

AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CARGA EM PAVIMENTOS DE MADEIRA ATRAVÉS DE ENSAIOS IN SITU

Ilharco, T.¹; Guedes, J.²; Costa, A.³; Arêde, A.⁴; Paupério, E.⁵

¹ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

² Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

³ Secção Autónoma de Engenharia Civil, Universidade de Aveiro

⁴ Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

⁵ Instituto da Construção, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto



RESUMO

Com a perspectiva de conhecer o comportamento estrutural de pavimentos antigos de madeira, o Núcleo de Conservação e Reabilitação de Estruturas e Património (NCREP), integrado na Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), tem vindo a realizar campanhas de ensaios in situ e laboratoriais. Uma dessas campanhas consistiu na realização de ensaios de carga num pavimento de madeira de um edifício do início do séc. XX da cidade do Porto, com o objectivo de avaliar o seu comportamento quando submetido a cargas verticais, assim como a função dos seus vários elementos estruturais, vigas, tarugos e soalho. Através da aplicação de cargas verticais numa área localizada do pavimento procurou-se analisar a forma como os tarugos e o soalho materializam a distribuição de carga entre vigas. Esta distribuição, contabilizada no Eurocódigo 5 através do parâmetro K_{sys} , é um aspecto importante do comportamento dos pavimentos de madeira. Os resultados obtidos no ensaio de carga são ainda confrontados com os resultados de simulações numéricas de modo a concluir sobre a qualidade destas análises na simulação dos aspectos comportamentais dos pavimentos de madeira.

1- INTRODUÇÃO

No complexo processo de reabilitação do edificado, em particular em zonas antigas como é o caso da cidade do Porto, a conservação dos pavimentos antigos de madeira afigura-se como um aspecto essencial. Estas estruturas são normalmente constituídas por vigas de madeira de secção circular, (diâmetros variáveis entre 0,15m e 0,40m), espaçadas de cerca de 0,50m, tarugadas, geralmente apoiadas nas empenas e por isso orientadas paralelamente à fachada principal. Por vezes são constituídas por vigas com secção rectangular, denotando de

intervenções de substituição de vigamentos originais efectuadas a partir do início do séc. XX. As espécies mais utilizadas nas estruturas dos pavimentos em Portugal eram o castanho, o carvalho, o pinho e o eucalipto.

Os problemas que estas estruturas apresentam resultam maioritariamente de ataques de agentes bióticos (insectos e fungos xilófagos), do contacto com água, ou de deficientes disposições construtivas, podendo resultar em estruturas com excessiva deformabilidade e amplitude de vibração ou, em último caso, na rotura de alguns dos seus elementos estruturais. A

existência destas situações, ou o desconhecimento do real comportamento das estruturas de madeira, leva a que num grande número de intervenções os pavimentos de madeira sejam substituídos, em detrimento da sua manutenção, ou reabilitação, com evidentes perdas para a identidade cultural, construtiva e histórica dos edifícios e da cidade.

Na realidade, é possível melhorar o comportamento dos pavimentos de madeira, adequando-o aos padrões de conforto actuais, através, por exemplo, de acções de intervenção que reduzam os níveis de deformação e de vibração que apresentam. Para isso é fundamental conhecer as características dos pavimentos, nomeadamente qual o papel dos tarugos e do soalho na distribuição de cargas entre vigas, contabilizada no Eurocódigo 5 (CEN, 2004) através do parâmetro K_{sys} , e no aumento de rigidez.

Tendo em vista a avaliação destas características o NCREP da FEUP realizou uma campanha de ensaios *in situ* e laboratoriais no pavimento de madeira de um edifício da cidade do Porto do início do séc. XX. Em particular, foi realizado um conjunto de ensaios de carga num troço localizado do pavimento do edifício, cujos resultados e análise se apresentam neste trabalho.

2- DESCRIÇÃO DO EDIFÍCIO E DO PAVIMENTO EM ESTUDO

O edifício alvo deste estudo situa-se na cidade do Porto; foi construído em 1916 e apresenta pavimentos e cobertura de madeira e paredes resistentes de alvenaria de granito com espessuras de cerca de 0,25m, Fig. 1.

Apesar do edifício apresentar uma grande largura de fachada (cerca de 11,5m), o esquema estrutural dos pavimentos é muito simples, consistindo em dois conjuntos de vigas de secção circular, tendo como apoios as paredes de empena e uma parede interior, ambas em alvenaria de granito.



Fig. 1 – Fachada principal do edifício.

Estes pavimentos apresentam semelhanças com a generalidade dos pavimentos dos edifícios antigos da cidade do Porto que possuem, normalmente, vãos entre 4,0 e 7,0m e se encontram apoiados nas paredes de empena. Na Fig. 2 observa-se o pavimento ensaiado e indicam-se as paredes de apoio das vigas.



Fig. 2 – Esquema do pavimento ensaiado.

