

Caracterização de pavimentos antigos de madeira através de identificação dinâmica

Characterization of old timber floors through dynamic identification

Tiago Ilharco
João Miranda Guedes
Alexandre Costa
Bruno Quelhas
Valter Lopes
Ricardo Gonçalves

Resumo

Os pavimentos de madeira assumem um papel primordial no comportamento de construções antigas, funcionando como elemento de ligação e de distribuição de cargas pelas paredes. A sua caracterização assume por isso um papel fundamental. Neste âmbito, o NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património Lda. [1] utiliza procedimentos de identificação do comportamento dinâmico na abordagem aos projetos de reabilitação estrutural de edifícios antigos com o objetivo de modelar de forma mais realista os pavimentos existentes de madeira. Nesta pesquisa exploratória, integrada em projetos do NCREP e num trabalho de investigação, [2], [3], conseguiu-se, aplicando esta técnica a 3 casos de estudo, estimar: (i) a diferença entre os resultados experimentais e numéricos da frequência de vibração vertical; ii) a influência do soalho e dos apoios das vigas nas paredes na frequência de vibração vertical dos pavimentos e (iii) o grau de encastramento das vigas nos apoios nas paredes.

Abstract

Timber floors play a key role in the behaviour of old masonry and timber buildings; they act as connecting elements of walls and promote the load distribution through the walls. Therefore, its assessment assumes an important role. In this context, NCREP – Consultancy and Rehabilitation of Built Heritage, Lda. [1] includes, in the structural rehabilitation projects of old buildings, procedures of identification of the dynamic behaviour of timber floors, aiming more realistic simulations of these structural elements. In this exploratory research, that involved NCREP projects and investigation work, [2], [3], the application of this technique to 3 case studies allowed estimating: (i) the difference between the experimental and numerical results of the vertical vibration frequencies, (ii) the influence of the floorboards and the supports of the beams on the walls in the vertical vibration frequencies of the floors and (iii) the degree of embedment of the beams in the walls.

Palavras-chave: Caracterização / Pavimentos / Madeira / Identificação dinâmica

Keywords: Assessment / Floors / Timber / Dynamic identification

Tiago Ilharco

Engenheiro Civil (MSc)
NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
tiago.ilharco@ncrep.pt

João Miranda Guedes

Professor Auxiliar / Engenheiro Civil (PhD)
FEUP / NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
jguedes@fe.up.pt

Alexandre Costa

Engenheiro Civil (PhD)
NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
alexandre.costa@ncrep.pt

Bruno Quelhas

Engenheiro Civil (PhD)
NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
bruno.quelhas@ncrep.pt

Valter Lopes

Engenheiro Civil (MSc)
NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda.
Porto, Portugal
valter.lopes@ncrep.pt

Ricardo Gonçalves

Engenheiro Civil (MIEC)
FEUP
Porto, Portugal
up201402634@fe.up.pt

Aviso legal

As opiniões manifestadas na Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas são da exclusiva responsabilidade dos seus autores.

Legal notice

The views expressed in the Portuguese Journal of Structural Engineering are the sole responsibility of the authors.

ILHARCO, T. [et al.] – Caracterização de pavimentos antigos de madeira através de identificação dinâmica. **Revista Portuguesa de Engenharia de Estruturas**. Ed. LNEC. Série III. n.º 8. ISSN 2183-8488. (novembro 2018) 85-94.

1 Introdução

A reabilitação de edifícios antigos em Portugal, entendidos neste trabalho como construções construídas tipicamente por elementos portantes verticais (paredes) principais de alvenaria de pedra e elementos horizontais (pavimentos e coberturas) em estrutura de madeira, é hoje uma atividade em franca expansão. Envolve procedimentos que exigem o conhecimento do comportamento mecânico dos materiais e elementos estruturais que constituem esses edifícios, e do seu estado de conservação. Em particular, deve envolver ações que melhorem ou efetivem a ligação entre paredes e entre estes elementos e as estruturas dos pavimentos e das coberturas, de forma a promover o funcionamento conjunto de todos os elementos estruturais, assegurando, deste modo, uma boa partilha de esforços. Neste âmbito, os pavimentos assumem um papel particularmente importante, sendo responsáveis pela transferência e distribuição de forças, quer verticais resultantes do uso corrente dos pavimentos, quer horizontais resultantes de impulsos, pelas paredes. De facto, os elementos estruturais horizontais não só são responsáveis pela criação de espaços funcionais a diferentes níveis em altura e de elementos de proteção desses espaços, mas também pelo estabelecimento de conexões entre paredes, promovendo o que se designa habitualmente como comportamento em caixa da construção [4]. Por outro lado, sendo estruturas flexíveis, a capacidade dos pavimentos é normalmente condicionada por questões de deformação e/ou vibração induzida pelo uso, sendo esta última característica uma das principais razões apontadas por alguns dos intervenientes nos processos de reabilitação para a sua substituição, ou reforço, apesar de muitas destas estruturas, aparentemente deficitárias, terem demonstrado um comportamento satisfatório ao longo da sua vida útil.

