

AVALIAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS DE PAVIMENTOS DE MADEIRA ANTIGOS UTILIZANDO IDENTIFICAÇÃO DINÂMICA

JOSÉ DIOGO ALVES BARREIRA COELHO

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL — ESPECIALIZAÇÃO EM ESTRUTURAS

Orientador: Professor João Paulo Miranda Guedes

Coorientador: Engenheiros Bruno Quelhas Silva e Tiago Ilharco

JUNHO DE 2015

MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA CIVIL 2014/2015

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

Tel. +351-22-508 1901

Fax +351-22-508 1446

✉ miec@fe.up.pt

Editado por

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO

Rua Dr. Roberto Frias

4200-465 PORTO

Portugal

Tel. +351-22-508 1400

Fax +351-22-508 1440

✉ feup@fe.up.pt

🌐 <http://www.fe.up.pt>

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição que seja mencionado o Autor e feita referência a *Mestrado Integrado em Engenharia Civil – 2014/2015 – Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, Portugal, 2015.*

As opiniões e informações incluídas neste documento representam unicamente o ponto de vista do respetivo Autor, não podendo o Editor aceitar qualquer responsabilidade legal ou outra em relação a erros ou omissões que possam existir.

Este documento foi produzido a partir de versão eletrónica fornecida pelo respetivo Autor.

Aos meus pais

'I've missed more than 9000 shots in my career. I've lost almost 300 games. 26 times I've been trusted to take the game winning shot and missed. I've failed over and over and over again in my life. And that is why I succeed'

Michael Jordan

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a quem mais me auxiliou na realização desta dissertação, o meu orientador, Professor João Paulo Miranda Guedes, pelo tempo disponibilizado e pelos conhecimentos e conselhos partilhados.

Como não podia deixar de ser, agradeço igualmente aos coorientadores, Engenheiros Bruno Quelhas e Tiago Ilharco e a todos os membros do NCREP que deram o seu contributo na realização desta dissertação.

Especialmente á minha família, por criarem todas as condições necessárias para chegar a esta fase da minha vida.

A todos os meus amigos pelo apoio incondicional.

RESUMO

A necessidade de reabilitar edifícios antigos é, hoje em dia, uma prioridade em Portugal e, nesse âmbito, é necessário perceber o estado e o comportamento dos materiais e elementos estruturais que os constituem. Entre esses elementos destacam-se os pavimentos de madeira que pela sua função assumem um papel relevante no comportamento global da estrutura. Não só são responsáveis pela criação de plataformas para utilização e fruição dos espaços, como estabelecem ligações entre os elementos resistentes verticais onde se apoiam, promovendo um melhor funcionamento em caixa das estruturas antigas.

Neste âmbito, a identificação do estado da madeira e dos elementos estruturais que constituem os pavimentos é uma ação fundamental que deve resultar, sempre que necessário/possível, da realização de ações/ensaios não destrutivos. O uso de troncos de árvores para a materialização das vigas e tarugos neste tipo de estruturas, assim como a heterogeneidade e anisotropia associadas à madeira em geral e a estes elementos estruturais em particular, são alguns dos entraves quando se pretende identificar as características e/ou classificar este material.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento dos pavimentos de madeira antigos através da medição de frequências de vibração, ou seja, utilizando procedimentos sem dano para a estrutura. Com um pequeno equipamento, como um sismógrafo ou um acelerómetro, é possível medir as frequências de vibração de um pavimento. Por outro lado, através de um programa de análise estrutural, as frequências obtidas experimentalmente podem ser comparadas com valores obtidos através de simulação numérica, permitindo estimar o estado real e inferir o comportamento dos pavimentos. Estas técnicas têm como vantagem, em relação a outros procedimentos, o transporte fácil do equipamento, o baixo custo do teste e a facilidade e rapidez de tratamento dos resultados.

A influência dos vários elementos que constituem a estrutura dos pavimentos de madeira antigos é objeto de análise neste trabalho, nomeadamente a qualidade da madeira, o tipo de ligações das vigas às paredes de alvenaria e a irregularidade do seu eixo longitudinal.

PALAVRAS-CHAVE: Madeira, pavimentos, identificação dinâmica, simulação numérica.

ABSTRACT

The need to rehabilitate old buildings is becoming a priority in Portugal and, therefore, it is necessary to understand the state and the behaviour of the materials and structural elements that constitute these constructions. Among these elements, timber floors stands out as one of the most important, for its own role and relevant participation at the behaviour of the entire structure. The floors are not only responsible for creating platforms to make spaces usable, but also for establishing connections between walls, promoting a better global box behaviour.

In this context, the identification of the state of structural elements that constitute timber floors through non-destructive techniques is a key action. The use of tree trunks to materialize the beams and struts, the heterogeneity and anisotropy of timber in general and of these elements in particular, are some of the obstacles when seeking to identify the characteristics and/or classifying this material.

This study aims assessing the dynamic behaviour of the old timber floors through vibration frequencies' measurements, i.e. without damaging the original structure. With a small device, such as a seismograph or an accelerometer, this work seeks measuring the vibration frequencies of timber floors. Through structural analysis, the frequencies obtained experimentally can be compared with the values obtained through numerical simulation, allowing estimating the real state and the behaviour of timber floors. The advantages of this technique, when compared to other procedures, are the easy transportation of the equipment, the fast processing of the results and its low cost.

The influence of the various elements constituting old timber floors is one of the aspects under analysis, in particular the timber quality, the type of connection between beams and masonry walls and the irregularity of the beams' longitudinal axis.

Keywords: Timber, Floors, dynamic identification, numerical simulation.

ÍNDICE GERAL

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO	III
PALAVRAS-CHAVE:	III
ABSTRACT	V
ÍNDICE GERAL	VII
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABELAS E GRÁFICOS	XI
1.INTRODUÇÃO	1
1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO	1
1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	1
2.MADEIRA ESTRUTURAL	3
2.1. ÁRVORE E MADEIRA	3
2.2. DEFEITOS NA MADEIRA [4].....	5
2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS – CLASSES DE RESISTÊNCIA	7
2.4. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA	10
2.4.1. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA	10
2.4.1.1. Resistógrafo	10
2.4.1.3 Pylodin.....	11
2.4.1.4 Sismógrafo	12
2.5. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA ESTRUTURAL ANTIGA	12
2.7. PAVIMENTOS EM MADEIRA.....	13
2.7.1 VIGAS	13
2.7.2. TARUGOS E CADEIAS.....	14
2.7.3. SOALHO	15
2.7.4. DANOS ESTRUTURAIS.....	16
3.CASOS DE ESTUDO	17
3.1. CASA BURGUESA DO PORTO.....	17
3.2. RUA DA TORRINHA [16]	19
3.2.1 DESCRIÇÃO GERAL	19
3.2.2. SISTEMA ESTRUTURAL	20
3.2.3. MEDIÇÕES.....	21

3.2.3. ENSAIOS DINÂMICOS	22
3.3. RUA DO ROSÁRIO [17]	23
3.3.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	23
3.3.2 SISTEMA ESTRUTURAL	24
3.3.3. MEDIÇÕES	25
3.3.4. ENSAIOS DINÂMICOS	26
3.4. RUA MONTE DOS JUDEUS [18]	27
3.4.1 DESCRIÇÃO GERAL.....	27
3.4.2. SISTEMA ESTRUTURAL	27
3.4.3. MEDIÇÕES	28
4. ENSAIOS DINÂMICOS – RESULTADOS	31
4.1. PROCESSAMENTO DO SINAL	31
4.2. MODELOS NUMÉRICOS	33
4.2.1. RUA DA TORRINHA.....	33
4.2.2 RUA DO ROSÁRIO.....	36
4.2.3. RUA MONTE DOS JUDEUS.....	38
4.3. VALORES TEÓRICOS	39
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	41
5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....	41
5.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS	41
5.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS PAVIMENTOS	44
5.4. ESTUDOS GERAIS	47
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	53
6.1. CONCLUSÕES.....	53
6.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55
ANEXOS.....	57

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Corte transversal de um tronco (material lenhoso).....	4
Figura 2.2 – As 3 direções próprias da madeira	5
Figura 2.3 – Cobertura em madeira lamelada-colada do Pavilhão Atlântico, Lisboa	5
Figura 2.4 – Defeitos nas madeiras	7
Figura 2.5 – Exemplo de um gráfico obtido com o resistógrafo em vigas do Palácio de Belmonte	10
Figura 2.6 – Resistógrafo 3450-S	11
Figura 2.7 – Exemplo de aplicação do pylodin	11
Figura 2.8 – Exemplo de aplicação do sismógrafo	12
Figura 2.9 – Vigas de um edifício na Rua dos Caldeireiros, Porto	13
Figura 2.10 – Exemplo de aplicação de ferrolhos.....	14
Figura 2.11 – Tarugamento de um pavimento	15
Figura 2.12 – Cadeia num pavimento na Rua da Torrinha, Porto	15
Figura 2.13 – Soalho de um pavimento na Rua Alexandre Braga, Porto	16
Figura 3.1 – Maqueta de uma casa na rua Dr. Barbosa de Castro, Porto	17
Figura 3.2 – Exemplo de um teto fasquiado de gesso.....	18
Figura 3.3 – Planta do piso 1 do edifício.....	20
Figura 3.4 – Planta estrutural do pavimento em estudo com os ensaios realizados pelo NCREP	20
Figura 3.5 – Fotografia do pavimento em estudo (CompA-1).....	21
Figura 3.6 – Figura esquemática do pavimento em estudo e dos seus alinhamentos	21
Figura 3.7 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas	22
Figura 3.8 – Plantas estruturais do piso 1 e piso 2	23
Figura 3.9 – Fotografias do pormenor dos apoios das vigas na parede exterior	24
Figura 3.10 – Fotografia do pavimento do piso 1 (à esquerda) e do piso 2 (à direita)	24
Figura 3.11 – Figura esquemática do pavimento em estudo e dos eixos de referência	25
Figura 3.12 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas.	26
Figura 3.13 – Planta do edifício em estudo.....	27
Figura 3.14 – Fotografia do pormenor da ligação entre vigas	28
Figura 3.15 – Fotografia do pavimento em estudo	28
Figura 3.16 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas	29
Figura 4.1 – Registo temporal das acelerações nas 3 direções obtido diretamente do sismógrafo (horizontais: Tran e Long; vertical: Vert)	31
Figura 4.2 – Registo de frequências depois de tratada a informação da figura 4.1 através do programa <i>GeoDas</i> com um pico de frequência de 29.3 Hz na direcção de vibração vertical (diagrama inferior)	31
Figura 4.3 – Aspeto do modelo do pavimento antes de qualquer intervenção (fase 1)	35

Figura 4.4 – Aspeto do modelo após a colocação das vigas de reforço (fase 2)	35
Figura 4.5 – Aspeto do modelo do pavimento do piso 1	37
Figura 4.6 – Aspeto do modelo do pavimento do piso 2	37
Figura 4.7 – Aspeto do modelo do pavimento em estudo	39
Figura 4.8 – Primeiros quatro modos de vibração de uma viga simplesmente apoiada	40
Figura 5.1 – Estudo do eixo longitudinal no programa de cálculo automático	43

ÍNDICE DE TABELAS E GRÁFICOS

Tabela 2.1 – Classes de resistência da madeira. Valores característicos.....	8
Tabela 2.2 – Classes de resistência da madeira lamelada-colada homogênea. Valores característicos	9
Tabela 2.3 – Classes de resistência da madeira lamelada-colada combinada. Valores característicos	9
Tabela 2.4 – Classes de resistência para madeiras portuguesas	13
Tabela 3.1 – Secções (Ai) e distâncias ao eixo (Xi) para cada alinhamento $i = 1, 5$ em cm	22
Tabela 3.2 – Secções “A” e distâncias ao eixo “X” em cm para cada alinhamento do piso 1	25
Tabela 3.3 – Secções “A” e distâncias ao eixo “X” em cm para cada alinhamento do piso 2	26
Tabela 4.1 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua da Torrinha	32
Tabela 4.2 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua do Rosário – Piso 1	32
Tabela 4.3 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua do Rosário – Piso 2	33
Tabela 4.4 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua Monte dos Judeus	33
Tabela 4.5 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo	36
Tabela 4.6 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo	38
Tabela 4.7 – Valores de frequência calculados com o modelo numérico.....	38
Tabela 4.8 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo	39
Tabela 5.1 – Valores de frequência para diferentes graus de encastramento e diferentes condições de apoio	42
Tabela 5.2 – Frequências naturais de uma viga em função da sua classe de resistência.....	42
Tabela 5.3 – Modos de vibração e valores de frequência determinados para os casos de estudo	44
Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios dinâmicos.....	48
Gráfico 5.1 – Valores de frequência em função do vão dos pavimentos	50
Gráfico 5.2 – Valores de frequência de vibração em função do momento de inércia das vigas	51
Gráfico 5.3 – Momento de inércia em função do vão das vigas	51

1. INTRODUÇÃO

1.1. OBJETIVOS DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação, com o título “Avaliação das características mecânicas de pavimentos de madeira antigos utilizando identificação dinâmica” tem como objetivo a análise estrutural de pavimentos de madeira antigos através da medição das suas frequências próprias de vibração com o auxílio de acelerómetros/sismógrafos.

Os resultados obtidos neste trabalho poderão ser extremamente úteis para reabilitar as estruturas deste tipo que se encontram em grande número espalhadas por todo o país, promovendo a preservação das estruturas existentes.

Os casos de estudo foram nomeados pela empresa NCREP, Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda, que facilitou o acesso aos edifícios em estudo.

Através da medição da frequência própria de vibração, pretende-se estimar algumas propriedades mecânicas dos elementos presentes na estrutura. Será igualmente analisada a influência dos vários elementos presentes num pavimento, desde os tetos de gesso, aos tarugos e soalho. As ligações entre vigas e tarugos e as condições de apoio das vigas às paredes de alvenaria também serão analisadas ao longo desta dissertação.

O interesse desta investigação resulta do grande número de pavimentos de madeira antigos existentes, não só no Porto, como em todo o país, e à dificuldade de estimar as suas propriedades e comportamento mecânico através de ensaios não destrutivos.

1.2. ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Para além deste capítulo introdutório onde se apresentam os objetivos e como se organiza a informação desta dissertação, existem mais 4 capítulos.

No capítulo 2 serão apresentadas algumas propriedades da madeira: as diferentes espécies de madeira utilizadas em elementos estruturais, defeitos, classes de resistência, ensaios de avaliação não destrutivos e elementos e características típicas de um pavimento tipo em madeira.

No capítulo 3 serão apresentados os casos de estudo, com especial destaque para o sistema estrutural de cada um, as medições realizadas e a identificação dos diferentes ensaios dinâmicos nos diferentes casos de estudo.

O capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios dinâmicos e descreve o processo do tratamento da informação. Este capítulo contém igualmente a informação relativa à simulação numérica de cada caso de estudo e os respetivos resultados.

O capítulo 5 incide na interpretação dos resultados dos ensaios dinâmicos que serão fundamentais para chegar a qualquer tipo de conclusão.

No capítulo 6 apresentar-se-ão as principais conclusões e considerações finais retiradas a partir deste trabalho, e serão feitas algumas sugestões para futuros trabalhos.

2. MADEIRA ESTRUTURAL

2.1. ÁRVORE E MADEIRA

A madeira, para além de ser um dos materiais mais sustentáveis, é também um material que oferece a resistência e durabilidade necessária (quando tratada corretamente) para ser um bom material estrutural. A capacidade que tem de poder ser um bom isolante, tanto térmico como acústico, é igualmente relevante. As vantagens da utilização da madeira como material estrutural são inúmeras, tais como [1]:

- Economicamente, é dos materiais com melhor relação quantidade/preço;
- É um material natural renovável;
- É fácil de trabalhar e pode ser reempregue várias vezes;
- É leve, mas tem uma resistência mecânica elevada. Dependendo do tipo de madeira, este material pode igualar a resistência à compressão do betão e ter valores superiores de resistência à flexão e ao corte;
- Tem boas condições naturais de isolamento térmico e acústico.

No entanto é necessário referir que existem algumas desvantagens quando falamos da madeira como material estrutural [1]:

- É combustível;
- É heterogéneo e anisotrópico;
- É bastante vulnerável a agentes bióticos;
- É vulnerável a variações de volume em função do ambiente local.

A madeira, em geral, deriva de dois grandes grupos de espécies de árvores: as Gimnospérmicas, também denominadas de coníferas, resinosas ou madeiras brandas, e as Angiospérmicas, também conhecidas por dicotiledóneas, folhosas ou madeiras duras [2].

As madeiras denominadas de resinosas são as mais utilizadas em elementos estruturais por terem uma boa resistência à compressão e ainda melhor resistência à tração [3]. Dentro deste tipo de madeiras, destacam-se, para utilização estrutural, o pinheiro, o abeto, o cedro e o cipreste [2].

No grande grupo das madeiras Angiospérmicas, destacam-se dois subgrupos: as monocotiledóneas, que não possuem uma resistência aceitável para serem classificadas como madeira estrutural, e as

dicotiledóneas, ou folhosas, que possuem madeiras tanto de baixa, como de elevada qualidade. O castanho, o eucalipto, o carvalho e a noqueira são algumas espécies de madeira folhosa [2].

Estes dois tipos de madeira referidos diferem, não só na sua aparência exterior, mas também ao nível atômico do tecido lenhoso. O lenho é constituído pelo borne, cerne e medula. O borne situa-se na zona mais externa do lenho e possui uma cor mais clara; é por isso a madeira mais jovem do tronco. A camada mais interior junto da medula é o cerne. Esta zona da árvore apresenta uma cor mais escura do que o borne, já que possui uma maior densidade, resistência e estabilidade a humidade e agentes de degradação biológica. A medula encontra-se na zona mais central da árvore e não tem qualquer resistência mecânica e durabilidade. Os raios medulares são igualmente importantes para a definição qualitativa da madeira do tronco. Prolongam-se de forma radial desde a medula até à casca e são responsáveis pelo transporte e armazenamento de substâncias nutritivas [2].

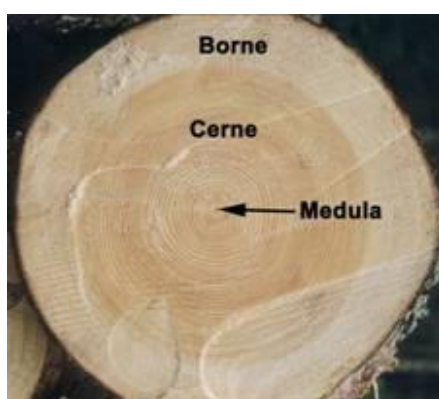


Figura 2.1 – Corte transversal de um tronco (material lenhoso) [4]

No âmbito estrutural, podemos classificar a madeira como um material heterogéneo, devido à sua grande composição celular, maioritariamente caracterizado pelo tecido lenhoso (borne, cerne e medula) que confere a sua rigidez, impermeabilidade e resistência. Devido ao seu crescimento natural, que depende de inúmeras variáveis, como a natureza do solo, condições climáticas, humidade do ar, entre outras, é muito difícil, ou praticamente impossível encontrar as mesmas características, físicas e mecânicas, em dois pontos distintos de uma árvore [5].

A anisotropia é outra característica que podemos atribuir à madeira: as propriedades apresentadas no plano paralelo às fibras diferem das apresentadas no plano perpendicular às mesmas, ou seja as propriedades diferem segundo os eixos radial, axial e tangencial. A grande discrepância entre propriedades acontece entre a direção paralela e a direção perpendicular às fibras [5].

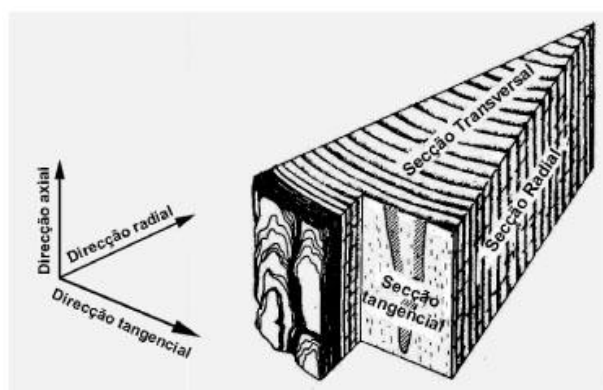


Figura 2.2 – As 3 direções próprias da madeira [4]

Para alterar as características de heterogeneidade e anisotropia da madeira existem processos de transformação que tornam o comportamento deste material mais homogêneo e mais isotrópico. Um desses processos é a laminagem que consiste em cortar a madeira em lamelas que são posteriormente coladas de forma a diminuir a influência dos defeitos nas peças [6]. A madeira lamelada-colada permite vencer grandes vãos, oferece uma elevada resistência ao fogo e, por isso, ideal na construção de pavimentos e coberturas. A sua leveza, facilidade de montagem no local e a sua variedade de formas arquitetónicas são outras grandes vantagens deste tipo de madeira.



Figura 2.3 – Cobertura em madeira lamelada-colada do Pavilhão Atlântico, Lisboa [7]

Para além das coberturas, como é exemplo a cobertura do Pavilhão Atlântico, figura 2.3, a madeira lamelada-colada é utilizada igualmente em pontes devido á capacidade de produzir peças curvas, facilitando a criação de estruturas em arco e de grande vão [7].

2.2. DEFEITOS NA MADEIRA [4]

Na constituição da madeira existem irregularidades que é necessário ter em conta por alterarem as suas propriedades mecânicas. Estas irregularidades diminuem a qualidade do elemento e reduzem a sua resistência. As irregularidades mais frequentes na madeira são:

- Nós;
- Fendas;
- Inclinação do fio;
- Bolsas de resina;
- Descaio.

Os **nós** são os defeitos que mais contribuem para o decréscimo da resistência do material devido á sua localização na peça estrutural, forma e tamanho. Essa ação redutora nas propriedades mecânicas da madeira resulta do desvio das fibras que envolve o nó, tanto maior quanto maior for a sua dimensão.

Podem ser classificados como ‘nós vivos’ quando se encontram no material lenhoso, ou ‘nós mortos’ quando se encontram desligados do restante tecido. Podem também ser classificados como ‘podres’ ou ‘sãos’, dependendo do seu grau de apodrecimento.

Este tipo de defeitos tem grande influência para esforços de tração, devido á reduzida capacidade resistente do material. Este tipo de esforços provoca a separação do nó do resto do elemento; já isso não acontece para esforços de compressão onde o elemento e o nó trabalham em conjunto. Na flexão, estes defeitos devem, por isso, situar-se na zona comprimida de maneira a minimiar o seu impacto.

As **fendas** podem ser inicialmente originadas pelo processo de secagem da madeira (fendas de secagem provocadas pela variação de volume que origina tensões internas que podem provocar a separação das fibras), ou desenvolvem-se posteriormente devido às cargas de serviço.

O efeito das fendas nas propriedades da madeira depende do tipo de esforço, da localização, comprimento e profundidade das mesmas.

