

CODE 309

CARACTERIZAÇÃO DE ESTRUTURAS DE PAVIMENTOS DE MADEIRA NO CENTRO HISTÓRICO DE VISEU

Raimundo, Ana¹; Negrão, João²; Vicente, Romeu³; Ferreira, Tiago⁴

1: Aluna de Mestrado

Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra
e-mail: anaraimund@hotmail.com

2: PhD

Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra
e-mail: jhnegrao@dec.uc.pt

3: PhD

RISCO, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Aveiro
e-mail: romvic@ua.pt

4: PhD

ISISE, Departamento de Engenharia Civil da Universidade do Minho
e-mail: tmferreira@civil.uminho.pt

PALAVRAS CHAVE: Estruturas de madeira; Pavimentos de madeira; Ensaio de Carga; Centro Histórico de Viseu.

RESUMO

Os Centros Históricos possuem património histórico, cultural, arquitetónico e construtivo que deve ser preservado. O valor do conjunto edificado é o que efetivamente cria valor patrimonial em relação aos edifícios individualmente, pelo que todas as intervenções de reabilitação nas construções de uma área urbana devem estar sujeitas a princípios básicos comuns. Este trabalho insere-se numa campanha de levantamento, proteção e valorização do património do Centro Histórico de Viseu. Com o objetivo de caracterizar os pavimentos de madeira de um edifício antigo. Realizou-se uma campanha experimental de diagnóstico e inspeção, complementada com um ensaio de carga. Este ensaio efetuou-se com o carregamento vertical e pontual nas vigas do pavimento, por se considerar esta modalidade mais adequada a estes pavimentos do que o carregamento uniformemente distribuído, geralmente utilizado. Foi medida a deformação da viga diretamente carregada e a das adjacentes. Apresentam-se os resultados obtidos desta campanha experimental, e o seu tratamento para caracterização das vigas do pavimento. Posteriormente, e ainda um trabalho em curso, apresentamos as premissas de um exercício de validação e avaliação numérica do sistema de pavimento tarugado.

1. INTRODUÇÃO

O património, tangível e intangível, é constituído por recursos de gerações vindouras que são usufruídos no presente e herdados pelo passado. A história e identidade de uma cidade é materializada pelos edifícios antigos da malha urbana, onde se inclui o edifício anónimo, existindo riqueza coletiva na morfologia do urbanismo [1].

A cidade de Viseu (Portugal), com mais de 2.500 anos, possui património único. Particulariza-se o Centro Histórico de Viseu pela iniciativa de preservação e valorização do património, através da promoção da reabilitação do edificado classificado e anónimo. Este ambiciona o reconhecimento nacional e internacional, através de uma possível candidatura a Património da Humanidade da UNESCO. Assim, torna-se relevante investigar, reabilitar e salvaguardar o seu edificado histórico, onde se enquadra o caso de estudo do presente artigo.

A necessidade de intervenção de salvaguarda dos valores culturais e consequente contribuição para o desenvolvimento sustentável das cidades, deve ter como base a criteriosa e científica caracterização e avaliação dos edifícios antigos, devido ao empírico e escasso conhecimento que impera na comunidade técnica. Os edifícios antigos caracterizam-se por recorrerem a matérias-primas e técnicas construtivas locais. Em Portugal, utilizou-se comumente a madeira em pavimentos, a nível estrutural e não estrutural, a partir do século XIX até meados do século XX. Devido à não existência de regulamentação específica para a construção de madeiras, aplicavam-se conhecimentos empíricos atualmente em desuso [2]. Com o advento do betão armado, a sociedade e a comunidade técnica interiorizaram que a madeira é um material fraco, originando perdas irremediáveis do património aquando da sua substituição por betão em construções antigas [3]. Essa é uma tendência em reversão e a primeira opção, nas intervenções de reabilitação contemporâneas, é a de conservar a genuinidade da construção original e técnicas tradicionais de construção, na medida em que esta tenha aptidão para responder às novas exigências funcionais. Esta decisão requer, por vezes, a inspeção e realização de ensaios não destrutivos no local.