É por isso importante caracterizar corretamente as propriedades mecânicas e o comportamento estrutural dos pavimentos. É possível estimar algumas características das madeiras através de ensaios sónicos, ou de penetração, utilizando por exemplo instrumentos como o *Pilodyn* e o *Resistógrafo*, mas os resultados destes ensaios são não só locais como não existem correlações suficientemente fiáveis com as propriedades mecânicas da madeira [5]. Alternativamente, existe a possibilidade de estimar o comportamento global de pavimentos através da realização de ensaios de carga [4], um procedimento não destrutivo, mas que envolve meios pesados e custos mais elevados, normalmente inoportáveis numa intervenção corrente.

Neste trabalho procura-se estimar as características e o comportamento global de pavimentos de madeira antigos através de metodologias simples de identificação ou medição do seu comportamento dinâmico. Esta metodologia, adotada habitualmente pelo NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património Lda. na abordagem aos projetos de reabilitação estrutural de edifícios antigos, permite estimar e modelar de forma mais realista as características dos pavimentos de madeira, e melhor sustentar eventuais necessidades de reforço estrutural [6], [7]. A pesquisa exploratória apresentada neste trabalho fez parte de um trabalho de investigação [2], [3] e baseia-se nos resultados obtidos em 3 edifícios localizados no Porto, alvo de projeto de reabilitação estrutural por parte do NCREP.

Através do uso de acelerómetros foram medidas frequências de vibração de um conjunto de pavimentos e estimadas algumas das suas características através do ajuste destes resultados experimentais aos obtidos através de programas de análise estrutural. A medição do comportamento dinâmico de pavimentos, ou seja, considerando as características reais que o determinam, permitiu adquirir uma maior sensibilidade na modelação estrutural dos pavimentos de madeira. Em particular, permitiu verificar a influência do soalho e das condições de encastramento dos apoios das vigas nas paredes no comportamento dinâmico dos pavimentos, e estimar valores para este encastramento. Os benefícios dos procedimentos de identificação dinâmica são, entre outros, o seu carácter totalmente não destrutivo, a facilidade de transporte do equipamento, o rápido processamento dos resultados e o baixo custo de todo o processo.

2 Sistema estrutural e comportamento dinâmico dos pavimentos de madeira antigos

Os pavimentos de madeira de edifícios antigos apresentam tipicamente uma estrutura principal constituída por vigas de madeira de castanho, carvalho ou pinho, que se apoia em paredes de alvenaria de pedra e suporta o soalho e a estrutura do teto subjacente, Figura 1. Em edifícios anteriores ao século XX as vigas têm secção circular, e apenas em construções posteriores aparecem vigas retangulares [8], Figura 2. No caso de vigas de secção circular, irregulares, a horizontalidade do soalho era assegurada com a colocação de tacos de madeira sob o soalho, e a dos tetos com a colocação de um vigamento transversal ao anterior e/ou a interposição de tacos de madeira. Entre vigas, e centrados com o seu eixo, existem troços de viga transversais, designados por tarugos, que contraventam a estrutura e estabelecem alguma continuidade das vigas nessa direção. Nalgumas situações, os tarugos são entalhados, ou apresentam formas distintas, por exemplo em cruz (tarugos de cruzeta), apresentando habitualmente secção idêntica ou inferior à das vigas.



Figura 1 Pavimento de madeira de uma construção antiga de alvenaria. Vigas de secção transversal circular



Figura 2 Pavimento de madeira de uma construção antiga de alvenaria. Vigas de secção transversal retangular

Embora o sistema de vigas constitua a estrutura principal resistente dos pavimentos, o soalho tem também uma função estrutural importante. Para além de permitir o uso corrente dos pavimentos, o soalho, juntamente com os tarugos, distribui as cargas verticais pelas vigas e homogeneiza o comportamento dos pavimentos. Permite que o pavimento deformado assuma uma forma contínua e que as vigas recebam cargas proporcionais à sua rigidez. Esta função é particularmente importante, quando sabemos que, em particular no caso de peças de secção circular, as vigas podem apresentar diâmetros diferentes entre si e variações de secção ao longo do seu comprimento resultantes da redução de secção que ocorre no sentido de crescimento dos troncos. Aliás, nestes casos observa-se *in situ*, e como boa norma construtiva, a colocação dos troncos lado a lado, dispostos a 180°, uns em relação aos outros.

Relativamente a dimensões das peças, de uma forma geral, as construções ordinárias apresentam elementos portantes verticais distribuídos de tal forma que permitem a utilização de vigas de pavimentos com vãos inferiores a 6 m. As vigas de madeira de secção circular apresentam diâmetros variáveis entre 10 e 40 cm e encontram-se espaçadas entre eixos de 40 a 70 cm. No caso das vigas retangulares, as secções apresentam alguma standardização, sendo comum encontrar vigas com 8 x 22 cm² e 8 x 16 cm². Encontram-se soalhos com diferentes espessuras, variando normalmente entre 2,5 e 3,5 cm.