A **inclinação do fio** traduz-se pela inclinação existente entre o fio e o eixo longitudinal da peça. Essa inclinação resulta de anomalias de crescimento, ou da serragem oblíqua das peças.

Este defeito reduz a capacidade resistente da madeira por nos afastarmos da situação ideal, ou seja os esforços nunca serão aplicados paralela ou perpendicularmente às fibras (anisotropia). Este tipo de defeitos são mais acentuados em zonas de compressão e desprezáveis em zonas de tração, ou em peças sujeitas a flexão.

As **bolsas de resina** são cavidades, em geral de pequena dimensão, que contêm resina no estado líquido ou solido. Reduzem a capacidade resistente do material e apenas aparecem nas Resinosas. As bolsas de goma são defeitos semelhantes às bolsas de resina, mas só ocorrem nas madeiras folhosas.

O **descaio** surge devido á variação da secção transversal ao longo da peça. Limita a fixação dos apoios e outros tipos de ligações, não afetando a capacidade resistente do material.

Por vezes também se assinala a **taxa de crescimento** como causa de eventuais defeitos. Esta taxa é avaliada pelo espaçamento entre anéis de crescimento. Embora não sendo um defeito, é um parâmetro importante na avaliação das madeiras resinosas. O espaçamento entre anéis de crescimento define indiretamente a densidade da madeira que está relacionada com a sua resistência e módulo de elasticidade.



Figura 2.4 – Defeitos nas madeiras [4]

Outro tipo de degradação dos elementos estruturais acontece devido a **agentes bióticos**. Os fungos penetram a madeira através das fissuras existentes causando manchas superficiais e podridão. Também os insetos xilófagos (térmitas e carunchos) invadem a madeira para se abrigarem e alimentarem. Durante o seu crescimento, e já na fase adulta, alimentam-se do material lenhoso reduzindo a secção resistente da peça e aumentando o risco da instalação de umidade [5].

Principalmente as fissuras e os nós são responsáveis pelo decréscimo de rigidez dos elementos de madeira, o que diminui a sua frequência natural. O Eurocódigo 5 prevê a intervenção em pavimentos com frequências inferiores a 8 Hz [8].

2.3. PROPRIEDADES FÍSICAS E MECÂNICAS – CLASSES DE RESISTÊNCIA

Para uma utilização mais eficiente em elementos estruturais, a madeira foi dividida em classes de resistência às quais se associam propriedades físicas e mecânicas. O projetista pode, deste modo, dimensionar elementos de madeira com maior facilidade, recorrendo à norma EN 338 [9] que agrupa madeiras Folhosas e Resinosas em conjuntos de classes de resistência.

Pela leitura da tabela 2.1 verifica-se que uma madeira C20 pertence ao grupo das Resinosas de média qualidade com resistência característica à flexão na direção das fibras de 20 N/mm². Já uma madeira D30 pertence ao grupo das folhosas e tem uma resistência característica à flexão de 30 N/mm².

Os valores da resistência à flexão na direção das fibras, da massa volúmica e do módulo de elasticidade foram obtidos através de ensaios de classificação, enquanto as restantes propriedades foram obtidas relacionando as três propriedades acima referidas.

Existem alguns fatores naturais capazes de influenciar as características físicas e mecânicas da madeira, tais como [1]:

- A localização da peça no lenho – O resultado dos ensaios pode variar significativamente em função da localização do provete na árvore;
- A presença de defeitos – Nós, fendas, inclinação do fio, etc.;
- A humidade – A madeira apresenta a resistência máxima quando completamente seca.

Tabela 2.1 – Classes de resistência da madeira. Valores característicos. (EN 338 [9])

	Choupo e Espécies Resinosas																Espécies Folhosas						
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	D30	D35	D40	D50	D60	D70					
	Propriedades de resistência mecânica (N/mm ²)																						
Flexão	$f_{b,k}$	14	16	18	20	22	24	27	30	35	40	45	50	30	35	40	50	60	70				
Tração paralela	$f_{t,0,k}$	8	10	11	12	13	14	16	18	21	24	27	30	18	21	24	30	36	42				
Tração perpendicular	$f_{t,90,k}$	0,4	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6				
Compressão paralela	$f_{c,0,k}$	16	17	18	19	20	21	22	23	25	28	27	29	23	25	26	29	32	34				
Compressão perpendicular	$f_{c,90,k}$	2,0	2,2	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8	2,9	3,1	3,2	8,0	8,4	8,8	9,7	10,5	13,5				
Corte	$f_{v,k}$	1,7	1,8	2,0	2,2	2,4	2,5	2,8	3,0	3,4	3,8	3,8	3,8	3,0	3,4	3,8	4,6	5,3	6,0				
Propriedades de rigidez (kN/mm ²)																							
Módulo de elasticidade paralelo	Média $E_{0,mean}$ $E_{0,0,05}$	7	8	9	9,5	10	11	11,5	12	13	14	15	16	10	10	11	14	17	20				
Módulo de elasticidade perpendicular	Média $E_{90,mean}$	4,7	5,4	6,0	6,4	6,7	7,4	7,7	8,0	8,7	9,4	10,0	10,7	8,0	8,7	9,4	11,8	14,3	16,8				
Módulo de distorção	Média G_{mean}	0,23	0,27	0,30	0,32	0,33	0,37	0,38	0,40	0,43	0,47	0,50	0,53	0,64	0,69	0,75	0,93	1,13	1,33				
		0,44	0,5	0,56	0,59	0,63	0,69	0,72	0,75	0,81	0,88	0,94	1,00	0,60	0,65	0,70	0,88	1,06	1,25				
Densidade (kg/m ³)																							
Valor característico	ρ_k	290	310	320	330	340	350	370	380	400	420	440	460	530	560	560	650	700	900				
Média	ρ_{mean}	350	370	380	390	410	420	450	460	480	500	520	550	640	670	700	780	840	1080				
Nota: Os valores contidos no presente quadro referem-se a valores obtidos em provetes condicionados para 20°C de temperatura e 65% de humidade relativa do ar, condições que, em média, conduzem a um teor em água na madeira à volta dos 12%.																							

Para além das classes resistentes relativas aos grupos de madeira folhosa e resinosa, existem também classes resistentes para madeira lamelada-colada homogénea, quando as lamelas derivam apenas de um tipo de madeira, e combinada, quando as lamelas pertencem a dois tipos de madeira. Estas propriedades estão presentes nas tabelas 2.2 e 2.3. Os parâmetros de resistência e rigidez encontram-se em N/mm² e a densidade em Kg/m³ [10].

Tabela 2.2 – Classes de resistência da madeira lamelada-colada homogénea. Valores característicos [10]

Glulam strength class		GL 24h	GL 28h	GL 32h	GL 36h
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tension strength	$f_{t,0,g,k}$	16,5	19,5	22,5	26
	$f_{t,90,g,k}$	0,4	0,45	0,5	0,6
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	24	26,5	29	31
	$f_{c,90,g,k}$	2,7	3,0	3,3	3,6
Shear strength	$f_{v,g,k}$	2,7	3,2	3,8	4,3
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	390	420	460	490
Shear modulus	$G_{g,mean}$	720	780	850	910
Density	$\rho_{g,k}$	380	410	430	450

Tabela 2.3 – Classes de resistência da madeira lamelada-colada combinada. Valores característicos [10]

Glulam strength class		GL 24c	GL 28c	GL 32c	GL 36c
Bending strength	$f_{m,g,k}$	24	28	32	36
Tension strength	$f_{t,0,g,k}$	14	16,5	19,5	22,5
	$f_{t,90,g,k}$	0,35	0,4	0,45	0,5
Compression strength	$f_{c,0,g,k}$	21	24	26,5	29
	$f_{c,90,g,k}$	2,4	2,7	3,0	3,3
Shear strength	$f_{v,k,g}$	2,2	2,7	3,2	3,8
Modulus of elasticity	$E_{0,g,mean}$	11 600	12 600	13 700	14 700
	$E_{0,g,05}$	9 400	10 200	11 100	11 900
	$E_{90,g,mean}$	320	390	420	460
Shear modulus	$G_{g,mean}$	590	720	780	850
Density	$\rho_{g,k}$	350	380	410	430

2.4. METODOLOGIAS PARA AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA DA CAPACIDADE RESISTENTE DE ESTRUTURAS DE MADEIRA

Os métodos de ensaio não destrutivos realizados em elementos/estruturas de madeira têm como objetivo avaliar as propriedades físicas e mecânicas da madeira, assim como o seu estado de conservação, de forma não intrusiva, ou seja sem causar dano, ou qualquer impacto negativo no elemento.

Em seguida, encontram-se descritos alguns equipamentos de ensaio/avaliação não destrutivos, referindo algumas das suas vantagens e inconvenientes.

2.4.1. MÉTODOS E EQUIPAMENTOS DE AVALIAÇÃO NÃO DESTRUTIVA

2.4.1.1. Resistógrafo

Este aparelho, utilizado sobretudo em elementos estruturais de madeira, relaciona a energia despendida na penetração de uma broca de reduzida espessura a velocidade constante com a densidade da madeira.

O grande interesse dos resultados, a facilidade de utilização e o número de pessoas envolvidas neste tipo de ensaios são algumas das grandes vantagens deste aparelho. Em particular, uma pessoa pode realizar este ensaio sem depender de terceiros. Permite detetar variações de densidade, podridões, vazios e defeitos internos existentes na peça ensaiada através do gráfico resultante do ensaio [4].

Pela leitura da figura seguinte, associada ao ensaio de uma viga do Palácio de Belmonte [11], verifica-se que a densidade varia constantemente em função da profundidade. Por outro lado, na zona entre 130 a 195 mm de profundidade, encontram-se os menores valores de resistência, possivelmente resultantes da existência de um vazio interno.

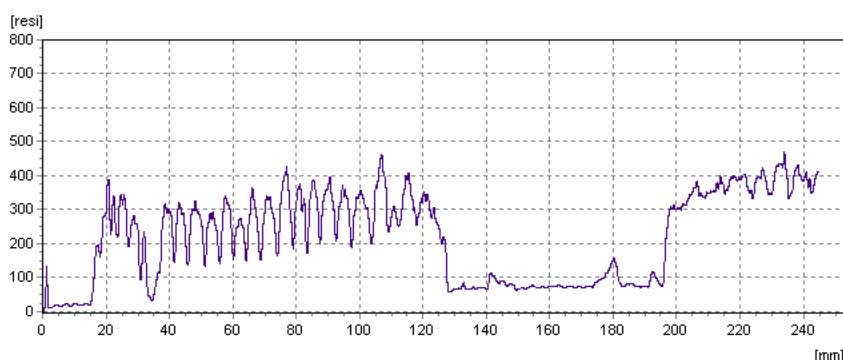


Figura 2.5 – Exemplo de um gráfico obtido com o resistógrafo em vigas do Palácio de Belmonte [11]

Por outro lado, o tempo utilizado no tratamento da informação e a não existência de correlações fiáveis para estimativa de valores quantitativos, nomeadamente da capacidade resistente, através do método são algumas limitações deste equipamento. Este método pode ser bastante pesado, dado serem necessários, no mínimo, 30 ensaios em cada peça para o resultado final ser fiável [5].



Figura 2.6 – Resistógrafo 3450-S [11]

2.4.1.3 Pylodin

O pylodin mede a profundidade da penetração de uma agulha impulsionada por uma mola. Através da profundidade, e de correlações com a dureza superficial, é possível estimar algumas propriedades físicas da madeira tais como a densidade da madeira. É um método de fácil utilização e útil para estimar o estado de conservação das estruturas.

Por outro lado, apenas avalia o material superficial de uma peça de maneira, não tendo em consideração o seu interior, ou seja, a existência de vazios e podridões, e não garante uma estimativa precisa das características mecânicas do material devido ao baixo número de correlações existentes [2].

É, por isso, um método útil para caracterizar o estado de conservação (sobretudo superficial) da madeira, mas pouco fiável para estimar as suas propriedades mecânicas [2].

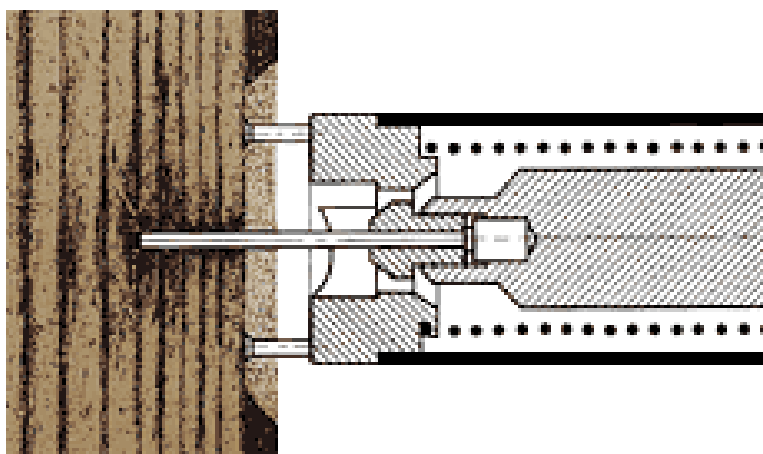


Figura 2.7 – Exemplo de aplicação do pylodin [12]

2.4.1.4 Sismógrafo

O sismógrafo foi o aparelho utilizado na inspeção aos casos de estudo, sendo bastante utilizado pelo NCREP na avaliação do comportamento de pavimentos de madeira antigos.

O sismógrafo é um aparelho que mede acelerações em três direções ortogonais. O sinal obtido pelo sismógrafo é depois tratado em computador, neste caso através do programa *GeoDAS*, nomeadamente na transformação do sinal de leitura em acelerações para frequências.

As frequências permitem estimar a rigidez da estrutura/elemento e, nalguns casos, estimar o módulo de elasticidade da madeira a partir do conhecimento da geometria e da densidade dos elementos. É um instrumento útil para saber o estado de conservação da madeira e verificar se é necessário reforçar a estrutura, ou substituir alguns dos seus elementos.

Para além dos ensaios realizados no âmbito desta tese, foram também utilizados resultados de ensaios realizados pelo NCREP em vários edifícios do Porto e, por isso, relevantes para esta dissertação.



Figura 2.8 – Exemplo de aplicação do sismógrafo

2.5. AVALIAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DA MADEIRA ESTRUTURAL ANTIGA

Depois de descrever alguns ensaios não destrutivos para classificar a madeira, é importante referir o método presente na norma EN338 [7], no ponto 6.2.2, cujo objetivo é atribuir classes de resistência à madeira presente em estruturas antigas.

Através desta norma, é possível associar uma população de madeiras a uma classe de resistência, desde que a resistência à flexão na direção paralela às fibras ($f_{m,k}$), a sua massa volúmica (ρ_m) e módulo de elasticidade ($E_{0,m}$) sejam iguais ou superiores aos valores da respetiva classe.

Para uma correta identificação da espécie, é necessário efetuar um reconhecimento visual de diferentes parâmetros (cor, largura dos veios de Verão e de Inverno, dureza, etc.), sendo necessário, muitas das vezes, retirar uma amostra para analisar em laboratório.

Na tabela 2.4 estão relacionadas as principais espécies de madeira usadas em estruturas em Portugal com as respetivas classes de resistência, tendo em conta os princípios acima referidos. O pinho bravo português não se encontra neste quadro por ter uma norma específica de classificação que o identifica como C18. Os valores das principais propriedades mecânicas foram retirados da publicação 'Madeiras Portuguesas' de Albino de Carvalho, à exceção do módulo de elasticidade.

Tabela 2.4 – Classes de resistência para madeiras portuguesas [5]

Espécie	fm,k (MPa)	E0,m (GPa)	ρk (Kg/m3)	Classe – EN 338
Castanho	97	10	540	D30
Carvalho	122	11	800	D40
Eucalipto	137	12	765	D40
Choupo branco	80	11	450	C24

2.7. PAVIMENTOS EM MADEIRA

As vigas, os tarugos e o soalho constituem os elementos principais dos pavimentos em madeira. No entanto, nos casos em que é preciso desviar forças de alguma(s) viga(s) para as vigas que a(s) ladeiam, são colocadas cadeias. Antigamente, as vigas e os tarugos eram apenas serrados, ou seja, pouco trabalhados por não ficarem à vista na estrutura final, no entanto, o soalho, como é o elemento do pavimento que tem mais importância estética tinham acabamentos mais cuidados [13].

2.7.1 VIGAS

Tradicionalmente, as vigas de um pavimento em madeira encontram-se posicionadas paralelamente entre si e, no caso de edifícios antigos, apoiadas/embebidas em paredes de alvenaria. Nos edifícios construídos até ao início do século XX, as vigas eram de secção circular variável (troncos de árvore), por vezes falqueados numa, ou duas faces de maneira a receber o soalho e/ou o teto (figura 2.9).



Figura 2.9 – Vigas de um edifício na Rua dos Caldeireiros, Porto

Como a secção do tronco não é regular e diminuía em altura, as vigas eram intercaladas em sentidos opostos, para que na mesma extremidade uma secção maior ficasse ladeada por duas secções menores, de forma a uniformizar a rigidez e a resistência do pavimento.

As vigas devem estar apoiadas em 2/3 da espessura da parede, se não estiverem apoiadas em toda a sua largura [14]. Vigas apoiadas em paredes exteriores apresentam normalmente uma maior potencial de dano devido ao maior potencial de exposição a agentes atmosféricos.

As ligações das vigas às paredes, quando existiam, eram feitas através de elementos metálicos, denominados de ferrolhos, pregados às vigas e encastrados na alvenaria (figura 2.10).

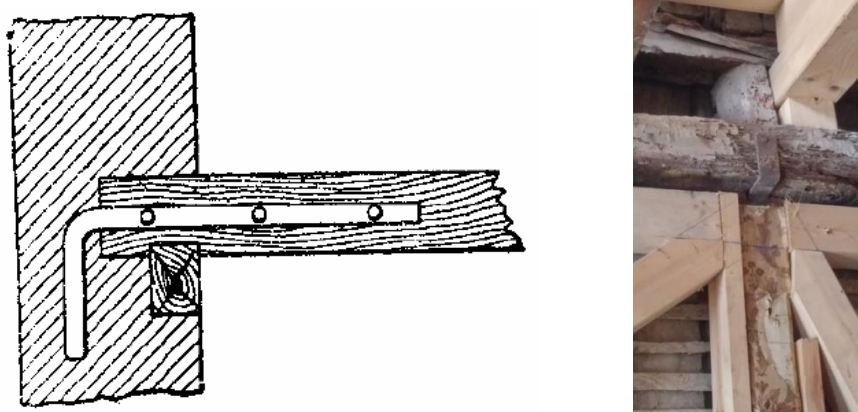


Figura 2.10 – Exemplo de aplicação de ferrolhos

O espaçamento entre vigas ronda normalmente os 40 a 70 cm entre eixos [11], ficando a primeira e última viga junto às paredes extremas dos edifícios. Antigamente, como a madeira usada nos pavimentos era quase sempre do mesmo tipo, o espaçamento e a sua secção transversal estavam diretamente relacionados com o vão e a carga [13].

2.7.2. TARUGOS E CADEIAS

Quando o vão do pavimento é muito grande e estando sob ação de cargas aplicadas, a viga pode instabilizar lateralmente (bambeamento), perdendo rigidez e capacidade resistente. O bambeamento existe quando um elemento esbelto atinge o momento crítico no seu plano de inércia máxima, originando deslocamento no plano perpendicular ao carregamento, ou seja, origina vibrações e deformações indesejáveis num pavimento.

Para que tal não aconteça, utilizam-se tarugos entre vigas para travar esse deslocamento horizontal e para que a estrutura funcione em conjunto. Os tarugos devem ser mais largos em cima e introduzidos à força para fazer com que o vigamento suba um pouco e, posteriormente, fique devidamente nivelado devido ao peso próprio e as cargas de serviço [11], sem desprezar os cuidados necessários para que não sejam danificadas as paredes onde o vigamento apoia [13], figura 2.11.

As cadeias existem quando o vigamento precisa de ser interrompido, figura 2.12. Conduatas, chaminés e caixas de escadas são alguns exemplos de elementos que impedem o vigamento de os ultrapassar e apoiar-se na parede. Nestes casos, as vigas do pavimento apoiam-se nas cadeias que, por sua vez, se apoiam em duas vigas principais laterais às vigas interrompidas, permitindo contornar os obstáculos referidos. As vigas laterais que recebem a cadeia idealmente devem ter maior dimensão de forma a resistirem às novas cargas introduzidas [13].



Figura 2.11 – Tarugamento de um pavimento



Figura 2.12 – Cadeia num pavimento na Rua da Torrinha, Porto

2.7.3. SOALHO

O soalho consiste num conjunto de tabuas de madeira com espessuras entre os 2 e os 5 cm e larguras entre os 12 e os 30 cm, posicionadas na direção perpendicular ao vigamento e que servem como revestimento, recebendo e distribuindo diretamente as cargas de serviço.

O pinho nacional, pinho manso e a casquinha são os principais tipos de madeira usados para o soalho. As ligações entre tabuas podem ser de junta, de chanfro, de meio-fio (também chamado à portuguesa) e de macho e fêmea (à inglesa).

Uma solução bastante utilizada em soalhos que mostravam um desgaste significativo consistia em aplicar um forro perpendicular (novo soalho) com cerca de 1,5 centímetros de espessura [11], figura 2.13.



Figura 2.13 – Soalho de um pavimento na Rua Alexandre Braga, Porto

2.7.4. DANOS ESTRUTURAIS

Em pavimentos de madeira verificam-se, principalmente, dois tipos de danos estruturais de grande importância. A rotura por corte nas ligações aos apoios devido à redução da seção por ataques de carunchos, fungos e térmitas resultante, usualmente, da existência de elevados teores de humidade, e a rotura por flexão a meio vão devido a defeitos na madeira, à redução da seção útil e/ou ao excesso de carga devido á mudança de uso do edifício [11]. Este tipo de danos influencia a deformação do pavimento e a vibração própria da estrutura.

3. CASOS DE ESTUDO

3.1. CASA BURGUESA DO PORTO

Entre os séculos XVII e XIX, a tipologia habitacional na cidade do Porto centrava-se em edifícios de 3 pisos (11 m de altura) fundados em terrenos com 4 a 8 m de largura por 15 a 25 m de profundidade. O edifício típico ocupa toda a frente do terreno e possui um logradouro junto à fachada de tardoz.

As paredes de fundação e dos pisos inferiores são de alvenaria, sendo o granito o material mais utilizado. As paredes sofrem um alargamento na fundação para reduzir a tensão de solicitação no terreno, e a profundidade da base depende da qualidade do terreno. As paredes de alvenaria em pisos inferiores têm espessuras a variar entre os 30 e os 70 cm. Para pisos superiores, em paredes interiores de compartição e paredes da caixa de escadas são usadas normalmente paredes de tabique simples e duplo, respetivamente, figura 3.1.