As vigas apresentam diâmetro variável entre 0,15 e 0,20m, têm cerca de 5,5m de comprimento e encontram-se espaçadas de 0,40m a 0,60m. De referir que a grande heterogeneidade dos diâmetros e a falta de linearidade das vigas dificultaram consideravelmente a análise do pavimento. Análises laboratoriais permitiram concluir tratar-se de madeira de castanho (*Castanea sativa* Mill). A efectuar o seu contraventamento existem tarugos, com diâmetro de cerca de 0,10m, espaçados de aproximadamente 2,0m, e uma camada de soalho de pinho constituído por tábuas com 13,0cm de largura e cerca de 2,7cm de espessura.

3- O SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO DE CARGA EM PAVIMENTOS DE MADEIRA

Observam-se com frequência pavimentos que, mesmo apresentando graves danos estruturais, não sofrem colapsos integrais devido ao facto da sua estrutura ser consideravelmente mais complexa do que se admite nas análises teóricas habituais. De facto, o efeito estrutural proporcionado pelo soalho pregado, pelos tectos (quando existem) e pelos tarugos pode ser preponderante no comportamento do pavimento, sobretudo pela mobilização do efeito de membrana ou de diafragma (Appleton, 2003), que se traduz pelo designado factor de distribuição da carga, K_{sys} .

Segundo Blass (1995), o factor de distribuição de carga aumenta a resistência global do pavimento ao ter em conta dois efeitos principais. Por um lado a reduzida probabilidade de um elemento mais fraco ser posicionado num local em que as tensões sejam particularmente altas, e por outro, o facto dos elementos mais rígidos receberem uma maior percentagem da carga aplicada. Este efeito corresponde na prática a uma homogeneização do pavimento, permitindo que as cargas sejam repartidas de forma proporcional à sua rigidez e por isso, à sua resistência. Por estas razões, Blass (1995) considera que o efeito de distribuição da carga compensa, até um certo nível, o efeito da variabilidade material, uniformiza as deformações, reduz a carga absorvida por elementos mais flexíveis e aumenta-a em elementos mais rígidos.

Quando os elementos estruturais apresentam comportamento não linear, ou seja, se encontram submetidos a cargas próximas da rotura, o efeito da distribuição de carga acontece da mesma forma. De facto, se a rigidez do elemento diminui devido a fendilhação ou a deformações plásticas, a carga é redistribuída pelo sistema e a viga parcialmente degradada é capaz de contribuir para a capacidade de carga do pavimento (Blass, 1995). Este autor menciona um estudo de (Foschi et al., 1989) que concluiu que o factor de distribuição de carga é relativamente

insensível às variações das condições de apoio, à secção, número e espaçamento das vigas e ao rácio entre cargas permanentes e sobrecargas. Por sua vez, (Blass, 1995) determinou, para um pavimento comum, um factor de distribuição de carga de $K_{sys} = 1,15$, muito próximo do definido pelo EC5 que é de 1,1, referindo ainda que para o aumentar é necessário aumentar o rácio da rigidez do sistema de distribuição em relação à rigidez média dos elementos do pavimento.

4- ENSAIO DE CARGA

4.1 - Introdução

Na sequência do ponto anterior, os ensaios de carga realizados tem por objectivo avaliar o comportamento dos pavimentos de madeira quando submetidos a cargas verticais, analisando em particular a capacidade de distribuição de carga e que permite que as acções verticais impostas sejam repartidas pelas várias vigas que compõem o pavimento. Assim, procura-se estimar a eficácia do tarugamento e do soalho na distribuição de esforços e na diminuição das deformações nos pavimentos, ou seja, a forma como os tarugos e o soalho contribuem para a distribuição da carga entre vigas.

4.2 - Setup do ensaio

O ensaio de carga consistiu em isolar uma faixa de pavimento com 3,5m de largura, constituído por 7 vigas, e submetê-lo a um carregamento vertical monotónico aplicado em 2 alinhamentos posicionados na zona central e simetricamente em relação ao meio vão. Foi escolhida uma faixa que se encontrasse em bom estado de conservação e que foi isolada através do corte com serra do soalho e dos tarugos, de forma a desliga-la do restante pavimento e de zonas mais degradadas. A faixa passou assim a materializar um pavimento apoiado apenas em dois lados, o que nem sempre corresponde à realidade, já que nalgumas situações os pavimentos se encontram apoiados em 4 lados, com o

soalho e as vigas extremas ligados às fachadas.

A carga foi aplicada através de três reservatórios plásticos empilhados com capacidade de cerca de 600 litros cada um, perfazendo um total de aproximadamente 1,80 toneladas de carga, Fig. 3, posicionados na zona central da faixa de pavimento ensaiada. Os reservatórios foram pousados no pavimento, aplicando 2 cargas de cutelo transversais às vigas numa extensão igual à dimensão transversal dos reservatórios (1,1m) e separadas de uma distância igual à dimensão longitudinal do reservatório (1,0m).