O comportamento dinâmico de um pavimento de madeira é determinado por vários fatores, tais como a sua massa, rigidez, amortecimento e características geométricas e estruturais, nomeadamente a existência de tarugos, a espessura do soalho, o tipo de ligação entre vigas e paredes, etc. Acontece frequentemente que pavimentos dimensionados ou verificados para atender ao critério de deformação exibem problemas de vibração. O critério

de deformação tradicional não garante, necessariamente, um comportamento dinâmico satisfatório e, nesse sentido, é importante limitar os valores mais baixos das frequências dos pavimentos, com o intuito de atender aos requisitos de conforto. Note-se ainda que, porque o aumento da massa pode diminuir as frequências para níveis críticos, a utilização de materiais pesados em pavimentos de madeira (por oposição à baixa densidade da madeira), como lajetas de betão, se não for corretamente concebida, pode resultar em comportamentos dinâmicos desadequados.

3 Procedimento dinâmico

O procedimento utilizado na identificação dinâmica dos pavimentos utilizado pelo NCREP, e aplicado no âmbito deste trabalho, é bastante simples. Um sismógrafo mede as acelerações verticais dos pavimentos e/ou das vigas dos pavimentos submetidas a vibração ambiente e à aplicação de impulsos verticais espaçados no tempo, Figuras 3 e 4. Nestes processos é essencial realizar um planeamento prévio e cuidadoso dos ensaios, que defina, entre outros aspetos, o equipamento a utilizar, o posicionamento dos acelerómetros e a duração dos ensaios. Porque os pavimentos de madeira apresentam um peso reduzido, durante a realização dos ensaios é importante não perturbar os pavimentos com a introdução de massas adicionais, como as dos operadores dos ensaios; pequenas variações de massa podem nestes casos afetar significativamente os resultados.



Figura 3 Utilização de sismógrafo na identificação dinâmica de um pavimento de madeira no centro do Porto

Nos ensaios foram utilizados sismógrafos constituídos por acelerómetros triaxiais (GeoSIG GSR-18bit), com uma frequência de aquisição de 250 Hz. Por outro lado, os aparelhos devem posicionar-se em pontos de maior deslocamento modal e evitar pontos de deslocamento modal nulo nos modos de vibração com interesse em identificar. Adicionalmente, a aquisição de dados num ensaio dinâmico, em particular quando se utiliza apenas vibração ambiente, deve ser efetuada num intervalo de tempo igual a $1000 \times T_{max}$ sendo T_{max} o maior período, ou o período correspondente à menor frequência que se pretende identificar. No caso de pavimentos de madeira, geralmente deve-se considerar um período de aquisição

de 1 a 3 minutos para assegurar que as principais frequências de vibração sejam adequadamente caracterizadas.



Figura 4 Utilização de sismógrafo na identificação dinâmica de um pavimento de madeira na Baixa pombalina

Nos ensaios foram utilizados sismógrafos constituídos por acelerómetros triaxiais (GeoSIG GSR-18bit), com uma frequência de aquisição de 250 Hz. Por outro lado, os aparelhos devem posicionar-se em pontos de maior deslocamento modal e evitar pontos de deslocamento modal nulo nos modos de vibração com interesse em identificar. Adicionalmente, a aquisição de dados num ensaio dinâmico, em particular quando se utiliza apenas vibração ambiente, deve ser efetuada num intervalo de tempo igual a $1000 \times T_{max}$ sendo T_{max} o maior período, ou o período correspondente à menor frequência que se pretende identificar. No caso de pavimentos de madeira, geralmente deve-se considerar um período de aquisição de 1 a 3 minutos para assegurar que as principais frequências de vibração sejam adequadamente caracterizadas.

Efetuada os registos temporais em aceleração, os resultados são decompostos em frequências através da utilização de algoritmos clássicos de FFT, e comparados com os obtidos através de modelos numéricos ou analíticos da estrutura, Figura 5. Neste caso os registos foram analisados através do programa GeoDAS [9].

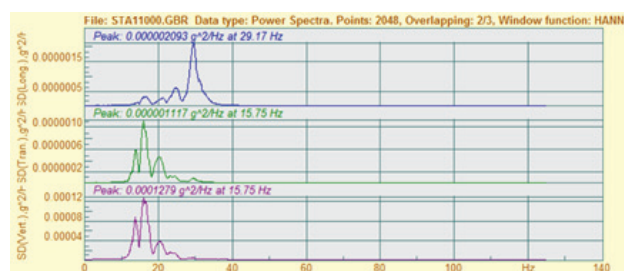


Figura 5 Espectros de potência de um sinal determinados através do GeoDAS [9]

Para que se possa construir os modelos estruturais dos pavimentos, deve efetuar-se um levantamento prévio das características geométricas/estruturais dos elementos que os constituem e a

modelar, nomeadamente: o vão, a secção transversal, o espaçamento e material das vigas e dos tarugos e a dimensão, a espessura e material do soalho e, eventualmente, dos tetos. Nos casos de estudo analisados nesta investigação, este levantamento foi facilitado pelo facto de os edifícios estarem a sofrer obras de reabilitação estrutural na sequência dos projetos de reabilitação estrutural previamente elaborados pelo NCREP.

