced floor vibrations. **Building Acoustics**, v. 13, n. 3, p. 211–221, 2006.

UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Wood Handbook: Wood as an Engineering Material**. 2010, Madison, Wisconsin, 2010, 508 p.

WECKENDORF, J. **Dynamic response of structural timber flooring systems**. 2009 . 235 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Centro de Engenharia de Madeira, Escola de Engenharia e Ambiente Construído, Universidade Napier Edimburgo, Edimburgo, Suécia, 2009.

WECKENDORF, J. *et al.* Vibration serviceability performance of timber floors. **European Journal of Wood and Wood Products**, v. 74, n. 3, p. 353–367, 2016.

WOODARD, A. C.; MILNER, H. R. Sustainability of timber and wood in construction. In: KHATIB, J. M. (ed). **Sustainability of Construction Materials**. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 2016. cap. 7, p. 129–157.

XIONG, H.; KANG, J.; LU, X. Field testing and investigation of the dynamic performance and comfort of timber floors. **Journal Of Asian Architecture And Building Engineering**, v. 10, n. 2, p. 407–412, 2011.

ZHANG, S. **Vibration serviceability of cold-formed steel floor systems**. 2017. 235 f. Tese (Doutorado em Filosofia) – Universidade de Waterloo, Ontario, Canadá, 2017.

ŽIVANOVIĆ, S.; PAVIC, A.; REYNOLDS, P. Vibration serviceability of footbridges under human-induced excitation: A literature review. **Journal of Sound and Vibration**. v. 279, p. 1-74, 2005.

ZMIJEWKI, T.; WOJTOWICZ-JANKOWSKA, D. Timber - Material of the Future - Examples of Small Wooden Architectural Structures. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. v. 245, n. 8, p. 1-9, 2017.

APÊNDICES

Quadro 11 – Pesquisas relacionadas (continua).

Ano	Título	Autores	Metodologia	Principais resultados
2018	Analytical, numerical and experimental assessment of vibration performance in timber floors	<ul style="list-style-type: none"> • Daniele Casagrande; • Ivan Giongo; • Federico Pederzoli; • Alessandro Franciosi; • Maurizio Piazza. 	<p>A avaliação de parâmetros de frequência natural, amortecimento e aceleração vertical, atrelados à vibração de pisos de madeira em grande escala, fora realizada em um piso composto por CLT e em outro constituído por vigas de MLC, com a subestrutura configurada por uma camada de concreto. Para tanto, os referidos sistemas estruturais, caracterizados pelo mesmo comprimento e massa, foram analisados por meio de métodos analíticos e numéricos, bem como por procedimentos experimentais em laboratório e <i>in-loco</i>, admitindo-se como estímulo dinâmico, a caminhada e o impacto de um martelo instrumentado.</p>	<p>Observou-se que as metodologias experimentais se comportam como a avaliação de desempenho mais adequada, posto que a estrutura em suas condições reais de uso é analisada. A contraponto desse cenário, a modelagem numérica leva em consideração, os critérios vinculados às características da estrutura e ao estímulo dinâmico, visando a previsão de seu comportamento real, enquanto que pelo método analítico, apenas parâmetros de massa e geometria da estrutura são levados em consideração, sendo essa metodologia categorizada, como uma prática de previsão, útil às fases de concepção de projetos.</p> <p>Ainda, atestou-se que as repartições internas dos ambientes e os elementos não- estruturais exercem grande influência na resposta dinâmica dos pisos, quanto à frequência natural, formas de modo e amortecimento.</p>
2018	Evaluación de las características dinámicas y serviciabilidad vibratoria de entrepisos de madera	 <ul style="list-style-type: none"> • Mario W. E. Toledo; • L. G. Galvão; • Ezequiel D. Sánchez. 	<p>A pesquisa visou o estudo do desempenho vibracional de um piso composto por vigas maciças de madeira através dos critérios de verificação estabelecidos pelo Regulamento Argentino CIRSOC 601. Para tanto, admitindo-se cinco dimensões para o comprimento do vão do piso, determinações experimentais da frequência natural do sistema, por intermédio da medição de vibrações ambientais e induzidas por pedestres e martelo instrumentado foram realizadas, além de uma modelagem numérica no Software SAP2000. Ainda, um estudo paramétrico, admitindo como variáveis, a altura, a largura e o comprimento das vigas, fora desenvolvido e analisado.</p>	<p>O desenvolvimento dos procedimentos experimentais e numérico, bem como o estudo paramétrico desenvolvido, apontaram que as condições de suporte influenciam de forma decisiva na resposta dinâmica do sistema estrutural, alterando a mesma sensivelmente. Ainda, através da aplicação da verificação do Regulamento Argentino, deduziu-se que as variáveis que controlam o projeto de desempenho vibracional, são a deflexão instantânea por carga unitária e a frequência natural, considerando a incidência de 50% da sobrecarga de uso</p>

Fonte: Próprio autor (2020).

Quadro 10 – Pesquisas relacionadas (continuação).

2018	Vibration responses of glulam beam-and-deck floors	<ul style="list-style-type: none"> • Mohammad M. Ebadi; • Ghasan Doudak; • Ian Smith. 	<p>Partindo-se de um piso com 5,0 metros de vão, composto por vigas de MLC, a pesquisa visou a verificação de quais efeitos as variáveis de construção, como a diminuição do vão, aumento do número de vigas, consideração de suporte intermediário e a adição de camadas à subestrutura, provocam sobre a frequência natural, formas de modo, amortecimento e deflexão do referido sistema construtivo, associada a aferição da capacidade de métodos normativos em prever esses parâmetros dinâmicos e estáticos. Para esse cenário, medições da deflexão estática no centro do piso bem como das frequências ambientais e forçadas, essa ocasionada por um martelo instrumentado, foram realizadas. Ainda, opiniões perante a performance da estrutura, quando estimulada pela caminhada humana, foram coletadas de um grupo formado por 20 indivíduos de teste.</p>	<p>As investigações experimentais avaliadas corroboram o fato de que a alteração de detalhes construtivos de pisos com vigas e subestrutura em MLC, influenciam nas propriedades modais e estáticas do sistema. Atestou-se que, os métodos simplistas de verificação de projeto empregados, estimam frequências naturais e deslocamentos estáticos, causados por uma força de gravidade concentrada, com nível razoável de precisão, apenas para algumas das configurações admitidas para o piso estudado.</p> <p>Quanto às avaliações realizadas pelos indivíduos de teste, perante a aceitabilidade das vibrações, apontou-se que os seres humanos podem sentir os efeitos que as variações dos parâmetros construtivos provocam nos movimentos vibratórios, entretanto elevada inconsistência fora identificada entre a avaliação do desempenho feita pelos sujeitos participantes e a previsão dada por critérios de projetos propostos para outras tipologias de pisos construídos em madeira.</p>
2016	Experimental and analytical study on dynamic performance of timber-concrete composite beams	<ul style="list-style-type: none"> • Rajendra Rijal; • Bijan Samali; • Rijun Shrestha; • Keith Crews. 	<p>Partindo de uma faixa de um piso de madeira, comportando duas vigas constituídas por painéis folheados laminados (LVL), o objetivo principal da pesquisa trata em aferir os parâmetros dinâmicos da frequência fundamental, formas de modo e taxas de amortecimento dos referidos elementos estruturais. Experimentalmente, três espécimes de vigas com vão livre de 6,0 e 8,0 metros de comprimento foram estimuladas por um martelo instrumentado, para a obtenção dos parâmetros dinâmicos. Por meio de metodologias tradicionais de previsão analítica, as frequências naturais também foram estabelecidas.</p>	<p>A partir da análise dos dados obtidos de modo experimental e analítico, em termos das frequências naturais da estrutura em análise, atestou-se que as previsões analíticas aplicadas podem ser confiavelmente empregadas em determinações de cálculo da frequência natural de pisos de madeira, uma vez que uma variação de 5,0% com os valores experimentais, fora identificada.</p>

