

# COMPORTAMENTO NO PLANO E FORA DO PLANO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA

## IN-PLANE AND OUT-OF-PLANE BEHAVIOUR OF TIMBER FLOORS

**João H. Negrão** <sup>(1)</sup> (A)

(1) PhD, CICC, CITAB, Professor Associado, Universidade de Coimbra, Coimbra, Portugal  
Endereço de contato: jhnegrao@dec.uc.pt; (A) Apresentador

### Código de Identificação: T9-01

#### Resumo

Na construção tradicional em Portugal, as paredes são constituídas por alvenaria de pedra e os pavimentos são em madeira. Sendo estes constituídos por soalho aplicado diretamente sobre as vigas ou sobre barrotes contínuos perpendiculares a estas, as suas características dinâmicas e capacidade de distribuição de forças no plano suscitam dúvidas. As primeiras são essenciais para o bom desempenho a respeito de vibrações em serviço, enquanto a segunda é necessária para a mobilização das paredes e demais elementos de travamento face à ação sísmica. Em intervenções de reforço e reabilitação, o comportamento no plano pode ser melhorado mediante a inclusão de uma treliça de travamento no plano do pavimento, constituída pelas vigas existentes e por elementos diagonais adicionais metálicos, em madeira ou em FRP, aplicados sobre, sob ou entre as vigas. Uma alternativa é a constituição de um pavimento misto madeira-betão. Neste caso, o objetivo primário é a melhoria de desempenho do pavimento para ações verticais, mas a lâmina de betão confere ao pavimento uma elevada rigidez no seu plano, permitindo antecipar um desempenho satisfatório também quanto ao funcionamento como diafragma sendo indispensável, para tal, que as ligações lâmina-paredes apresentem também as necessárias características de rigidez e resistência. Este trabalho descreve um estudo computacional preliminar nessa área, sendo comparados modelos dos tipos referidos, nomeadamente de variantes de um pavimento simples (não reforçado), de um reforço com treliça e de um pavimento madeira-betão.

**Palavras chave:** pavimentos de madeira; diafragma; dinâmica reforço

#### Abstract

*In traditional construction in Portugal, walls are made up with stone masonry and the floors are in timber. These consist of floor planks either directly laying on the main timber beams or on transverse small beams which in turn lay on the main beams. Whatever the case is, the dynamic characteristics and the capability to withstand in-plane forces raise some interrogations. The former are essential to the good in-service behaviour towards vibrations, while the latter is needed to distribute the horizontal forces caused by a seism to walls and bracing systems. In strengthening and refurbishment interventions, the in-plane behaviour may be enhanced through the design of a bracing truss in the floor plane, composed by the existing floor beams and additional diagonal steel, timber or FRP elements, applied on, under or between the main beams. An alternative consists of a composite timber-concrete floor. In this case, the primary objective is the improvement of the floor performance under vertical loads, but the very high in-plane stiffness of the concrete layer allows to anticipate a satisfactory diaphragm behaviour of the floor, which also requires that the floor-to-wall connections show the adequate strength and stiffness characteristics. This paper describes a preliminary computational study in this topic, where floor models of the types described before are compared, namely variants of a simple (unstrengthened) floor, a truss-reinforced floor and a timber-concrete floor.*

**Keywords:** timber floors; diaphragms; dynamic; strengthening

## 1. INTRODUÇÃO

Os edifícios de construção tradicional em Portugal, bem como na generalidade dos países mediterrânicos da Europa, são constituídos por paredes em alvenaria de pedra, ligados por pavimentos de madeira. As tábuas de solho podem ser aplicadas sobre barrotes perpendiculares às vigas principais, caso se pretenda que tenham a direção destas ou o seu espaçamento seja excessivo (Figura 1a), ou diretamente sobre as vigas, se o espaçamento for pequeno (tipicamente inferior a 40cm) e se pretender essa direção para as tábuas (Figura 1b). Acessoriamente, e dependendo do vão em causa, podem ser usados tarugos de travamento e distribuição, habitualmente a meio (no caso de um tarugo, Figura 1c) ou a terços (no caso de dois) do vão do pavimento. A entrega nas paredes é feita seja diretamente, inserindo as vigas em caboucos praticados na alvenaria, ou indiretamente, apoiando as vigas num frechal que se desenvolve continuamente ao longo da parede e ligado a esta. Salvo no caso raro em que os barrotes tenham comprimentos de entrega longos nos caboucos, a condição de apoio habitualmente considerada é a de apoio simples, isto é, sem encastramento.