4 Casos de estudo

Foram selecionados como casos de estudo 3 edifícios de habitação com estrutura em alvenaria de pedra e madeira que sofreram intervenções de reabilitação e reforço estrutural no âmbito de projetos realizados pelo NCREP [10], [11], [12]. Os edifícios localizam-se no Porto, Portugal, e apresentam características comuns: têm forma retangular em planta, paredes exteriores em alvenaria de pedra com aberturas apenas nos alçados principal e de tardoz, e paredes de empena comuns aos edifícios vizinhos onde se apoiam as vigas de madeira dos pavimentos. As paredes interiores são em tabique, e os pavimentos, coberturas e escadas são em estrutura de madeira. Em ambos os casos as estruturas de alvenaria de pedra e de madeira encontravam-se em bom estado geral de conservação, apresentando danos estruturais pontuais. Estes elementos, e os que se apresentam nos pontos seguintes, foram recolhidos a partir das ações de inspeção realizadas aos edifícios pelo NCREP previamente aos projetos de reabilitação estrutural:

- O primeiro edifício (E1) localiza-se na Rua do Almada, no Porto. É constituído por 5 pisos e os pavimentos são constituídos por vigas de madeira de secção circular com diâmetros entre 0,16 e 0,18 m, espaçadas entre 0,75 m e 0,80 m, e que vencem um vão de 4,35 m sem apoios intermédios, nomeadamente paredes de tabique sobrejacentes ou subjacentes.
- O segundo edifício (E2) situa-se na Praça Coronel Pacheco e é composto por 4 pisos. Os pavimentos são constituídos por vigas de madeira de secção retangular com dimensões médias de 8 x 22 cm², espaçadas em média de 0,70 m, e que vencem vãos de 3,40 m e 1,80 m no piso 0, e 5,20 m nos restantes pisos, sendo que nestes últimos não têm apoios intermédios, nomeadamente paredes de tabique sobrejacentes ou subjacentes. Durante a intervenção alguns dos pavimentos foram reforçados com vigas maciças de pinho nacional com 14 x 20 cm².
- O terceiro edifício (E3) situa-se na Rua do Rosário e é composto por 5 pisos. Os pavimentos de madeira são constituídos por vigas de madeira de secção aproximadamente quadrada com dimensões médias de 18 x 18 m² (resultante do corte de vigas de secção circular), espaçadas entre 0,65 m e 0,70 m e que vencem vãos de 2,80 m e 4,50 m sem apoios intermédios, nomeadamente paredes de tabique sobrejacentes ou subjacentes.

Os pavimentos de madeira dos edifícios referidos apresentam rácios entre as dimensões transversais e longitudinais entre 1,0 e 1,5. Os materiais identificados nos pavimentos foram: castanho (*Castanea sativa* Mill) (classe resistente D30) nas vigas, e pinho nacional e nórdico (*Pinus pinaster* e *Pinus sylvestris*) (classe resistente C18) no soalho e gesso nos elementos de madeira dos tetos. Embora fossem

detetadas variações, considerou-se uma espessura média do soalho de 3 cm e do teto de 2 cm. A Tabela 1 apresenta as características mecânicas consideradas para os elementos de madeira, vigas e soalho, e para o teto de gesso.

Tabela 1 Características mecânicas consideradas para os materiais

	E (GPa)	ρ (KN/m ³)
Vigas	10	6,4
Soalho	9	3,8
Tetos	1	27,0

5 Resultados

5.1 Influência dos componentes do pavimento na rigidez

Para um pavimento simplesmente apoiado em duas faces opostas, a frequência fundamental f_1 pode ser calculada usando a equação 1 [13].

$$f_1 = \left[\rho / (2 \times L^2) \right] \times (EI_{long} / M)^{(1/2)} \quad (1)$$

sendo L o vão livre das vigas em metros, M a massa calculada para o pavimento apenas com peso próprio e cargas permanentes, tal como aconteceu nos ensaios realizados, em kg/m² e EI_{long} a rigidez à flexão longitudinal do pavimento, isto é, na direção das vigas, em Nm²/m. Dada a dificuldade em estimar a contribuição do soalho pregado sobre as vigas, e eventualmente da estrutura do teto para o valor desta rigidez, é comum considerar-se apenas a contribuição das vigas. O uso da equação 1 é sugerido também para pavimentos de madeira que sejam simplesmente apoiados nos quatro lados, [12], sendo que, neste caso, EI_{long} continua a representar a rigidez equivalente do pavimento na direção das vigas.

No entanto, para as condições referidas, nomeadamente a consideração no cálculo do EI_{long} apenas a contribuição das vigas, supostas simplesmente apoiadas, as frequências obtidas *in situ* pelo NCREP nas suas campanhas de identificação dinâmica englobadas em ações de inspeção e diagnóstico são normalmente superiores às frequências teóricas [6], [7]. Esse resultado é corroborado pelo documento [14], que afirma que as frequências obtidas *in situ* são tipicamente 50% superiores às frequências estimadas pela equação 1, sugerindo a multiplicação da rigidez por um fator correspondente de forma a ter em consideração: (i) a contribuição do soalho que introduz rigidez, em particular na direção perpendicular às vigas, promovendo o funcionamento bidirecional do pavimento, e (ii) as condições de suporte das vigas nas paredes, que não correspondem a apoios simples.