Fonte: Próprio autor (2020).

Quadro 10 – Pesquisas relacionadas (continuação).

2015	Psycho-vibratory evaluation of timber floors - Towards the determination of design indicators of vibration acceptability and vibration annoyance	<ul style="list-style-type: none"> • Juan Negreira; • Arnaud Trollé; • Kirsi Jarnerö; • Lars-Göran Sjökvist; • Delphine Bard. 	<p>Aspirando pelo desenvolvimento de indicadores de resposta humana às vibrações de pisos de madeira, em termos da aceitabilidade e incômodo de vibrações, pela associação de parâmetros dinâmicos e estáticos com análises subjetivas de ocupantes, a pesquisa mensurou cinco pisos de madeira, em ambientes de laboratório.</p> <p>Medições objetivas foram realizadas para a obtenção da deflexão no meio do vão e parâmetros dinâmicos da frequência natural e amortecimento, através de testes dinâmicos empregando um instrumento agitador. Como medições objetivas, sujeitos de teste foram solicitados a descrever, pelo preenchimento de um questionário, as vibrações sentidas quando caminhavam sobre a estrutura e quando estavam sentados em uma cadeira e outro indivíduo executava a caminhada.</p>	<p>Perante a associação de parâmetros objetivos e subjetivos para o desenvolvimento de indicadores da resposta humana às vibrações, constatou-se que em termos do incômodo de vibrações, os critérios objetivos da frequência natural, calculada em conformidade com a equação do EUROCODE 5, bem como o critério analítico proposto por Hu e Chui, enquadram-se como os melhores indicadores, ao passo que a taxa de amortecimento destacou-se como o mais adequado indicador objetivo para a aceitabilidade das vibrações.</p> <p>Analisando-se no âmbito dos parâmetros subjetivos das análises, o Valor Máximo da Vibração Transiente (MVTT), estabelecido com base nas acelerações experienciadas pelos indivíduos de teste, provou ser o indicador mais adequado para a aceitabilidade das vibrações.</p>
2010	Vibrational behaviour of timber floors	<ul style="list-style-type: none"> • Ivan Glisovic; • Bosko Stevanovic. 	<p>Admitindo-se um piso composto por nove vigas de madeira, com comprimento de 3,60 metros, como de referência, a pesquisa desenvolveu uma modelagem numérica, para a obtenção dos parâmetros modais de frequência natural, formas de modo quanto à estímulos dinâmicos do caminhar, realizado na região central do piso e cruzando o mesmo. Diante disso, considerando-se o teste de impacto de calcanhar, um estudo paramétrico fora realizado, de modo que parâmetros como o espaçamento entre vigas, altura da seção transversal, espessura da camada de cobertura do piso, espaçamento entre conectores e condições de suporte, eram alterados, com o intuito de se investigar o efeito dessas mudanças, sobre a resposta dinâmica do sistema estrutural em análise.</p>	<p>Com base nos resultados obtidos, melhorias no desempenho do piso podem ser obtidas aumentando as frequências naturais e o espaçamento entre frequências adjacentes ou reduzindo as amplitudes da resposta.</p> <p>Ainda, constatou-se que que vibrações incômodas em pisos de madeira podem ser efetivamente controladas através de uma abordagem de projeto que considere a rigidez e a massa, bem como a escolha e definição de arranjos estruturais e detalhamento apropriados operam como importantes critérios para a minimização da ocorrência desses fenômenos.</p>

APÊNDICE B – Execução da estrutura do piso

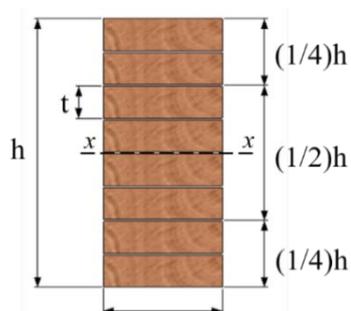
O processo executivo em escala real, do sistema estrutural de piso abordado na presente pesquisa, o qual ocorreu nas dependências do Laboratório de Ensaios em Sistemas Estruturais – LESE, na Universidade de Passo Fundo – UPF – Campus 1, fora planejado para ser executado ao longo de cinco etapas explanadas abaixo.

a) Etapa 1: Produção das vigas de Madeira Laminada Colada

O emprego como elemento estrutural da Madeira Laminada Colada (MLC), também conhecida como *Glued Laminated Timber* (Glulam), produto manufaturado em madeira mais antigo a ser empregado pelo setor da Construção Civil (USDA 2010; ZMIJEWKI;WOJTOWICZ-JANKOWSKA, 2017), no cenário mundial atual alcança escalas jamais atingidas anteriormente, dado que como um produto à base de madeira, destaca-se por artefatos com propriedades mecânicas aperfeiçoadas, em virtude da aplicação da técnica de laminação associada ao uso de materiais adesivos específicos, a qual promove homogeneização das propriedades do conjunto de lâminas e a dispersão de possíveis defeitos e inclinações excessivas das fibras da madeira, pelas lamelas adjacentes, circunstância que possibilita caminhos alternativos e efetivos às tensões (MIOTTO; DIAS, 2009; KUZMAN; OBLAK; VRATUŠA, 2010).