Os pavimentos de madeira tradicionais são basicamente considerados grelhas, nas quais os sarrafos/soalho e tarugos cumprem a função de distribuição lateral de carga. No entanto, a frequente heterogeneidade das vigas principais, devida a diferenças de material e secção das peças, na origem, ou a degradação de origem mecânica ou biológica, ocorrida no período de serviço, torna essa distribuição menos previsível e conforme com modelos de análise estrutural que geralmente se adaptam bem a estruturas de aço ou betão armado, embora Ilharco *et al* [4] refiram que a variabilidade é compensada com transferência de carga para os elementos mais rígidos. Por isso se entende que a caracterização de resistência de um pavimento de madeira se baseia muito mais no comportamento dos elementos individuais (vigas) do que no caso daqueles materiais. Quando haja lugar à consideração de ensaios de carga para a caracterização mecânica do pavimento, esta especificidade deve ser refletida no tipo de ensaio, nomeadamente substituindo o carregamento uniformemente distribuído, habitual no caso de pavimentos de betão armado, por carregamentos pontuais ou lineares aplicados diretamente às vigas de madeira individuais, de forma a conseguir evidenciar as suas características particulares.

Em linha com esta metodologia, efetuou-se a caracterização de um pavimento de madeira, através de inspeção e diagnóstico, com auxílio de ensaios de carga *in situ* em três vigas para apoiar posterior uma modelação numérica paramétrica. Pretende-se analisar o comportamento da estrutura, nomeadamente na distribuição de carga dos elementos constituintes do pavimento (vigas, tarugos e soalho).

2. AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL

2.1 Inspeção e diagnóstico

Procedeu-se à caracterização de um pavimento de madeira, de um edifício do Centro Histórico de Viseu. Este edifício situa-se com alçado principal na Rua Dr. Luíz Ferreira (antiga Rua do Comércio), nº 92 a 106, estimando-se que a época de construção do edifício se situe entre o final do século XIX e início do século XX. O edifício em estudo é composto por cinco pisos acima da cota de soleira, sendo os dois pisos inferiores destinados a comércio e os restantes a habitação. A nível construtivo, este possui paredes resistentes em alvenaria de pedra granítica, cobertura em madeira, paredes interiores divisórias em tabique (estrutura de madeira fasquiada, preenchida com argamassa de cal/gesso) e revestimento de pavimento em soalho. Como habitual na época de construção, os pavimentos são constituídos por pavimento de madeira maciça. Existe incerteza relativamente ao tipo de madeira utilizada, processos construtivos e possíveis alterações.

O pavimento de madeira ensaiado situa-se no Piso 2. O acesso às vigas de madeira efetuou-se pelo teto do piso inferior, tendo sido necessária a remoção do forro em madeira. As tábuas do forro encontravam-se pregadas a vigas secundárias, as vigas do forro, colocadas inferiormente às principais e irrelevantes para a caracterização em vista. O pavimento é constituído por nove vigas, com o soalho aplicado diretamente, sem sarrafos. Com base na coloração e textura e na utilização de espécies predominantes no local, a madeira das vigas aparenta ser Castanho (*Castanea Sativa* Mill.), embora não se tenha procedido a nenhum exame taxonómico. As vigas são retilíneas e retangulares, com vão médio de 4,27m e dimensões de secção médias de 9,4×20,2cm². Os tarugos são do tipo simples, com comprimento igual ao espaço livre entre vigas, ou seja, de 32,4cm em média. A sua fixação é efetuada através de pregagem. Como se apresentam em linha contínua, por exequibilidade de construção, a sua pregagem efetuou-se obliquamente. Encontram-se situados a terços do vão, ou seja, com espaçamento aproximado de 1,33m. São retangulares com altura média de 15cm, exceto os tarugos situados entre as vigas V6-V7 e V7-V8, que apresentam dimensões superiores. As tábuas de soalho encontram-se aplicadas perpendicularmente às vigas. A justaposição das tábuas é do tipo soalho macho-fêmea ou à inglesa. As tábuas possuem, em valores médios, 2,2cm de espessura e 16,3cm de largura, verificando-se pregagem pontual. Por método construtivo característico deste tipo de soalho, a pregagem deveria ser escondida no macho e a largura média de 11cm. A entrega das vigas é realizada através de frechal corrido e aparente. As vigas são entalhadas no apoio sobre o frechal do lado da parede meeira e não contactam a parede. A observação do frechal e apoio das vigas foi dificultada pela existência de caixa de escadas, do lado da parede interior divisória.