A Tabela 2 apresenta as frequências fundamentais de vibração medidas *in situ* e calculadas através da equação 1, considerando as vigas simplesmente apoiadas e a contribuição do soalho e dos tetos apenas com a sua massa. Nesta tabela, o parâmetro M inclui a massa das vigas, dos soalhos e dos tetos, de acordo com as secções

transversais, espessuras e massas volúmicas apresentadas na Tabela 1, e calculado através da equação 2:

$$M = (\rho \times A / s)_{\text{viga}} + (\rho \times e)_{\text{soalho}} + (\rho \times e)_{\text{teto}} \quad (2)$$

onde A representa a área da secção transversal média das vigas do pavimento, s o espaçamento médio entre eixos das vigas do pavimento, e a espessura média do soalho e do teto do mesmo pavimento.

A rigidez dos pavimentos, EI_{long} , é calculada através da equação 3, assumindo os valores da Tabela 1 e as características geométricas médias das vigas indicadas nas Tabelas 2, 3 e 4:

$$EI_{\text{long}} = (E \times I_{\text{long}} / s)_{\text{viga}} \quad (3)$$

sendo I_{long} a inércia da secção transversal das vigas.

Tabela 2 Resultados do caso E1

Ensaio	L (m)	s (m)	D (cm)	EI_{long} (Nm ² /m)	Massa (kg/m ²)	f_1 (Hz)	
						Exp.	Teor.
PVRA_1	4,35	1	18,0	515300	83,27	11,0	6,5
PVRA_3	4,35	0,75	18,0	687066	88,80	12,2	7,3
PVRA_5	4,35	0,75	18,0	687066	88,80	12,3	7,3
PVRA_6	4,35	0,75	16,0	428932	84,16	17,0	5,9
PVRA_7	4,35	0,75	16,0	428932	84,16	12,5	5,9

Tabela 3 Resultados do caso E2

Ensaio	L (m)	s (m)	A (vigas reforço)				EI_{long} (Nm ² /m)	Massa (kg/m ²)	f_1 (Hz)	
			b (cm)	h (cm)	b (cm)	h (cm)			Exp.	Teor.
PVCP_1	5,2	0,5	12	24			2764800	104,24	15,1	9,5
PVCP_2	5,2	0,73	8	23	14	20	2261826	97,97	15,1	8,8
PVCP_3	5,2	0,65	8	22	14	20	2384410	101,02	15,1	8,9
PVCP_4	5,2	0,73	8	20	14	20	1881279	95,82	15,1	8,1
PVCP_6	5,2	0,63	8	20	14	20	2179894	100,45	15,1	8,6

Tabela 4 Resultados do caso E3

Ensaio	L (m)	s (m)	A		EI_{long} (Nm ² /m)	Massa (kg/m ²)	f_1 (Hz)	
			b (cm)	h (cm)			Exp.	Teor.
PVRR_6	4,5	0,70	18	18	1249714	96,86	13,9	8,8
PVRR_8	4,5	0,65	18	18	1345846	99,19	15,5	9,0
PVRR_10	4,5	0,65	18	18	1345846	99,19	13,3	9,0

Como se observa nas Tabelas 2 a 4, os rácios entre as frequências fundamentais medidas experimentalmente e os valores obtidos através da equação 1 são superiores a 1,58, ou seja, sugerem a multiplicação da rigidez EI_{long} das vigas por um fator no mínimo igual a 2,49 para que se obtenham, através da equação 1 e para as condições assumidas, valores de frequência idênticos aos reais. Faz-se notar que os valores obtidos vão ao encontro dos valores

obtidos pelo NCREP noutros edifícios [6], [7] e aos indicados pelo documento [14].

Nos pontos seguintes faz-se a análise dos parâmetros que condicionam este aumento de rigidez do pavimento.

5.2 Influência das condições de apoio na rigidez

Para tentar perceber a influência das condições de ligação das vigas de pavimento às paredes, em particular o grau de encastramento conferido por estas ligações relativamente à situação de apoio simples, construíram-se modelos numéricos de um pavimento de cada um dos edifícios utilizados como caso de estudo. Procurou-se que estes modelos se aproximassem o mais possível das condições *in situ* de forma a que o grau de encastramento das vigas nas paredes pudesse ser utilizado como parâmetro de calibração no ajuste das frequências de vibração verticais dos pavimentos.

Tendo esse objetivo em mente, o soalho foi simulado através de uma casca ortotrópica, com a espessura e o módulo de elasticidade indicado na Tabela 1; foi considerada a real inércia das tábuas do soalho na direção das tábuas e uma inércia igual a 1/300 da inércia anterior na direção das vigas. Nas extremidades da casca ortotrópica consideraram-se apenas apoios verticais, de forma a simular a restrição ao levantamento conferida pelas paredes de alvenaria de pedra e de tabique ao soalho. O teto de gesso foi incluído no modelo de forma simplificada. Dado o seu baixo módulo de elasticidade quando comparado com o da madeira (Tabela 1), o teto foi integrado na casca ortotrópica do soalho apenas com a sua massa, tendo para isso sido considerado para o material da casca um peso volúmico que homogeneizasse os dois materiais na espessura do soalho (equação 4).

$$\rho_{\text{(casca)}} = (\rho_m \times e_m + \rho_g \times e_g) / (e_m) = 21,8 \text{ kN/m}^3 \quad (4)$$

em que os índices m e g se referem à madeira e ao gesso, respetivamente. A Figura 6 apresenta o modelo numérico tipo do pavimento PVRA_5.