Neste tipo de casas é frequente encontrar uma claraboia para iluminar e ventilar a caixa de escadas, que podia ser redonda ou oval, quadrada ou retangular [14].

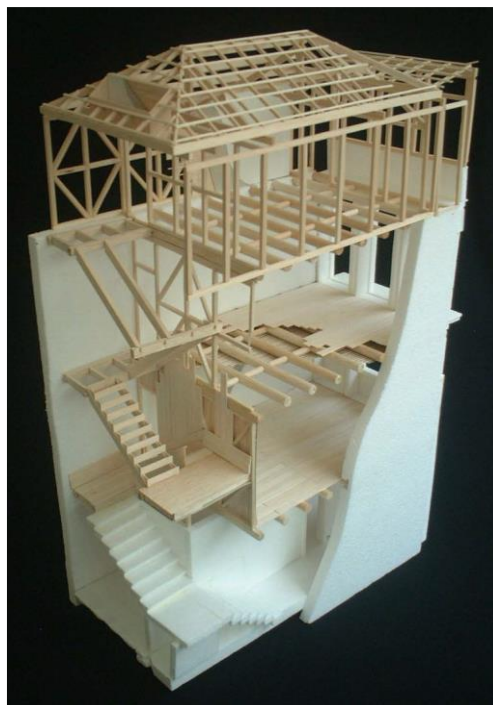


Figura 3.1 – Maqueta de uma casa na rua Dr. Barbosa de Castro, Porto [14]

Os pavimentos e coberturas eram construídos com vigas de madeira em forma de paus rolados, a meio, ou aos terços de vão. O castanho, carvalho e o pinho de riga eram mais usados para o vigamento dos sobrados (pavimentos) e coberturas, o pinho nacional para paredes de tabique, soalhos e caixilharias exteriores e interiores; o pinho manso e a casquinha também eram usados para estes dois últimos casos.

O castanho é muito resistente à água, mas facilmente atacado pelo caruncho; o carvalho, sendo mais duradouro e resistente, tem a desvantagem de ser muito pesado. O pinheiro tinha a vantagem de ser a madeira mais abundante em Portugal e, por isso, economicamente mais viável. É fácil de trabalhar, com alguma durabilidade dependendo do seu tipo e resistente à água, mas possui muitos nós e fende com facilidade.

Os pavimentos, inicialmente constituídos por vigas em forma de paus rolados, em edifícios de finais do século XIX são substituídos por vigas de madeira esquadriada com 50 a 70 cm de espaçamento, apoiados, na maior parte dos casos, em 2/3 da espessura da parede. O pinho manso era o tipo de madeira mais usado na aplicação do soalho cuja espessura rondava os 3 cm [14].

A largura da fachada destes edifícios estabelece o vão das vigas dos pavimentos. Em edifícios com largura superior a 5 m, aproximadamente, é de esperar que exista uma parede longitudinal de alvenaria intermédia paralela às duas paredes de empena para apoio intermédio das vigas de madeira, para que o vão dos pavimentos não exceda os 5 m, evitando deste modo vibrações excessivas e/ou a necessidade de uso de vigas de grande diâmetro. Um edifício com 8 m de fachada possui, normalmente, dois tipos de vão: tipicamente um com 3 m e outro com 5 m.

Os tetos, inicialmente realizados por tabuado, a partir do século XVIII passam a ser estucados com variados motivos decorativos. Para suporte dos revestimentos e acabamentos em gesso dos tetos, a técnica utilizada consistia na construção de uma estrutura de ripas trapezoidais de pequena dimensão, também designada por fasquios, espaçadas de um dedo sobre a qual era aplicado a pasta de gesso [14], figura 3.2.



Figura 3.2 – Exemplo de um teto fasquiado de gesso

As propriedades mecânicas do gesso têm grande relevância neste estudo por estar presente em muitos dos tetos dos pavimentos dos casos de estudo. Apresenta um coeficiente de condutibilidade térmica relativamente baixo e um conjunto de características que o tornam num material bastante resistente ao fogo e, por isso, eficaz para ser utilizado como revestimento.

O gesso apresenta também uma boa aderência à maioria dos materiais de construção. No entanto, adere mal a superfícies de madeira o que levava a fadear os tetos para haver uma melhor aderência entre as ripas trapezoidais. O gesso é um material ligeiramente solúvel e por isso, “inimigo” da presença de grandes quantidades de água. Tipicamente apresenta um peso volúmico de 27 KN/m³ e um módulo de elasticidade de 1 GPa [15].

Todos estes aspetos foram detetados não só nos casos de estudo mas também em outros edifícios do Porto que foram possíveis visitar para um bom entendimento do sistema estrutural dos pavimentos antigos e dos edifícios em geral. O NCREP nomeou 3 casos de estudo aos quais foi dedicada uma análise mais detalhada e que se situam em:

- Rua da Torrinha;
- Rua do Rosário;
- Rua Monte dos Judeus.

Neste capítulo podemos contar com a descrição detalhada dos casos de estudo, sendo que os resultados dos ensaios e o tratamento da informação será assunto para tratar nos capítulos seguintes.

3.2. RUA DA TORRINHA [16]

3.2.1 DESCRIÇÃO GERAL

Um dos casos de estudo situa-se na Rua da Torrinha, Porto. Trata-se de um edifício antigo, com 4 pisos, 4 m de fachada, de largura variável ao longo dos seus 15 m de profundidade, com uma área coberta total de 270 m², um logradouro de 140 m² e que foi sujeito a várias intervenções ao longo do tempo.

Este edifício foi reabilitado com um projeto do NCREP. Durante o processo de inspeção e diagnóstico, e com o objetivo de maximizar o aproveitamento dos elementos estruturais no projeto de reabilitação, foram realizados 38 ensaios em elementos estruturais de madeira (vigas do pavimento) onde foi usado:

- Resistógrafo para avaliar o estado de conservação interno e superficial da madeira;
- Pilodyn para avaliar o estado superficial da madeira;
- Higrómetro para avaliar o teor de água da madeira.

O resultado das ações de inspeção e dos ensaios apurou que, em geral, os pavimentos apresentavam um bom estado de conservação, registando-se no entanto uma vibração excessiva nos compartimentos do piso 1 junto à fachada posterior. Na figura 3.3 encontra-se a planta deste piso, destacando-se o pavimento CompA-1, objeto deste estudo e que apresentava o soalho degradado devido a ataques de insetos xilófagos.

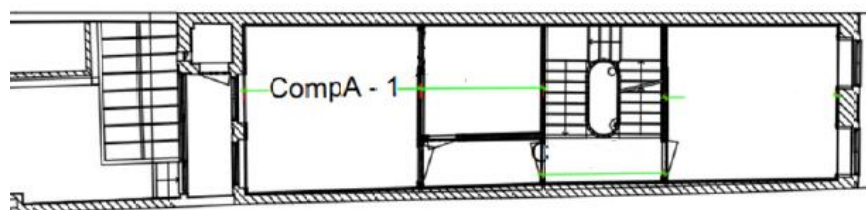


Figura 3.3 – Planta do piso 1 do edifício [16]

3.2.2. SISTEMA ESTRUTURAL

O estudo deste pavimento (CompA-1) foi feito em duas fases. Na primeira, anterior à intervenção realizada, o pavimento do piso 1 era constituído por uma estrutura resistente de madeira folhosa com vigas de secção transversal circular variável, falqueadas nas duas faces para receberem os revestimentos dos pavimentos e do teto. As vigas encontram-se “encastradas” nas empenas em alvenaria de pedra do edifício.

O soalho neste piso é simples, com aproximadamente 2,5 cm de espessura, e o teto do piso inferior estucado com elementos decorativos aplicados sobre fasquio pregado à estrutura do pavimento. O piso inferior (piso 0) possuía uma parede divisória de tabique que funcionava como apoio secundário das vigas do pavimento em estudo.

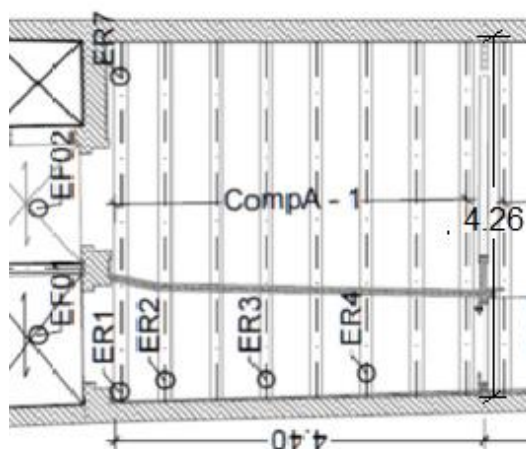


Figura 3.4 – Planta estrutural do pavimento em estudo com os ensaios realizados pelo NCREP [16]

Numa fase posterior, durante a intervenção, a parede de tabique do piso inferior, que dista 3 metros da empena mais afastada, foi removida. Embora o “Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural” (RIDE) realizado pelo NCREP [17] destacasse o bom estado de conservação do pavimento inicial, estimando que a madeira existente tinha características semelhantes às da classe resistente D30, previu a introdução de 3 novas vigas de madeira intercalados com os existentes de forma a obviar a vibração excessiva que se estimaria verificasse após a remoção da parede.



Figura 3.5 – Fotografia do pavimento em estudo (CompA-1)

3.2.3. MEDIÇÕES

Quando o soalho do pavimento do piso 1 foi retirado, procedeu-se à caracterização geometria das vigas da estrutura de 4.26 metros de vão. Foram verificadas e medidas as secções transversais em 5 pontos (A_i) de cada viga i e medida a distância do eixo da viga nos mesmos 5 pontos à parede interior (X_i). Os resultados das medições encontram-se na tabela 3.1. A secção dos tarugos preexistentes é circular com um diâmetro de 15 cm; os tarugos novos apresentam a mesma secção das vigas novas.

As vigas preexistentes foram designadas por V1, V2, V3, V4 V5, V6 e V7 e as vigas novas foram designadas por VN1, VN2 e VN3, figura 3.6.

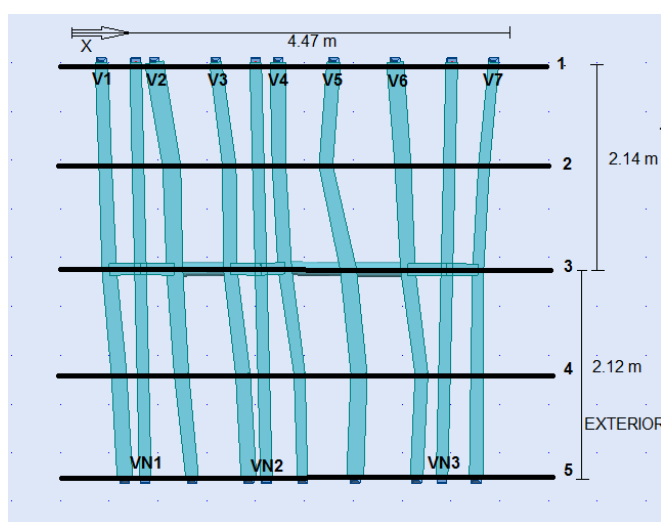


Figura 3.6 – Figura esquemática do pavimento em estudo e dos seus alinhamentos

Tabela 3.1 – Secções (Ai) e distâncias ao eixo (Xi) para cada alinhamento i = 1, 5 em cm

Alinhamento	1		2		3		4		5	
	A1	X1	A2	X2	A3	X3	A4	X4	A5	X5
V1	∅18	66	∅18	60	∅17	50	∅15	46	∅15	42
VN1	12x17	87	12x17	85	12x17	79	12x17	77	12x17	77
V2	∅15	135	∅17	124	∅19	117	∅21	114	∅22	96
V3	∅18	193	∅17	187	∅16	174	∅16	173	∅14	159
V4	∅12	211	∅13	209	∅16	203	∅16	201	∅19	199
VN2	12x17	248	12x17	241	12x17	230	12x17	224	12x17	223
V5	∅20	302	∅19	306	∅19	295	∅16	282	∅16	280
V6	∅15	365	∅15	370	∅17	356	∅19	351	∅20	343
VN3	12x17	391	12x17	395	12x17	395	12x17	398	12x17	401
V7	∅16	426	∅15	427	∅13	428	∅13	434	∅12	444

3.2.3. ENSAIOS DINÂMICOS

Foram realizados ensaios em duas fases distintas. Na primeira fase, o pavimento tinha soalho e apoiava-se na parede de tabique do piso inferior; na segunda, a parede de tabique tinha sido removida e o soalho retirado. Na primeira fase o pavimento foi ensaiado a meio vão do soalho, entre a zona da parede de tabique e a empena mais afastada, ou seja o sismógrafo foi colocado a 2,20 m da fachada posterior e 1,5 m da empena onde apoiavam as vigas. Na segunda fase, sem parede de tabique e sem soalho, ensaiaram-se as vigas VN1, V2, VN2, V4, V5 e VN3 a meio e a um quarto do vão total, perfazendo 12 ensaios neste pavimento, figura 3.7.

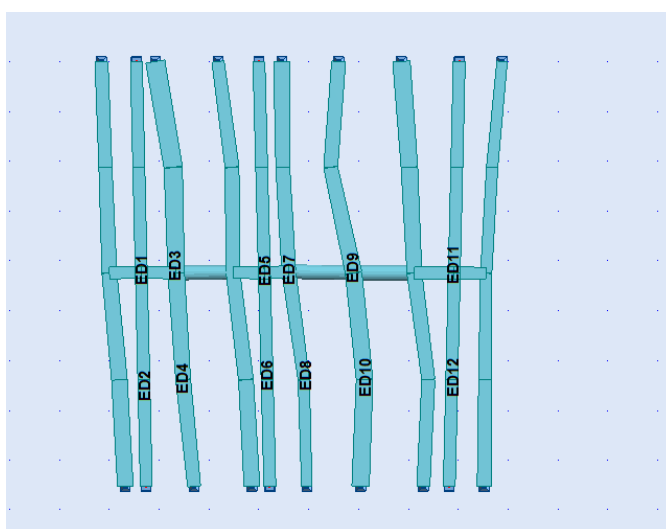


Figura 3.7 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas

A informação obtida nos ensaios foi gravada no sismógrafo e tratada em data posterior á data dos ensaios.

3.3. RUA DO ROSÁRIO [17]

3.3.1 DESCRIÇÃO GERAL

O edifício presente na rua do Rosário, Porto desenvolve-se em 4 pisos; apresenta paredes exteriores e interiores de alvenaria de granito, paredes interiores em tabique e pavimentos, escadas e cobertura em madeira. Trata-se de um edifício com 8 m de fachada e 21 m de profundidade, de maior nobreza do que o edifício da rua da Torrinha devido á sua envergadura e pormenores interiores. Nos pisos 1 e 2 encontram-se os pavimentos estudados neste edifício e descrito no subcapítulo seguinte.

Neste edifício foram realizados ensaios não destrutivos, à semelhança do edifício anterior, com o objetivo de avaliar o estado de conservação dos elementos estruturais de madeira. Segundo a memória descritiva do projeto de estabilidade deste edifício realizado pelo NCREP, os danos verificados nos pavimentos deste foram um ligeiro ataque de insetos xilófagos (caruncho) no soalho e algum destaque dos estuques em zonas localizadas do teto.

A figura 3.8 apresenta as plantas estruturais do piso 1 e piso 2, assinalando as zonas onde foram realizados ensaios dinâmicos, CompB-1 e CompB-2, respetivamente.



Figura 3.8 – Plantas estruturais do piso 1 e piso 2 [17]

3.3.2 SISTEMA ESTRUTURAL

A estrutura resistente dos pavimentos do piso 1 e piso 2 é de madeira de castanho, com vigas de secção média variável de 18x18 cm² e espaçamento médio de 70 cm no piso 1 e 65 cm no piso 2. As vigas estão apoiadas entre as empenas e a parede intermédia longitudinal de alvenaria de granito e possuem tarugos a meio vão. Foram ensaiadas 3 vigas consecutivas dos piso 1 e 2 na zona correspondente ao vão menor (2,80 m). As vigas do piso 1 estão apoiadas sob um socalco na parede exterior, num comprimento de 18 cm (figura 3.9), e encastradas na parede interior, suportando o teto estucado com elementos decorativos do piso inferior.



Figura 3.9 – Fotografias do pormenor dos apoios das vigas na parede exterior

As vigas do piso 2 estão encastradas nas paredes interior e exterior e não suportam o teto do piso inferior que tinha sido retirado. Neste pavimento foram efetuados ensaios dinâmicos com e sem tarugos no pavimento. Tanto no piso 1 como no piso 2, não existia soalho sobre as vigas analisadas, figura 3.10.



Figura 3.10 – Fotografia do pavimento do piso 1 (à esquerda) e do piso 2 (à direita)

3.3.3. MEDIÇÕES

O levantamento da geometria do pavimento de ambos os pisos, em particular das vigas, seguiu um procedimento idêntico ao usado no caso de estudo da rua da Torrinha, mas utilizando medições ao longo de 7 eixos de referência perpendiculares às vigas (ver Figura 3.11). Os tarugos presentes têm secção retangular com 5 cm de base por 10 cm de altura.

As vigas, com um vão de 2,87 m, foram designadas por V_{ij} , com “i” a assinalar o piso em estudo e “j” o número da viga no pavimento, sendo a V11 a primeira viga medida no primeiro piso.

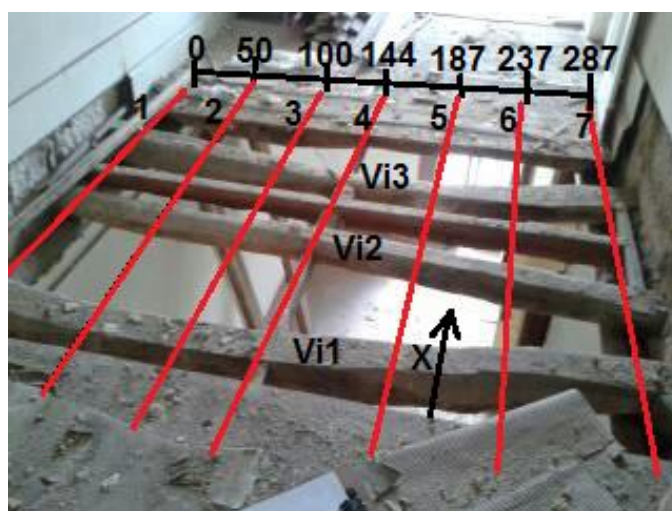


Figura 3.11 – Figura esquemática do pavimento em estudo e dos eixos de referência

Nas tabelas 3.2 e 3.3 encontram-se os valores para o afastamento até ao eixo a partir do corte feito no soalho do lado da fachada principal, ”X”, e a forma e dimensão da secção de cada viga, “A”, segundo os diferentes alinhamentos.

Tabela 3.2 – Secções “A” e distâncias ao eixo “X” em cm para cada alinhamento do piso 1

		1	2	3	4	5	6	7
V11	A	∅20	∅16	∅17	∅19	∅19	∅19	∅20
	X	33	30	29	35	35	37	40
V12	A	∅15	∅15	∅15	∅15	∅15	∅16	∅17
	X	99	98	98	98	96	94	94
V13	A	19x15	20x15	21x15	21x15	20x15	20x15	19x15
	X	167	162	162	165	164	160	156

Tabela 3.3 – Secções “A” e distâncias ao eixo “X” em cm para cada alinhamento do piso 2

		1	2	3	4	5	6	7
V21	A	17x18	20x18	17x16	17x16	22x17	20x17	16x17
	X	27	24	20	21	28	37	39
V22	A	∅14	∅14	∅14	∅15	∅15	∅15	∅15
	X	110	106	99	98	90	87	80
V23	A	∅19	∅19	∅19	∅17	∅17	∅19	∅18
	X	170	165	158	153	151	152	161

3.3.4. ENSAIOS DINÂMICOS

As vigas do piso 1, V1j, foram ensaiadas a meio vão, coincidente com a zona dos tarugos, e a um quarto do vão. No piso 2 foram realizados os mesmos ensaios, a meio e a um quarto do vão, com e sem tarugos. Foram por isso realizados 6 ensaios no piso 1 e 12 no piso 2, um total de 18 ensaios neste pavimento, figura 3.12.

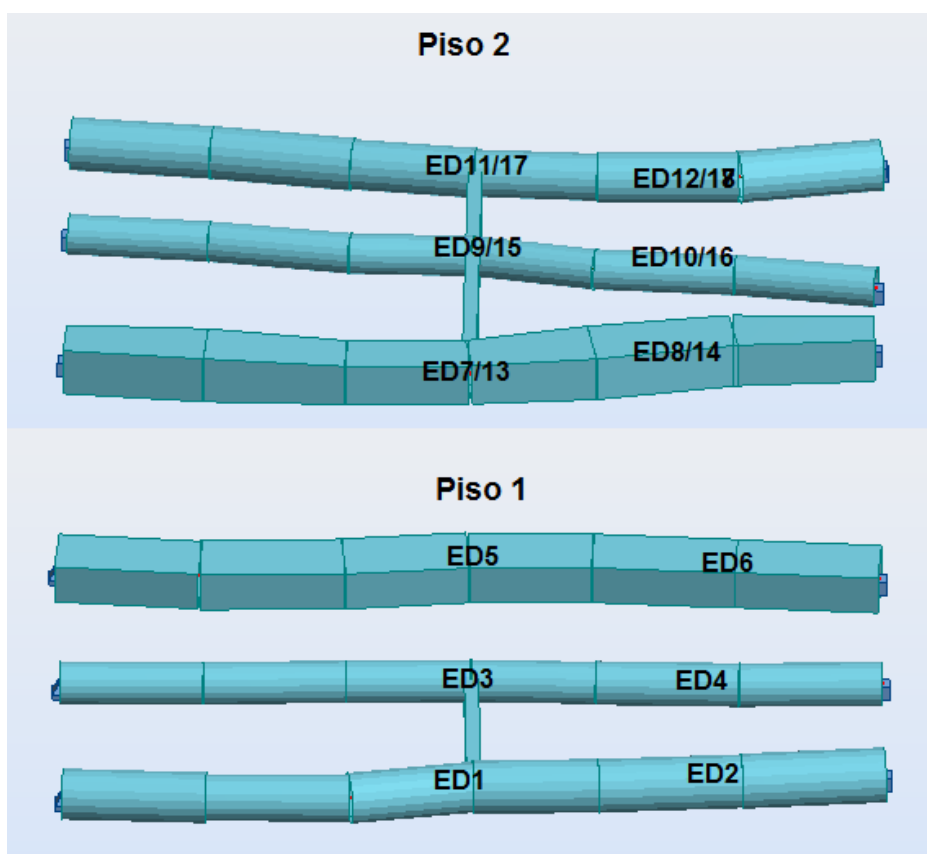


Figura 3.12 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas.