Fig. 3 – Reservatórios utilizados para o ensaio.

Foram instaladas mangueiras ligadas à rede geral de abastecimento de água, tendo sido colocado à entrada dos reservatórios um caudalímetro para controlo e registo do volume de água entrado ou seja, da carga a actuar sobre o pavimento. Foi ainda montado um sistema de descarga no fundo dos reservatórios para permitir o seu rápido esvaziamento. Foram medidas as deformações verticais nas 5 vigas centrais com recurso a 13 LVDTs, tal como se apresenta na Fig. 4 e na Fig. 5.

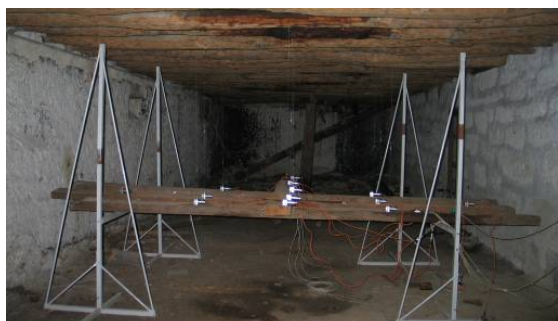


Fig. 4 – Estrutura montada sob o pavimento para colocação dos LVDT.

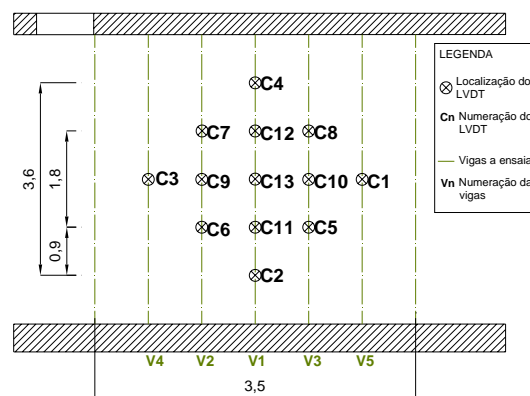


Fig. 5 – Planta da faixa ensaiada com a localização dos LVDTs.

Tendo em vista os objectivos referidos, o ensaio decorreu em 3 fases, correspondentes ao pavimento em 3 situações distintas: Ensaio E1 - pavimento tal como se encontrava *in situ*, com tarugos e soalho, Fig. 6; Ensaio E2 - pavimento sem tarugos, ou seja, só com o soalho, Fig. 7; Ensaio E3 - pavimento sem tarugos e soalho i.e., com as vigas isoladas, Fig. 8.



Fig. 6 – Ensaio 1, pavimento com tarugos e soalho.



Fig. 7 – Ensaio 2, pavimento sem tarugos e com soalho.



Fig. 8 – Ensaio 3, vigas isoladas.

Para se conseguir proceder à sequência do ensaio E1 para o ensaio E3, o

carregamento foi efectuado de modo a que não fosse ultrapassado o comportamento elástico da estrutura. A resposta em regime último foi analisada à posteriori através de ensaios laboratoriais em vigas do mesmo pavimento realizados segundo a norma EN408 (CEN, 2003), mas que não vão ser analisados no âmbito deste trabalho.

Através de medições realizadas em vários pontos das 7 vigas integrantes da faixa de pavimento (V1 a V7) foi estimado um valor médio para o diâmetro e para os espaçamentos das vigas. Verificou-se uma grande falta de homogeneidade e, acima de tudo, de linearidade geométrica das vigas que contribuiu para uma grande variação dos espaçamentos, Fig. 9.

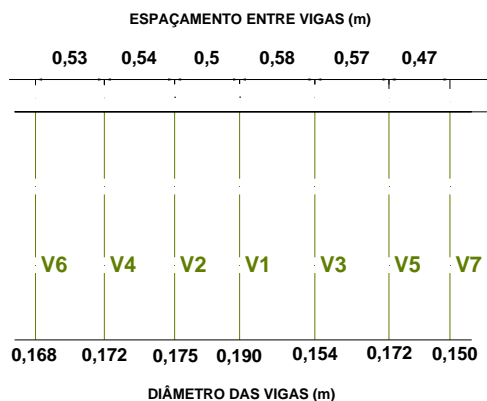


Fig. 9 – Diâmetros e espaçamentos médios das vigas ensaiadas.

Tal como se apresenta na Fig. 5, nos dois primeiros ensaios (E1 e E2) monitorizou-se a viga central (V1) em 5 pontos (aos sextos, aos terços e ao meio vão), as duas vigas mais próximas da central (V2 e V3) em 3 pontos (aos quartos e ao meio vão) e as outras duas laterais (V4 e V5) num ponto (meio vão). As vigas mais afastadas (V6 e V7) não foram monitorizadas. No terceiro ensaio (E3), a inexistência de soalho restringiu o carregamento a apenas as 2 vigas centrais (V1 e V2), tendo-se monitorizado apenas essas 2 vigas e em 5 pontos cada (aos sextos, aos terços e ao meio vão).