Detetaram-se vestígios de serrim e orifícios de saída de caruncho apenas na viga V4. Observou-se que a viga V9 apresenta coloração diferente e dimensões superiores às restantes. Apresenta também entalhes sem função atual no pavimento, indicando que foi possivelmente reaproveitada de outra utilização anterior. Não se verificaram ações de substituição de secção nem de aplicação de produtos preservadores. A inspeção visual foi contemplada com percussão, tendo as vigas devolvido um som seco e compacto, indicador de inexistência de enfraquecimento expressivo de origem biológica. O teor de água das vigas foi medido com humidímetro, tendo sido registados valores médios de 12,5% que, salvo situações pontuais não detetadas, tornam remota a possibilidade de apodrecimento nas vigas.

2.2 Ensaio de carga

2.2.1 Preparação e execução do ensaio

Antecedendo a realização do ensaio de carga, foi definida a carga máxima a aplicar no ensaio de carga, calcular a plataforma de suporte da carga em conformidade e preparar a forma de carga incremental, além de se proceder à remoção do forro do teto para acesso à estrutura do pavimento. Para a carga de ensaio, foi seguida uma abordagem conservadora, dadas as incertezas relativas à espécie de madeira utilizada e respetivo estado de conservação, entre outras. Assumida uma secção transversal de 75×150mm² e um vão de 4,0m, determinou-se a carga de ensaio como a que, num carregamento pontual a meio vão da viga, resultaria numa tensão atuante de flexão de 10N/mm², tendo-se obtido um valor de 2,4kN. Estimando o valor médio do módulo de elasticidade da madeira em 10GPa, corresponderá a esta carga uma flecha elástica de cerca de 15,0mm. Tendo em conta os limitados recursos *in situ* e a dificuldade de elevar cargas significativas até ao piso a ensaiar, a carga a utilizar foi materializada com sacos de areia, cada um de 10kgf, totalizando 300kgf (3,058kN). Este baixo peso unitário permitiu ainda aplicar a carga de forma muito gradual. A autarquia assegurou a entrega de 0,5m³ de areia no local, e a pesagem foi feita com uma balança eletrónica, com um erro máximo de leitura de 50g. Para reduzir o erro acumulado, foi feita a pesagem incremental dos sacos de areia, até um total de cinco. Os sacos utilizados foram vulgares sacos para lixo, fechados após a pesagem, para evitar variação de peso por evaporação da humidade da areia.

A carga é aplicada sobre uma plataforma suspensa, que teve igualmente de ser dimensionada. A plataforma (Figura 1) é constituída por dois painéis sobrepostos de madeira de 18mm de espessura, com furos nos cantos por onde passam cabos que abraçam varões colocados inferiormente, que constituem

os apoios da plataforma. Os cabos são suspensos superiormente de um esticador de gancho, que cerra o cabo que contorna a viga superior, a ensaiar.

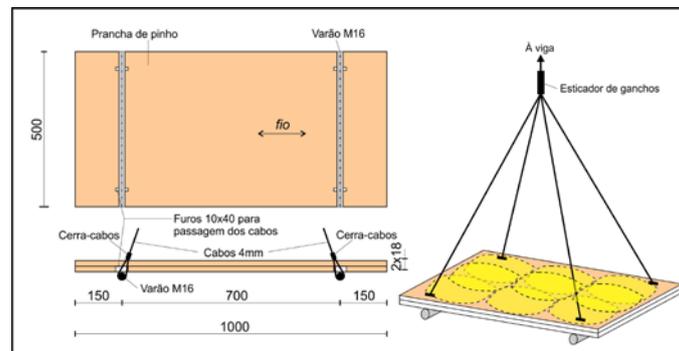


Figura 1: Plataforma de carga (dimensões em mm)