3.4. RUA MONTE DOS JUDEUS [18]

3.4.1 DESCRIÇÃO GERAL

Na Rua Monte dos Judeus encontra-se o último edifício alvo de estudo detalhado. Com 5 m de fachada e 18 m de profundidade, este edifício de 4 pisos apresentava um estado de conservação precário, já que apresentava apenas as paredes de alvenaria do contorno do edifício. A “Memória Descritiva e Justificativa” elaborada pelo NCREP [18] previa a reabilitação do edifício existente dotando-o das condições de segurança e utilização necessárias ao seu bom funcionamento como edifício de habitação, preservando e valorizando as qualidades arquitetônicas originais ainda existentes. Assim, o projeto previa a implementação de novas estruturas de pavimento em todos os pisos e a criação de um novo piso em estrutura de madeira. A estrutura do pavimento em estudo encontra-se descrita no subcapítulo seguinte e representada na figura 3.13.

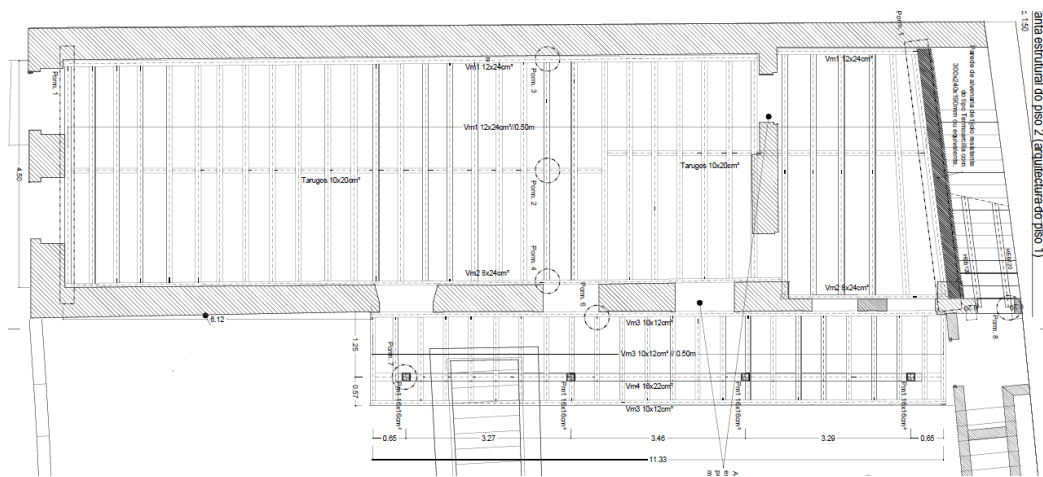


Figura 3.13 – Planta do edifício em estudo [18]

3.4.2. SISTEMA ESTRUTURAL

A intervenção realizada no piso 2, que será o alvo deste estudo, inclui a implementação de um novo pavimento composto por vigas de madeira de classe resistente GL24h com tratamento prévio em autoclave de duplo vácuo (incolor) contra agentes bióticos. A classe GL24h é homogênea e composta por lamelas de classe C24.

O pavimento é constituído por vigas perimetrais de secção 8x24 cm² que estão ligadas às paredes de alvenaria por buchas químicas M16 8.8 com 0.5 m de espaçamento. Estas vigas perimetrais recebem as vigas principais de secção 12x24 cm² através de suportes ALUmini 185 com furos (aparafusagem total e embebidos na madeira, (figura 3.14) da Rothoblaas, ligados com parafusos HBS e pinos autoperfurantes. A ligação dos tarugos às vigas principais às vigas perimetrais é do mesmo tipo da ligação definida anteriormente.

Entre a viga perimetral e a parede de alvenaria existe uma regularização com argamassa na zona de fixação das buchas químicas.



Figura 3.14 – Fotografia do pormenor da ligação entre vigas

3.4.3. MEDIÇÕES

Todos os elementos do pavimento têm a mesma secção transversal. Vigas e tarugos têm 12 cm de base por 24 cm de altura, vão de 4,26 m e espaçamento entre eixos de 54 cm. As vigas perimetrais têm 8 cm de base e 24 cm de altura.

3.4.4. Ensaios Dinâmicos

No pavimento do piso 2 foram ensaiadas 3 vigas correspondentes á terceira, quarta e quinta viga numeradas a partir da fachada posterior, figura 3.16. As vigas foram ensaiadas na zona dos tarugos, que corresponde ao meio vão das vigas e a um quarto do vão. Foram, por isso, efetuados 6 ensaios dinâmicos neste pavimento.

É importante referir que, como está ilustrado na figura 3.15, no dia em que foram realizados os ensaios dinâmicos existia uma serie de cargas (pedras e material de obra) que, embora afastadas das vigas ensaiadas, poderiam influenciar o comportamento dinâmico do pavimento por influência da transferência de carga através dos tarugos.



Figura 3.15 – Fotografia do pavimento em estudo

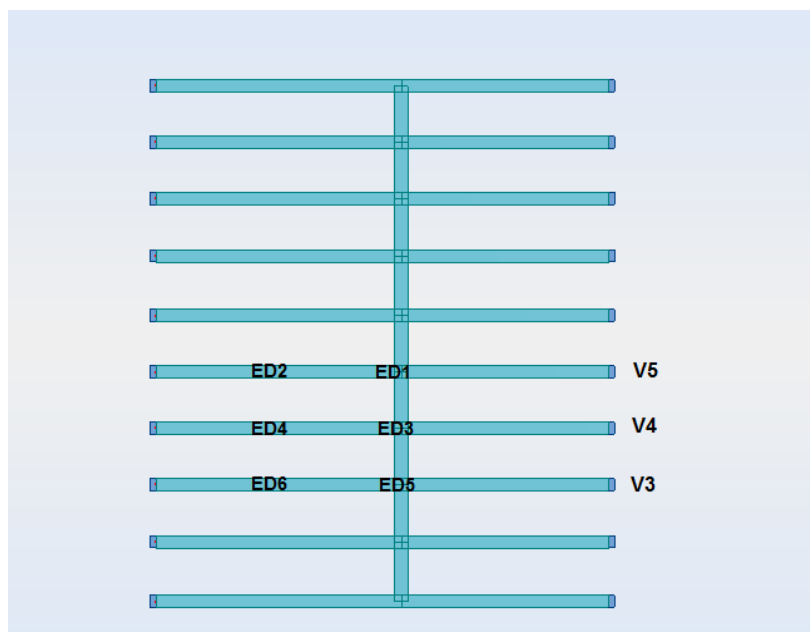


Figura 3.16 – Identificação dos ensaios dinâmicos nas vigas

4.

ENSAIOS DINÂMICOS – RESULTADOS

4.1. PROCESSAMENTO DO SINAL

A informação registada pelo sismógrafo foi analisada com o auxílio do programa *GeoDas*. Através deste programa foi possível transformar os diagramas de variação das acelerações no tempo registadas em simultâneo nas 3 direções durante um intervalo de aquisição de cerca de 4 a 5 minutos, numa escala de frequências. Este procedimento passa primeiro por desprezar as frequências abaixo dos 3 Hz usando a opção *Highpass Filter* (filtro passa alto) na opção *Analyse*. Em seguida, é utilizada a opção *Baseline Correction* para anular o valor residual médio dos registos temporais e, por fim, utiliza-se a opção *Power Spectra* para se obter as frequências, aplicando previamente a janela de *Hanning* ao registo temporal das acelerações.

As figuras 4.1 e 4.2 apresentam o aspeto da informação temporal registada pelo sismógrafo e o aspeto da informação depois de transformadas as acelerações em registos de frequências através do programa *GeoDas*. As acelerações e frequências registadas segundo a direção horizontal “x” têm cor azul, a direção horizontal “y” a verde e a direção vertical “z” a roxo. Considerou-se apenas a direção “z”.

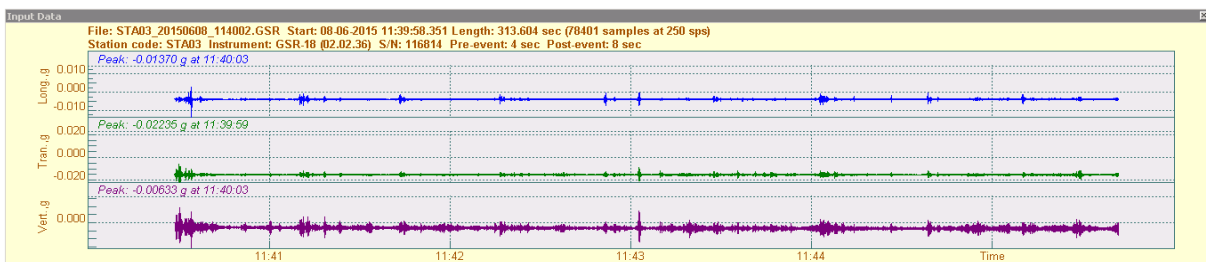


Figura 4.1 – Registo temporal das acelerações nas 3 direções obtido diretamente do sismógrafo (horizontais: Tran e Long; vertical: Vert)

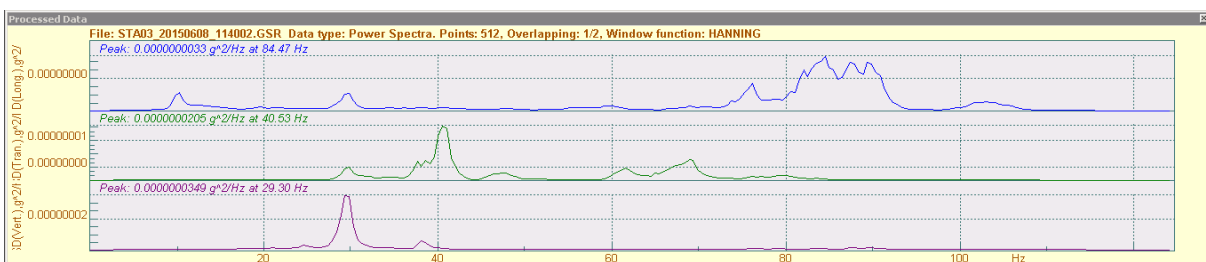


Figura 4.2 – Registo de frequências depois de tratada a informação da figura 4.1 através do programa *GeoDas* com um pico de frequência de 29.3 Hz na direcção de vibração vertical (diagrama inferior)

Este processo foi realizado para todos os ensaios efetuados com o sismógrafo. As tabelas seguintes apresentam os valores das “i” primeiras frequências de vibração vertical (fi) correspondentes aos picos obtidos nos diferentes ensaios realizados.

Tabela 4.1 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua da Torrinha

Viga	½ vão	¼ vão	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
VN1	X		9.3	12.7	17.6
		X	9.3	12.7	17.6
V2	X		9.3	12.7	17.6
		X	9.3	12.7	17.6
VN2	X		9.3	12.7	17.6
		X	9.3	12.7	17.6
V4	X		9.3	17.6	
		X	9.3	17.6	
V5	X		9.3	12.7	
		X	9.3	12.7	
VN3	X		9.3	12.7	17.6
		X	9.3	12.7	17.6

Tabela 4.2 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua do Rosário – Piso 1

Viga	½ vão	¼ vão	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f3 (Hz)
V11	X		21.0	23.4	25.9
		X	21.0	23.4	25.4
V12	X		21.0	24.9	26.9
		X	21.0	24.9	
V13	X		21.0	25.4	
		X	21.0	25.4	27.8

Tabela 4.3 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua do Rosário – Piso 2

Viga	Com tarugos				Sem tarugos	
	1/2 vão	1/4 vão	f1 (Hz)	f2 (Hz)	f1 (Hz)	f2 (Hz)
V21	X		34.7		32.2	38.6
		X	34.7		32.2	38.6
V22	X		28.9	36.6	36.6	
		X	28.9	37.6	37.1	
V23	X		27.3		24.1	
		X	29.3		23.9	

Tabela 4.4 – Valores de frequências obtidos no edifício da Rua Monte dos Judeus

Viga	1/2 vão	1/4 vão	f1 (Hz)	f2 (Hz)
V3	X		24.9	
		X	24.9	
V4	X		24.9	31.25
		X	24.9	31.25
V5	X		24.4	
		X	24.4	

O pavimento do edifício na Rua da Torrinha foi ensaiado antes de qualquer intervenção, tendo sido registados os valores das frequências dos pavimentos ainda com o soalho. Esses primeiros ensaios indicaram que a frequência própria de vibração do pavimento nas condições originais era de 15,1 Hz.

4.2. MODELOS NUMÉRICOS

A simulação numérica da estrutura dos pavimentos dos diferentes casos de estudo foi feita recorrendo ao programa de cálculo automático de análise estrutural *Autodesk Robot Structural Analysis*. Estas simulações permitem, por comparação com os resultados experimentais, estimar a influência dos tetos de gesso, do soalho, dos tarugos e das ligações à parede no comportamento dos pavimentos estudados.

Os apoios foram calibrados através da redução do grau de encastramento de rotação das vigas nos apoios extremos.

4.2.1. RUA DA TORRINHA

Foram construídos dois modelos para o pavimento em estudo, CompA-1. O primeiro possui as condições originais do pavimento, ou seja as vigas originais com tarugos, soalho, teto fasquiado de gesso e a parede de tabique transversal ao pavimento no piso inferior. No segundo modelo foram adicionadas três vigas retangulares, o soalho foi retirado, o teto fasquiado de gesso manteve-se e a parede de tabique foi removida.

No primeiro modelo, para as vigas e os tarugos de madeira foi usado um material com um módulo de elasticidade de 11 GPa e densidade de 5,20 KN/m³, valores correspondentes à classe resistente D30. As ligações das vigas originais às paredes de alvenaria foram consideradas como sendo apoios triplos, bloqueando apenas os deslocamentos de translação nas 3 direções. A parede de tabique do piso inferior foi considerada como simulando um apoio simples vertical, e a presença do teto de gesso e do soalho foi simulada através de uma casca homogeneizada nas propriedades estimadas da madeira do soalho. De acordo com o Relatório de Inspeção e Diagnóstico Estrutural (RIDE) elaborado pelo NCREP, foi considerado para o soalho uma classe resistente C18 (densidade de 3.14 KN/m³ e módulo de elasticidade de 9 GPa) e uma espessura de 2.5 cm. O teto de gesso foi considerado com 2 cm de espessura, módulo de elasticidade de 1 GPa e uma densidade de 27 KN/m³ [13]. Homogeneizando estes dois materiais, tendo em conta os módulos de flexão, as áreas e as densidades de cada material:

$$\rho(\text{casca}) = \frac{\rho m \cdot A_m + \rho t \cdot A_t}{A_m} = \frac{3.14 * 0.025 * 1 + 27 * 0.02 * 1}{0.025 * 1} = 24.74 \text{ KN/m}^3$$

$$E(\text{casca}) = \frac{E_m \cdot I_m + E_t \cdot I_t}{I_m} = \frac{9 * 0.025^3 + 1 * 0.02^3}{0.025^3} = 9.5 \text{ GPa}$$

Onde: E = Modulo de elasticidade (m da madeira e t do gesso), GPa;

ρ = Densidade (m da madeira e t do gesso), KN/m³;

A = Área (m da madeira e t do gesso), m²;

I = Momento de inércia da secção transversal (m da madeira e t do gesso), m⁴.

Obteve-se uma casca de 2.5 cm de espessura com uma densidade de 24.74 KN/m³ e um módulo de elasticidade de 9.5 GPa,

As secções circulares foram consideradas quadradas por simplicidade de representação da variação da secção entre alinhamentos na forma circular. Por exemplo, a viga V1 de secção circular variável começa por ter um diâmetro de 18 cm variando ao longo do seu eixo até 15 cm; a $D = 18$ cm corresponde uma inercia, $\frac{1}{4}\pi\left(\frac{D}{2}\right)^4$, que igualada á inercia do quadrado, $\frac{b^4}{12}$, resulta numa dimensão $b = 15.7$ cm. Este processo foi efetuado para todas as secções das vigas da estrutura. A parede de tabique inferior foi considerada no modelo através de apoios simples à distância de 3 m da parede mais afastada, e os tarugos foram considerados encastrados nas vigas, mas apenas com 40% da rigidez à rotação no encastramento, figura 4.3. Estes últimos valores resultam do ajuste que foi necessário realizar para que as frequências numéricas se aproximassem das experimentais

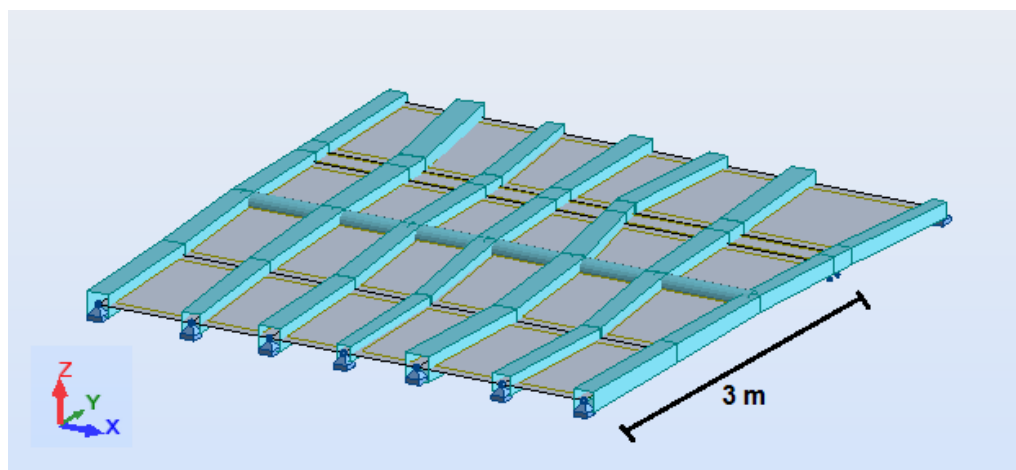


Figura 4.3 – Aspeto do modelo do pavimento antes de qualquer intervenção (fase 1)

No segundo modelo, figura 4.4, foram inseridas as vigas novas com o mesmo módulo de elasticidade e densidade das antigas, de secção constante, quadrada ($12 \times 17 \text{ cm}^2$), com um grau de encastramento de 40% nas paredes de alvenaria. Os novos tarugos, com a mesma secção das novas vigas, foram igualmente considerados com um grau de encastramento de 40% nas vigas, e uma casca com as propriedades apenas do gesso foi inserida para simular o teto do piso inferior. Os apoios simples verticais que simulavam a parede de tabique foram removidos. Mais uma vez, os graus de encastramento resultam do ajuste que foi necessário realizar para que as frequências numéricas se aproximassem das experimentais.

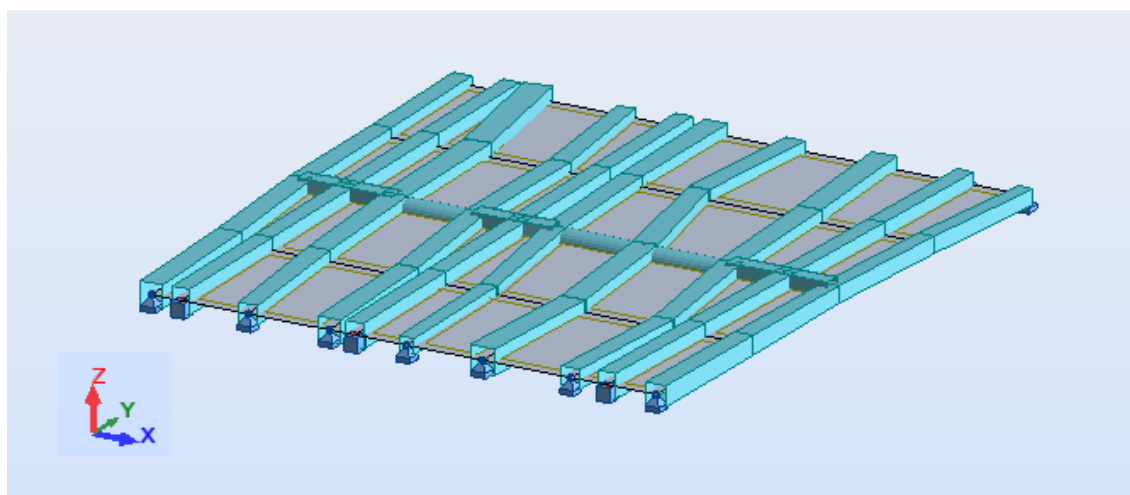


Figura 4.4 – Aspeto do modelo após a colocação das vigas de reforço (fase 2)

A tabela 4.5 apresenta as diferentes propriedades consideradas para cada um dos dois modelos.

Tabela 4.5 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo

Modelos	Elementos	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Condições de apoio	Grau de encastramento das rotações (%)	Densidade (KN/m ³)
Modelo da fase 1	Vigas	11	Triplo	40	5.2
	Tarugos		Encastrados nas vigas		
	Soalho e teto	9.5			24.7
Modelo da fase 2	Vigas originais (V)	11	Triplo		5.2
	Vigas novas (VN)	9	Encastradas	40	3.1
	Tarugos novos		Encastrados nas vigas		
	Tarugos originais	11		40	5.2
Teto	1			27	

No primeiro modelo obteve-se uma frequência natural do pavimento de 17.1 Hz, valor próximo da frequência medida com o sismógrafo, 15.1 Hz.

As frequências calculadas pelo programa para o segundo modelo foram de 10.4 Hz, 12.7 Hz e 18.7 Hz, sendo também próximas dos valores experimentais. No capítulo seguinte será feita uma comparação mais detalhada entre os valores experimentais e os valores do modelo tendo em conta os modos de vibração obtidos pelo programa.

4.2.2 RUA DO ROSÁRIO

Na simulação da estrutura do piso 1 e do piso 2 considerou-se para cada troço de viga uma secção transversal igual à média dos valores extremos, dado que a distância entre alinhamentos, cerca de 50 cm, é bastante reduzida.

O piso 1 contém as 3 vigas que foram ensaiadas. As vigas encontram-se ligadas por tarugos de secção retangular e suportam o teto de gesso do piso inferior. Os apoios das vigas nas paredes de empena bloqueiam apenas os deslocamentos nas 3 direções por estarem apoiadas sobre um socalco; já na parede interior, as vigas encontram-se parcialmente encastradas.

A figura 4.5 apresenta o aspeto do modelo do troço do pavimento do piso 1 ensaiado.