4.3 - Resultados obtidos

Para cada ensaio realizado foram registados em contínuo os valores de leitura dos LVDTs. A análise dos

resultados, em particular das curvas força (carga) instalada vs deslocamento medido, mostra um comportamento linear sem inflexão i.e., sem indícios de tendência para uma rotura imediata, embora seja expectável uma rotura frágil sem “patamar de deformação plástica”, comportamento típico de estruturas de madeira quando submetidas a esforços de flexão / tracção.

Através da utilização da expressão da Resistência dos Materiais (1) que traduz uma situação semelhante à do ensaio de carga e relaciona a flecha a meio vão de uma viga com duas cargas pontuais F aplicadas de forma simétrica, e assumindo um módulo de elasticidade constante para todas as vigas de madeira, foi possível analisar a percentagem de carga que foi repartida pelas diferentes vigas. Com esta informação foram analisados os resultados dos dois ensaios de carga iniciais, de forma a determinar qual o real efeito de transmissão de cargas entre as vigas, bem como qual a função dos tarugos e do soalho nesta transmissão. Apresenta-se em seguida a equação (1):

$$E_{m,g} = \frac{F \times a \times (2L^2 - 4a^2)}{24I \times u} \quad (1)$$

representando $E_{m,g}$ o módulo de elasticidade global em flexão, L o comprimento do elemento entre os dois apoios, u a deformação a meio vão equivalente à carga F , I a inércia do elemento e a a distância entre a carga e o apoio mais próximo.

Ensaio E1 – com soalho e tarugos

No ensaio E1 a viga V1 (central) apresentou uma flecha máxima a meio vão de 31,2mm, as duas vigas mais próximas desta, V2 e V3, apresentaram flechas de 22,4mm e 25,8mm e as mais afastadas, V4 e V5, flechas de 9,6mm e 13,3mm, respectivamente. Mostra-se na Fig. 10 o gráfico carga vs deslocamento das 5 vigas ensaiadas.

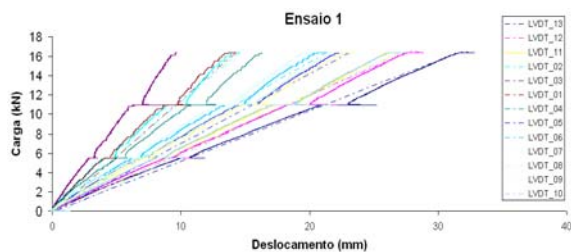


Fig. 10 – Gráfico carga-deslocamento para as 5 vigas do ensaio de carga 1.

Verifica-se através do gráfico que as vigas exibem um comportamento linear. Os patamares que se observam próximo dos valores de carga de 6,0kN e 12,0kN correspondem à perturbação causada pela passagem dos técnicos para mudança da posição da mangueira nos reservatórios que simulam a carga. Verificou-se a quase total recuperação das vigas de madeira na descarga (curvas a traço-ponto), com deformações residuais de cerca de 0,3mm, depois de terem atingido os 31mm (1% de deformação residual).

Conhecendo então as deformações das vigas e assumindo que apresentam igual módulo de elasticidade, estimou-se, através da equação (1), o valor de carga ($F/E_m.g$) necessária para provocar as referidas deformações em cada uma das vigas e, conseqüentemente, a % de carga que na hipótese referida é resistida por cada viga, assumindo, simplificada, que apenas as 5 vigas centrais monitorizadas sofrem deformações relevantes, Tabela 1.

Tabela 1 – Contribuição das várias vigas do pavimento no ensaio de carga 1.

Viga	Diâmetro (mm)	u (mm)	% carga por viga
V1	190	31,22	42,3%
V2	175	22,37	21,8%
V3	154	25,80	15,1%
V4	172	9,55	8,7%
V5	172	13,31	12,1%

É interessante verificar que a viga central recebe apenas 42% da carga aplicada, sendo a restante repartida pelas outras vigas, sendo que as vigas V2 e V3 recebem entre 22% e 15% da carga e as vigas V4 e V5 recebem cerca de 10% da carga. Esta distribuição da carga representa o factor de distribuição de carga conferido pelo soalho e pelos tarugos e que contribui

para um aumento da rigidez e da capacidade resistente local do pavimento, diminuindo consideravelmente o nível de esforço da viga carregada.

Ensaio 2 – com soalho sem tarugos

No ensaio E2 a viga V1 (central) apresentou uma flecha a meio vão de 31,8mm, as duas vigas mais próximas, V2 e V3, apresentaram flechas de 23,5mm e 25,8mm e as mais afastadas, V4 e V5, flechas de 10,3mm e 12,6mm, respectivamente, Fig. 11.