O dimensionamento e a produção de vigas de Madeira Laminada Colada em território brasileiro, são processos regulamentados pela norma NBR 7190:2011 - Projeto de estruturas de madeira. Em virtude da grande importância atribuída à técnica da laminação, a referida normativa demanda que a composição da seção transversal das vigas de MLC seja dada pela distribuição das lâminas conforme os valores de seus Módulos de Elasticidade, onde os lamelados com Módulo de Elasticidade de valor inferior ($E_{M,i}$), são dispostos na metade central da seção transversal do elemento estrutural, ao passo que as lamelas com valores superiores ($E_{M,s}$), compõem as quartas partes mais afastadas da linha neutra (x) (ABNT, 2011), como ilustrado pela Figura 153.

Figura 153 – Seção ilustrativa da combinação de lâminas com diferentes módulos de elasticidade.



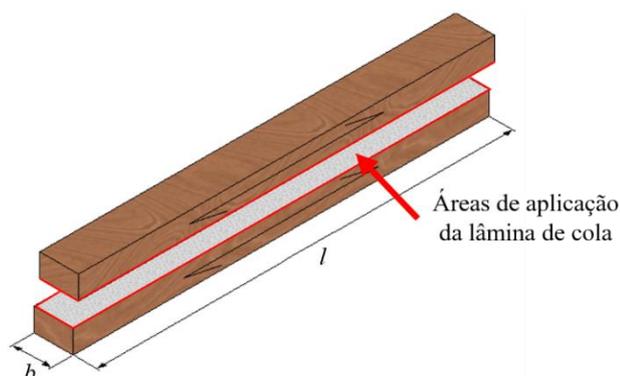
Fonte: Próprio autor (2020).

Para o Módulo de Elasticidade das lâminas (MOE_L) caracterizado conforme as prescrições discutidas na subseção 3.2.1.4 e as seções transversais das vigas de MLC compostas, empregando-se os resultados expostos na mesma subseção, o processo de manufatura das mesmas seguiu para a etapa de colagem dos arranjos de laminados, um sobre os outros, de forma a compor as camadas de lâminas características de vigas de Madeira Laminada Colada. Destaca-se que, essa parcela do processo deve ser realizada através da aplicação de uma película de cola adesiva sintética e estrutural, com propriedades compatíveis à madeira bem como as condições ambientais que os elementos estruturais estarão dispostos ao longo de sua vida útil, de forma que a qualidade e os métodos de aplicação atendam as recomendações do fabricante (ABNT, 2011).

Assim sendo, as vigas foram executadas com os laminados em arranjos horizontais, compondo camadas lamelares com a fibra da madeira paralela ao eixo longitudinal da peça estrutural, metodologia de disposição mais indicado devido a melhor distribuição dos possíveis defeitos de nós e inclinação das fibras da madeira, de modo a proporcionar maiores parâmetros resistentes ao elemento estrutural (ABBOTT; WHALE, 1987; HOW; SIK; UYUP 2016).

A lâmina de cola fora aplicada em ambas as faces de contato, correspondentes a largura (b) e ao comprimento (l) da peça, como mostra o esquema da Figura 154, pelo espalhamento da cola por rolo de espuma, conforme a Figura 155, material que fora devidamente caracterizado conforme descrito na subseção 3.2.2, sendo definida a aplicação da película adesiva PUR-501, vide os resultados e explicações da subseção 3.2.2.

Figura 154 – Esquema das áreas de aplicação da película de cola.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 155 – Processo de aplicação da película de cola nas áreas de contato entre as lâminas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Dadas as características higroscópicas da madeira bem como os limites de temperatura que a cola deve ser trabalhada, as vigas foram confeccionadas nas dependências do Laboratório de Materiais de Construção Civil – LABOMACC, na Universidade de Passo Fundo – UPF – Campus 1, visando promover adequadas condições de controle de temperatura ambiente e teor de umidade relativa do ar, parâmetros mensurados por um termo higrômetro digital mostrado pela Figura 156, posto que a manufatura das vigas ocorreu na transição entre as estações de outono e inverno.

Figura 156 – Controle de temperatura ambiente para a colagem das vigas.



Fonte: Próprio autor (2020).

A efetividade da película adesiva é dada através da pressão de colagem promovida por dispositivos auxiliares disponíveis no mercado da Construção Civil, os quais devem ser devidamente escolhidos para que os valores mínimos de pressão e tempo de colagem, indicados pelos fabricantes das colas adesivas, sejam atingidos. A contraponto desse cenário, a NBR 7190:2011 (ABNT, 2011) indica que a união entre as peças laminadas deve ser executada a uma pressão mínima de 0,70 MPa e de 1,20 MPa, respectivamente para madeiras com densidade inferior ou igual a 0,50 g/cm³ e superior a esse valor limite, por um período de tempo mínimo de 6 horas, em um ambiente temperatura de 20,0°C e umidade relativa do ar em 65,0%, sendo posteriormente removida de forma gradual, ao longo do comprimento das peças estruturais.

Para as vigas de MLC da pesquisa, a pressão de colagem foi estabelecida por dez unidades de grampos sargentos tipo C 8". Assim sendo, em virtude da solicitação da normativa brasileira, acerca do atendimento dos valores mínimos de pressão explanados acima, todos os grampos sargentos foram submetidos a medições da pressão, visando a verificação do atendimento da mesma, posto que a pressão mínima das vigas confeccionadas é de 1,20 MPa, dado que a densidade básica (ρ_{bas}) caracterizada para o lote de madeira utilizado, é de 0,79104 g/cm³, de acordo com a descrição da caracterização e resultados pela subseção 3.2.1.2.

A pressão dos sargentos tipo C 8" foi averiguada por intermédio de três medições, conforme o esquema do ensaio apresentado pela Figura 157, com auxílio de uma de uma

célula de carga com capacidade de 0,50 toneladas e sistema de leitura digital imediato. Salienta-se que, o aperto dos grampos sargentos fora realizado até que certa pressão fosse sentida, mais um adicional de giro da barra roscada, na ordem de 1/4 de volta, visando prevenir a ocorrência de esmagamento da madeira, nos pontos de aplicação da pressão.

Figura 157 – Determinação da pressão dos sargentos tipo C 8”.



Fonte: Próprio autor (2020).