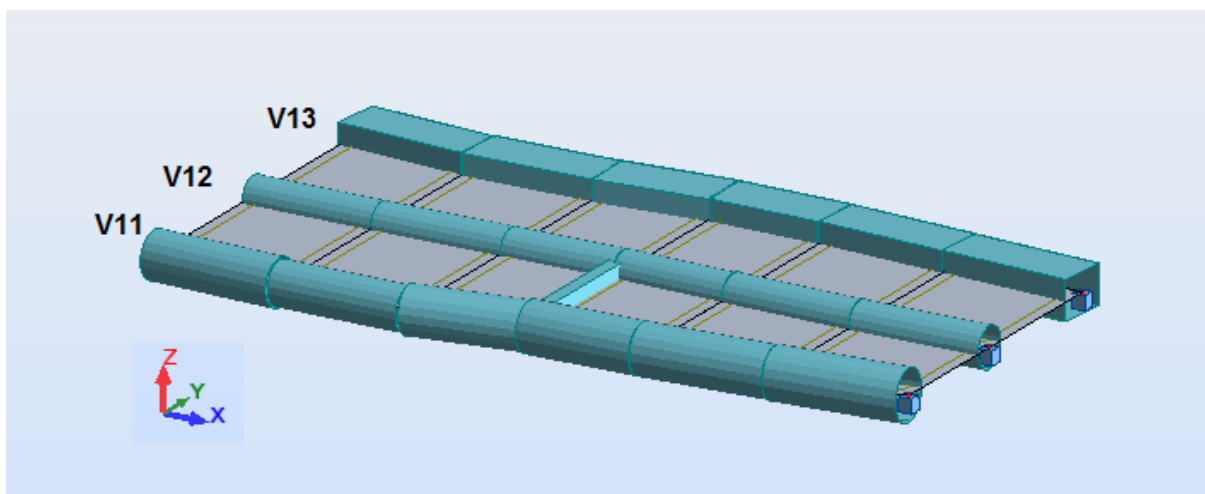


Figura 4.5 – Aspeto do modelo do pavimento do piso 1

No piso 2, foram ensaiadas 3 vigas, com e sem tarugos. O teto e o soalho tinham sido removidos. As vigas encontravam-se encastradas nas duas paredes de alvenaria e foram ensaiadas ainda com os tarugos que foram posteriormente retirados para a realização de novos ensaios para comparar o seu efeito na estrutura e para tentar estimar o grau de encastramento na ligação das vigas às empenas. A figura 4.6 apresenta o aspeto do modelo do pavimento estudado do piso 2.

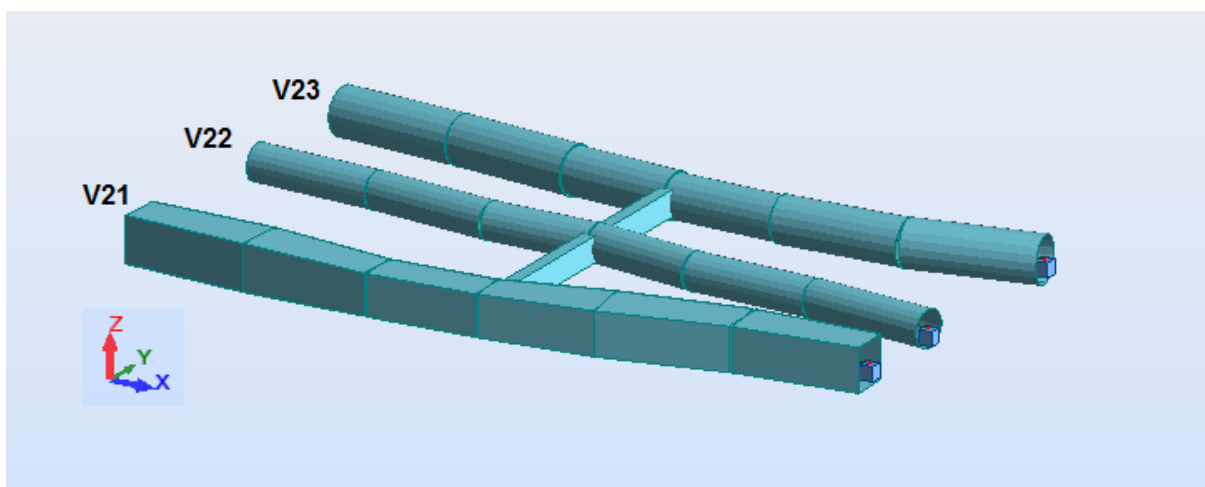


Figura 4.6 – Aspeto do modelo do pavimento do piso 2

Foram considerados os mesmos valores para as propriedades mecânicas dos materiais e que se apresentam apresentadas na tabela 4.6. Note-se que os valores dos graus de encastramento resultam do ajuste que foi necessário realizar para que as frequências numéricas se aproximassem das experimentais

Tabela 4.6 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo

Modelos	Elementos	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Condições de apoio	Grau de encastramento das rotações (%)	Densidade (KN/m ³)
Modelo do piso 1	Viga 11	11	Triplo + Encastramento	80 (no encastramento)	5.2
	Viga 12				
	Viga 13				
	Tarugos		Encastrados nas vigas	80	
	Teto	1			27
Modelo do Piso 2	Viga 21	11	Encastradas	8	5.2
	Viga 22			11	
	Viga 32			3	
	Tarugos		Encastrados nas vigas	80	

A tabela 4.7 apresenta os valores das frequências obtidas para os modelos numéricos considerados neste caso de estudo.

Tabela 4.7 – Valores de frequência calculados com o modelo numérico

	f (Hz)	f (HZ)	f (Hz)
Modelo do piso 1	20.6	24.3	28.4
Modelo do piso 2	Com tarugos	36.3	37.3
	Sem tarugos	24.7	32.4

4.2.3. RUA MONTE DOS JUDEUS

As vigas e os tarugos, de secção regular, deste pavimento encontram-se encastradas em vigas perimetrais, com a mesma dimensão, ligadas às paredes. Na tabela 4.8 apresentam-se as propriedades consideradas para este modelo e que correspondem às do material da classe resistente GL24h.

Tabela 4.8 – Propriedades consideradas no modelo do pavimento em estudo

Modelos	Elementos	Módulo de Elasticidade E (GPa)	Condições de apoio	Grau de encastramento das rotações (%)	Densidade (KN/m ³)
Rua Monte dos Judeus	Vigas	11.6	Encastradas	80	3.73
	Tarugos		Encastrados nas vigas	80	

Destacam-se as boas condições de apoio das vigas nas vigas perimetrais, assim como dos tarugos nas vigas. Na figura 4.7 apresenta o aspeto do modelo para este pavimento.

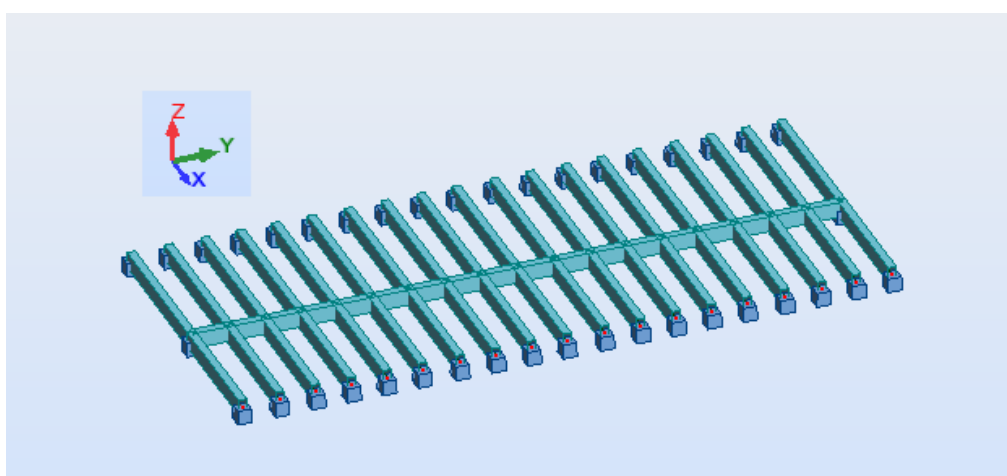


Figura 4.7 – Aspeto do modelo do pavimento em estudo

A primeira frequência de vibração vertical do modelo, f1, calculada pelo programa foi de 53.7 Hz.

4.3. VALORES TEÓRICOS

Uma viga simplesmente apoiada, isolada, possui uma frequência de vibração que depende do módulo de elasticidade do material, do comprimento do vão, da forma da secção e do seu peso específico.

A frequência natural de uma viga é assim determinada a partir da sua massa específica e da sua rigidez. Quando a rigidez de um elemento, ou de uma estrutura aumenta, a sua frequência natural aumenta; quando aumentamos a massa da estrutura, a frequência natural diminui. É expectável, por isso, que a presença do soalho aumente a rigidez da estrutura, e com isso aumente a frequência natural do pavimento, enquanto a presença dos tetos de gesso nos pavimentos, com um módulo de elasticidade bastante reduzido e uma massa elevado, provoca a diminuição da frequência de vibração dos pavimentos.

A frequência de vibração de uma viga simplesmente apoiada é determinada por:

$$f = \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2 \sqrt{\frac{EI}{m}} \cdot \frac{1}{2\pi} \tag{4.1}$$

Onde: f = frequência própria de vibração (Hz);

L = comprimento da viga (m);

E = módulo de elasticidade (KPa);

I = momento de inércia da área da seção transversal (m^4);

m = massa específica por unidade de comprimento (Ton/m).

O parâmetro “n” define a ordem do modo de vibração da viga, ou seja para $n = 1$ a expressão representa a frequência relativa ao primeiro modo de vibração. Na figura 4.8 estão representados os quatro primeiros modos de vibração de uma viga nessas condições.

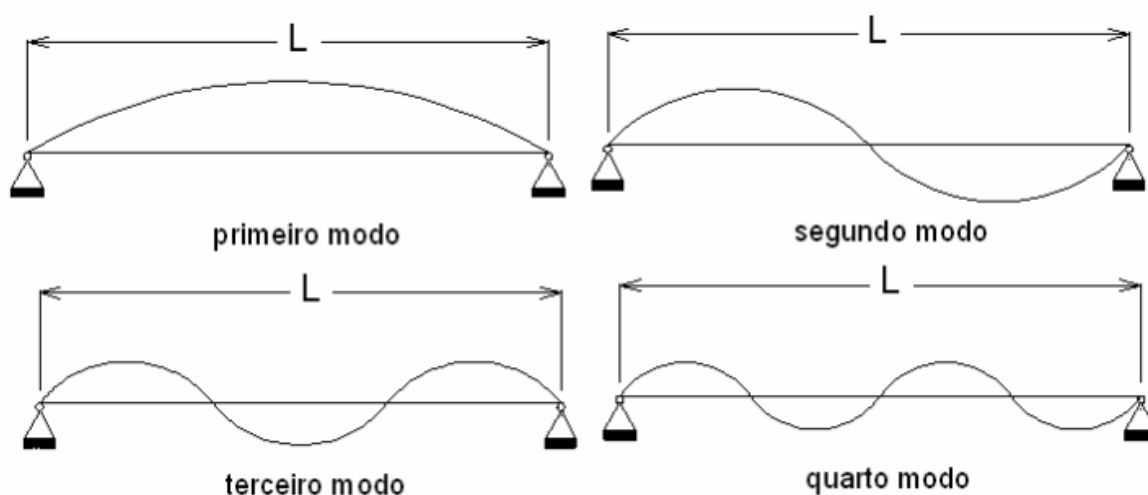


Figura 4.8 – Primeiros quatro modos de vibração de uma viga simplesmente apoiada [19]

Note-se que o sismógrafo deteta mais do que uma frequência para o mesmo ensaio. Por análise da figura 4.8 conclui-se, por exemplo, que quando é posicionado a meio vão, deteta apenas movimentos causados por modos de ordem ímpar ($i = 1, 3, 5 \dots$). Isto só é válido numa situação ideal de simetria pura e, por isso, quando o sismógrafo está posicionado a meio vão, não é anormal que registre frequências relativas ao segundo modo de vibração, embora com intensidades expectáveis bastante menores.

5.

ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste capítulo apresenta-se a análise dos resultados apresentados no capítulo 4. Esta análise tem em conta a geometria de cada pavimento, os elementos que os constituem e as condições de apoio das vigas. O sismógrafo foi posicionado, na maior parte dos casos, a meio e a um quarto do vão dos pavimentos/vigas.

É analisada a influência do tipo de encastramento das vigas na parede expectável, assim como da presença dos tetos (estrutura fasquiada com gesso) e dos tarugos no comportamento dos pavimentos. A variação da frequência de vibração resultante da variação do módulo de elasticidade, da rigidez parcial dos apoios e da forma do eixo longitudinal de uma viga isolada também é alvo deste estudo.

5.2. ESTUDOS PARAMÉTRICOS

A maior dificuldade encontrada ao longo deste trabalho passou pela identificação das condições de apoio das vigas nas paredes. Para tentar perceber melhor as condições presentes nos pavimentos antigos de madeira foi realizada uma simulação numérica de uma viga de características mecânicas constantes, variando o grau de encastramento dos apoios.

Para uma viga de madeira de classe resistente D30, módulo de elasticidade igual a 11 GPa e densidade igual a 5.2 KN/m³, de secção quadrada com 10 cm de base por 20 cm de altura, foram registadas as frequências naturais em função do grau de encastramento dos apoios usando o programa de cálculo automático de análise estrutural referido no capítulo 4.

A mesma viga foi simulada tendo em conta duas condições de apoio. Inicialmente, considerou-se que a viga seria parcialmente encastrada nas duas extremidades como acontece na maior parte dos casos e, numa segunda fase, considerou-se que a viga estaria parcialmente encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada na outra, como é exemplo o pavimento do Piso 1 da Rua da Torrinha que numa das extremidades penetra na parede de alvenaria e na outra pousa sobre um socalco. Para estas condições, e variando o grau de encastramento das vigas, registaram-se valores de frequência apresentados na tabela 5.1. Entre parêntesis apresenta-se a variação dos valores da frequência tendo por base a viga simplesmente apoiada. Quando o grau de encastramento (K_a) é 0%, o programa considera a viga simplesmente apoiada, cujo valor teórico determinado pela expressão (4.1) é 16.2 Hz. Para um grau de encastramento igual a 100%, o programa considera a viga perfeitamente encastrada.

Tabela 5.1 – Valores de frequência para diferentes graus de encastramento e diferentes condições de apoio

Ka (%)	Viga encastrada-simples	Viga duplamente encastrada
	f (Hz)	f (Hz)
0	16,2	16,2
10	17,4 (7,4 %)	18,4 (13,5 %)
20	18,5 (14,2 %)	20,5 (26,5 %)
30	19,5 (20,4 %)	22,5 (38,8 %)
40	20,4 (25,9 %)	24,4 (50,6 %)
50	21,2 (30,8 %)	26,3 (62,3 %)
60	22,0 (35,8 %)	28,0 (72,8 %)
70	22,7 (40,1 %)	29,8 (84,0 %)
80	23,4 (44,4 %)	31,6 (95,1 %)
90	24,1 (48,8 %)	33,3 (105,6 %)
100	24,7 (52,5 %)	35,0 (116,0 %)

Verifica-se um ligeiro aumento da frequência própria de vibração quando a viga está encastrada numa das extremidades e simplesmente apoiada na outra (52,5 %) em relação à situação da viga simplesmente apoiada, enquanto o aumento registado para a viga quando está encastrada em ambas as extremidades é superior ao dobro (116 %). Logo, a uma viga encastrada nas duas extremidades está associada uma maior variação possível de frequência quando se desconhece o seu grau de encastramento.

A influência do módulo de elasticidade na frequência natural da viga também foi objeto de estudo. Para isso, foram consideradas varias classes resistentes de madeira resinosa, para a mesma viga de dimensões 10x20 cm² e 5 m de comprimento, e foi estudada a variação da frequência própria. A viga encontra-se parcialmente encastrada nas extremidades (80% de um encastramento perfeito). Na tabela 5.2 estão presentes as classes de resistência consideradas, o seu módulo de elasticidade e densidade e as frequências próprias calculadas pelo programa a partir das propriedades consideradas. Entre parêntesis apresenta-se a variação dos valores da frequência tendo por base a classe de resistência C16. Nesta análise foi considerado 80% de encastramento nas extremidades.

Tabela 5.2 – Frequências naturais de uma viga em função da sua classe de resistência

Classe de resistência	E (GPa)	ρ (KN/m ³)	f (Hz)
C16	8,0	3,1	41,6
C20	9,5 (18,8%)	3,3	42,9 (3,1%)
C24	11,0 (37,5%)	3,5	45,9 (10,3%)
C30	12,0 (50,0%)	3,8	46,0 (10,6%)
C40	14,0 (125,0%)	4,2	47,3 (13,7%)
C50	16,0 (200,0%)	4,6	48,3 (16,1%)

Pela observação da tabela 5.2, quando o módulo de elasticidade aumenta, o valor da frequência própria de vibração aumenta. No entanto, quando o módulo de elasticidade aumenta de 8 GPa para 16 GPa, ou

seja 200%, a frequência aumenta apenas de cerca de 16%, ou seja um aumento importante do módulo de elasticidade não implica um aumento significativo da frequência, em particular quando comparado com a influência das condições de apoio. Esta diferença resulta do facto do módulo de elasticidade estar associado à densidade do material: maior módulo implica maior massa.

Interessa igualmente estudar a influência da forma do eixo longitudinal dos troncos de madeira que constituem os pavimentos antigos de madeira. A eventual importância deste aspeto surgiu da análise das frequências registadas no Piso 2 da Rua do Rosário, mais precisamente, na viga V23; ao contrário do que expectável, sendo a viga de maior dimensão transversal, e por isso supostamente a mais rígida, apresentava frequência menor ou idêntica à das restantes vigas. Quando o pavimento foi ensaiado sem tarugos, a viga V23 de maior secção transversal registou uma frequência de 24 Hz, enquanto as restantes vigas ensaiadas deste pavimento, ou seja com igual vão e condições de apoio, mas menor secção transversal, registaram valores de frequência superiores, 32 Hz (viga V21) e 37 Hz (viga V22).

Depois de calibrar a rigidez dos apoios para as 3 vigas no modelo numérico, estudou-se em separado a viga V23 que apresentava um eixo bastante curvo. Foi então criada uma nova viga, com as mesmas condições de apoio e a mesma secção transversal, mas de eixo retilíneo (figura 5.1.).

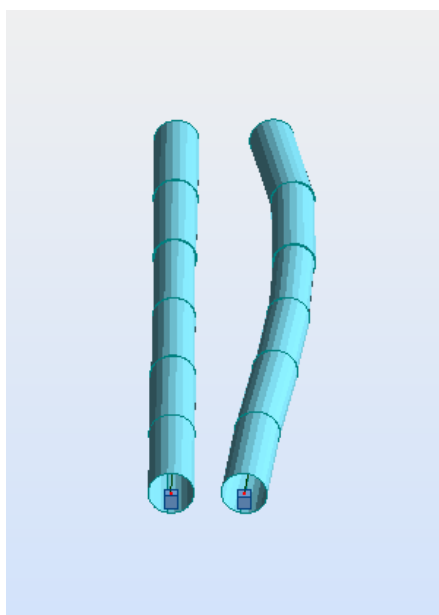



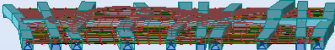

Figura 5.1 – Estudo do eixo longitudinal no programa de cálculo automático

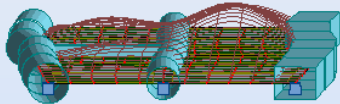
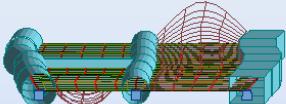
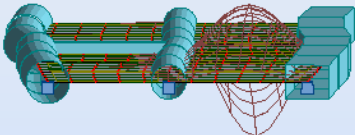
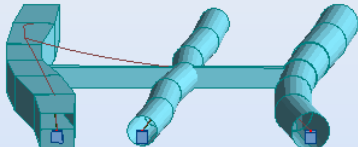
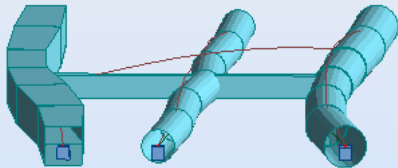
Através do programa de cálculo automático de análise estrutural, verificou-se uma diminuição bastante significativa na passagem da viga retilínea para a viga curva. A viga V23, á direita na figura 5.1, apresenta um eixo curvo e uma frequência para o primeiro modo de vibração (deslocamento perpendicular ao plano da viga) de aproximadamente 24,7 Hz; já a frequência registada pelo programa para a viga da esquerda, com eixo retilíneo e as mesmas propriedades mecânicas e geométricas, foi de 40,4 Hz (variação de 63.6%), ou seja quanto mais linear for o eixo da peça no plano perpendicular à direção do movimento, maior é a frequência correspondente ao modo de vibração. A título de curiosidade indica-se que a frequência correspondente ao segundo modo de vibração na estrutura da direita (deslocamentos horizontais – perpendiculares aos do primeiro modo) é de 76,6 Hz e na estrutura da esquerda é de 40,4 Hz, ou seja a situação inverte-se.

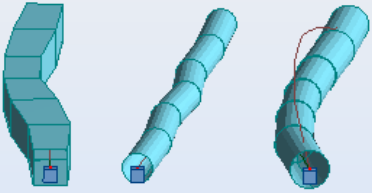
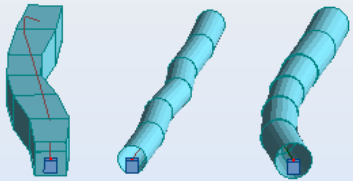
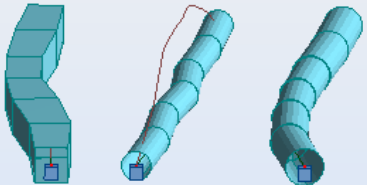
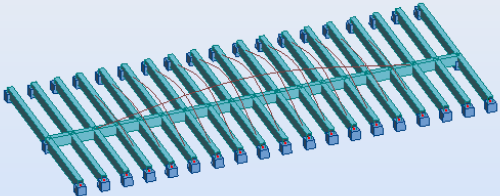
5.3. ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DINÂMICO DOS PAVIMENTOS

Na tabela seguinte encontram-se os vários modos de vibração calculados pelo programa de cálculo automático e os respectivos valores experimentais determinados através da medição com o sismógrafo.

Tabela 5.3 – Modos de vibração e valores de frequência determinados para os casos de estudo

Caso de estudo		Frequência (Hz)	
		Modelo	Experimental
Original		17.1	15.1
		10.4	9.3
Rua da Torrinha	Reforçado	12.7	12.7
		18.7	17.6

Caso de estudo		Frequência (Hz)		
		Modelo	Experimental	
Rua do Rosário	Piso 1		20.6	21.0
			24.3	23.4
			28.4	25.9
Piso 2 (com tarugos)			36.3	34.7
			37.3	36.6

Piso 2 (sem tarugos)		24.7	24.1
		32.4	32.2
		36.9	36.6
Caso de estudo		Frequência (Hz)	
		Modelo	Experimental
Rua Monte dos Judeus		53.8	24.9

Da análise da tabela 5.3, destaca-se a diminuição das frequências quando os pavimentos contam com a presença de tetos de gesso, devido ao seu baixo módulo de elasticidade e elevada massa específico. A presença deste elemento tem uma contribuição maioritariamente de massa, o que implica frequências mais baixas quando comparadas com a dos pavimentos sem tetos de gesso. O melhor exemplo desta situação é o caso de estudo da Rua do Rosário onde, no piso 1, o pavimento com teto tem uma

frequência própria de aproximadamente 21 Hz, enquanto no piso 2, o pavimento sem teto apresenta uma frequência de 36 Hz.