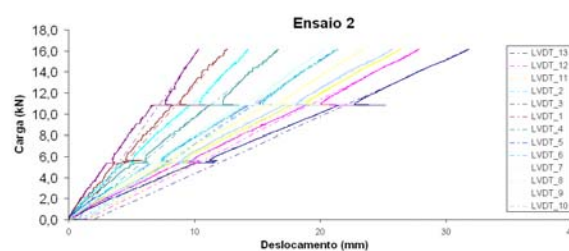


Fig. 11 – Gráfico carga-deslocamento para as 5 vigas do ensaio de carga 2.

Mais uma vez é possível verificar que as vigas exibem um comportamento linear e que recuperam quase na totalidade as deformações na descarga. No entanto, neste caso a percentagem de deformação residual aumentou para cerca de 6%, uma vez que foram de cerca de 2,0mm, depois de se terem atingido 31,8mm, resultando numa menor recuperação do que a que se deu no ensaio 1. Tal como sucedeu nesse ensaio, verifica-se no gráfico alguma perturbação devida à passagem dos técnicos para mudança da posição da mangueira nos reservatórios que simulam a carga.

Mais uma vez, conhecendo as deformações das vigas e assumindo igual módulo de elasticidade, foi possível estimar qual a carga necessária para provocar as referidas deformações em cada viga. Os valores obtidos encontram-se na Tabela 2.

Verifica-se que a viga central V1 recebe apenas 42% do valor da carga aplicada, sendo a restante carga repartida pelas restantes vigas; as vigas V2 e V3 recebem entre 22% e 15% da carga e as

vigas V4 e V5 recebem cerca de 10% da carga.

Tabela 2 – Contribuição das várias vigas do pavimento no ensaio de carga 2.

Viga	Diâmetro (mm)	u (mm)	% carga por viga
V1	190	31,83	42,3%
V2	175	23,45	22,4%
V3	154	25,79	14,8%
V4	172	10,33	9,2%
V5	172	12,58	11,2%

Conclui-se que as cargas associadas a cada viga foram idênticas às do ensaio E1 ou seja, a remoção dos tarugos não implicou mudanças na distribuição de carga entre as vigas, podendo-se afirmar que neste caso o soalho é o principal responsável por esta distribuição. De facto, o documento TRADA (2005) refere que uma melhoria significativa das deformações estáticas é conseguida com mais sucesso através da instalação de uma camada mais espessa e rígida de soalho do que com tarugos adicionais.

Neste ponto convém referir que as próprias características dos tarugos do pavimento em estudo, com secções variáveis e reduzida linearidade geométrica, bem como a fraca ligação existente entre estes elementos e as vigas de secção circular, levaram a que não contribuíssem significativamente para a melhoria do comportamento deste pavimento para cargas verticais, tendo neste âmbito uma importância reduzida. Ainda assim, comparando o ensaio E2 com o ensaio E1, verifica-se que a presença dos tarugos no ensaio E1 permitiu que, em média, as deformações das vigas diminuíssem entre 2 e 8%.

Ensaio 3 – duas vigas isoladas

No ensaio E3 a carga foi centrada na 2 vigas V1 e V2 isoladas. A carga máxima aplicada foi de 1500kg, ou seja, cerca de 7,4kN em cada viga, tendo-se chegado a uma deformação de 36,5mm na viga V1 e de 67,1mm na viga V2. Esta diferença dever-se-á ao maior diâmetro da viga V1 (19cm) em relação à viga V2 (17,5cm) e à inexistência de um sistema de distribuição de carga (soalho e tarugos) que permitisse repartir a carga proporcionalmente à

rigidez das vigas. De igual modo, para o mesmo valor de carga total imposta, o ensaio E3 resulta numa maior deformação das vigas V1 e V2 em relação aos ensaios E1 e E2. Na Fig. 12 apresenta-se o gráfico carga vs deslocamento das duas vigas ensaiadas que ilustra este resultado.

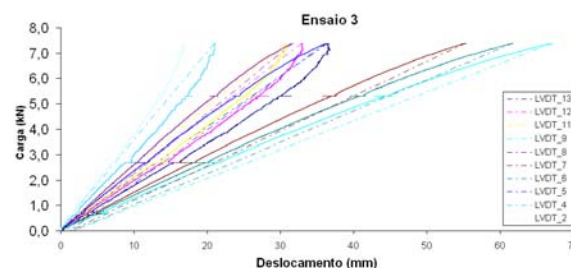


Fig. 12 – Gráfico carga-deslocamento para as 2 vigas do ensaio de carga 3.

Mais uma vez, verifica-se que o comportamento das vigas é perfeitamente linear elástico, com recuperação quase total das deformações (0,6mm de deformação residual para uma deformação total de 51,8mm, ou seja, cerca de 1%).