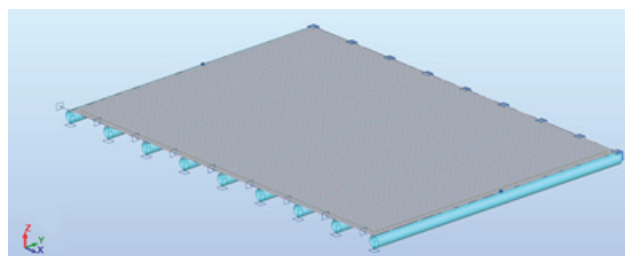


Figura 6 Simulação numérica do pavimento PVRA_5

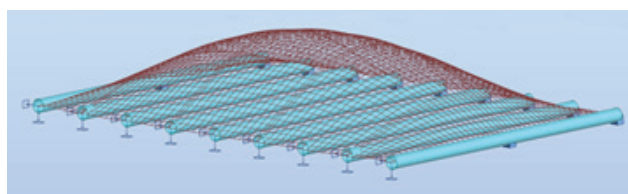
Um fator que influencia a frequência numérica dos pavimentos é o posicionamento do soalho em relação às vigas. Para simular esta situação, foi aplicado um *offset* nas vigas em relação ao soalho. De forma a estimar a influência deste parâmetro, o pavimento PVRA_5 (E1) foi simulado numericamente com e sem *offset* do soalho em relação às vigas, e supondo as vigas simplesmente apoiadas nas extremidades. A Tabela 5 apresenta os valores das 3 primeiras frequências de vibração verticais dos pavimentos, f_1 , f_2 e f_3 , obtidos através dos modelos, mostrando um acréscimo relevante nestes

valores, em particular na frequência do 2.º e 3.º modos de vibração que apresentam uma participação mais importante da flexão do pavimento na direção transversal às vigas, consentâneo com as formas dos modos de vibração, Figura 7.

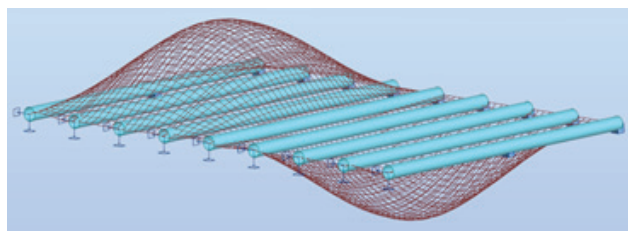
Tabela 5 Frequências de vibração numéricas com e sem aplicação do *offset*

	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
Com <i>offset</i>	9,4	12,3	15,4
Sem <i>offset</i>	7,5 (-20,2%)	8,4 (-31,7%)	10,7 (-30,5%)

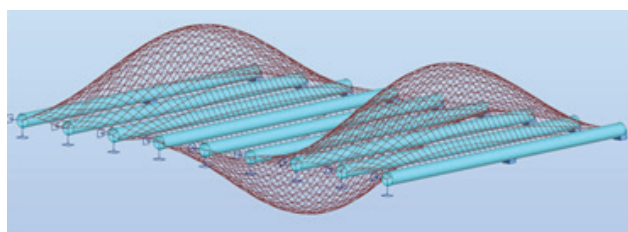
Em seguida o modelo com a inclusão do *offset* do soalho em relação às vigas foi calibrado para as frequências medidas experimentalmente de forma a obter-se um bom ajuste nas 3 primeiras frequências fundamentais, utilizando como parâmetro de ajuste o grau de encastramento das vigas nos apoios em relação à situação de apoio simples. Para esta calibração utilizou-se o pavimento PVRA_5 de E1 que apresentava como frequências experimentais para os primeiro, segundo e terceiro modos de vibração verticais: 12,30 Hz, 14,28 Hz e 16,20 Hz, respetivamente.



(a)



(b)



(c)

Figura 7 Primeiros modos de vibração do pavimento PVRA_5: (a) 1.º, (b) 2.º e (c) 3.º modos verticais

Em seguida o modelo com a inclusão do *offset* do soalho em relação às vigas foi calibrado para as frequências medidas experimentalmente de forma a obter-se um bom ajuste nas 3 primeiras frequências fundamentais, utilizando como parâmetro de ajuste o grau de

encastramento das vigas nos apoios em relação à situação de apoio simples. Para esta calibração utilizou-se o pavimento PVRA_5 de E1 que apresentava como frequências experimentais para os primeiro, segundo e terceiro modos de vibração verticais: 12,30 Hz, 14,3 Hz e 16,2 Hz, respetivamente.

Na Tabela 6 apresentam-se as frequências numéricas obtidas para diferentes graus de encastramento das vigas nos apoios em relação à situação de apoio simples, para o pavimento PVRA_5.

O grau de encastramento que melhor se aproxima dos valores experimentais encontra-se entre 40% e 60%. Estes resultados mostram também que, percentualmente, o grau de encastramento dos apoios influencia mais a frequência do primeiro modo de vibração vertical do que a dos segundo e terceiro modos de vibração.