O ensaio consistiu na aplicação de carga estática com incrementos de 20kgf, até ao total de 300kgf, seguida de descarga com decrementos iguais. A carga máxima foi um pouco superior ao valor inicialmente previsto, dado a resposta da estrutura sugerir que as suas propriedades foram subestimadas. Para além da sobrecarga, houve ainda a considerar o peso da plataforma e demais equipamento, que é de cerca de 13kgf. A carga e descarga executaram-se lentamente, quando estabilizada a resposta após cada incremento/decremento. A carga foi aplicada aproximadamente a meio vão da viga e de modo pontual, com o cabo a cercar apenas a viga a ensaiar (Figura 2(a)). Totalizaram-se cinco medições de deformações verticais, nomeadamente três na viga ensaiada e uma em cada viga imediatamente adjacente. Para tal, colocaram-se defletómetros (LVDTs - *Linear Variable Differential Transformer*) a meio vão (LVDT#1) e aos terços (LVDT#2 e LVDT#3) da viga ensaiada e a meio vão das vigas imediatamente adjacentes (LVDT#4 e LVDT#5). Realizaram-se três ensaios, em separado, nomeadamente na viga V4 (ensaio #1), na viga V5 (ensaio #2) e na viga V7 (ensaio #3). Na Figura 2 apresentam-se o esquema e o registo fotográfico para a viga V5, a título exemplificativo. Chama-se a atenção de que as vigas que aparecem em primeiro plano, na imagem, são as de forro, de qualidade inferior e que não foram objeto de ensaio. As vigas de pavimento estão a uma cota superior e parcialmente ocultas pelas de forro, sendo identificável a viga em ensaio por estar rodeada pelo cabo.

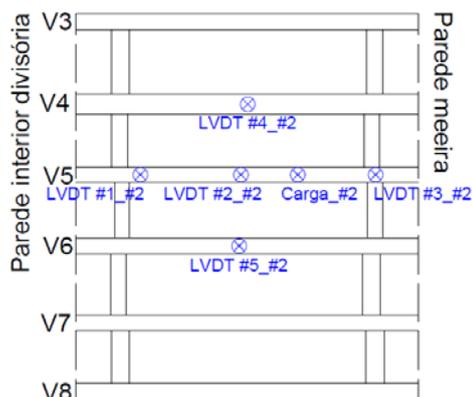


Figura 2: Instrumentação da viga V5: Esquema (esquerda) e foto (direita)

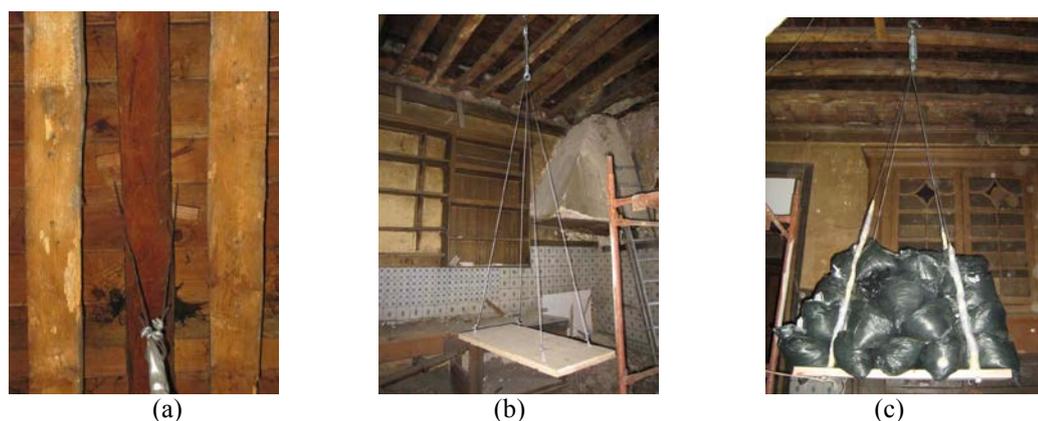


Figura 2: (a) cabo a abraçar a viga a ensaiar; (b) plataforma sem carga; (c) plataforma em carga máxima