Importa referir que o facto de nos dois primeiros ensaios de carga a viga central receber menos de metade do valor da carga total aplicada indica que o factor K_{sys} poderá ser eventualmente maior do que o 1,1 considerado no EC5. A quantificação rigorosa deste factor, em particular para pavimentos antigos de madeira, poderá ser de grande utilidade para a realização de intervenções de reabilitação cuidadas, permitindo tirar o melhor partido das potencialidades dos pavimentos e manter algumas destas estruturas que estariam à partida destinadas a ser substituídos. Nesse sentido, procurar-se-á, em futuros projectos quantificar este factor através de ensaios em pavimentos de madeira semelhantes ao aqui estudado a realizar no Laboratório de Engenharia Sísmica e Estrutural (LESE) da FEUP.

5- MODELO NUMÉRICO

Foi construído um modelo numérico do pavimento com o programa Robot Millenium (2004) com o objectivo de comparar os resultados obtidos por via numérica com os obtidos por via

experimental. O modelo foi definido usando as características geométricas da estrutura, tendo-se considerado elementos lineares sem empenos e as dimensões médias reais das vigas, soalho e tarugos do pavimento. Na figura seguinte pode-se observar o modelo numérico construído para o ensaio E1.

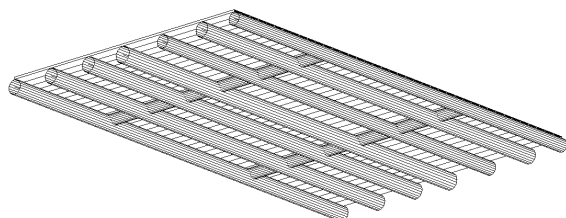


Fig. 13 – Modelo numérico do pavimento com tarugos e soalho.

As características mecânicas adoptadas para os elementos de madeira tiveram em consideração os resultados obtidos em ensaios à flexão de vigas de madeira retiradas do mesmo pavimento e realizados no LESE (Ilharco, 2008). Os parâmetros usados foram a massa volúmica e o módulo de elasticidade da madeira, respectivamente iguais a 650kg/m³ e 7,9GPa. Para as tábuas do soalho, em madeira de pinho, foram consideradas características de uma classe resistente baixa (C14), por se desconhecer as suas características reais.

A análise conjunta dos resultados numéricos e experimentais permitiu observar algumas diferenças. Na viga central V1 o valor obtido através do modelo numérico é ligeiramente inferior ao obtido experimentalmente, rondando a diferença os 15%. Já os valores obtidos para as vigas V2 e V3 são praticamente iguais aos experimentais (diferenças de cerca de 5%). No entanto, para as duas vigas extremas (V4 e V5), esta situação altera-se radicalmente, com o modelo numérico a apresentar deformações muito superiores aos verificados *in situ*: diferenças de 100% e 56% para as vigas V4 e V5 respectivamente, Fig. 14.



Fig. 14 – Comparação das deformações numéricas e experimentais a meio vão das 5 vigas centrais obtidas no ensaio E1.

A consideração de valores de diâmetros médios das vigas na modelação, sendo que os diâmetros das vigas apresentam variações ao longo do seu comprimento, diminuindo normalmente de uma extremidade para a outra, e a adopção do mesmo módulo de elasticidade para as várias vigas poderá contribuir para as diferenças observadas. Em particular, os resultados denotam uma participação real do soalho e dos tarugos menor do que a traduzida no modelo numérico. O facto de no modelo a ligação entre os vários elementos construtivos, vigas, tarugos e soalho ser perfeitamente contínua (o que não acontece na realidade), confere à estrutura uma rigidez e um comportamento conjunto sobreavaliados.

A adopção de um módulo de elasticidade para o soalho (7,0GPa – classe C14) não avaliado experimentalmente poderá também ter contribuído para as referidas diferenças. Para além disso, no modelo numérico as tábuas foram consideradas com comprimento igual à largura da faixa do pavimento (3,5m), quando na realidade existem com menor comprimento. O efeito de junta existente na ligação entre duas tábuas do mesmo alinhamento não é assim reproduzido no modelo, fazendo com que este apresente um comportamento mais rígido do que *in situ*, sobreavaliando o potencial do soalho na distribuição das cargas. De forma a influência destes dois aspectos, criaram-se modelos com rótulas nas barras que simulam o soalho: num modelo criaram-se rótulas desencontradas de 2,5m em 2,5m, ou seja, simularam-se tábuas de soalho com esse comprimento; noutro modelo, e de forma a analisar uma situação limite, criaram-se rótulas em todos os nós de ligação das tábuas às vigas. Finalmente, reduziu-se bastante o valor do módulo de

elasticidade das tábuas de modo a analisar também a influência deste parâmetro na resposta numérica. Na Tabela 3 e na Fig. 15 apresentam-se os resultados obtidos através destes diferentes modelos numéricos.