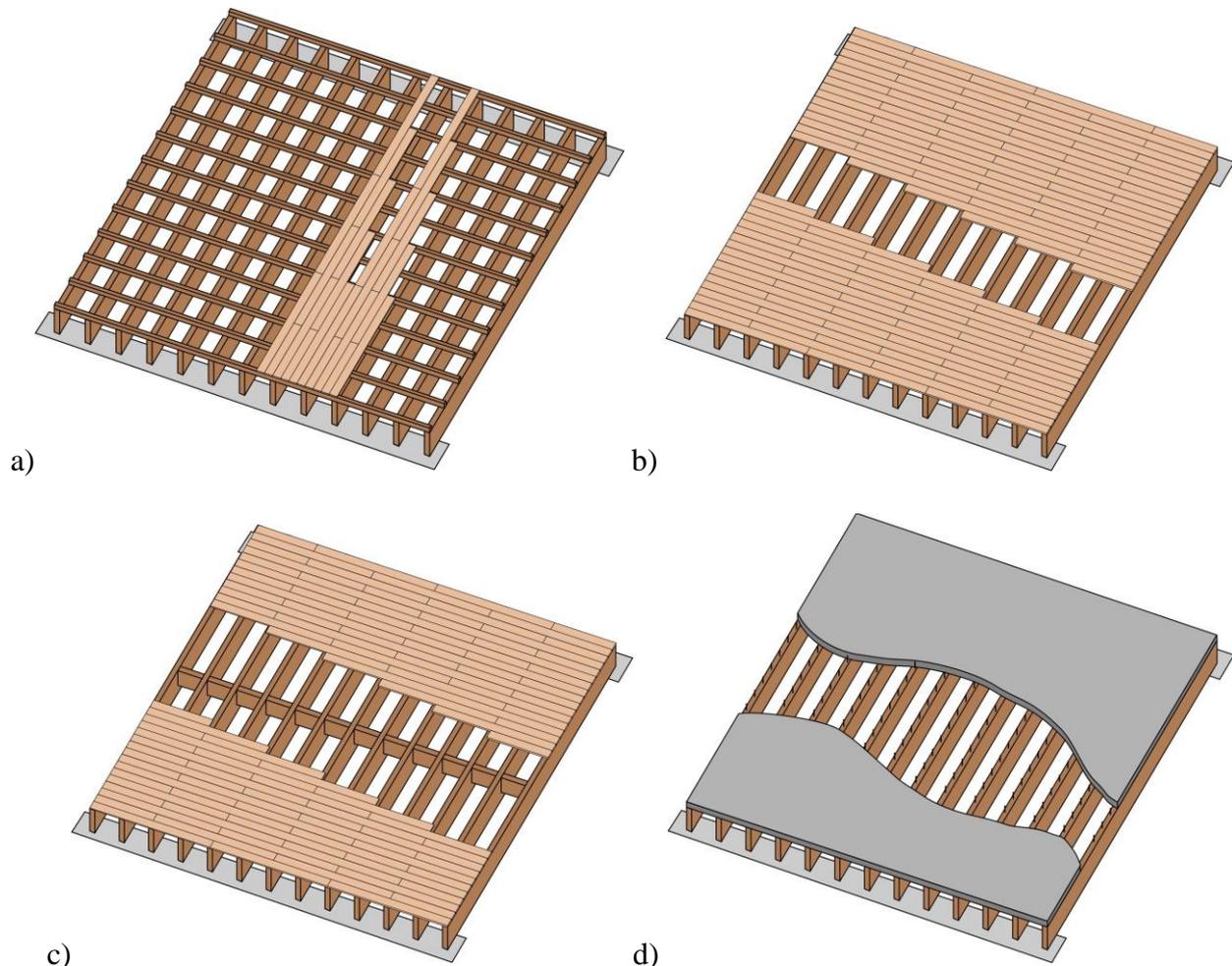


Figura 1: Configurações comuns de pavimentos de madeira: a) com sarrafos ; b) sem sarrafos ; c) com tarugo(s) ; d) misto madeira-betão

Pela própria natureza dos elementos constituintes, os pavimentos de madeira são unidirecionais, servindo os sarrafos, o solho e/ou os tarugos de elementos de distribuição de eficácia variável, como se verá. Quer os sarrafos, quer as tábuas de solho, têm juntas cuja frequência e espaçamento tem a ver com o vão do pavimento e com o padrão de repetição escolhido. Os tarugos são naturalmente

descontínuos, sendo introduzidos no intervalo livre entre faces de vigas contíguas e ligados a estas por pregagem oblíqua ou de topo. Neste ultimo caso, é necessário que sejam desencontrados vão a vão, para permitir a pregagem de topo.

Uma solução muito eficaz na reabilitação ou reforço de pavimentos de madeira consiste na execução de uma lâmina de betão, ligada às vigas por conetores metálicos, de novo a mobilizar o comportamento compósito semirrígido do conjunto (Figura 1d). A lajeta pode ser executada diretamente sobre as tábuas de solho, funcionando estas como cofragem perdida, ou sobre uma cofragem recuperável pela face inferior.

Para além da verificação da capacidade resistente dos pavimentos originais e/ou das soluções reforçadas a ações gravíticas, interessa também averiguar a capacidade de distribuição de carga dos vários sistemas e de assegurar o bom desempenho em serviço, nomeadamente limitando inferiormente as frequências de vibração mais baixas. Por outro lado, no caso de regiões onde a ação sísmica assume importância relevante, como acontece em grande parte do território de Portugal Continental e nas ilhas dos grupos Oriental e Central do arquipélago dos Açores, é relevante investigar a capacidade dos pavimentos para repartição de forças horizontais pelos elementos de travamento, tipicamente paredes-mestras de alvenaria ou frontais.

Para esse efeito, procedeu-se à análise da série de modelos, essencialmente correspondentes a variantes dos representados na Figura 1, elencada na Tabela 1.

Tabela 1: Modelos de pavimento analisados

Modelo	Descrição
A	Solho sobre sarrafos contínuos – Apoio em 2 lados opostos
B	Solho sobre sarrafos com juntas espaçadas de 1,2m – Apoio em 2 lados opostos
C	Solho sobre vigas principais – Apoio em 2 lados opostos
D	Solho sobre sarrafos contínuos – Apoio em 4 lados
E	Solho sobre sarrafos com juntas espaçadas de 1,2m – Apoio em 4 lados
F	Solho sobre vigas principais – Apoio em 4 lados
G	Pavimento misto madeira-betão – Apoio em 2 lados
H	Pavimento misto madeira-betão – Apoio em 4 lados
I	Solho sobre vigas principais e tarugo central – Apoio em 2 lados