Os valores das pressões resultantes da verificação de cada grampo sargento, são descritas na Tabela 47, sendo o conjunto dos referidos dispositivos caracterizado por uma pressão de 3,01 MPa, a qual viabiliza a aplicabilidade desse sistema, dado que as requisições mínimas de pressão solicitadas pela NBR 7190:2011, na ordem de 1,20 MPa, para o cenário do piso proposto, são atendidas efetivamente. Salienta-se que a área de aplicação de carga empregada no ensaio, é correspondente à base da célula de carga de 14,0 cm².

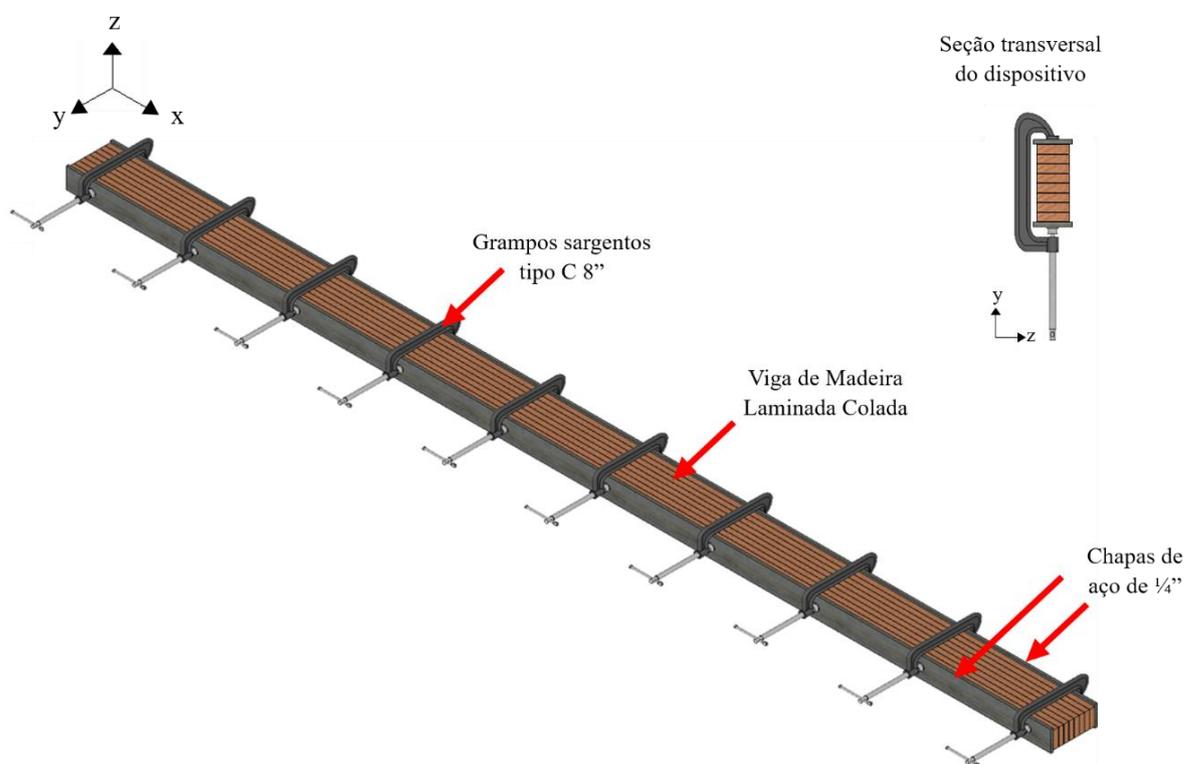
Tabela 47 – Pressão dos grampos sargentos tipo C 8”.

Sargentos	Medição 1 (MPa)	Medição 2 (MPa)	Medição 3 (MPa)	Pressão média (MPa)
1	3,73	3,87	3,79	3,80
2	2,74	2,84	2,72	2,77
3	2,51	2,66	2,59	2,59
4	2,88	3,06	3,24	3,06
5	2,80	2,72	2,87	2,79
6	3,63	3,54	3,76	3,64
7	2,48	2,38	2,53	2,46
8	3,87	3,94	3,92	3,91
9	2,59	2,36	2,53	2,49
10	2,66	2,47	2,50	2,54
Média (MPa)	-	-	-	3,01
Desvio padrão	-	-	-	0,57
Coef. variação (%)	-	-	-	18,90

Fonte: Próprio autor (2020).

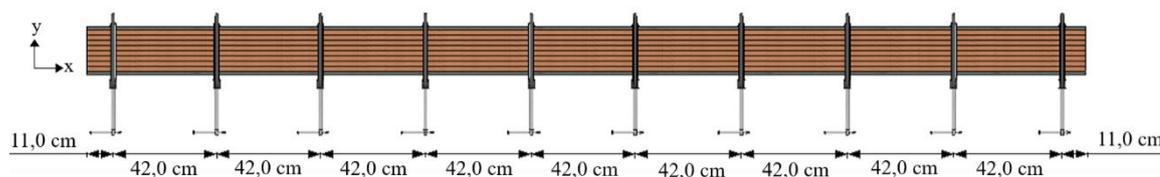
Buscando-se proporcionar maior controle na produção das vigas, em termos de qualidade do produto final e efetividade nas linhas de cola, um dispositivo para promover uma distribuição equivalente de pressão ao longo de todo o comprimento das vigas, fora discutido e desenvolvido, o qual comporta chapas de aço com espessura de ¼” (6,35 milímetros) e 4,0 metros de comprimento, como ilustrado na Figura 158, admitindo os espaçamentos entre os pontos de aplicação de pressão mostrados pela Figura 159.

Figura 158 – Dispositivo para prensagem das vigas, com chapas de aço.



Fonte: Próprio autor (2020).

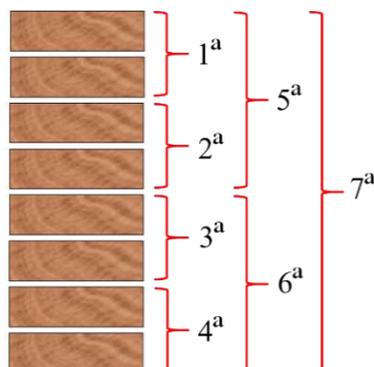
Figura 159 – Espaçamento entre os instrumentos de aplicação de pressão, para a colagem das vigas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Ainda objetivando-se a promoção de elevados parâmetros de controle e qualidade ao longo do processo de colagem, dado que as vigas comportam oito laminados na composição da seção transversal, fora estabelecida uma sequência de colagem dos laminados, essa apresentada pela Figura 160, de modo a ser aprimorado o manuseio das peças, admitindo-se tempo de colagem sob pressão dos grampos sargentos, de 40 minutos.