Tabela 3 – Comparação entre deformações experimentais e modelos numéricos. Ensaio 1

Vigas	Deformações (mm)				
	V4	V2	V1	V3	V5
Experimental	9,55	22,37	31,22	25,8	13,31
Modelo inicial	19	22,8	25,7	23,8	20,7
Modelo Rótulas parciais	18,1	22,7	26,6	24,2	20,9
Modelo Rótulas totais	0	17	70,3	34,2	0
Modelo E _{soalho} baixo	17,2	24	29,8	25,9	19,9

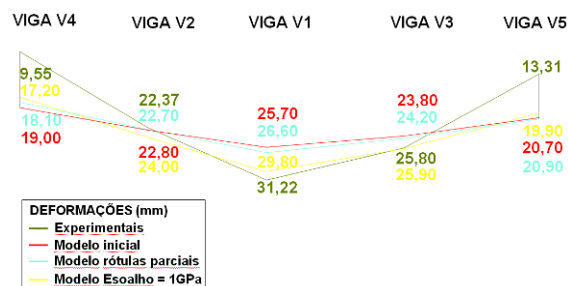


Fig. 15 – Comparação das deformações a meio vão das vigas obtidas no ensaio E1 para as várias modelações numéricas.

Os resultados permitem concluir que a diminuição no modelo do módulo de elasticidade do soalho para um valor fictício (extremamente baixo) continua a revelar uma sobreavaliação das deformações das vigas extremas, V4 e V5. Para além disso, o modelo com rótulas parciais, ou seja, que simula a existência de juntas a cada 2,5m das tábuas do soalho, embora com uma ligeira melhor aproximação aos valores experimentais, produz resultados muito semelhantes aos do modelo inicial. Finalmente o modelo com rótulas na totalidade das barras a simular as tábuas do soalho (que constitui uma situação limite) responde com deformações muito elevadas na viga central (V1), sendo que as vigas extremas deixam de receber carga, ou seja, neste caso o soalho só funciona como elemento de distribuição de carga nas vigas centrais. Concluindo, a situação real do pavimento

andarà mais próxima do modelo com rótulas parciais. No entanto, mesmo este modelo apresenta grandes diferenças em relação ao comportamento real do pavimento.

Menciona-se ainda que no modelo realizado para simular o ensaio E2 os resultados obtidos foram semelhantes aos do modelo do ensaio E1. Relativamente ao modelo efectuado para o ensaio E3, por consistir num ensaio em vigas isoladas, apresentou resultados bastante próximos dos experimentais.

Finalmente, estes resultados mostram que, apesar de se tratar de estruturas aparentemente simples, a utilização de modelos numéricos na simulação do comportamento de pavimentos antigos de madeira apresenta algumas dificuldades decorrentes, essencialmente, da complexidade da geometria irregular dos elementos estruturais e, em particular, das ligações que as vigas, soalho e tarugos apresentam *in situ*. Ainda assim, se bem calibrados, estes modelos poderão ser um bom auxílio para a análise deste tipo de estruturas.

6- CONCLUSÕES

De forma a contribuir para a preservação de pavimentos antigos de madeira, o NCREP da FEUP realizou uma campanha de ensaios *in situ* e laboratoriais num pavimento de madeira de um edifício do início do séc. XX na cidade do Porto (Ilharco, 2008). Estes ensaios permitiram conhecer melhor o comportamento de pavimentos de madeira antigos submetidos a cargas verticais, nomeadamente estudar a influência dos tarugos e do soalho na distribuição das cargas pelas vigas do pavimento.

Através da aplicação de cargas verticais numa faixa localizada do pavimento, efectuaram-se 3 ensaios em condições estruturais distintas: E1 considerando o pavimento com tarugos e soalho, E2 considerando o pavimento sem tarugos e com soalho e E3 considerando as duas vigas centrais isoladas. Esta sequência de ensaios permitiu avaliar a

eficácia do tarugamento e do soalho na distribuição de esforços e na diminuição das deformações nos pavimentos, ou seja, a forma como os tarugos e o soalho materializam a distribuição de carga entre vigas. Esta distribuição, contabilizada no Eurocódigo 5 (CEN, 2004) através do factor K_{sys} , é um aspecto importante do comportamento dos pavimentos de madeira.

Os resultados dos ensaios mostraram que, apesar do carga ter sido aplicada maioritariamente sobre a viga central da faixa de pavimento ensaiada, a viga central recebeu apenas cerca de 40% do valor total da carga, encontrando-se a restante carga dividida pelas outras vigas: as duas vigas mais próximas da central recebem cerca de 20% cada e as duas mais distantes cerca de 10% cada. Foi possível concluir que o soalho tem uma grande participação na distribuição da carga, ao contrário dos tarugos que neste pavimento apresentaram eficácia reduzida na distribuição de cargas verticais. De facto, neste pavimento a remoção dos tarugos não originou mudanças relevantes na distribuição de carga entre as vigas, situação que poderá também estar relacionada com as próprias características dos tarugos e com a sua fraca ligação que apresentavam às vigas de madeira. Ainda assim, estes elementos permitiram, em regra, uma redução das deformações das vigas da ordem de 5%. De qualquer modo, a realização de mais ensaios permitirá ser mais conclusivo em relação a este aspecto.