## 2. COMPORTAMENTO ESTÁTICO E DINÂMICO FORA DO PLANO (FLEXÃO)

### 2.1 Modelação

O modelo geométrico consiste de um pavimento quadrado de 4,80mx4,80m, com uma modularidade de 0,40m entre eixos de vigas e de sarrafos (quando existentes), existindo portanto 13 vigas, duas das quais periféricas, e 13 sarrafos. Todas as vigas têm apoios rotulados nas extremidades. Nos modelos D, E, F e H, são adicionalmente restringidos os deslocamentos transversais dos nós internos das vigas periféricas, simulando frechais com apoio contínuo nas paredes laterais. A secção considerada para as vigas foi de 80x160mm<sup>2</sup>, adequada e frequente em vãos com a dimensão aproximada do aqui considerado. Os sarrafos têm secção de 40x60mm<sup>2</sup>, também comum nestes pavimentos e para o espaçamento indicado. O solho foi modelado com uma espessura de 22mm, a mais correntemente utilizada. Para evitar a quase triplicação da dimensão da malha de elementos finitos, foram consideradas tábuas de 0,40m de largura por módulo, em vez de três tábuas de 0,133m, de forma a obter-se uma malha de densidade semelhante à dos restantes modelos. A influência desta simplificação nos resultados foi praticamente impercetível. Foram introduzidas libertações de modo a impedir interação flexão-torção entre barras ortogonais. Foi atribuída às vigas de madeira a classe resistente C18 segundo a EN338 [1].

No caso do modelo I, atribui-se ao tarugo central uma secção de  $80 \times 140 \text{ mm}^2$ , ligeiramente menor do que a das vigas principais. Uma vez que os troços de tarugo são descontínuos, é indispensável ter em consideração a rigidez de rotação ( $K$ ) da sua ligação às vigas, sem o que não desempenhariam qualquer efeito de distribuição de carga. Esse é um problema complexo e, para a determinação aproximada daquele valor, foi considerado o modelo representado na Figura 2, que se baseia na hipótese de que, por ação de uma força  $P$  aplicada numa viga, os tarugos adjacentes sofrem apenas movimento transversal de corpo rígido causado pelo escorregamento das ligações. Esta hipótese fundamenta-se no pequeno comprimento do tarugo, que resulta em rigidezes de rotação e translação elevadas dessa barra. Por outro lado, a rotação de corpo rígido do tarugo é impedido pelo seu confinamento entre as duas vigas adjacentes, contraventadas pelos tarugos seguintes. O movimento relativo tarugo-viga tem valores iguais e sentidos opostos na viga carregada e nas adjacentes, devendo-se à parte da força  $P$  que é repartida pelos tarugos para as vigas vizinhas.

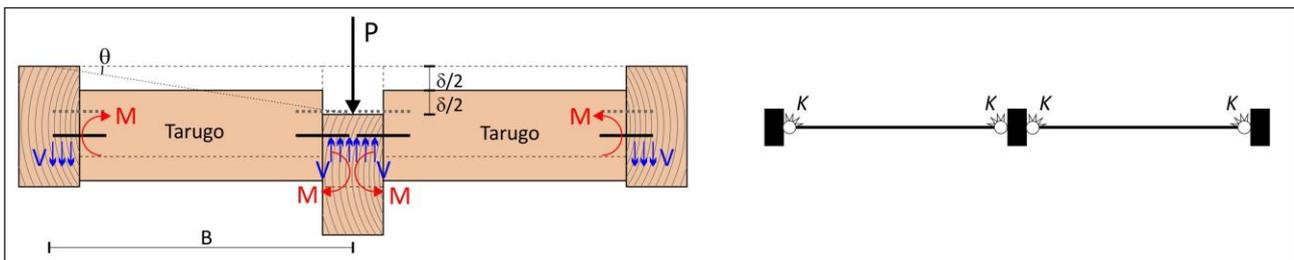


Figura 2: Modelo de ligação elástica tarugo-vigas

Sendo  $\delta$  o afundamento total da viga carregada, a rotação aparente do tarugo, entre vigas vizinhas, será dada por

$$\theta \cong \text{tg } \theta = \delta/B \quad (1)$$

do que resulta, para uma rotação unitária

$$\delta = B \quad (2)$$

Admitindo que a ligação do tarugo à viga se faz por uma cavilha ou parafuso de topo (o que só será possível se tarugos consecutivos estiverem transversalmente desfasados), o módulo de escorregamento por ligador e superfície de corte, para ligadores deste tipo e de acordo com a EN1995-1-1:2004 (EC5, Parte 1-1) [2], será

$$K_{\text{ser}} = \rho_m^{1,5} d/23 \quad (3)$$

Esta expressão aplica-se a ligadores inseridos perpendicularmente ao fio da madeira, mas admite-se igualmente válida no caso presente, em que o ligador é paralelo ao fio no tarugo.

Considerando um ligador de 10mm de diâmetro e um valor médio da massa volúmica de  $380 \text{ kg/m}^3$ , como especificado pela EN338 para a classe C18, este valor resulta em

$$K_{\text{ser}} = 380^{1,5} * 10/23 = 3221 \text{ N/mm (ou kN/m)} \quad (4)$$

O deslocamento transversal relativo (2) reparte-se igualmente pelas duas interfaces tarugo-viga, pelo que a força transversal mobilizada será

$$V = K_{\text{ser}} B/2 = 3221 * 0,4/2 = 644 \text{ kN} \quad (5)$$

O equilíbrio de momentos do tarugo, finalmente, determina o valor dos momentos  $M$ , que correspondem à rigidez de rotação aparente:

$$\sum M = 0 \Rightarrow VB = 2M \Rightarrow M = VB/2 = 644 \cdot 0,4/2 \cong 129 \text{ kNm/rad} \quad (6)$$

Este foi o valor atribuído às molas de rotação nas ligações vigas-tarugos do modelo I.