2.2.2 Resultados

Para cada ensaio registou-se o gráfico força/deslocamento, observando-se o esperado comportamento linear elástico. Embora a rotura em flexão seja de tipo frágil, sem desvio significativo da linearidade, não se registaram sinais precursoros da aproximação da zona de rotura, nomeadamente estalidos da madeira. De facto, tratando-se de um ensaio *in situ*, a preocupação com a segurança é fundamental e a carga máxima aplicada pressupõe um coeficiente de segurança elevado. A recuperação das deformações foi quase total, existindo pequeno deslocamento residual em todos os LVDTs, variando entre 0,46% e 7,87% dos valores máximos. Estes valores, inferiores a 10%, são admissíveis para estruturas de madeira e de reduzido grau de monolitismo [5], podendo ainda ter sido causados por alguma indentação ou ajustamento nos apoios da viga, constituídos por frechais contínuos. Nos três ensaios verificou-se que, para a carga máxima, os deslocamentos máximos ocorreram no LVDT#2 (meio vão da viga ensaiada), como previsível (próximo da carga aplicada a aproximadamente meio vão). Destes, valor máximo ocorreu na viga V4 (-5,54mm), o que também se deve a ter carregado esta viga com uma carga maior (380kgf) do que as restantes (ver Figura 3). Ainda assim, este valor é muito inferior à deformação prevista (15mm), o que pode ser justificado por várias razões, por ordem decrescente de probabilidade: i) repartição de carga para as vigas adjacentes não contabilizada no cálculo preliminar; ii) madeira de qualidade superior ao preliminarmente admitido; iii) dimensões médias da secção transversal superiores ao admitido no cálculo; iv) encastramento parcial das vigas nas secções de apoio. Os menores deslocamentos foram observados nos LVDT#4 e 5, em todos os ensaios, e devem-se exclusivamente à transferência de carga da viga carregada para as adjacentes, sendo os valores qualitativamente coerentes com essa causa, uma vez que a maior parte da carga é suportada pela viga diretamente carregada. Por fixação insuficiente dos defletómetros (LVDT#4 e 5) no primeiro ensaio, ou causa similar, o registo de deformação das vigas laterais foi errático, não oferecendo condições para uma interpretação fiável. Também na própria viga carregada, houve uma perturbação com causa não identificada, na fase final da descarga, visível na descontinuidade da curva de descarga (Figura 3).

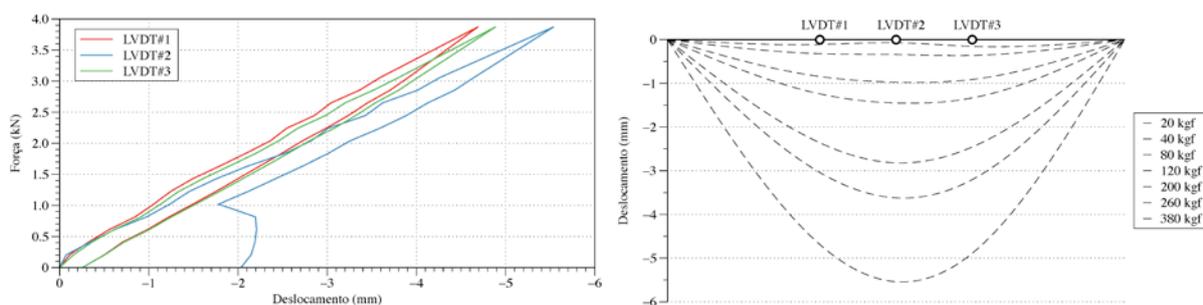


Figura 3: Gráfico carga/deslocamento para o ensaio da viga V4 (ensaio #1)

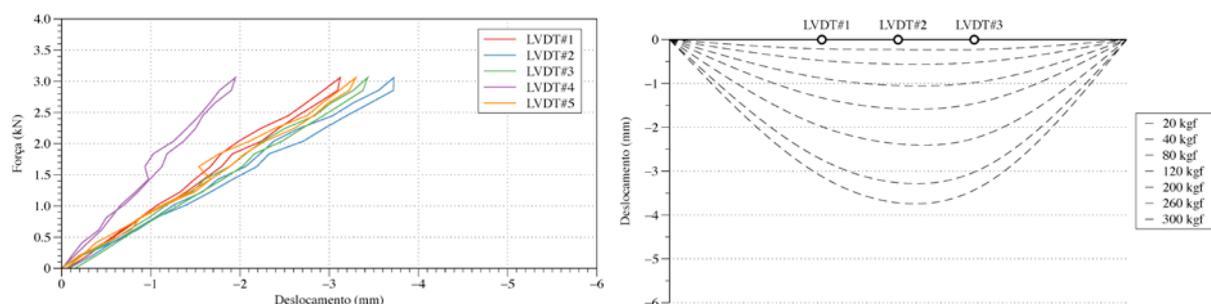


Figura 4: Gráfico carga/deslocamento para o ensaio da viga V5 (ensaio #2)

No caso do segundo e terceiro ensaios (respetivamente nas Figuras 4 e 5), no entanto, é visível o comportamento globalmente linear (embora pontualmente perturbado) e a recuperação na descarga. No caso do segundo ensaio, a menor deformação de uma viga adjacente (LVDT#4) em relação à outra (LVDT#5) tanto pode traduzir uma menor transferência de carga, associada a elementos de distribuição menos eficazes (tarugos menores, por exemplo), como uma superior rigidez do material, ou uma combinação de ambos. O ensaio de vigas consecutivas teria permitido melhorar a compreensão deste aspeto mas, como já referido, não foi possível concluir a totalidade dos ensaios programados e nas vigas V4 e V5, embora adjacentes, essa interpretação é comprometida pelos resultados anómalos atrás mencionados.