No piso 2 da Rua do Rosário foram ensaiadas as vigas com e sem tarugos para perceber a sua influência. Observou-se que, independentemente da frequência própria das vigas, os tarugos são fundamentais para que o pavimento funcione de forma conjunta, ou seja responda com frequências idênticas, independentemente da viga onde se efetua a leitura das vibrações, ou seja homogeneizam o comportamento dos pavimentos. A Rua Monte dos Judeus também é exemplo disso, apesar da discrepância entre os valores das frequências do modelo e os valores medidos experimentalmente. Foram ensaiadas 3 vigas consecutivas neste pavimento registando-se sempre a mesma frequência natural com valor aproximado de 25 Hz, mas bastante inferior à frequência expetável para uma viga com o material, secção transversal e ligação nas extremidades da viga ensaiada e que deveria andar próxima dos 30 Hz. A explicação para a discrepância entre os valores da frequência experimental e do modelo parece ser a presença de objetos de elevada massa sob o pavimento, embora em vigas afastadas, nomeadamente pedras e materiais de obra. Esta hipótese foi inclusivamente verificada através do modelo numérico, realçando, de forma mais veemente, a importância dos tarugos, quando bem ligados às vigas, como acontece neste pavimento, uniformizando o comportamento do pavimento e fazendo participar todas as vigas como se de uma única estrutura contínua se tratasse.

Conhecendo o tipo de madeira presente nas vigas e a frequência experimental resultante dos ensaios efetuados, foi possível estudar as condições de apoio das estruturas. Destaca-se a boa calibração dos apoios parcialmente rígidos das vigas novas no edifício da Rua da Torrinha e das vigas parcialmente encastradas no edifício da Rua do Rosário, concluindo-se que os apoios das vigas originais (vigas antigas apoiadas nas paredes de alvenaria), em geral aproximam-se de vigas simplesmente apoiadas, ou com um reduzido grau de encastramento, e as vigas novas (vigas pré-fabricadas com um melhor pormenor nas condições de apoio) instaladas na Rua da Torrinha e Monte dos Judeus, apresentam um elevado grau de encastramento.

O estudo das frequências das vigas do piso 2 na Rua do Rosário aferiu a importância do traçado do eixo longitudinal das vigas na suas frequências próprias de vibração, pois a viga V23, sendo a viga com maior secção transversal, mas também de maior eixo curvo, apresentava uma frequência de vibração para o primeiro modo bastante inferior à das vigas vizinhas ensaiadas no mesmo pavimento.

5.4. ESTUDOS GERAIS

Os ensaios na Rua da Torrinha, Rua do Rosário e Rua Monte dos Judeus serviram de suporte principal às conclusões referidas nos pontos anteriores. No entanto, foram incluídos neste estudo os pavimentos e resultados de outros ensaios efetuados no âmbito deste trabalho e outros realizados anteriormente pelo NCREP, mais precisamente em edifícios localizados no Porto na Rua Barão de São Cosme, Rua Santa Helena, Rua dos Caldeireiros, Rua Instituto Araújo Porto, Rua das Fontainhas e na Rua da Cordoaria.

Foram registadas as frequências dos vários pavimentos/vigas dos edifícios localizados nas ruas referidas, tendo-se registado o vão de cada pavimento, a forma da secção e o espaçamento das vigas, perfazendo um total de aproximadamente 80 ensaios. Na Rua da Torrinha, Rua do Rosário, Rua Instituto Araújo Porto e na Rua do Rosário foram ensaiados os pavimentos originais que continham soalho e teto. Já na Rua de Sta. Helena foram ensaiados pavimentos com soalho, vigas e tarugos, mas sem o teto inferior. Na Rua da Torrinha e do Rosário foram ensaiados pavimentos sem o soalho, mas com os tetos de gesso fasquiados. O resultado dos ensaios para os diferentes edifícios são apresentados

na tabela 5.4. As siglas “b” e “D” correspondem à dimensão da base e do diâmetro das vigas em centímetros, respetivamente, e quando os ensaios foram realizados num pavimento com soalho esta dimensão é indicada como “PAV”. A altura das vigas retangulares e a área transversal estão representadas pelas siglas “h” e “A”, respetivamente. A partir destes registos foi traçado o gráfico 5.1.

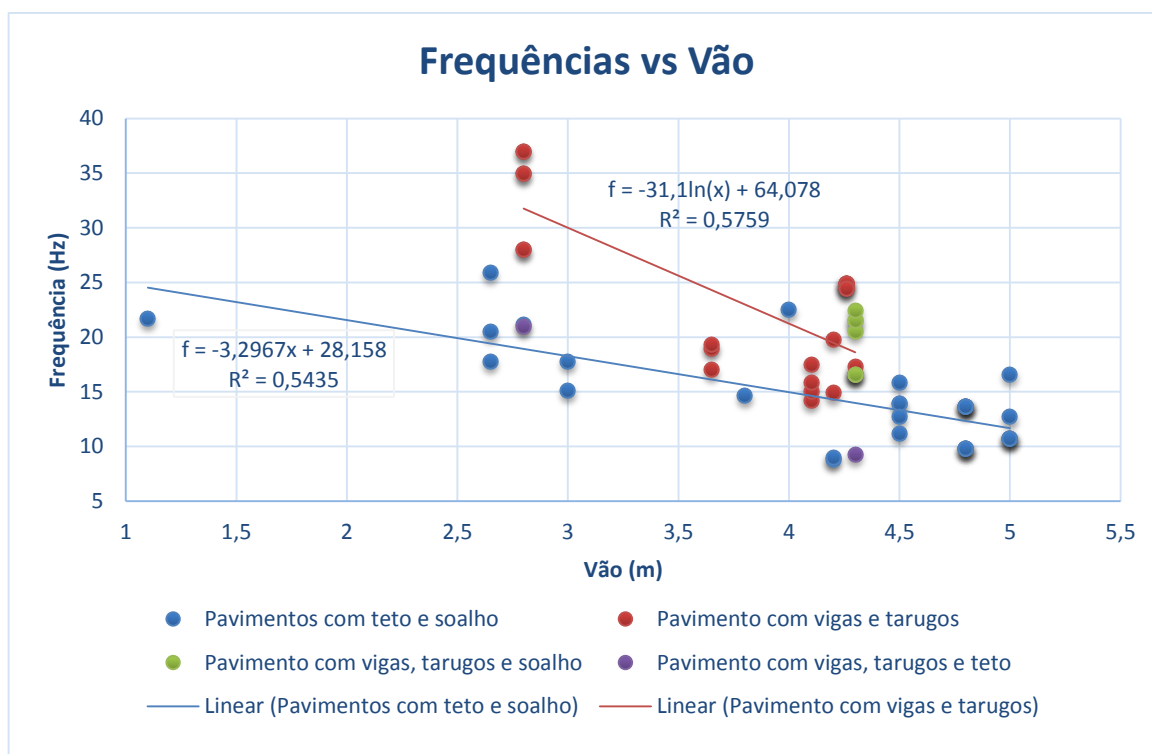
Tabela 5.4 – Resultado dos ensaios dinâmicos.

Rua	Viga	b ou D (cm)	h (cm)	A (m ²)	Vão (m)	f (Hz)	Espaçamento (m)
Barão de São Cosme	V1	19	-	0,028	3,65	19	
	V2	20	-	0,031	3,65	17	
	V3	20	-	0,031	3,65	19,3	
Rosário	ED1	PAV			4,5	13,9	0,65
	ED2	PAV			4,5	13,9	0,65
	ED3	PAV			2,65	25,9	0,65
	ED4	PAV			4,5	15,9	0,65
	ED5	PAV			4,5	12,7	0,65
	ED6	PAV			2,65	17,8	0,65
	ED7	PAV			2,65	20,5	0,65
	ED8	PAV			4,5	11,2	0,65
Sta. Helena	1º andar	PAV			4,3	16,6	0,6
	1º andar	PAV			4,3	16,6	0,6
	r/c	PAV			4,3	21,5	0,65
	r/c	PAV			4,3	20,5	0,65
	r/c	PAV			4,3	21,5	0,6
	r/c	PAV			4,3	22,5	0,6
Caldeireiros	VA3	17	20	0,034	4,3	17,3	
		17	20	0,034	4,3	16,6	
	VN4	10	16	0,016	4,2	19,8	
		10	16	0,016	4,2	14,9	
	VA5	15	15	0,023	4,1	17,5	
		15	15	0,023	4,1	14,2	
	VN6	10	16	0,016	4,1	15	
	10	16	0,016	4,1	15,9		
Torrinha	ED1	PAV			3	15,1	
	ED2	PAV			3	17,8	
	ED3	PAV			4	22,5	
	ED4	PAV			4,2	8,8	
	ED5	PAV			4,2	9	
	ED6	PAV			2,8	21,2	
	ED7	PAV			1,1	21,7	

Rua	Viga	b ou D (cm)	h (cm)	A (m ²)	Vão (m)	f (Hz)	Espaçamento (m)
Instituto Araújo Porto	ED1	PAV			4,8	13,7	
	ED2	PAV			4,8	13,7	
	ED3	PAV			4,8	13,7	
	ED4	PAV			4,8	13,7	
	ED5	PAV			4,8	13,7	
	ED6	PAV			4,8	9,8	
	ED7	PAV			4,8	9,8	
	ED8	PAV			4,8	9,8	
	ED9	PAV			4,8	9,8	
Fontainhas	ED1	17	-	0,023	5	10,7	0,5
	ED3	17	-	0,023	5	10,7	0,5
Torrinha	VN3	12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
		12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
	V5	19	-	0,028	4,3	9,3	0,5
		19	-	0,028	4,3	9,3	0,5
	V4	15	-	0,018	4,3	9,3	0,5
		15	-	0,018	4,3	9,3	0,5
	VN2	12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
		12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
	V2	19	-	0,028	4,3	9,3	0,5
		19	-	0,028	4,3	9,3	0,5
	VN1	12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
		12	17	0,020	4,3	9,3	0,5
Cordoaria	Piso 1	PAV			3,8	14,6 5	
		PAV			5	10,7 4	
	Piso 2	PAV			5	10,7 5	
	Piso 3	PAV			5	12,7	
		PAV			5	16,6	

Rua	Viga	b ou D (cm)	h (cm)	A (m ²)	Vão (m)	f (Hz)	Espaçamento (m)
Rosário	V11	19	-	0,028	2,8	21	0,7
		19	-	0,028	2,8	21	0,7
	V12	15	-	0,018	2,8	21	0,7
		15	-	0,018	2,8	21	0,7
	V13	20	15	0,030	2,8	21	0,7
		20	15	0,030	2,8	21	0,7
	V21	20	17	0,034	2,8	35	0,65
		20	17	0,034	2,8	35	0,65
	V22	15	-	0,018	2,8	37	0,65
		15	-	0,018	2,8	37	0,65
	V23	19	-	0,028	2,8	28	0,65
		19	-	0,028	2,8	28	0,65
Monte dos Judeus	V3	12	24	0,029	4,26	24,9	0,55
		12	24	0,029	4,26	24,9	0,55
	V4	12	24	0,029	4,26	24,9	0,55
		12	24	0,029	4,26	24,9	0,55
	V5	12	24	0,029	4,26	24,4	0,55
		12	24	0,029	4,26	24,4	0,55
		12	24	0,029	4,26	24,4	0,55

Gráfico 5.1 – Valores de frequência em função do vão dos pavimentos



Foi traçada uma regressão linear entre as frequências dos ensaios dos pavimentos com teto e soalho e dos ensaios dos pavimentos com apenas vigas e tarugos, em função dos vãos das vigas, obtendo-se valores de correlação R^2 de 0.54 e 0.57, respetivamente. Trata-se de valores baixos que apontam uma tendência, mas que mostram ser pouco fiável a estimativa da frequência de um pavimento em boas condições em função do seu vão, para as condições do caso de estudo. No entanto, permite concluir que as vigas dos pavimentos isoladas, ou apenas com tarugos, apresentam tendencialmente frequências mais altas do que as dos pavimentos com soalho e/ou teto.

A relação entre o vão, a secção das vigas e a frequência de vibração foi analisada tendo por base os valores apresentados na tabela 5.4. No entanto, não foi possível retirar qualquer tipo de conclusão devido à grande dispersão dos resultados refletida nos valores baixos de R^2 . Os gráficos 5.2 e 5.3 apresentam os valores de frequência em função do momento de inércia aferido através da dimensão da secção transversal das vigas, e o momento de inércia em função do vão, respetivamente.

Gráfico 5.2 – Valores de frequência de vibração em função do momento de inércia das vigas

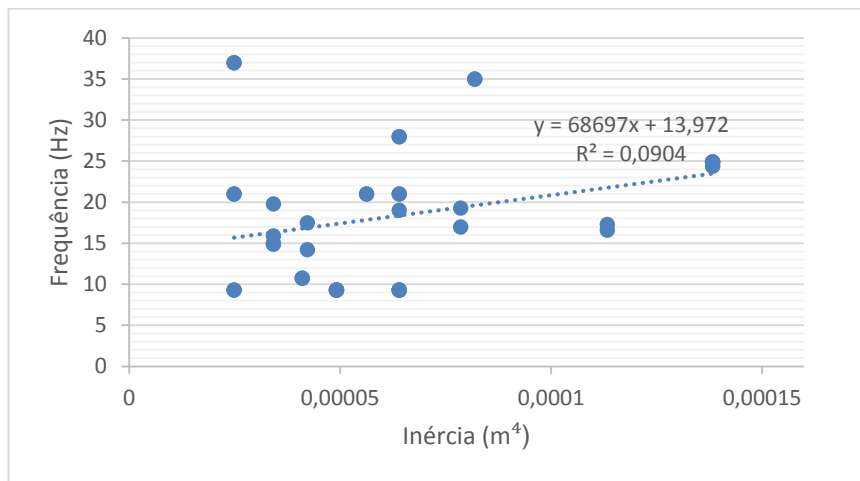
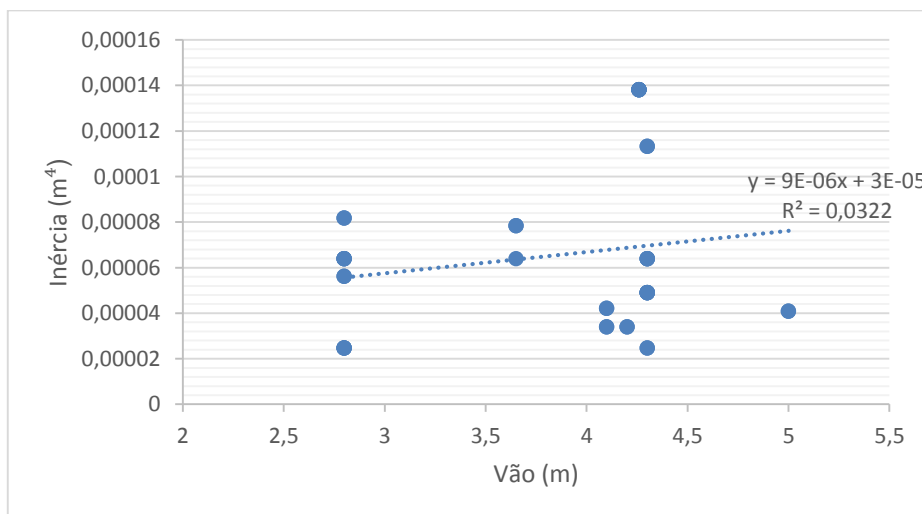


Gráfico 5.3 – Momento de inércia em função do vão das vigas



Embora se apresentem estes 2 últimos gráficos, a sua leitura não deixa espaço para grandes conclusões.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1. CONCLUSÕES

A durabilidade da madeira como material estrutural é um dos grandes impulsionadores do seu uso. Existe um grande número de estruturas realizadas com este material que chega aos dias de hoje após “sobreviverem” durante séculos. A sua utilização em elementos estruturais deverá tendencialmente aumentar à medida que os projetistas forem capazes de aproveitar as suas características, dado ser um material renovável, relativamente barato e com um bom comportamento mecânico a todo o tipo de esforços.

O principal objetivo deste trabalho é avaliar as características mecânicas, nomeadamente o módulo de elasticidade da madeira e o comportamento das estruturas através da medição experimental da frequência de vibração das estruturas/elementos realizados a partir deste material. Não foi possível relacionar de forma unívoca a frequência da madeira com o seu módulo de elasticidade, no entanto foram aferidas propriedades importantes relativas ao comportamento dinâmico dos pavimentos de madeira antigos.

A não linearidade do eixo de uma viga de madeira pode provocar uma variação superior a 60% na sua frequência de vibração. Por outro lado, as condições de apoio nas paredes de alvenaria podem ser responsáveis pela variação da frequência superior a 100%, dependendo do grau de encastramento das vigas nas paredes. Estas duas características são as que maior influência apresentam na frequência de vibração dos pavimentos, em particular quando comparadas com o módulo de elasticidade da madeira que, para variações de 200% pode fazer alterar o valor da frequência natural de uma viga em apenas cerca de 15%.

Os tetos de gesso funcionam como massa adicional na estrutura, diminuindo a frequência de vibração dos pavimentos. Já os tarugos e o soalho são responsáveis pelo comportamento dinâmico homogéneo da estrutura dos pavimentos.

6.2. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Deve ser feito um estudo experimental sobre as ligações das vigas às paredes de alvenaria para avaliar o módulo de elasticidade da madeira nos pavimentos deste género, apesar de haver outras variáveis por vezes mais relevantes, como a linearidade do eixo longitudinal das vigas e a existência de tetos de gesso, o que torna o estudo das frequências próprias de vibração dos pavimentos em função do módulo de elasticidade da madeira um processo demasiado complexo. O grau de encastramento das vigas está relacionado com o comprimento que penetra nas paredes de alvenaria e condiciona o comportamento dinâmico final dos pavimentos. Conhecendo as condições de apoio destas estruturas deve ser possível, através da identificação dinâmica dos pavimentos, classificar a madeira ou aproximar as suas características mecânicas a uma classe resistente presente no Eurocódigo 5.

Deve, por isso, ser realizado um maior número de ensaios de avaliação da frequência de vibração de pavimentos de madeira em situações reais de forma a aumentar a base de dados existente, permitindo melhor esclarecer, por exemplo, a influência do soalho e dos tetos na rigidez/comportamento destes elementos estruturais. Este tipo de estudos deve acompanhar os trabalhos de inspeção e diagnóstico que antecedem qualquer intervenção/reabilitação em construções existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

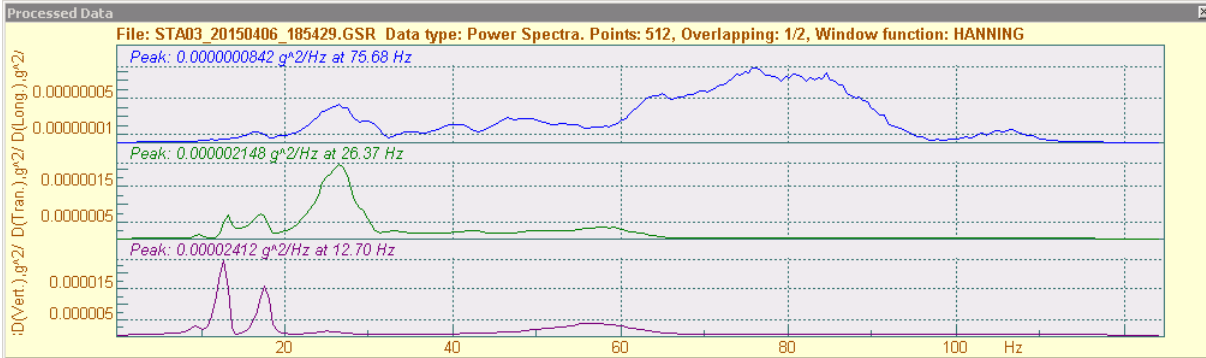
- [1] Coutinho, J. (1999). *Materiais de Construção I. Madeiras*. Policopiado (FEUP), Porto.
- [2] Júnior, J. *Avaliação não destrutiva da capacidade resistente de estruturas de madeira de edifícios antigos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2006.
- [3] Capuz, R. (2003). *Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. Tese de Doutoramento, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia.
- [4] <http://construironline.dashofer.pt/?s=modulos&v=capitulo&c=1782>. Acedido em Junho de 2015.
- [5] Pereira, S. *Avaliação experimental das principais propriedades mecânicas de peças estruturais em madeira antiga*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009.
- [6] Martins, T. *Dimensionamento de Estruturas em Madeira; Coberturas e Pavimentos*. Dissertação de Mestrado, IST, 2010.
- [7] Gonçalves, L. *Projeto de estruturas em madeira lamelada colada*. Dissertação de Mestrado, IST, 2012.
- [8] CEN. (2004b). *EC5 – Projecto de Estruturas de Madeira. Parte 1.1: Regras gerais e regras para edifícios. NP ENV 1995-1-1*. IPQ, Lisboa.
- [9] EN 338, Structural Timber. CEN, 2003.
- [10] EN 1194, *Timber structures- Glued laminated timber- Strength classes and determination of characteristic values*, 1999.
- [11] Dias, T. *Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos; Diagnóstico e Intervenção Estrutural*. Dissertação de Mestrado, FEUP, 2007.
- [12] Proceq. (2003). *Pilodyn – Model 6J User manual*, Proceq SA, Schwerzenbach, Switzerland.
- [13] Segurado, J. E. S. (1942). *Trabalhos de carpintaria civil*. Biblioteca de Instrução Profissional, Livraria Bertrand, Lisboa.
- [14] Teixeira, J. J. L. (2004). *Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal*, Provas de aptidão pedagógica e capacidade científica. FAUP, Porto.
- [15] Gomes, A., Pinto, A., Pinto, J. (2013). *Materiais de Construção I. Gesso e Cal de Construção*. (Instituto Superior Técnico), Lisboa.
- [16] NCREP, *Memoria descritiva e justificativa/Relatório de investigação e diagnóstico estrutural*, ref. MD/NCREP_0201A0214, Maio 2014, Porto.
- [17] NCREP, *Projeto de Estabilidade – Licenciamento*, ref. MD/NCREP_0140^a1013, Novembro 2013, Porto.
- [18] NCREP, *Memoria descritiva e justificativa – Execução*, ref. MD/NCREP_0100-A-04-13, Junho 2014, Porto.
- [19] http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11327/11327_4.PDF. Acedido em Junho de 2015.