Finalmente, para os modelos G e H, relativos ao pavimento misto madeira betão, foi utilizado um modelo de laje ortotrópica nervurada numa direção, correspondendo as nervuras às vigas de madeira e tendo espaçamento igual ao destas. As suas dimensões foram definidas por homogeneização da secção de madeira a respeito do betão, definido como C30/37 segundo a EN1992-1-1 (EC2, Parte 1-1) [3]. Este procedimento resulta numa ligação rígida dos dois materiais, correspondendo-lhe uma rigidez e frequência de vibração superior às que se obteriam se houvesse sido feita a modelação do comportamento compósito. No entanto, as conclusões obtidas ganham força ao fazer-se a extrapolação do modelo rígido para o semi-rígido, o que torna justificável a utilização daquele neste estudo preliminar. A análise estrutural foi realizada com o programa AutoDesk Robot [4].

## 2.2 Resultados e discussão – Comportamento dinâmico

Na Figura 3 representam-se os 4 primeiros modos de vibração para o modelo A. O amortecimento modal considerado foi de  $\xi=1\%$ , como especificado no EC5.

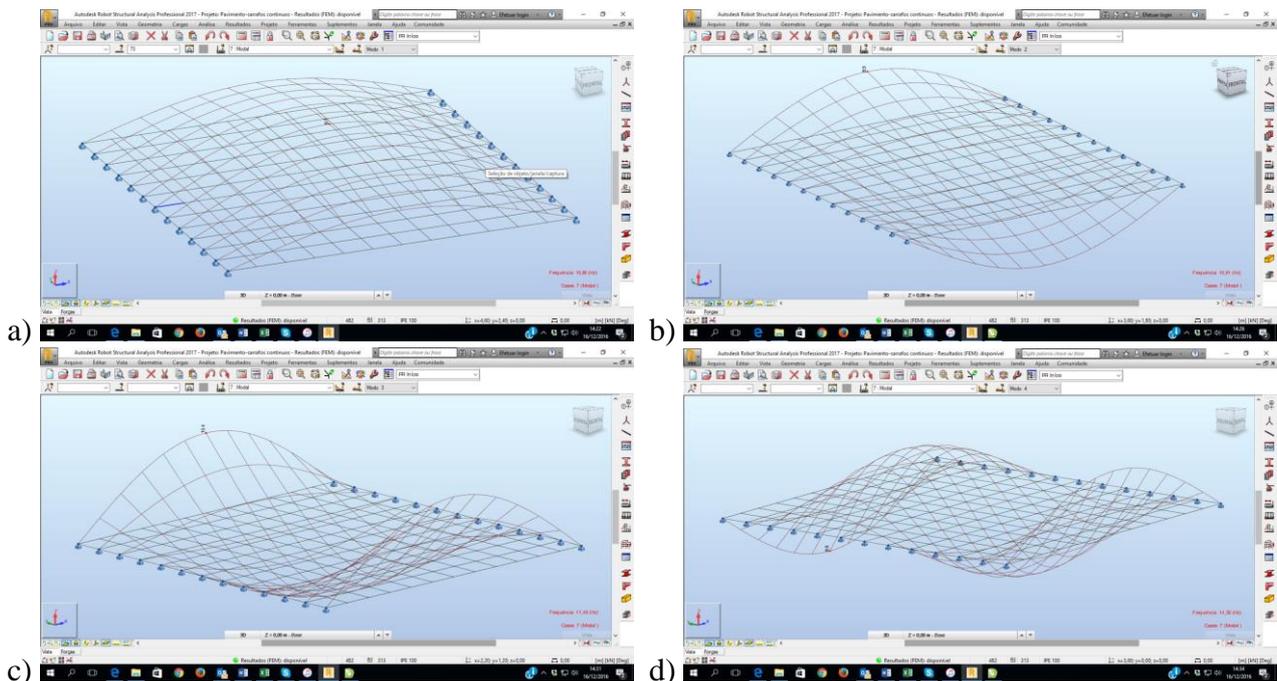


Figura 3: a) Modo 1 b) Modo 2 c) Modo 3 d) Modo 4

Todos estes modos são simétricos em X (direção principal), alternando em simétricos (1 e 3) e antissimétricos (2,4) na direção transversal. Em conjunto, e para vibração na direção vertical, correspondem a uma participação modal de mais de 98%, o que torna quase irrelevantes as contribuições de modos superiores. A ordem destes modos mantém-se inalterada em todas as configurações, à exceção da I, em que o 4º modo é o 1º modo antissimétrico em X, mas com uma frequência muito mais elevada do que nos restantes casos. Isto significa que, do ponto de vista de resposta a excitação devida a cargas dinâmicas verticais (salto, passos sincronizados), não são de esperar respostas muito diferentes para as diversas configurações. Na Tabela 2 apresentam-se os

valores das frequências de vibração para os primeiros 10 modos e o tipo respetivo. As cores destinam-se a facilitar a identificação de modos semelhantes, tendo-se atribuído a cor cinzenta aos primeiros quatro modos que, como referido, quase não mudam de posição entre configurações.

Tabela 2: 10 primeiras frequências e modos de vibração para as várias configurações