Figura 160 – Sequência admitida para a colagem das lâminas.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para a sequência de colagem dos laminados discutida acima, a Figura 161 apresenta visualmente a colagem entre duas lamelas, correspondente a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª etapas de colagem, ao passo que, a Figura 162 demonstra a realização da 5ª e 6ª fases de cola e a Figura 163 a sétima e última, onde o conjunto das oitos lâminas estará completamente unido, finalizando o processo de manufatura das vigas de MLC. Salienta-se que, a prensagem das vigas fora executada com os laminados na vertical, cenário que facilita o manuseio dos grampos sargentos bem com o aperto dos mesmos.

Figura 161 – Prensagem da 1ª, 2ª, 3ª e 4ª etapas de colagem.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 162 – Prensagem da 5ª e 6ª etapas de colagem.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 163 – Prensagem da 7ª etapa de colagem.



Fonte: Próprio autor (2020).

O esquema conferido ao dispositivo de colagem, fora desenvolvido de modo que os grampos sargentos fossem colocados em contato direto com as chapas de aço, para que a integridade das lamelas fosse mantida e não ocorresse esmagamentos nas seções. Desta forma, definiu-se como critério de aplicação de pressão, o fechamento dos grampos

sargentos até que certa pressão fosse atingida, com um adicional de $\frac{1}{4}$ de volta, sendo a efetividade desse cenário verificada pela formação de saliências na lâmina de cola, devido a expulsão do material adesivo, situação visualizada nas figuras demonstrativas da sequência de prensagem das lâminas.

b) Etapa 2: Disposição das vigas de Madeira Laminada Colada

Conforme retratado na subseção 3.1, as vigas de MLC foram identificadas considerando-se a sequência de manufatura, de modo que esse mesmo critério fora adotado para a disposição das mesmas, na fase de execução do piso. Assim sendo, observando-se os eixos de identificação das vigas da Figura 42 e na disposição das vigas da Figura 164, denota-se que as vigas VLC1 e VLC2, as primeiras a serem confeccionadas, encontram-se dispostas nas extremidades do piso.

Figura 164 – Disposição das vigas de MLC.



Fonte: Próprio autor (2020).

Para tanto, ressalta-se que esse cenário alternativo ocorreu, em virtude de ambas as vigas apresentarem maiores valores médios da dimensão de altura da seção transversal, quando comparadas com os correspondentes valores das demais vigas, como visualizado na

Tabela 20, de modo a ser adotada a disposição como vigas de bordo, visando o favorecimento do nivelamento das vigas, etapa explanada no item abaixo, bem como a mitigação de possíveis interferências sobre os valores dos parâmetros dinâmicos mensurados experimentalmente.

c) Etapa 3: Condições de apoio

As condições de apoio do piso comportam, como já explanado, extremidades paralelas ao comprimento do piso em condições livres, associadas aos bordos correspondentes à largura da estrutura, em condições simplesmente apoiados sobre vigas de suporte em aço. Assim sendo, para a configuração simplesmente apoiada, as vigas de MLC foram posicionadas de forma que, em ambos pontos de apoio de cada uma, oito centímetros de viga estão em constante contato com as vigas de suporte, como pode ser observado na Figura 165, caracterizando vão livre experimental de 3,84 metros.

Figura 165 – Vigas de MLC simplesmente apoiadas sobre as vigas de suporte em aço.



Fonte: Próprio autor (2020).

Sendo a madeira de *Pinus*, essa empregada na manufatura das vigas de MLC, categorizada como uma madeira macia, as regiões dos apoios onde ocorre o contato direto entre as vigas de madeira e as vigas de suporte em aço, são passíveis de esmagamento da

seção da madeira. Para tanto, visando mitigar a referida situação, peças retangulares de espuma vinílica acetinada (EVA) com 8,0 milímetros de espessura e 8,0 centímetros de comprimento e 10,0 centímetros de largura, foram dispostas na região entre as vigas de MLC e as vigas de aço, como demonstrado pela Figura 166. Ressalta-se ainda que, as peças de EVA também operaram como mecanismos de nivelamento das vigas de MLC, sendo para as vigas de bordo empregado apenas uma peça de EVA, dado a peculiaridade de suas respectivas seções transversais, como já mencionado, ao passo que para as demais vigas, foram utilizadas duas ou mais peças de EVA.

Figura 166 – Espuma vinílica acetinada empregada na região de contato entre as vigas de MLC e vigas de suporte em aço.



Fonte: Próprio autor (2020).

d) Etapa 4: Instalação dos painéis de OSB

Como tratam ambos os documentos internacionais, *Product Guide: Grades and Specifications* (APA, 1995) e *Engineered Wood: Construction Guide* (APA, 2011), pavimentos que comportam painéis estruturais como o elemento do deck, demandam que os mesmos sejam instalados de modo contínuo, sobre dois ou mais apoios, de forma que o eixo longitudinal das peças seja transversal ao eixo longitudinal das vigas constituintes do piso, como demonstrado na Figura 167.

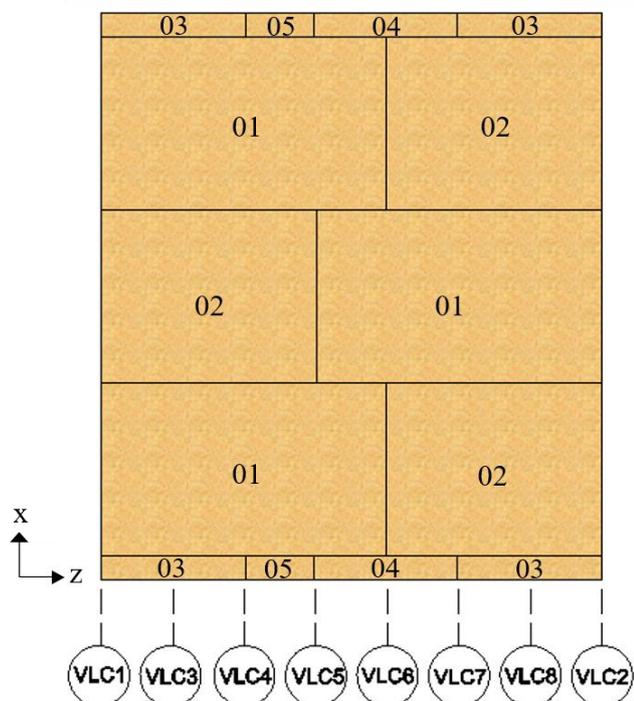
Figura 167 – Instalação requerida para os painéis de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