Os resultados obtidos no ensaio da viga V7 (ensaio #3), são aqueles em que o registo global de carga-deformação mais se aproxima do que seria de esperar, em condições de homogeneidade de material e de secções, o que é difícil de assegurar em estruturas antigas, como é o caso presente.

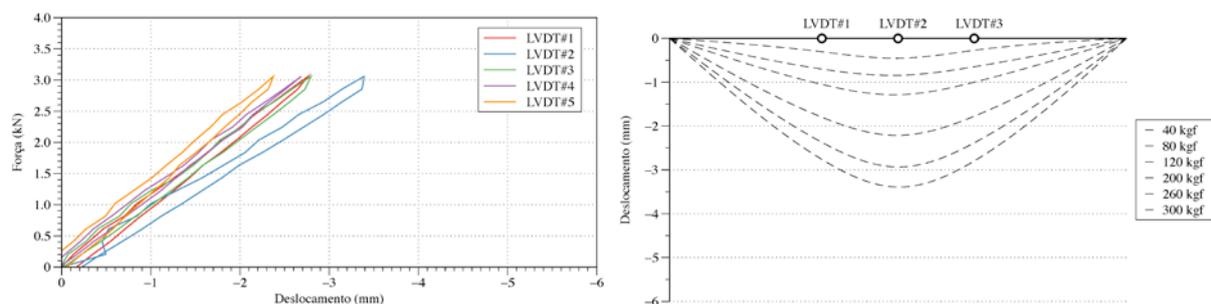


Figura 5: Gráfico carga/deslocamento para o ensaio da viga V7 (ensaio #3)

3. MODELO ESTRUTURAL

3.1 Modelação: desafio e dificuldades

Antes de entrar na discussão detalhada das dificuldades e possibilidades do uso de um modelo numérico para simulação do sistema real ensaiado, deve salientar-se que o objetivo essencial é conseguir informação de valor prático para o diagnóstico estrutural do pavimento e não reproduzir com fidelidade o seu comportamento, tarefa que, dada a quantidade de parâmetros envolvidos e a incerteza relativa à caracterização mecânica e geométrica dos elementos, se considera irrealista.

Em relação à geometria das vigas, há vários aspetos a considerar, começando pela variabilidade geométrica das secções, não só entre vigas distintas, mas também ao longo de cada uma (devida ao descaio, por exemplo). Este fator pode ser mitigado, medindo individualmente as vigas em vários pontos ao longo do comprimento e modelando-as por troços, como sequências de barras prismáticas, procedimento usado neste trabalho. Igualmente relevante é a presença localizada de defeitos de crescimento, serviço ou laboração de grande expressão, como nós na zona tracionada ou perdas de secção devidas a degradação biológica ou entalhes, por exemplo. Tais singularidades deverão ser

incluídas no modelo apenas quando a sua dimensão permita prever uma influência relevante na distribuição de esforços ou deformações.

Quanto à caracterização mecânica, e uma vez que os ensaios fornecem relações força-deslocamento, as quais são medidas diretas da rigidez, parece óbvio que o módulo de elasticidade da madeira seja a propriedade a obter do tratamento dos resultados experimentais. Havendo uma correlação moderada entre este parâmetro e algumas propriedades de resistência, estas poderão ser inferidas a partir da estimativa daquele e, por essa via, o nível de segurança do pavimento. Embora a atribuição de um valor único do módulo de elasticidade a todas as vigas constitua a abordagem mais simples do problema, ela está em contradição com a metodologia experimental considerada, que permite evidenciar diferenças de rigidez entre as vigas do pavimento. Por outro lado, aquela simplificação não se adequa a casos, como se observou visualmente no pavimento em estudo, em que as vigas aparentam não ser todas da mesma qualidade de madeira. Assim, opta-se por considerar valores individuais do módulo de elasticidade para cada viga.