Modo	Modelo A		Modelo B		Modelo C		Modelo D		Modelo E		Modelo F		Modelo G		Modelo H		Modelo I	
	f (Hz)	Tipo																
1	10,8	X1-Y1	10,8	X1-Y1	9,2	X1-Y1	10,9	X1-Y1	10,9	X1-Y1	9,2	X1-Y1	7,8	X1-Y1	9,4	X1-Y1	9,1	X1-Y1
2	10,9	X1-Y2	10,9	X1-Y2	9,5	X1-Y2	12,8	X1-Y2	12,4	X1-Y2	9,7	X1-Y2	8,9	X1-Y2	16,9	X1-Y2	9,4	X1-Y2
3	11,5	X1-Y3	11,4	X1-Y3	9,8	X1-Y3	19,0	X1-Y3	17,5	X1-Y3	11,7	X1-Y3	13,6	X1-Y3	31,5	X1-Y3	10,0	X1-Y3
4	14,5	X1-Y4	13,8	X1-Y4	10,6	X1-Y4	29,9	X1-Y4	26,6	X1-Y4	15,7	X1-Y4	24,0	X1-Y4	32,3	X2-Y1	12,4	X1-Y4
5	21,7	X1-Y5	19,8	X1-Y5	13,0	X1-Y5	43,0	X2-Y1	38,8	X1-Y5	21,5	X1-Y5	31,1	X2-Y1	37,0	X2-Y2	18,0	X1-Y5
6	33,0	X1-Y6	29,3	X1-Y6	17,2	X1-Y6	43,6	X2-Y2	43,0	X2-Y1	28,7	X1-Y6	32,0	X2-Y2	47,6	X2-Y3	26,3	X1-Y6
7	43,0	X2-Y1	41,4	X1-Y7	23,0	X1-Y7	44,8	X1-Y5	43,4	X2-Y2	36,5	X1-Y7	35,6	X2-Y3	52,6	X1-Y4	36,4	X1-Y7
8	43,4	X2-Y2	43,0	X2-Y1	30,0	X1-Y8	45,8	X2-Y3	45,2	X2-Y3	36,8	X2-Y1	40,5	X1-Y5	65,4	X2-Y4	36,8	X2-Y1
9	44,0	X2-Y3	43,3	X2-Y2	36,8	X2-Y1	51,2	X2-Y4	49,4	X2-Y4	36,9	X2-Y2	43,3	X2-Y4	70,4	X3-Y1	36,9	X2-Y2
10	44,9	X2-Y4	43,9	X2-Y3	36,9	X2-Y2	61,2	X2-Y5	53,1	X1-Y6	37,5	X2-Y3	56,5	X2-Y5	73,5	X3-Y2	37,5	X2-Y3

Xi-Yj – Modo caracterizado por “i” ondas na direção X e “j” ondas na direção Y. Valores ímpares correspondem a modos simétricos e valores pares a modos antissimétricos.

Uma primeira conclusão a destacar, porque algo inesperada, é a de que a solução madeira-betão apoiada em dois lados (G) é a que apresenta o mais baixo valor da frequência fundamental, embora seja muito mais rígida do que as restantes (à exceção da H). Tal deve-se ao facto de a esta solução estar associado um significativo aumento de massa, que influencia a frequência em sentido inverso da rigidez. Assim, para a avaliação da eficácia deste tipo de solução deverá ponderar-se se, com ela, se pretende reforçar a resistência e rigidez sob ações estáticas ou o efeito de diafragma para a ação sísmica. Para a variante com apoio em 4 lados, como é esperado que aconteça em situação de reabilitação real, a frequência fundamental mantém-se mais ou menos inalterada, mas há um aumento significativo das restantes, o que sem dúvida se deve à muito maior rigidez transversal desta variante, conferida pela lâmina de betão contínua, em relação a qualquer das restantes.

Outro aspeto relevante é o de que a consideração de juntas nos elementos secundários (sarrafos ou tábuas de solho) não afeta significativamente as frequências e modos de vibração, o que se pode concluir por comparação das variantes A e B, diferindo entre si apenas pela consideração de juntas nos sarrafos. A modelação poderá, por conseguinte, ser feita admitindo elementos contínuos, o que simplifica consideravelmente a modelação.

A comparação das variantes com (B) e sem (C) sarrafos e apoio em dois lados revela, como esperado, redução nos valores das frequências de vibração. No entanto, essa redução é pequena nos primeiros modos, acentuando-se apenas nos modos superiores, com baixa contribuição para a resposta do pavimento. Esse comportamento é semelhante nas variantes com apoio nos 4 lados (D e E), presumivelmente conferido também por frechais laterais mantendo-se, nestes casos, a proximidade dos valores das frequências mesmo para os modos mais elevados.

A presença de um tarugo central (I) quase não altera as frequências dos primeiros 3 modos da variante sem esse elemento (C), indicando que esse elemento, eficaz para melhorar a repartição de cargas, como se verá a seguir, tem pouco impacto na modificação do comportamento dinâmico do pavimento.

Finalmente, observa-se que, em todos os casos, a frequência fundamental se mantém basicamente acima de 8Hz o que, do ponto de vista regulamentar (EC5), permite a dispensa de um estudo dinâmico específico e requer apenas a verificação simplificada da secção 7.3.3 daquela norma, o que não será feito neste trabalho por falta de espaço.

### 2.3 Resultados e discussão – Distribuição de carga

Nas Figuras 4-a-b-c-d representa-se o efeito de repartição de carga, em termos de % do momento máximo numa viga carregada isoladamente. Os gráficos a) e b) referem-se à viga de bordo, com uma

força pontual aplicada a 1/4 ou a meio vão dessa viga. Não se representam as variantes D, E, F e H porque, sendo apoiadas nos 4 lados, a questão da repartição de carga não se coloca nesses casos.

Os gráficos c) e d) correspondem à viga central, com a força nas mesmas posições dessa viga. O eixo das abcissas refere-se à posição ao longo do vão de 4,8m.