Tabela 6 Frequências de vibração numéricas *versus* grau de encastramento das vigas nos apoios

Encastramento nos apoios	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
0%	9,4	12,3	15,4
20%	10,2 (8,5%)	12,9 (4,9%)	16,0 (3,9%)
40%	11,3 (20,2%)	13,8 (12,1%)	16,7 (8,4%)
50%	11,9 (26,6%)	14,3 (16,3%)	17,2 (11,7%)
60%	12,6 (34,0%)	14,9 (21,1%)	17,8 (15,6%)
80%	14,4 (53,2%)	16,6 (35,0%)	19,5 (26,6%)
100%	17,2 (83,0%)	19,6 (59,4%)	23,0 (49,4%)

5.3 Influência das condições de ligação viga-tarugo

Com base na informação anterior, os pavimentos PVCP_1 e PVRR_8 dos edifícios E2 e E3, respetivamente, foram também simulados de forma a verificar a pertinência dos valores de encastramento obtidos anteriormente. Em particular, e de forma a também introduzir na calibração o valor da rigidez das ligações entre as vigas e os tarugos, o modelo numérico do pavimento PVCP_1, com 40% de encastramento nos apoios das vigas nas paredes de alvenaria (limite inferior do grau de encastramento detetado na calibração do pavimento PVRA_5), foi calculado para diferentes graus de encastramento nas ligações vigas/tarugos. Os valores das frequências experimentais medidas para os primeiro e terceiro modos de vibração verticais deste pavimento são: 15,1 Hz e 26,4 Hz, respetivamente; não se conseguiu obter o segundo modo de vibração deste pavimento.

A Tabela 7 apresenta os valores das frequências numéricas obtidas em função do grau de encastramento considerado nas ligações tarugos/vigas, na simulação numérica do pavimento PVCP_1. Note-se que, neste caso, e apesar de se ter assumido “apenas” 40% de encastramento das vigas nas paredes, as duas frequências obtidas experimentalmente são inferiores às frequências numéricas obtidas: 17,2 Hz e 33,1 Hz. Pretendeu-se neste caso reajustar as frequências impondo diferentes graus de encastramento na ligação entre os tarugos e as vigas.

Tabela 7 Frequências de vibração numéricas *versus* grau de encastramento da ligação tarugos/vigas

Encastramento (tarugos/ vigas)	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
0%	16,8	19,7	23,2
20%	16,9 (0,6%)	20,2 (2,5%)	24,9 (7,3%)
40%	16,9 (0,6%)	20,7 (5,1%)	26,6 (14,7%)
50%	17,0 (1,2%)	21,0 (6,6%)	27,6 (19,0%)
60%	17,0 (1,2%)	21,3 (8,1%)	28,6 (23,3%)
80%	17,1 (1,8%)	22,1 (12,2%)	30,7 (32,3%)
100%	17,2 (2,4%)	22,9 (16,2%)	33,1 (42,7%)

Os resultados obtidos indicam que, percentualmente, o grau de encastramento das ligações tarugos/vigas altera pouco a frequência do primeiro modo de vibração vertical, e muito as frequências do terceiro modo de vibração. Por outro lado, mostram também que, nas condições da análise, é legítimo assumir-se como percentagem de encastramento nas ligações tarugos/vigas o mesmo valor de 40% assumido na ligação das vigas às paredes.

Com base nesta nova informação, os dois pavimentos PVCP_1 e PVRR_8 foram analisados supondo que ambas as ligações, vigas/parede e tarugos/vigas apresentavam um grau de encastramento de 40%. Os resultados que se apresentam na Tabela 8 mostram e comparam os resultados experimentais e numéricos para os três pavimentos analisados nas condições descritas.

Tabela 8 Resultados experimentais e numéricos supondo 40% de encastramento nas ligações vigas/paredes e tarugos/vigas

Pavimento		f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
PVRA_5	Exp.	12,3	14,2	16,8
	Num.	11,3 (-8,1%)	13,8 (-2,8%)	16,7 (-0,0%)
PVCP_1	Exp.	15,1	-	26,4
	Num.	17,0 (12,6%),	20,7	26,7 (1,1%)
PVRR_8	Exp.	15,9	-	23,7
	Num.	14,1 (-11,3%)	17,0	20,4 (-13,9%)

Como nota final, foi possível verificar que os elementos que mais influenciam o primeiro modo de vibração vertical são as vigas; o segundo e terceiro modos de vibração vertical, por envolverem movimentos transversais às vigas, são particularmente influenciados pelos tarugos e pelo soalho. Assim, em termos exploratórios, podemos afirmar que na calibração dos modelos utilizando a metodologia de identificação dinâmica, as características das vigas e dos apoios extremos devem ser calibradas fazendo uso, tendencialmente, do primeiro modo de vibração vertical, e as das ligações tarugos/vigas e do soalho do segundo e terceiro modos de vibração.

6 Considerações finais

No presente trabalho procura-se estimar as características e o comportamento global de pavimentos de madeira antigos através de metodologias simples de identificação do seu comportamento dinâmico, habitualmente adotadas pelo NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património Lda. [1] na abordagem aos projetos de reabilitação estrutural de edifícios antigos com o objetivo de modelar de forma mais realista os pavimentos existentes de madeira. A pesquisa exploratória analisada no presente trabalho fez parte de um trabalho de investigação, [2], [3], e baseia-se nos resultados obtidos em 3 edifícios localizados no Porto, alvo de projeto de reabilitação estrutural por parte do NCREP.