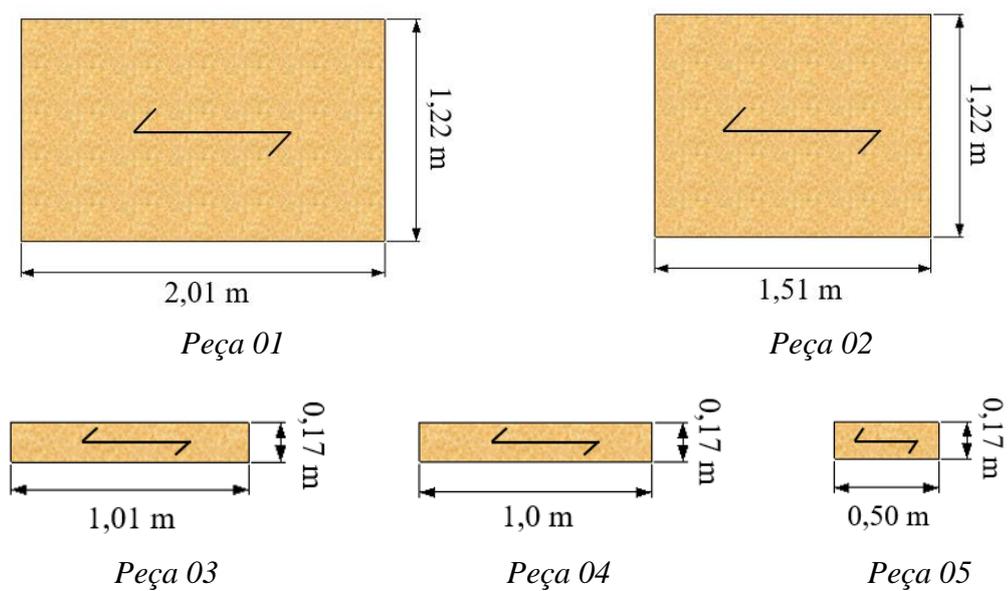
Aspirando pelo atendimento das prescrições dos códigos internacionais citados acima, elaborou-se um plano esquemático de disposição dos painéis de OSB, exposto na Figura 168, sendo considerado as juntas das placas desencontradas, para aprimorar a rigidez do conjunto estrutural. Somando a isso, a disposição das placas fora baseada na distribuição das peças com maiores áreas, da região central para as extremidades do piso, sendo os bordos contemplados com peças menores, de largura aproximadamente semelhante à definida para a região em que as vigas de MLC estão em contato com as vigas de suporte em aço, configurando assim, um plano de corte composto por cinco peças padrões, cujas dimensões são detalhadas na Figura 169.

Figura 168 – Plano esquemático da disposição das peças de OSB.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 169 – Dimensões das peças de OSB.

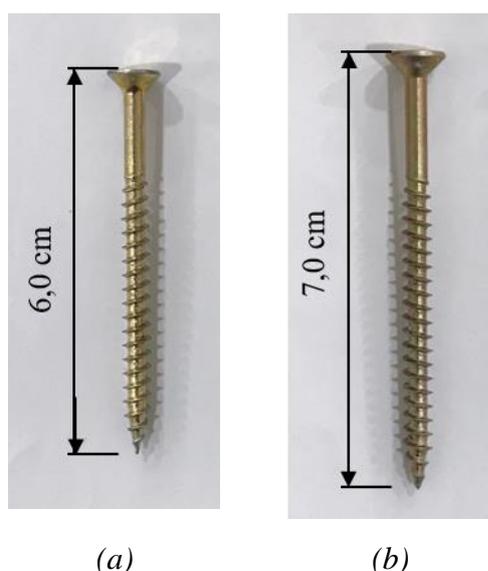


Fonte: Próprio autor (2020).

e) Etapa 5: Aparafusamento

Para a fixação dos painéis de OSB nas vigas de MLC, conforme as prescrições do documento *Product Guide: Grades and Specifications* (APA, 1995), o modelo de parafuso auto atarraxante em aço e cabeça chata Philips, específico para uso em madeira, fora adotado para a execução do piso, sendo adotado respectivamente para os espaçamentos de 3,0 (6d) e 4,0 (8d) centímetros, parafusos de 5,0 mm de diâmetro para 6,0 centímetros de comprimento e parafusos de 5,0 mm de diâmetro para 7,0 centímetros de comprimento, demonstrados pela Figura 170, relativos à linhas de parafusos aplicados nas fixações de extremidade e intermediárias.

Figura 170 – Parafusos auto atarraxantes aplicados nas (a) fixações de extremidade e (b) fixações intermediárias.

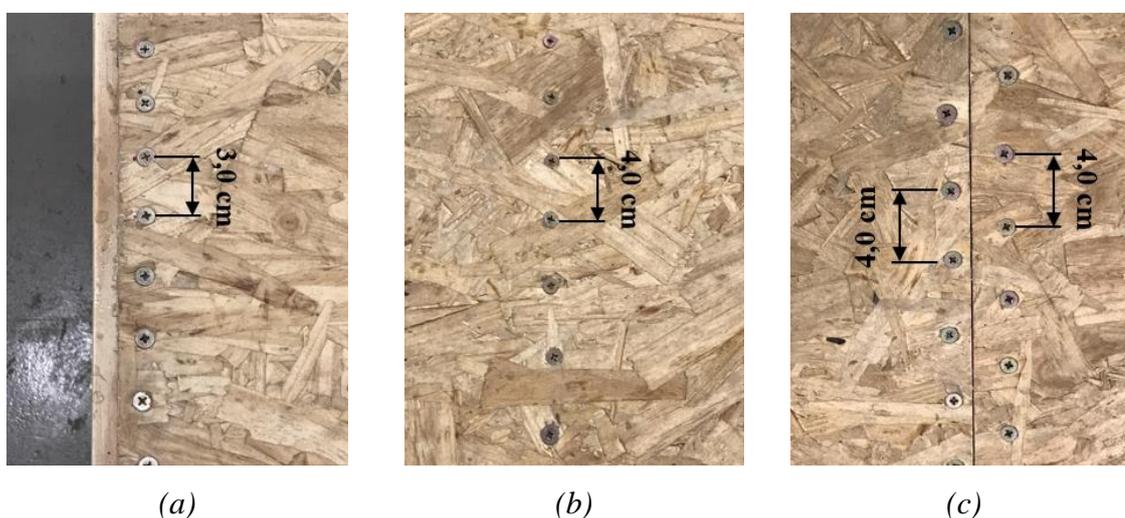


Fonte: Próprio autor (2020).