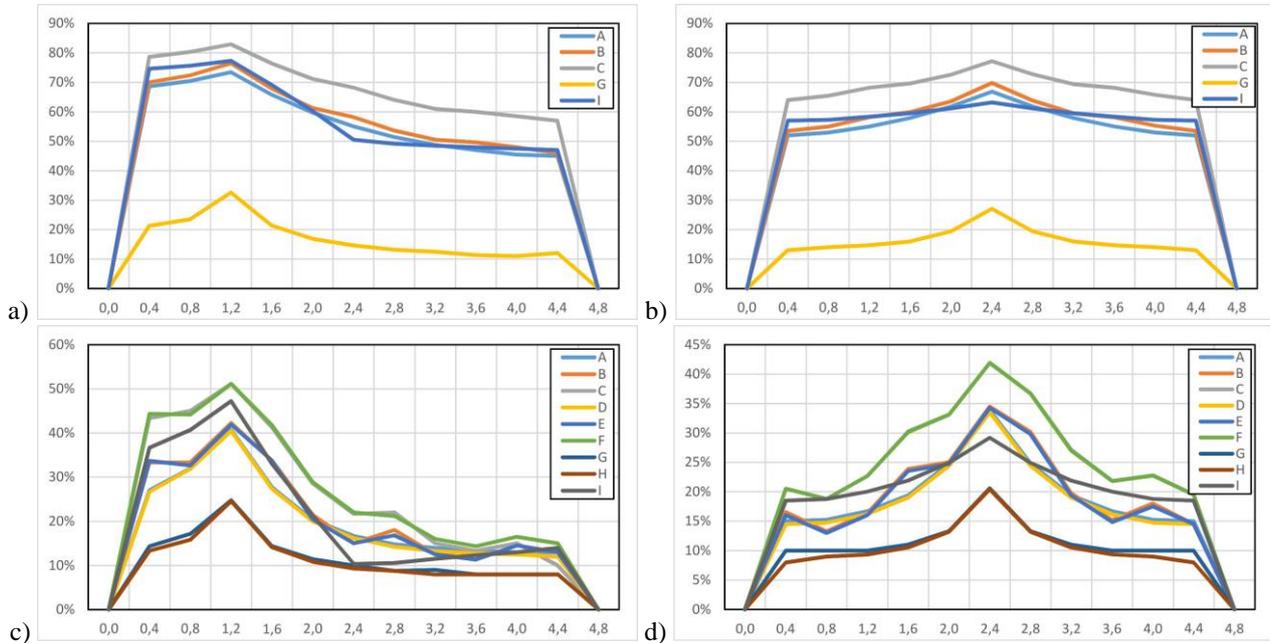


Figura 4: Efeito de repartição de carga pontual aplicada em: a) 1/4 do vão em viga lateral; b) 1/2 vão em viga lateral; c) 1/4 do vão em viga central; d) 1/2 vão em viga central

O aspeto relevante que os gráficos a) e b) evidenciam é o da superior capacidade de distribuição do pavimento madeira-betão, para carga aplicada na viga lateral. Enquanto nas restantes variantes essa viga é chamada a suportar de 70 a 80% do momento de referência, esse valor diminui para cerca de 30% na solução mista, o que se deve provavelmente à muito maior rigidez transversal desta solução. É de admitir que, caso tivesse sido levado em conta o comportamento semi-lígido, esta percentagem fosse ainda menor, uma vez que tal diminuiria a rigidez da viga. No entanto, e dada a complexidade do problema, esta observação não passa de uma conjectura a comprovar por uma análise mais profunda. Este comportamento é também observado para a carga aplicada a 1/4 ou meio vão da viga central, embora a redução de momento daí resultante não seja tão dramática como no caso da viga lateral. Assim, conclui-se que, adicionalmente ao aumento de resistência resultante da associação da viga de madeira e da lajeta de betão numa secção compósita, este tipo de solução beneficia ainda de um acréscimo de resistência adicional proveniente da melhoria da distribuição de carga.

Este efeito pode constatar-se de forma mais evidente na Figura 5, na qual se representam, para uma força pontual aplicada a meio vão da viga central, os momentos fletores, em percentagem do momento de referência, ao longo de toda essa viga. As soluções mistas (G e H) são de novo as mais eficazes, embora também seja de assinalar a redução significativa conseguida pela introdução do tarugo central (variante I), que pode assim ser igualmente encarado como uma solução indireta de reforço do pavimento.

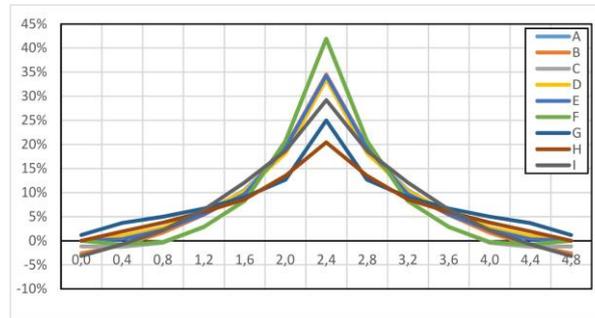


Figura 5: Variação de momento fletor ao longo da viga central, sob força pontual a meio vão

### 3. COMPORTAMENTO ESTÁTICO NO PLANO (EFEITO DE DIAFRAGMA)

#### 3.1 Modelação

Foi considerado a mesma configuração de referência que no caso anterior, focando-se agora a atenção no desempenho sob forças no plano. Os pavimentos de madeira são geralmente considerados ineficazes quanto ao comportamento de diafragma, essencial para distribuir as forças horizontais geradas pela ação sísmica pelos elementos de travamento verticais (paredes de alvenaria, tipicamente). As razões para tal são a baixa rigidez axial das vigas constituintes mas, principalmente, o mecanismo de distorção permitido pela ausência de sarrafos ou a sua pregagem perpendicular às vigas (Figura 6).

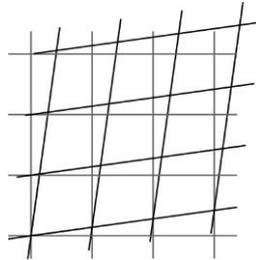


Figura 6: Mecanismo de distorção em pavimentos de madeira

Com o intuito de averiguar este comportamento e a eficácia de possíveis soluções de reforço e correção, foram analisados os modelos representados nas Figuras 7-a-b-c. O primeiro caso constitui a solução de referência, o tradicional pavimento de vigas de madeira e sarrafos transversais, com vãos e secções transversais iguais às utilizadas para o estudo fora do plano. A Figura 7-b refere-se a uma laje mista madeira-betão, tendo sido removidos os sarrafos e executada uma lajeta de 6cm de espessura. Também aqui, como na secção 2, se considerou a ligação rígida madeira-betão o que, não correspondendo à situação real, não altera as conclusões do estudo de forma significativa. A Figura 7-c representa uma treliça horizontal executada sob ou sobre o pavimento existente. Esta solução é frequente em reabilitação e reforço de pavimentos de madeira e destina-se, em primeiro lugar, a travar panos não contraventados de paredes mas, possuindo uma considerável rigidez no plano, melhora igualmente o comportamento de diafragma do pavimento. Estando quase continuamente apoiada nos elementos de madeira, que suportam o seu peso e limitam os comprimentos de encurvadura dos elementos individuais, pode ser executada com barras de aço retangulares de pequena secção. No estudo presente, a secção considerada foi de 60x5mm<sup>2</sup>, aplicada ao baixo.