No ensaio E3, ou seja, com duas vigas isoladas, foi notória a falta de um sistema de distribuição de carga que permitiria o trabalho conjunto das vigas e a respectiva transmissão da carga da viga com menor rigidez para a viga com maior rigidez. A viga de secção inferior apresentou uma deformação de cerca do dobro da apresentada pela viga mais rígida.

Refere-se ainda que o facto de nos dois primeiros ensaios de carga a viga central receber menos de metade do valor da carga total aplicado, indiciando que o factor K_{sys} poderá ser eventualmente maior do que o 1,1 considerado pelo EC5. A sua quantificação rigorosa, em particular para

pavimentos antigos de madeira, poderá ser de grande utilidade para a realização de intervenções de reabilitação cuidadas, permitindo tirar maior partido das potencialidades dos pavimentos e manter alguns que estariam à partida destinados a substituição. Nesse sentido procurar-se-á, em futuros projectos, fazer uma estimativa deste factor, nomeadamente através de ensaios laboratoriais no LESE em pavimentos de madeira semelhantes ao agora ensaiado.

Conclui-se assim que a existência de ligações eficazes entre as vigas e os restantes elementos estruturais, em particular o soalho, é fundamental para um funcionamento correcto dos pavimentos de madeira, permitindo uma maior homogeneização de esforços nas vigas e um menor nível de deformação. O mesmo se aplica aos tarugos que, no caso dos pavimentos antigos de madeira com elementos de secções transversais circulares, apresentam, aparentemente, uma reduzida eficácia na distribuição de cargas verticais. De qualquer forma, pelo seu posicionamento no plano das vigas, assume-se que mesmo nestes casos os tarugos terão sempre uma maior eficácia na distribuição das cargas horizontais nos pavimentos.

Finalmente, através dos dados obtidos em ensaios realizados, criou-se um modelo numérico do pavimento, tendo sido posteriormente realizado o seu melhoramento com o objectivo de se obter uma ferramenta útil para a simulação numérica de estruturas semelhantes. As diferenças de deformações entre o modelo e a realidade foram reduzidas para as três vigas centrais, mas consideráveis para as duas vigas extremas que apresentam deformações numéricas mais elevadas do que as experimentais. Concluiu-se existirem vários factores que podem estar na origem destas diferenças, sendo um dos principais a dificuldade em simular correctamente a ligação entre os vários elementos construtivos, vigas, tarugos e soalho. Outro factor com um peso importante está relacionado com a consideração, no modelo, de tábuas do soalho com comprimento igual à largura

da faixa do pavimento (3,5m). O efeito da junta existente na ligação entre cada 2 tábuas do mesmo alinhamento é importante. A sua não consideração rigidifica bastante o pavimento resultando em deformações subestimadas.

Foram criados vários modelos numéricos para analisar a importância destes factores, tendo-se concluído que em qualquer um deles se mantêm diferenças importantes em relação aos resultados *in situ*. No entanto, se bem calibrados, estes modelos poderão ainda assim ser um importante auxílio na análise deste tipo de estruturas.

7- REFERÊNCIAS

- Appleton, J. 2003. Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e tecnologias de intervenção. Amadora, Edições Orion.
- Blass, H. J. 1995. Load Sharing. Timber Engineering -Step 1.Lecture B16. Holanda, Almere Centrum Hout.
- Branco, J., P. Cruz, et al. (2004). Avaliação do comportamento de vigas antigas de pavimento a reutilizar no Museu da Indústria de Chapelaria. CIMAD 04. 1º Congresso Ibérico. A madeira na construção, Guimarães, Universidade do Minho.
- EN 338: EUROPEAN STANDARD. 2003. Structural timber – Strength classes." Office for Official Publications of the European Communities. Brussels, Belgium. CEN.
- EN 408: EUROPEAN STANDARD. 2003. Timber structures - Structural timber and glued laminated timber - Determination of some physical and mechanical properties." Office for Official Publications of the European Communities. Brussels, Belgium. CEN.
- EN 1995-1-1: EUROPEAN STANDARD. 2004. Eurocode 5: Design of timber structures – Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings. CEN.
- Foschi, R. O., et al. 1989. Reliability-Based Design of Wood Structures. Structural Research Series, Report No. 34. Vancouver, Canada, Department of Civil Engineering, University of British Columbia
- Ilharco, T. 2008. Pavimentos de madeira em edifícios antigos. Diagnóstico e intervenção estrutural. Tese de Mestrado em Reabilitação do Património Edificado. FEUP, Porto.
- Robot Millennium V.17.5 User's Manual, Robobat. 2004.
- TRADA. 2005. Strutting in timber floors. Hughenden Valley, High Wycombe, Bucks, TRADA Technology Ltd.