Quanto ao modelo propriamente dito, surgem também algumas dificuldades. A mais óbvia, porventura, refere-se à modelação do sistema de distribuição de cargas, constituído por tarugos e pelo soalho. Este corresponde a uma ligação elástica entre cada viga e as adjacentes, distribuída ao longo de todo o comprimento e de rigidez constante, na medida em que as tábuas sejam de espessura constante e da mesma qualidade de madeira. Essa rigidez depende ainda das condições de apoio das tábuas, como exemplificado na Figura 6, estando a realidade balizado entre estes casos extremos.

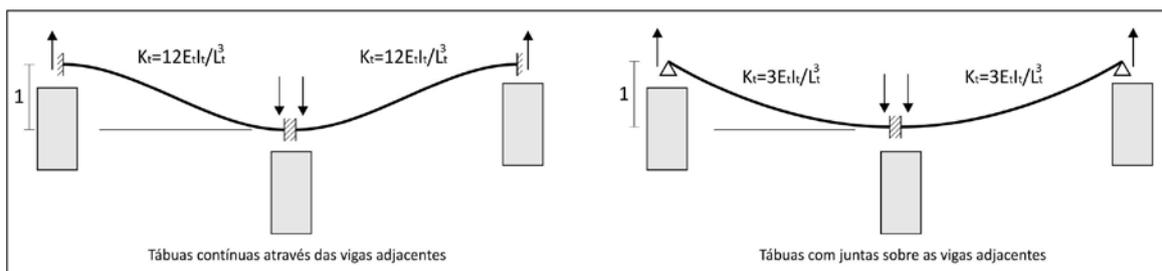


Figura 6: Modelos de rigidez distribuída correspondente às tábuas de soalho

Os tarugos são elementos descontínuos, colocados entre as vigas principais e ligados a estas por pregagem inclinada ou a partir da face oposta da viga, se desencontrados. A sua rigidez de flexão e corte é conferida pela resistência ao corte e ao arranque dos pregos de ligação e pelo efeito de alavanca devido ao contacto dos topos com as vigas confinantes, nomeadamente em rotação. Negrão [6] propõe uma expressão da rigidez baseada no modelo representado na Figura 7.

Crê-se que é pequena a sensibilidade da distribuição de forças às pequenas variações do módulo de elasticidade da madeira dos tarugos e do soalho, associadas à incerteza na sua caracterização, pelo que se poderá assumir, para estes elementos, o valor médio do módulo de elasticidade da espécie de madeira em causa. Esta hipótese deverá ser validada pelos resultados do modelo numérico, ainda em desenvolvimento.

Finalmente, há ainda que decidir sobre a complexidade do modelo de elementos finitos, podendo este reproduzir a totalidade do pavimento ou apenas a banda correspondente à viga em carga e as duas

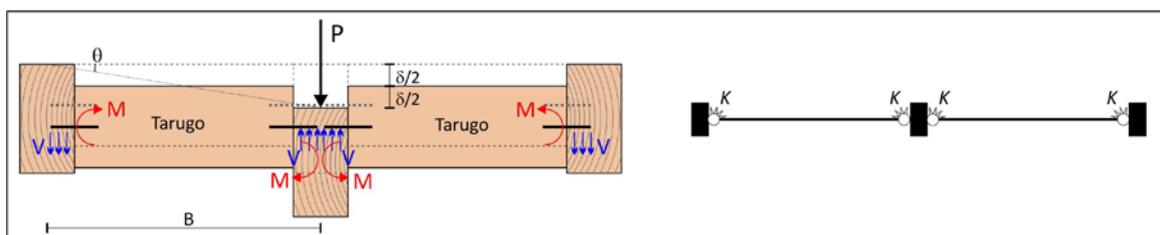


Figura 7: Modelo de ligação elástica tarugo-vigas [6]

adjacentes, como se mostra na Figura 8. Este último, de aplicação mais geral e de maior simplicidade, baseia-se na hipótese de que o essencial da repartição de carga se dá para as vigas adjacentes à carregada, o que constitui uma aproximação aceitável para vigas interiores do pavimento. Este aspeto também fica pendente de confirmação pela comparação das soluções fornecidas pelos dois modelos.