Através do uso de acelerómetros foram medidas frequências de vibração de um conjunto de pavimentos e estimadas algumas das suas características através do ajuste destes resultados experimentais aos obtidos utilizando programas de análise estrutural. Esta análise permitiu ganhar maior sensibilidade na modelação estrutural dos pavimentos de madeira, analisando o seu comportamento dinâmico de forma mais fidedigna e entrando em linha de conta com as características que mais o condicionam. Permitiu ainda verificar a influência do soalho e das condições de encastramento dos apoios das vigas nas paredes no comportamento dinâmico dos pavimentos, e estimar valores para este encastramento

Relativamente ao primeiro aspeto, a comparação das frequências medidas *in situ* com as frequências obtidas através da fórmula de determinação da frequência de vibração de uma viga simplesmente apoiada permitiu verificar existir uma subestimação da rigidez do pavimento para os exemplos apresentados de, no mínimo, um fator de 2,5, correspondente a uma subestimação da frequência de vibração de um fator de cerca de 1,5, [6], [7]. Note-se que a expressão que determina a vibração de uma viga simplesmente apoiada é comumente utilizada na estimativa da frequência de vibração, ou da rigidez dos pavimentos, dada a dificuldade em estimar, entre outros fatores, a contribuição do soalho, ou dos apoios das vigas nas paredes para essa rigidez.

Por outro lado, as medições *in situ* permitiram ainda, através da calibração de modelos numéricos que se procurou se aproximassem suficientemente da realidade dos pavimentos e onde se incluíram o soalho e tetos, estimar a rigidez dos apoios na ligação das vigas nas paredes. Obtiveram-se nessas calibrações valores próximos de 40% de encastramento das vigas em relação à situação de apoios simples nas paredes, tendo sido estimado um valor de encastramento idêntico para a ligação entre tarugos e vigas.

Para além disso, verificou-se que os elementos que mais influenciam o primeiro modo de vibração vertical são as vigas; o segundo e terceiro modos de vibração vertical são particularmente influenciados pelos tarugos e pelo soalho. Em termos exploratórios podemos afirmar que as características das vigas e dos seus apoios devem ser calibradas fazendo uso, tendencialmente, do primeiro modo de vibração, e as das ligações tarugos/vigas e do soalho, do segundo e terceiro modos de vibração.

Pretende-se no futuro continuar a desenvolver esta metodologia, estimando de forma mais rigorosa as características dos pavimentos, com o intuito final de minimizar as necessidades de intervenção estrutural, contribuindo para a salvaguarda destas estruturas.

Agradecimentos

O trabalho de investigação referido no presente artigo foi parcialmente financiado pelo Projeto POCI-01-0145-FEDER-007457 – CONSTRUCT – Instituto de I&D em Estruturas e Construções, financiado pelo Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FEDER), através do COMPETE2020 – Programa Operacional Competitividade e Internacionalização (POCI).

Referências

- [1] NCREP – Consultoria em Reabilitação do Edificado e Património, Lda. www.ncrep.pt
- [2] Gonçalves, R. – *Avaliação das características mecânicas de pavimentos de madeira antigos*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 2016.
- [3] Coelho, J. – *Avaliação das características mecânicas de pavimentos de madeira antigos utilizando identificação dinâmica*. Dissertação de Mestrado, FEUP, Porto, Portugal, 2016.
- [4] Ilharco, T. et al. – "Avaliação da distribuição de cargas em pavimentos de madeira através de ensaios *in situ*". *Revista Mecânica Experimental*, da APAET, Associação Portuguesa de Análise Experimental de Tensões, ISSN 1646-7078, Vol. 21, pp 1-11, 2012.
- [5] Capuz, R. – *Métodos de ensayos no destructivos para la estimación de las propiedades físicas y mecánicas de las maderas*. Ph.D. thesis, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, Spain, 2003.
- [6] Ilharco, T. et al. – "Assessment of timber floors by means of non-destructive testing methods". *Construction and Building Materials*, 2015.
- [7] COST Action FP1402. State of the art report – Basis of design principles for timber structures. *Vibrations in Timber Buildings*, 2018.
- [8] Teixeira, J. – "Descrição do sistema construtivo da casa burguesa do Porto entre os séculos XVII e XIX. Contributo para uma história da construção arquitectónica em Portugal". FAUP, Porto, Portugal, 2004.
- [9] GeoDas – *Geosig Data Acquisition System v 2.27*. GeoSig, 2014.
- [10] NCREP_0385A0315_Edificios Rua do Almada_ADD – *Projeto de reabilitação estrutural de edifício na Rua do Almada*, Porto, 2015.
- [11] NCREP_0188A0114_Edificio Praça Coronel Pacheco – *Projeto de reabilitação estrutural de edifício na Praça Coronel Pacheco*, Porto, 2014.
- [12] NCREP_0148A1013_Rua do Rosário – *Projeto de reabilitação estrutural de edifício na Rua do Rosário*, Porto, 2013.
- [13] European Committee for Standardization CEN, EN 1995-1-1 – *Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings*, CEN, Belgium, 2004.
- [14] TRADA – *Vibration in timber floors*, TRADA Technology Ltd, Hughenden Valley, High Wycombe, Bucks, 1998.