Anexos

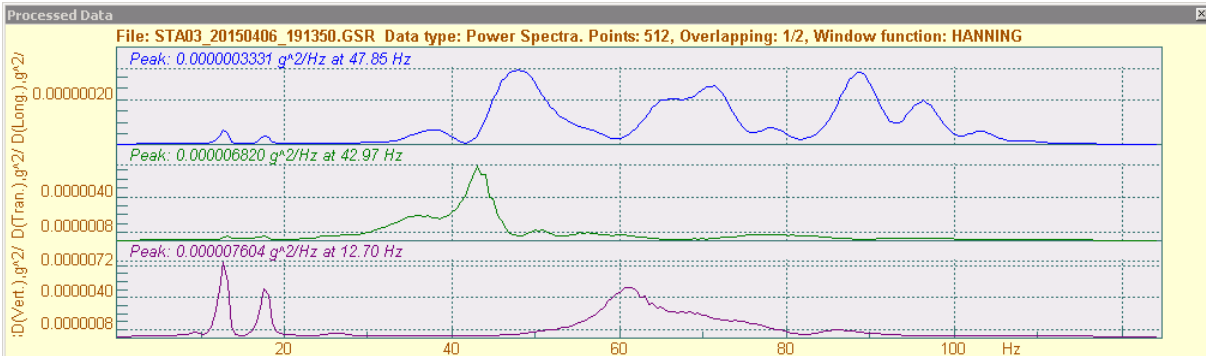
Ensaio dinâmico

Ensaio dinâmicos – Rua da Torrinha

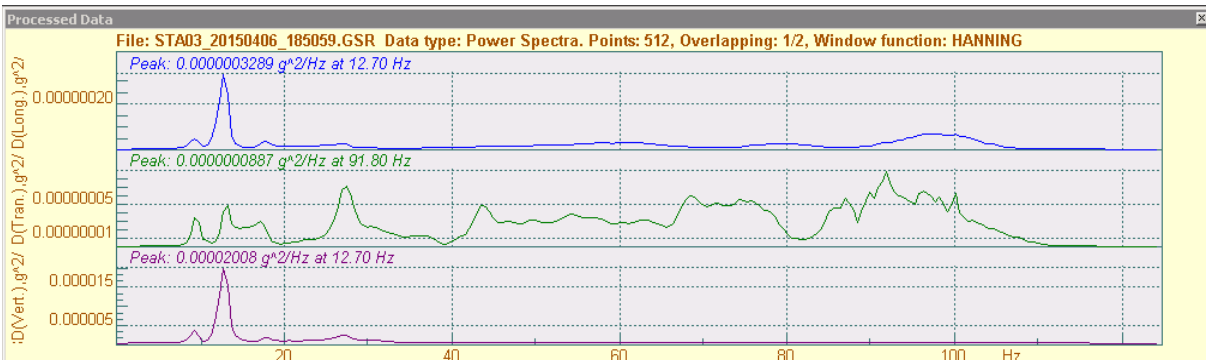
ED1



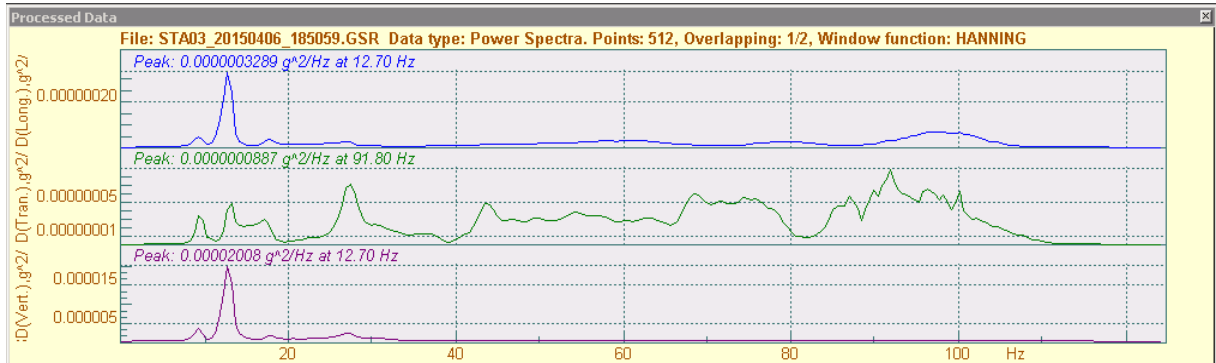
ED2



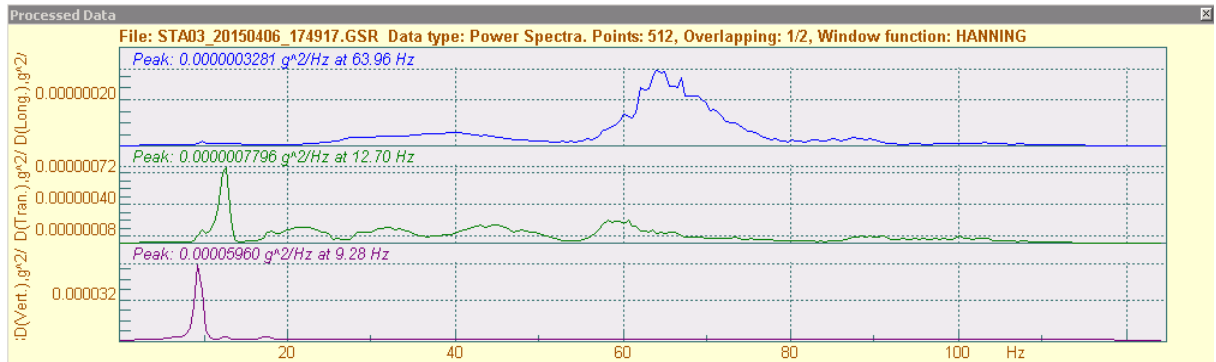
ED3



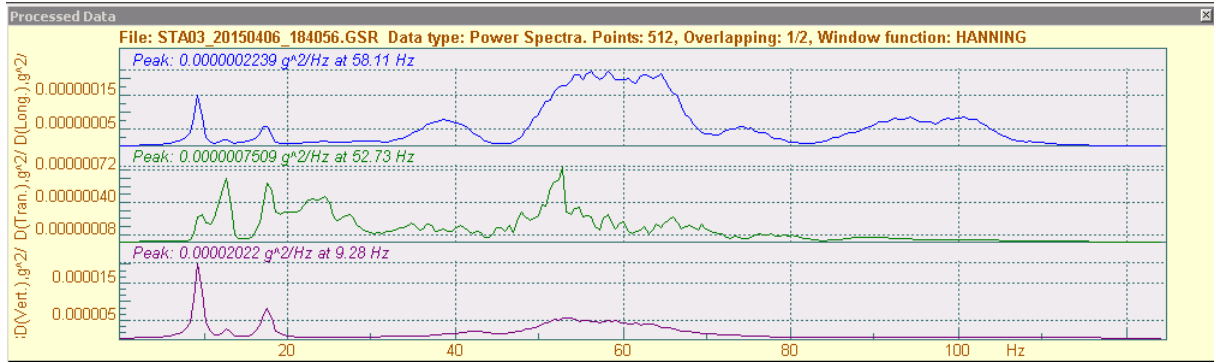
ED4



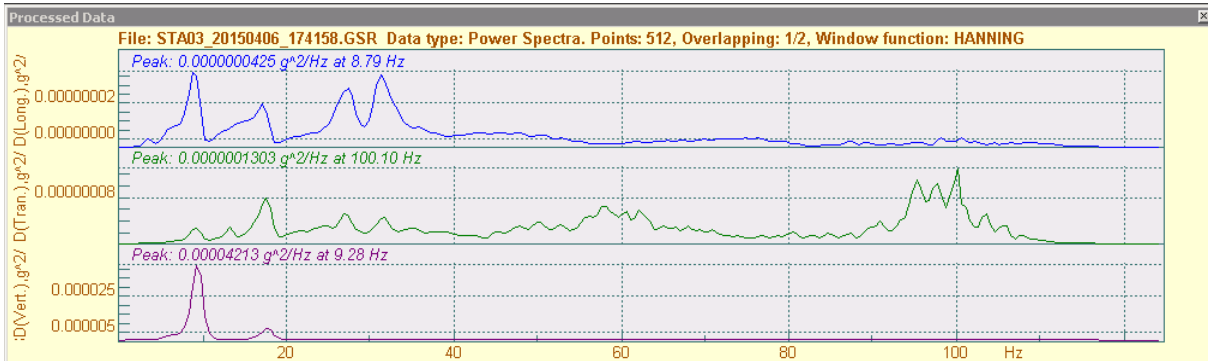
ED5



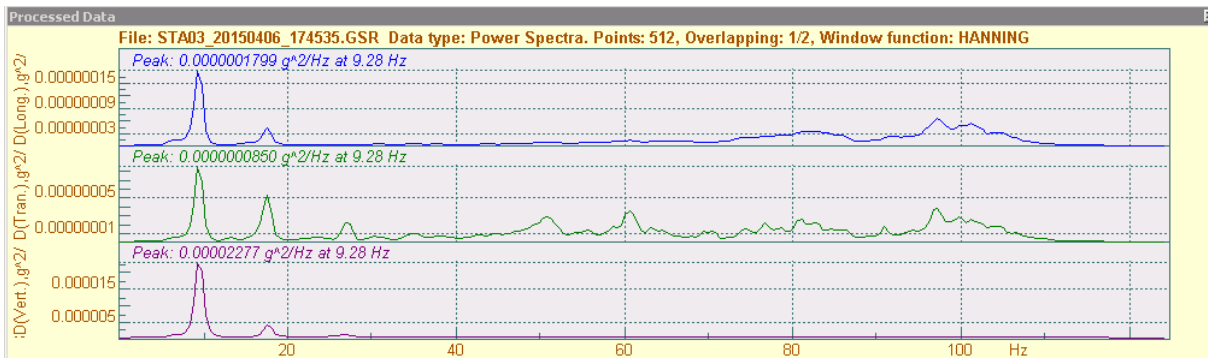
ED6



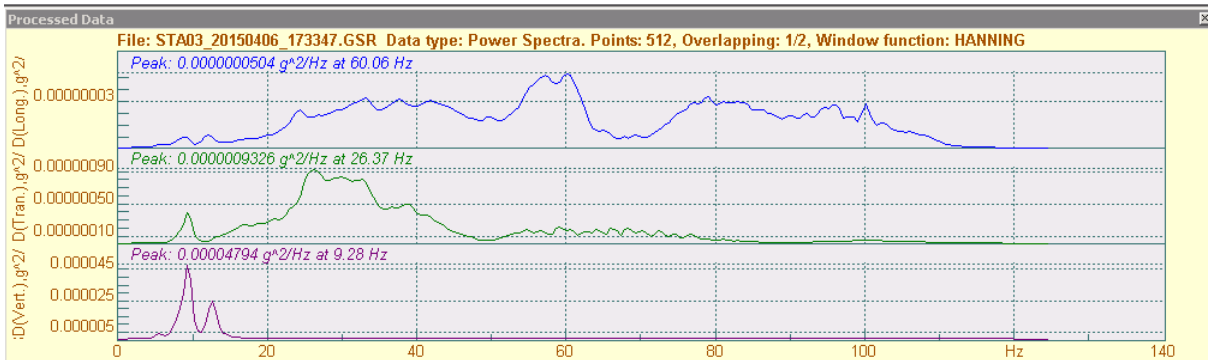
ED7



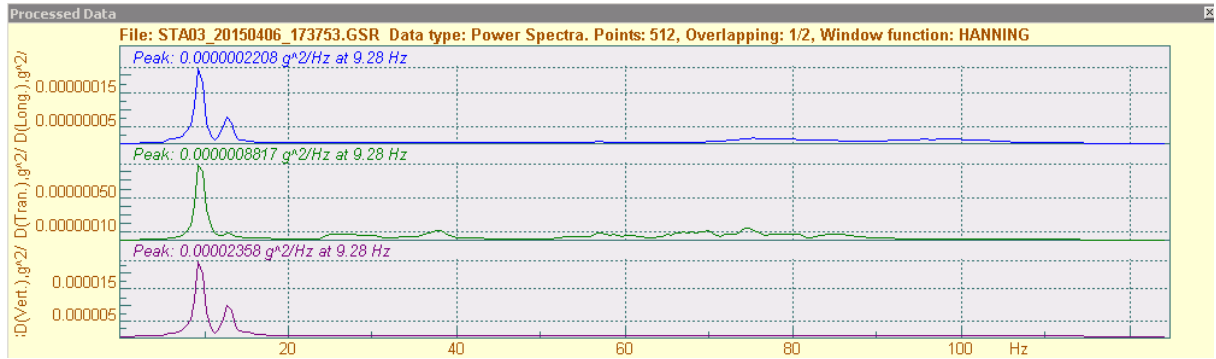
ED8



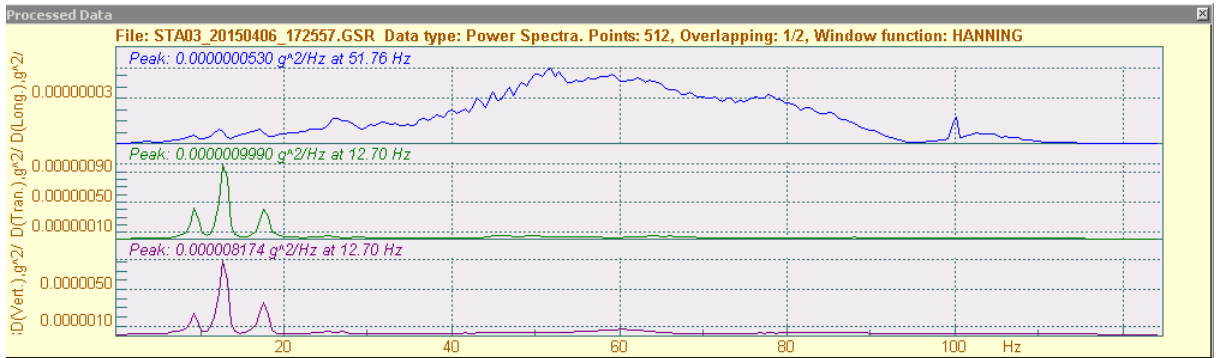
ED9



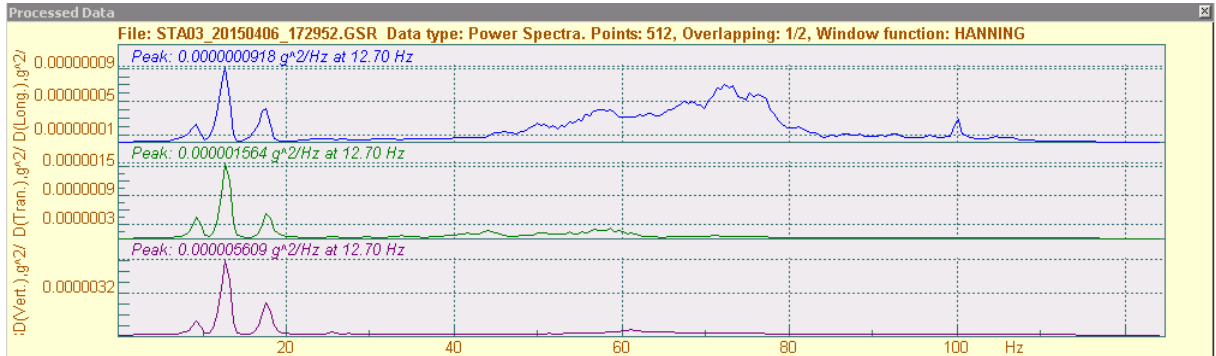
ED10



ED11

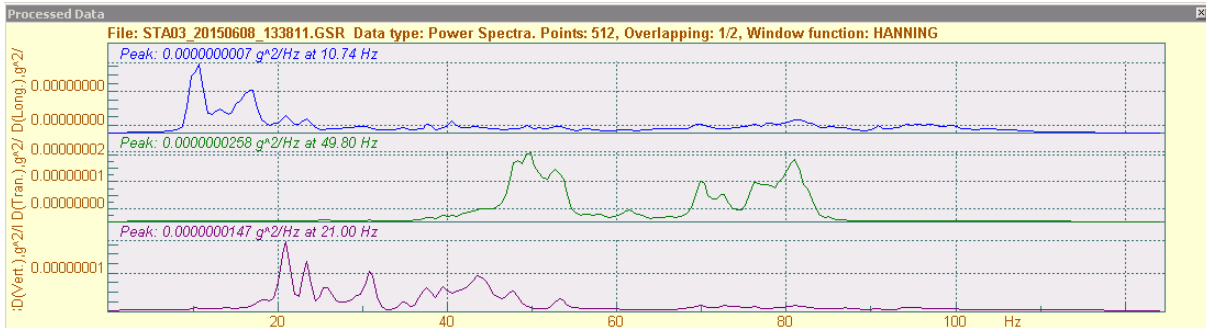


ED12

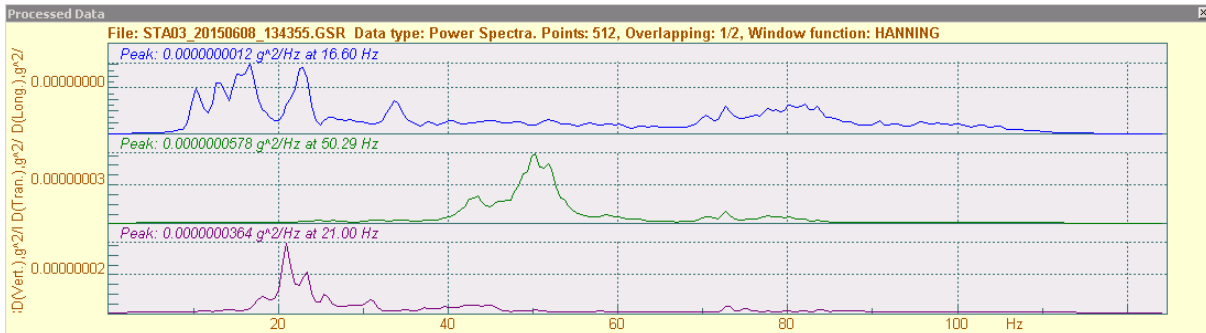


Ensaio Dinâmico – Rua do Rosário

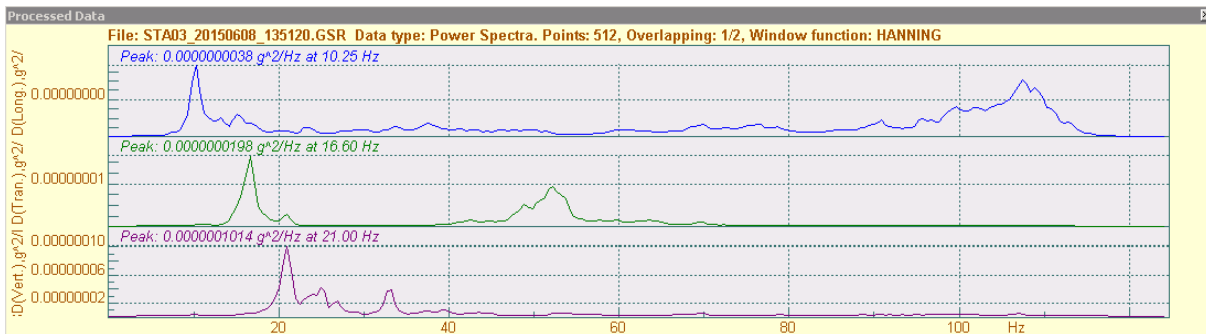
ED1



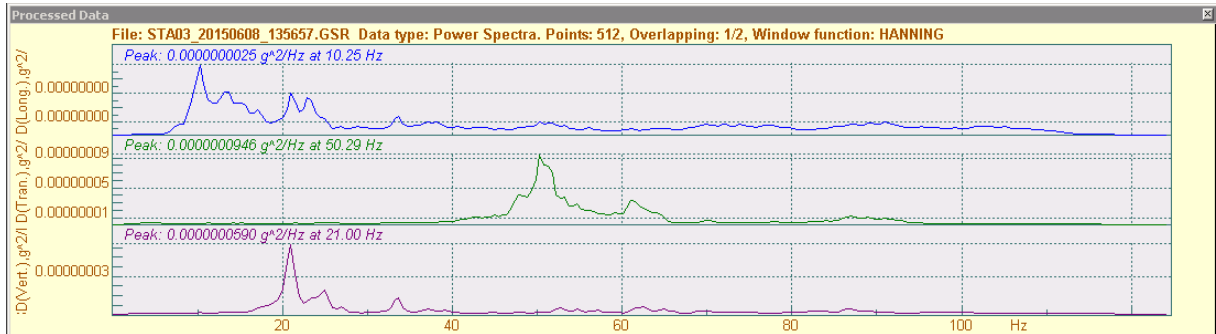
ED2



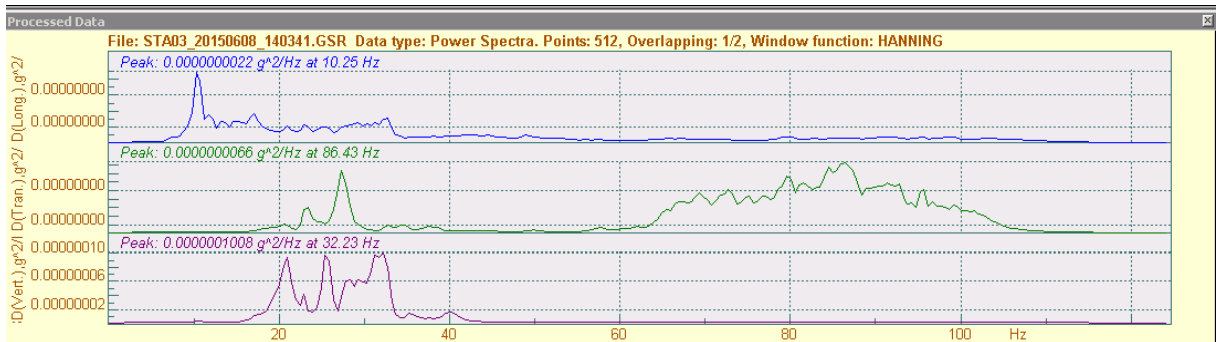
ED3



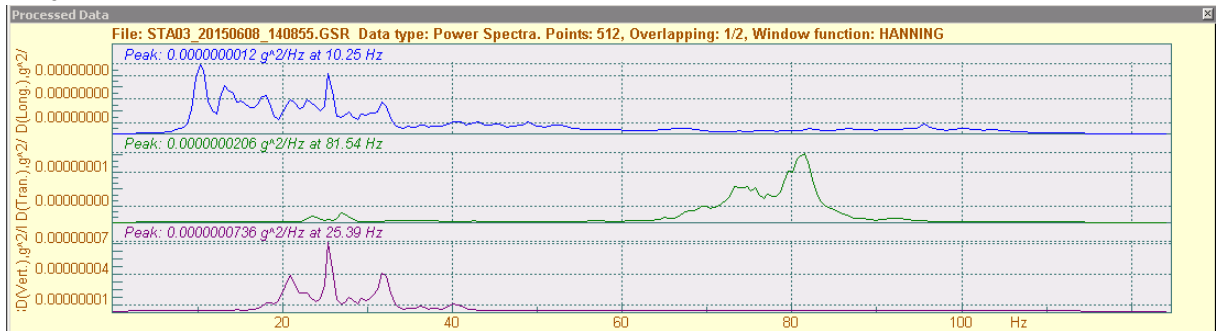