Na totalidade, oito linhas de aparafusamento entre as vigas de MLC e os painéis de OSB dispostas paralelamente ao sentido longitudinal da estrutura, foram executadas, sendo duas linhas correspondentes à fixação de parafusos nas extremidades nos bordos do piso e as demais, relativas à linhas intermediárias de fixação. Nesse cenário, as linhas de extremidade mostradas na Figura 171 (a), comportam a fixação sequencial de um único parafuso a cada 3,0 centímetros, a contraponto das fixações intermediárias que abrangem duas tipologias de fixação, a primeira abordando a aplicação simples e sequencial de um

único parafuso a cada 4,0 centímetros, nas linhas intermediárias correspondentes às regiões onde não há encontro entre juntas das placas de OSB, como visto na Figura 171 (b), e a segunda contemplando a fixação dupla sequencial de parafusos transpassados, alusiva as linhas de parafuso situadas nas zonas de encontro longitudinal das juntas de dois painéis de OSB, vide Figura 171 (c), método de aplicação adotado visando inibir a formação de zonas com linhas contínuas de separação das fibras das lâminas das vigas, nas quais ocorre a penetração dos parafusos.

Figura 171 – Aplicação dos parafusos nas (a) extremidades, (b) juntas intermediárias simples e (c) juntas intermediárias transpassadas, do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Em virtude do comprimento dos parafusos empregados, para o processo de aparafusamento, iniciado pela fixação de ambas as linhas de parafusos das extremidades do piso e seguindo o aparafusamento das linhas intermediárias, pré-furos de 3,0 milímetros de diâmetro e com aproximadamente 2,50 centímetros de comprimento, esses visualizados na Figura 172, foram realizados com auxílio de uma furadeira elétrica, de forma a auxiliar a penetração dos parafusos através dos painéis de OSB e vigas de MLC, processo executado com uma parafusadeira à bateria, vide Figura 173, conservando assim, a integridade física e estrutural de ambos os materiais, acerca do surgimento de linhas de separação das fibras da madeira das vigas e descascamento das lascas de madeira que compõem os painéis de OSB.

Figura 172 – Processo de pré-furação das linhas de aparafusamento do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

Figura 173 – Processo de aparafusamento do piso.



Fonte: Próprio autor (2020).

As saliências esbranquiçadas observadas no processo de aparafusamento da figura acima, tratam de resíduos de glicerina, composto orgânico pertencente à função álcool, no qual todo o comprimento da rosca dos parafusos fora banhado, processo complementar adotado em associação com a pré-furação, para favorecer a penetração dos parafusos.

APÊNDICE C – Questionário para a análise do conforto e aceitabilidade das vibrações do piso.

1) Informações gerais

- Idade
- Peso
- Gênero

2) Teste de impacto de calcanhar para indivíduo de teste em pé sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 1.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de impacto de calcanhar está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 2.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de impacto de calcanhar está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

3) Teste de impacto de calcanhar para indivíduo de teste sentado em uma cadeira disposta sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 3.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de impacto de calcanhar está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 4.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de impacto de calcanhar está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

4) Teste de caminhada para indivíduo de teste em pé sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 5.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de caminhada está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável

- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 6.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de caminhada está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

5) Teste de caminhada para indivíduo de teste sentado em uma cadeira disposta sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 7.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de caminhada está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 8.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de caminhada está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
 - b) Pouco aceitável
 - c) Razoavelmente aceitável
 - d) Aceitável
 - e) Muito aceitável
 - f) Definitivamente aceitável
- 6) Teste de corrida para indivíduo de teste em pé sobre o piso
- Incômodo de vibrações

Pergunta 9.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de corrida está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
 - b) Um pouco desconfortável
 - c) Razoavelmente desconfortável
 - d) Desconfortável
 - e) Muito desconfortável
 - f) Extremamente desconfortável
- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 10.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de corrida está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

7) Teste de corrida para indivíduo de teste sentado em uma cadeira disposta sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 11.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de corrida está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 12.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de corrida está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

8) Teste de salto para indivíduo de teste em pé sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 13.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de salto está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável

- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 14.) Você está sobre o piso em pé, no qual o teste de salto está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

9) Teste de salto para indivíduo de teste sentado em uma cadeira disposta sobre o piso

- Incômodo de vibrações

Pergunta 15.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de salto está sendo realizado por outra pessoa. Qual o grau de incômodo que você vivencia através da vibração do piso?

- a) Não é desconfortável
- b) Um pouco desconfortável
- c) Razoavelmente desconfortável
- d) Desconfortável
- e) Muito desconfortável
- f) Extremamente desconfortável

- Aceitabilidade de vibrações

Pergunta 16.) Você está sobre o piso sentado em uma cadeira, no qual o teste de salto está sendo realizado por outra pessoa. Como você avalia a vibração do piso?

- a) Definitivamente não é aceitável
- b) Pouco aceitável
- c) Razoavelmente aceitável
- d) Aceitável
- e) Muito aceitável
- f) Definitivamente aceitável