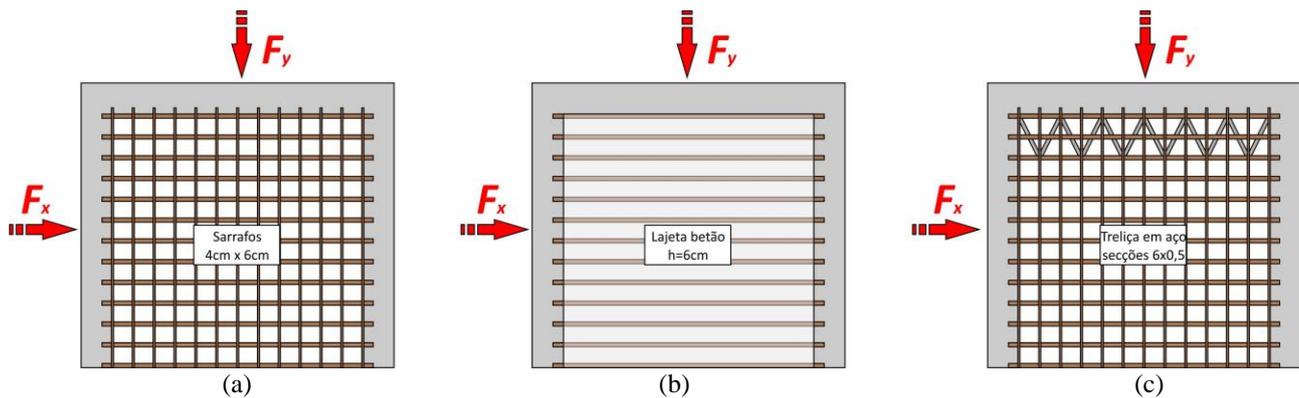


Figura 7: Configurações analisadas para estudo da rigidez no plano

O pavimento cobre um espaço quadrado de 5m de lado. Este é fechado por paredes de alvenaria em três lados e aberto no outro. Esta configuração foi escolhida para permitir separar as componentes de translação e de rotação/torção das ações horizontais. As vigas de pavimento orientam-se segundo a direção X (horizontal), apoiando-se em paredes opostas. Os sarrafos dispõem-se segundo a direção Y. O espaçamento de ambos os elementos é de 40cm.

As forças pseudo-estáticas correspondentes à ação sísmica foram determinadas de forma simplificada, considerando uma aceleração horizontal de 0,15g, valor correspondente a um sismo de intensidade elevada, e admitindo que a massa da estrutura era inteiramente devida ao peso das paredes, o que corresponde aproximadamente à realidade. Considerando paredes de 0,8m de espessura e 4m de pé-direito, a força sísmica a distribuir pelo pavimento, por piso e por unidade de comprimento de parede, será de

$$F_x = F_y = 0,8 \cdot 4,0 \cdot 22 \cdot 0,15 = 10,6 \text{ kN/m} \quad (7)$$

Assim, foi considerada uma carga uniformemente distribuída de 10kN/m por metro linear de parede, perfazendo uma força total de 50kN na direção y e de 100kN na direção x, uma vez que existem duas paredes segundo y. Note-se que estas forças são as que atuam segundo o eixo fraco de cada parede, admitindo-se que as que atuam segundo o eixo forte são diretamente suportadas pela parede respectiva, sem intervenção do efeito distribuidor do pavimento/diafragma.

Para as condições de apoio do pavimento no plano, consideraram-se apoios elásticos de rigidez igual à rigidez de translação de uma parede com as dimensões indicadas, atuada por uma força horizontal no topo (Figura 8) e um módulo de elasticidade de 1GPa, ou seja, para um espaçamento de 0,4m entre apoio

$$K = 3EI/L^3 = 3 \cdot 1E06 \cdot (0,4 \cdot 0,8^3 / 12) / 4,0^3 = 800 \text{ kN/m} \quad (8)$$

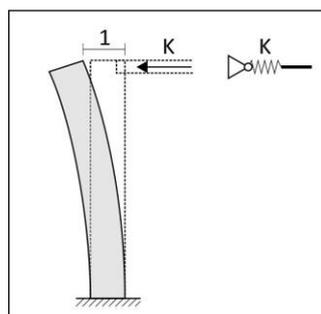


Figura 8: Rigidez no plano dos apoios do pavimento

### 3.2 Resultados e discussão – Ação sísmica na direção y

Neste caso, a força sísmica na parede x deve ser distribuída, por efeito de diafragma, para as duas paredes y. Tratando-se de uma situação simétrica, não há lugar a torção de conjunto, pelo que, considerando negligenciável a rigidez de eixo fraco da parede x, esta deveria suportar 0% desta força, cabendo 50% a cada parede y.