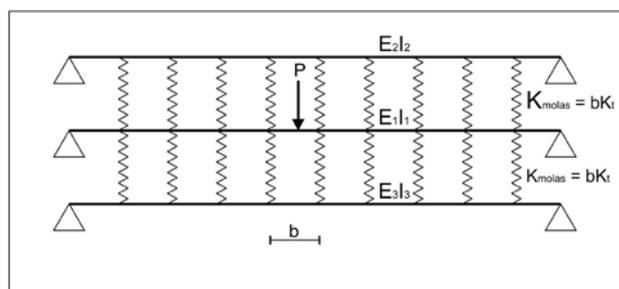


Figura 8: Modelo de 3 vigas

3.2 Resultados

Este é um trabalho em desenvolvimento, pelo que não é ainda possível apresentar resultados finais, pelo que a tónica do trabalho foi posta na metodologia de análise. Falta ainda referir de que modo será feita a comparação de resultados experimentais e numéricos, com vista a atingir-se o objetivo pretendido, que é o de obter estimativas dos módulos de elasticidade das vigas constituintes do pavimento. O problema em causa não tem abordagem analítica possível, mesmo na forma mais simples da Figura 8, pelo que se pensa que a melhor estratégia de solução será o recurso a Programação Matemática, com a minimização dos desvios entre os deslocamentos medidos e os determinados numericamente, para as posições correspondentes, sujeita a limites máximos e mínimos das variáveis de decisão, que serão os módulos de elasticidade das vigas. Existem ferramentas *standard* de Otimização que podem ser adaptadas [7],[8], de uma vez por todas e com reduzido esforço, para a resolução deste tipo de problema, podendo ser incorporadas no pós-processamento dos resultados da análise de elementos finitos.

4. CONCLUSÕES

Procedeu-se à realização de ensaios de carga pontual em vigas de um pavimento de madeira de um edifício antigo no Centro Histórico de Viseu, com vista à sua posterior caracterização estrutural, no âmbito de um processo de inspeção e diagnóstico. O método utilizado justifica-se pela natureza particular deste tipo de pavimento nos quais, mais do que o desempenho de conjunto, é importante avaliar a condição das vigas individuais e o maior ou menor efeito do tarugamento. Foi feita uma interpretação preliminar dos resultados, que deverá ser complementada pelo desenvolvimento de um modelo numérico, que incorpore as principais complexidades com interferência no comportamento do pavimento, nomeadamente os sistemas de distribuição de carga (tarugos e soalho). Com recurso posterior a uma ferramenta *standard* de Otimização Estrutural, deverão obter-se estimativas dos módulos de elasticidade das vigas individuais os quais, dada a sua correlação com as propriedades mecânicas relevantes, permitirão aferir da capacidade resistente do pavimento e dos seus elementos individuais.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] Rossa, W. *Fomos condenados à cidade: uma década de estudos sobre património*. Imprensa da Universidade de Coimbra - 2015, 2002-2013.
- [2] Appleton, J. *Reabilitação de Edifícios Antigos - Patologias e Tecnologias de Intervenção*, Edições Orion, 2011.
- [3] Negrão, J. H. Estruturas de madeira em Portugal - Presente e passado recente. *CIMAD 11 - 1º Congresso Ibero-Latino Americano da Madeira na Construção*, Coimbra 2011.

- [4] Ilharco, T., Guedes, J., Costa, A., Arêde, A., Paupério, E. Avaliação da distribuição de carga em pavimentos de madeira através de ensaios in situ. *8º Congresso Nacional de Mecânica Experimental*, Guimarães 2010.
- [5] Ramos, L. F., Lourenço P. B. Avaliação da segurança de dois pavimentos em madeira. *CIMAD'04 - A madeira na Construção - 1ª Congresso Ibérico*, Guimarães 2004.
- [6] Negrão, J. H. Comportamento no plano e fora do plano de pavimentos de madeira. *CLEM + CIMAD 2017 - II Congresso Latino-americano de Estruturas de Madeira e II Congresso Ibero-Latino-americano da Madeira na Construção*, Junín - Buenos Aires - Argentina 2017.
- [7] Simões, L.M.C. and Negrão, J.H. Sizing and Geometry Optimization of Cable-Stayed Bridges. *Computers and Structures*, Vol. 52, N° 2, pp.309-321, 1994
- [8] Negrão, J.H. and Simões, L.M.C. Reliability-based Optimum Design of Cable-Stayed Bridges. *Journal of Structural and Multidisciplinary Optimization*, Vol. 28, pp.214-220, 2004