APÊNDICE D – Modelagem numérica escrita pela linguagem APDL.

```
/PREP7
```

```
! *****
```

```
!   ELEMENT TYPE
```

```
! *****
```

```
ET,1,shell281
```

```
! *****
```

```
!   MATERIAL PROPERTIES
```

```
!   [Módulo em N/m2]
```

```
! *****
```

```
ACEL,0,-9.81,0,
```

```
!Material 1 VLC1
```

```
MP,EX,1,1.573905239e10
```

```
MP,PRXY,1,0.30
```

```
MP,DENS,1,7910.40
```

```
!Material 2 VLC2
```

```
MP,EX,2,1.497501737e10
```

```
MP,PRXY,2,0.30
```

```
MP,DENS,2,7910.40
```

```
!Material 3 VLC3
```

```
MP,EX,3,1.432143292e10
```

```
MP,PRXY,3,0.30
```

```
MP,DENS,3,7910.40
```

```
!Material 4 VLC4
```

```
MP,EX,4,1.425367924e10
```

```
MP,PRXY,4,0.30
```

```
MP,DENS,4,7910.40
```

```
!Material 5 VLC5
```

```
MP,EX,5,1.387256483e10
```

```
MP,PRXY,5,0.30
```

```
MP,DENS,5,7910.40
```

```
!Material 6 VLC6
```

```
MP,EX,6,1.443153264e10
```

```
MP,PRXY,6,0.30
```

```
MP,DENS,6,7910.40
!Material 7 VLC7
MP,EX,7,1.4838054690e10
MP,PRXY,7,0.30
MP,DENS,7,7910.40
!Material 8 VLC8
MP,EX,8,1.552406064e10
MP,PRXY,8,0.30
MP,DENS,8,7910.40
!Material 9 OSB
MP,EZ,9,2.310083130e9
MP,PRXY,9,0.30
MP,DENS,9,6159.27
! *****
!     SECTIONS
! *****
! - Seções das vigas
!Viga VLC1
SECTYPE,1,SHELL,,VLC1,0
SECDATA,0.0665,1,0.0,3
!Viga VLC2
SECTYPE,2,SHELL,,VLC2,0
SECDATA,0.0665,1,0.0,3
!Viga VLC3
SECTYPE,3,SHELL,,VLC3,0
SECDATA,0.0654,1,0.0,3
!Viga VLC4
SECTYPE,4,SHELL,,VLC4,0
SECDATA,0.0654,1,0.0,3
!Viga VLC5
SECTYPE,5,SHELL,,VLC5,0
SECDATA,0.0656,1,0.0,3
!Viga VLC6
SECTYPE,6,SHELL,,VLC6,0
SECDATA,0.0654,1,0.0,3
!Viga VLC7
```

```
SECTYPE,7,SHELL,,VLC7,0
SECDATA,0.0654,1,0.0,3
!Viga VLC8
SECTYPE,8,SHELL,,VLC8,0
SECDATA,0.0655,1,0.0,3
! - Seções do OSB
SECTYPE,9,SHELL,,OSB,0
SECDATA,0.015,1,0.0,3
! *****
!     MODELING
! *****
! *** KEYPOINTS ***
! - Keypoints das linhas de eixo das vigas
!Viga VLC1
k,1,0,0,0
k,2,4,0,0
k,3,4,0.1749,0
k,4,0,0.1749,0
!Viga VLC3
k,5,0,0.012,0.5
k,6,4,0.012,0.5
k,7,4,0.1749,0.5
k,8,0,0.1749,0.5
!Viga VLC4
k,9,0,0.0092,1
k,10,4,0.0092,1
k,11,4,0.1749,1
k,12,0,0.1749,1
!Viga VLC5
k,13,0,0.01,1.5
k,14,4,0.01,1.5
k,15,4,0.1749,1.5
k,16,0,0.1749,1.5
!Viga VLC6
k,17,0,0.012,2.0
k,18,4,0.012,2.0
```

k,19,4,0.1749,2.0
k,20,0,0.1749,2.0
!Viga VLC7
k,21,0,0.0121,2.5
k,22,4,0.0121,2.5
k,23,4,0.1749,2.5
k,24,0,0.1749,2.5
!Viga VLC8
k,25,0,0.0118,3.0
k,26,4,0.0118,3.0
k,27,4,0.1749,3.0
k,28,0,0.1749,3.0
!Viga VLC2
k,29,0,0.0011,3.5
k,30,4,0.0011,3.5
k,31,4,0.1749,3.5
k,32,0,0.1749,3.5
! *** ÁREAS DAS VIGAS ***
a,1,2,3,4
a,5,6,7,8
a,9,10,11,12
a,13,14,15,16
a,17,18,19,20
a,21,22,23,24
a,25,26,27,28
a,29,30,31,32
! *** ÁREAS DO OSB ***
a,3,4,8,7
a,7,8,12,11
a,11,12,16,15
a,15,16,20,19
a,19,20,24,23
a,23,24,28,27
a,27,28,32,31
! *****
! MESHING

! *****

ESIZE,0.05 !0.05 indica o tamanho do elemento de malha das vigas

! *** Vigas ***

! VLC1

TYPE,1

MAT,1

SECNUM,1

AMESH,1

! VLC2

TYPE,1

MAT,2

SECNUM,2

AMESH,8

! VLC3

TYPE,1

MAT,3

SECNUM,3

AMESH,2

! VLC4

TYPE,1

MAT,4

SECNUM,4

AMESH,3

! VLC5

TYPE,1

MAT,5

SECNUM,5

AMESH,4

! VLC6

TYPE,1

MAT,6

SECNUM,6

AMESH,5

! VLC7

TYPE,1

MAT,7
SECNUM,7
AMESH,6
! VLC8
TYPE,1
MAT,8
SECNUM,8
AMESH,7
! *** OSB ***
ESIZE,0.05
!0.05 indica o tamanho do elemento de malha das placas de OSB
! OSB entre vigas VLC1 e VLC3
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,9
! OSB entre vigas VLC3 e VLC4
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,10
! OSB entre vigas VLC4 e VLC5
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,11
! OSB entre vigas VLC5 e VLC6
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,12
! OSB entre vigas VLC6 e VLC7
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,13

```
! OSB entre vigas VLC7 e VLC8
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,14
! OSB entre vigas VLC8 e VLC2
TYPE,1
MAT,9
SECNUM,9
AMESH,15
! *****
!     LOADS
! *****
! *** Deslocamentos nulos ***
!VLC1
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral das viga de extremidade VLC1
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC3
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
```

NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC3
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC4
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
NSEL,R,LOC,Y,0.0092
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0092
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC4
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0092
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC5
NSEL,S,LOC,X,0,0.08

```
NSEL,R,LOC,Y,0.01
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.01
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC5
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.01
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC6
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC6
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.012
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC7
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
```

NSEL,R,LOC,Y,0.0121
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0121
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC7
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0121
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC8
NSEL,S,LOC,X,0,0.08
NSEL,R,LOC,Y,0.0118
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0118
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral VLC8
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0118
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!VLC2
NSEL,S,LOC,X,0,0.08

```
NSEL,R,LOC,Y,0.0011
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
NSEL,S,LOC,X,3.92,4.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0011
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
!Travamento lateral das viga de extremidade VLC2
NSEL,S,LOC,X,2.0
NSEL,R,LOC,Y,0.0011
D,ALL,UX,0
D,ALL,UY,0
D,ALL,UZ,0
NSEL,ALL
! *****
!      SOLUTION
! *****
/solu
antype,modal
modopt,snode,10
mxpand,10
solve
finish
```



UPF

UNIVERSIDADE
DE PASSO FUNDO

UPF Campus I - BR 285, São José
Passo Fundo - RS - CEP: 99052-900
(54) 3316 7000 - www.upf.br