ED4



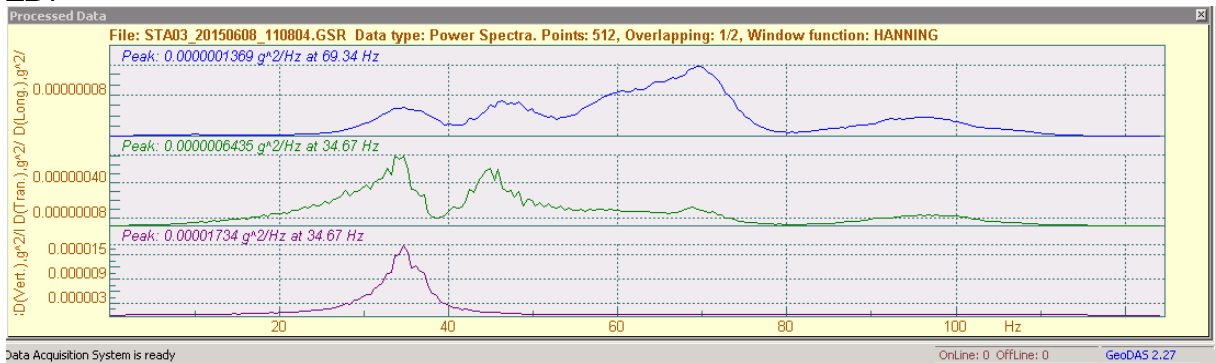
ED5



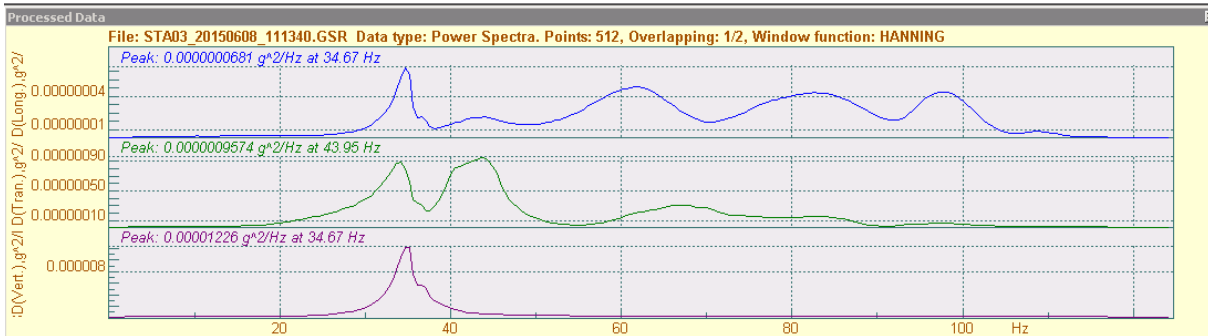
ED6



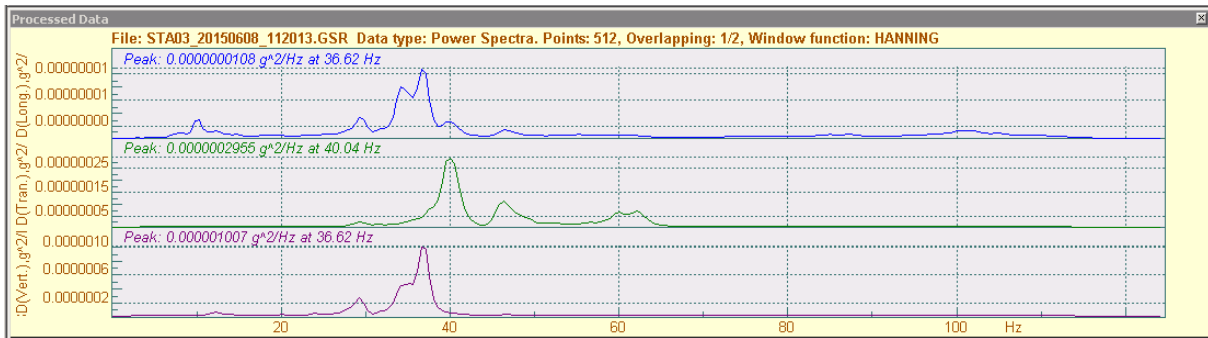
ED7



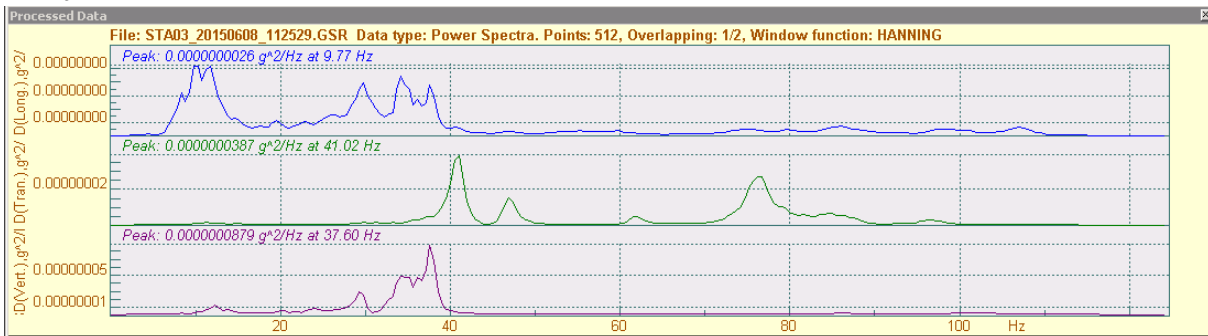
ED8



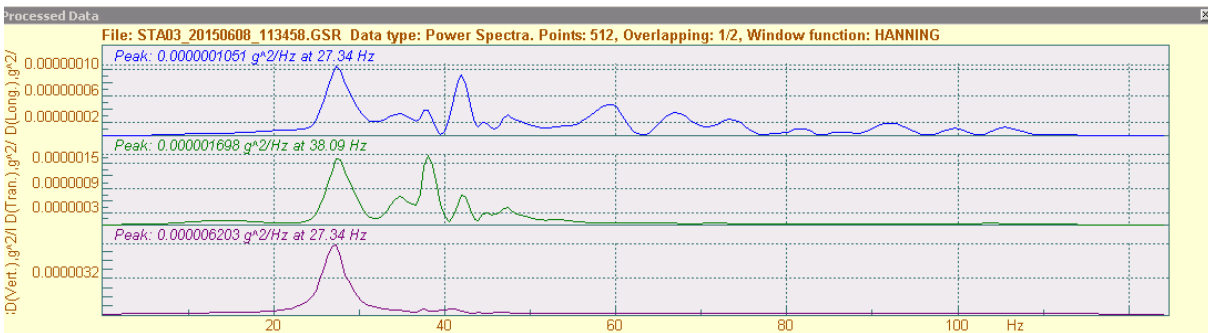
ED9



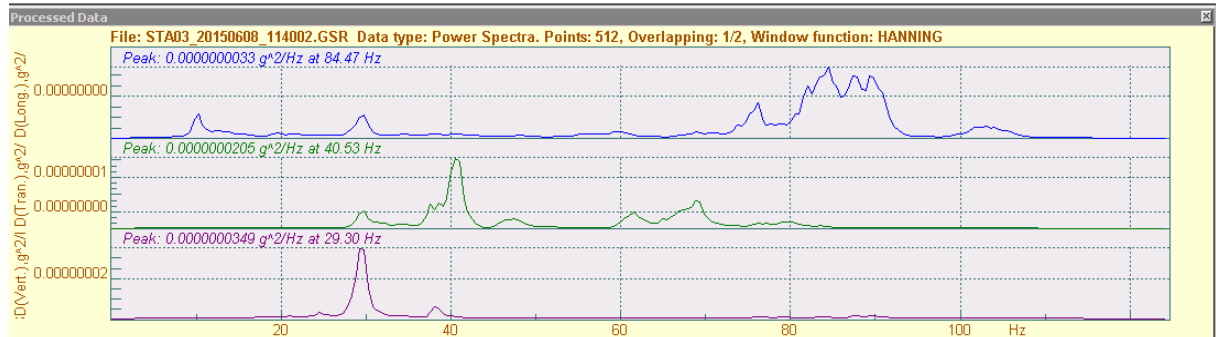
ED10



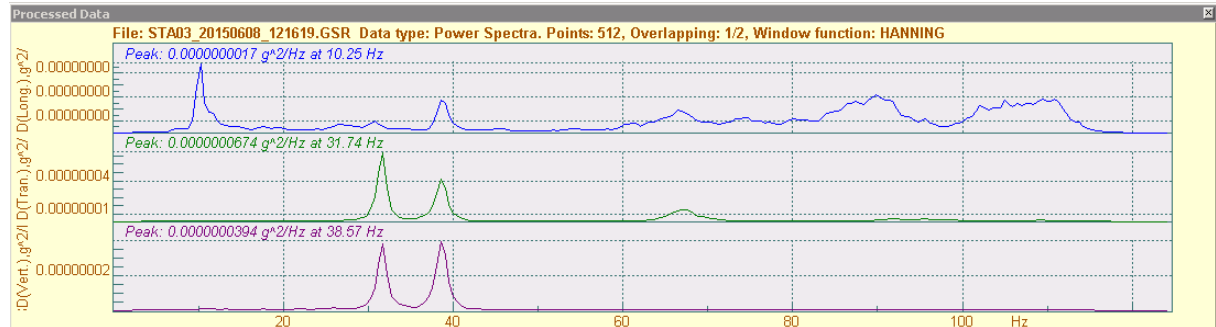
ED11



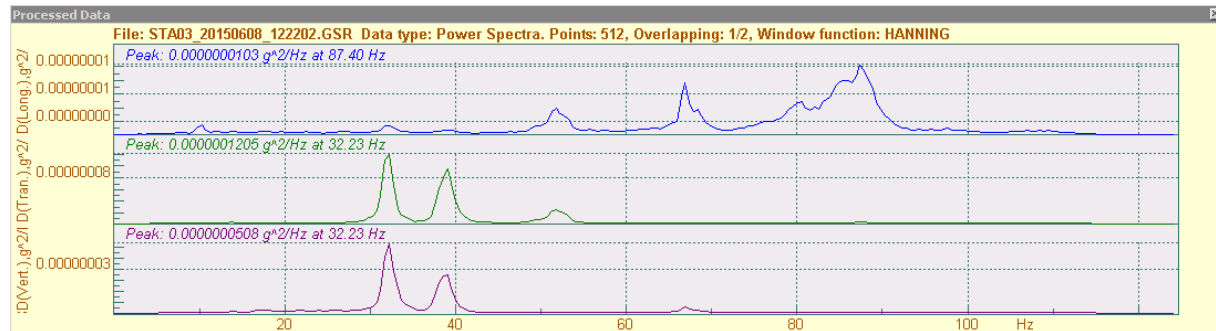
ED12



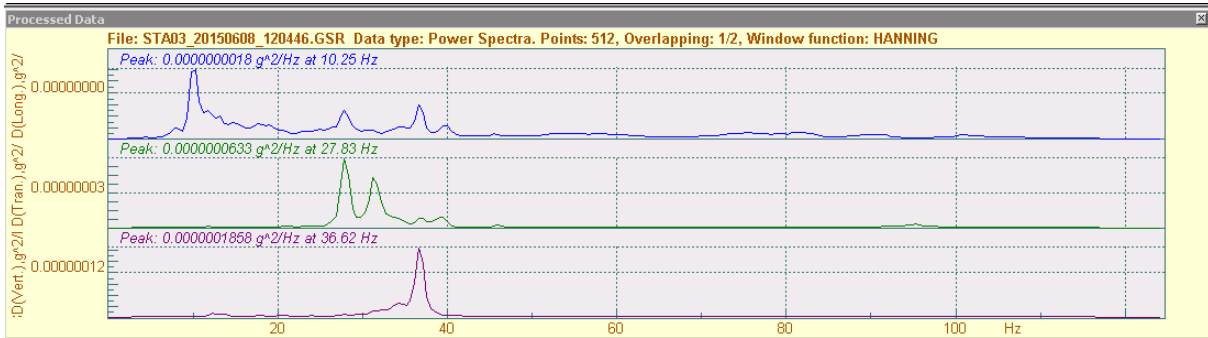
ED13



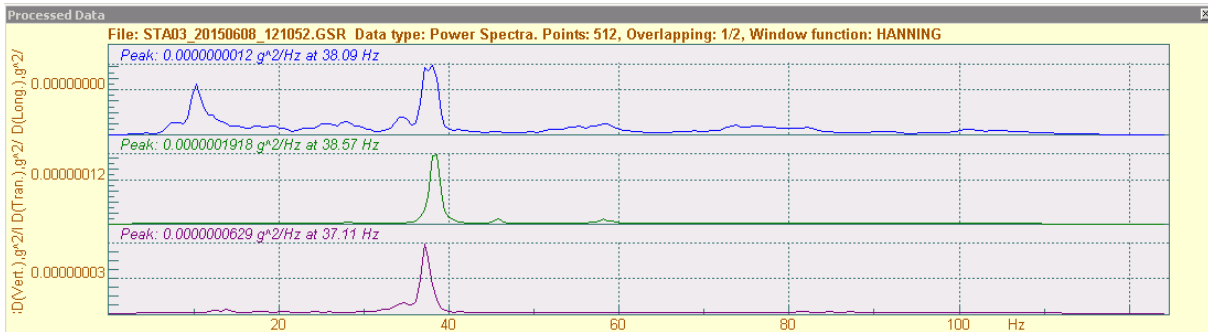
ED14



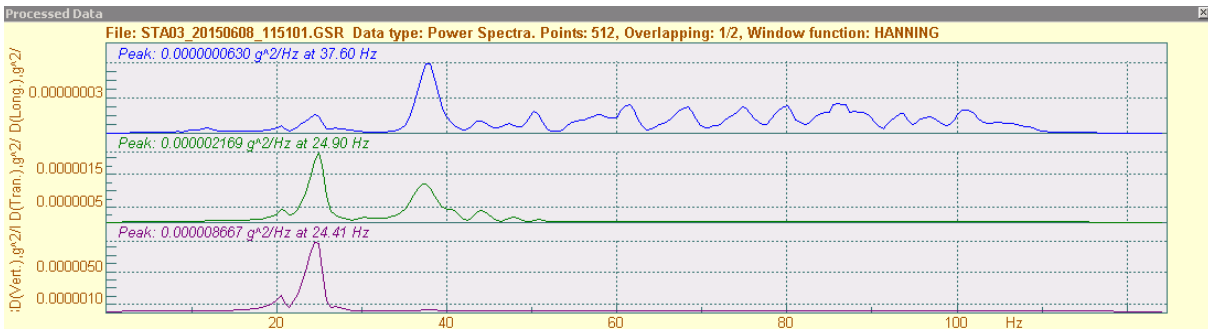
ED15



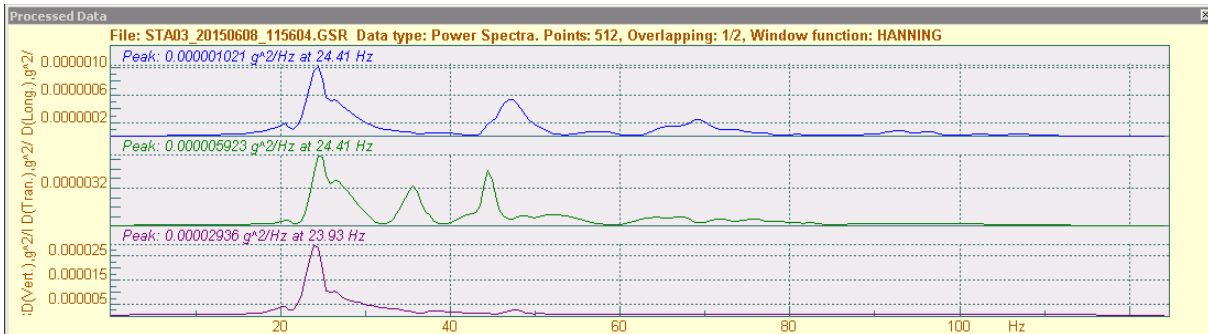
ED16



ED17

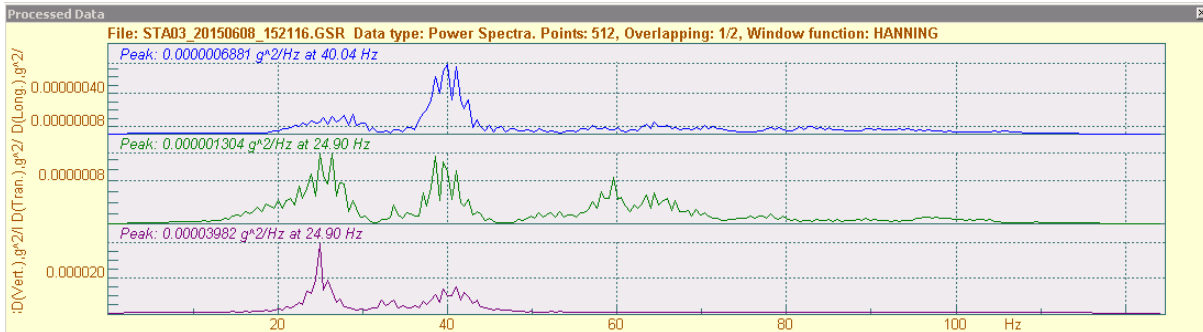


ED18

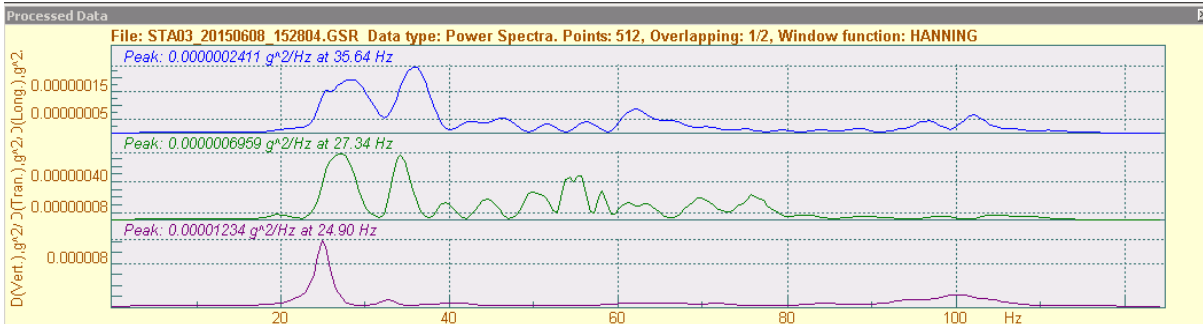


Ensaio Dinâmico – Rua Monte dos Judeus

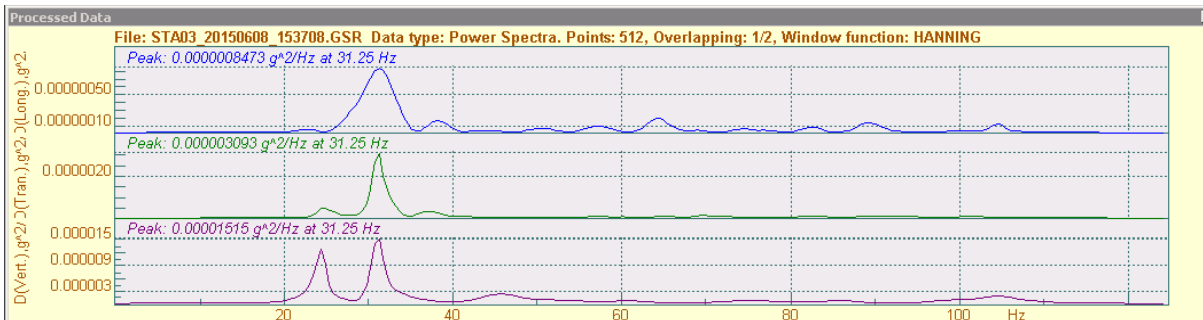
ED1



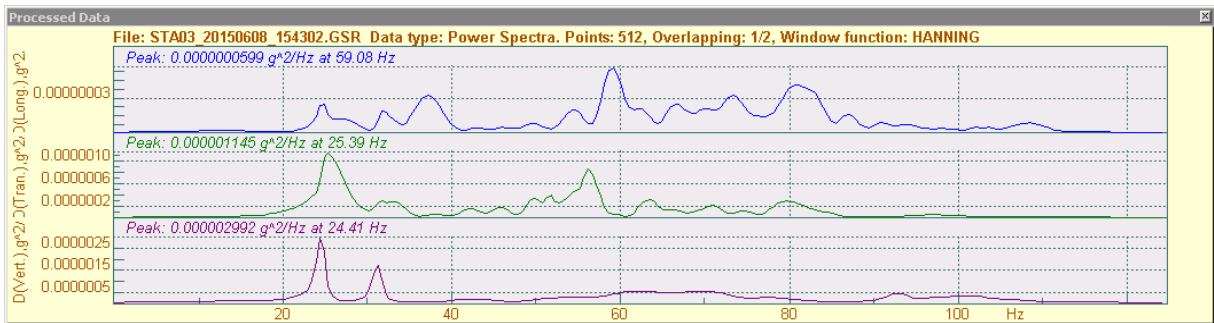
ED2



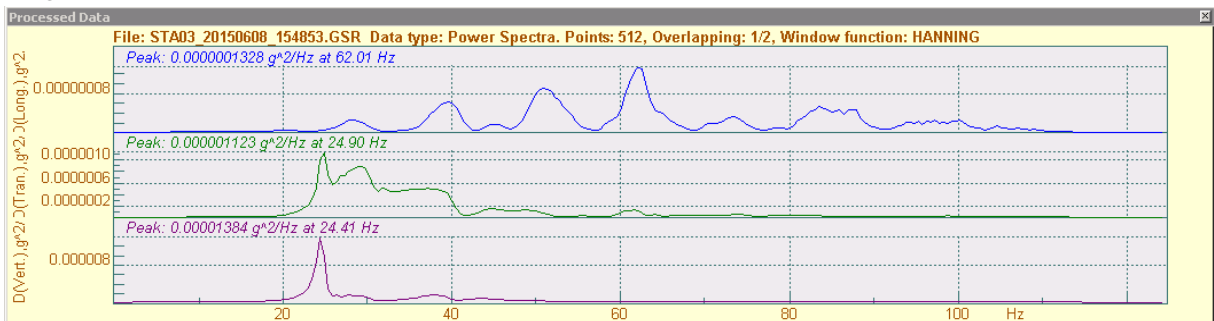
ED3



ED4



ED5



ED6