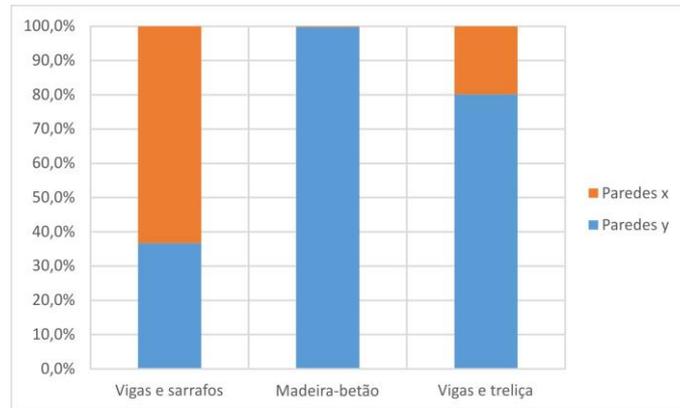


Figura 9: Repartição da força  $F_y$  pelas paredes para as 3 variantes

Os resultados representados na Figura 9 mostram comportamentos muito distintos para as 3 configurações analisadas. Para a solução mista madeira-betão, verifica-se que o comportamento de diafragma é praticamente perfeito, sendo 99,2% da força  $F_y$  transferida para as paredes que se dispõem segundo esta direção. No caso de referência, sem qualquer medida de reforço, comprova-se a ineficácia para o fim proposto, ficando a parede orientada na direção x sujeita a grandes flexões fora do seu plano (63,3% da força  $F_y$ ), para as quais não tem capacidade resistente, a menos que se proceda à execução de reforços armados em ambas as faces, situação que só deverá ser considerada na ausência de alternativas mais económicas e menos visualmente impactantes. A treliça melhora significativamente este comportamento, mas não a um ponto que permita aceitar a validade da hipótese do diafragma rígido, uma vez que 19,9% da força  $F_y$  fica ainda a cargo da parede orientada segundo x. No entanto, deve ter-se em conta que a solução específica aqui testada é passível de melhoramentos sem acréscimo de custos significativos, nomeadamente: i) o aumento do braço do binário (altura) da treliça; ii) a sua duplicação (no lado oposto do pavimento) ou iii) quadruplicação, com um quadro treliçado em todo o contorno. Estas variantes não foram aqui testadas, por falta de espaço, mas produzirão, seguramente, um aumento de eficácia no efeito de diafragma. A última alternativa, em particular, revelar-se-á indispensável para fazer face aos efeitos de torção, como se verá na sub-secção seguinte.

### 3.3 Resultados e discussão – Ação sísmica na direção x

Devido à disposição das paredes, haverá agora grande excentricidade entre o centro de massa das forças que mobilizam o pavimento (sensivelmente no centro deste) e a rigidez que se lhes opõe (sensivelmente segundo o eixo da parede x). Em consequência, há lugar a um elevado momento torçor, que deverá ser equilibrado por forças “y” de sentidos opostos nas duas paredes y, de acordo com o modelo teórico de distribuição baseado no pressuposto do diafragma rígido. Com o equilíbrio de momentos assim garantido, as forças  $F_x$  deverão ser exclusivamente absorvidas pela parede x.

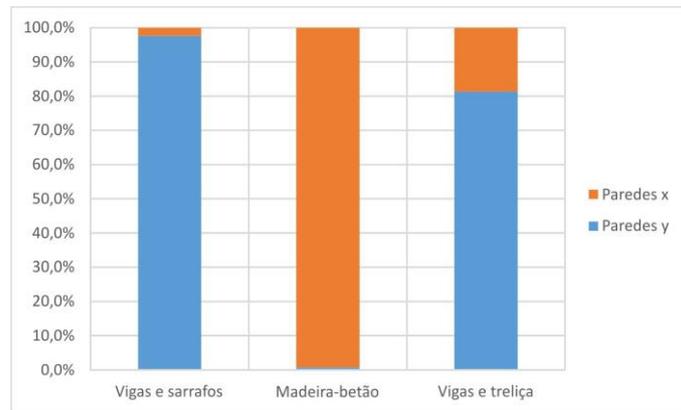


Figura 10: Repartição das forças  $F_x$  pelas paredes para as 3 variantes

A Figura 10 demonstra uma vez mais a perfeita concordância da solução mista madeira-betão com a hipótese do diafragma rígido, cabendo à parede x suportar 99,3% da força sísmica atuando nessa direção, não obstante a grande excentricidade. O pavimento tradicional revela-se absolutamente ineficaz, neste caso, apresentando uma distribuição residual de 2,4% e ficando, por conseguinte, a quase totalidade das forças  $F_x$  a produzir flexão fora do plano das paredes y. A treliça exerce de novo um efeito benéfico na repartição de forças, mas muito inferior ao do caso da translação sem torção e claramente insuficiente para uma condição de projeto aceitável. Sendo a consideração da torção incontornável em situação de projeto real, mesmo no caso de estruturas com simetria ortogonal (segundo os dois eixos), pela imposição regulamentar de excentricidades mínimas (EC8 [5]), resulta que uma solução de reforço com treliças no pavimento, para ser eficaz, deverá prever a execução de uma treliça de topologia tubular, preferencialmente acompanhando o contorno do pavimento.

#### 4. CONCLUSÕES

O comportamento dinâmico de pavimentos de madeira de construção tradicional não fazia parte do conhecimento existente à época da construção destes edifícios, tipicamente anteriores ao início do século XX. Neste trabalho, de natureza analítica e computacional, procurou-se salientar as suas idiossincrasias, nomeadamente com vista a apoiar a decisão face a eventual intenção de reforço ou reabilitação. O estudo incidiu sobre o comportamento no plano (como diafragma) e fora do plano (como pavimento propriamente dito). No último caso, analisaram-se pavimentos simples (com solho diretamente sobre as vigas), com sarrafos e com tarugos, e ainda o efeito da consideração das juntas nos sarrafos. Complementarmente, analisou-se ainda uma solução de reforço constituída por uma lajeta de betão rigidamente ligada às vigas. Verificou-se que as primeiras frequências de vibração, que determinam o essencial das forças dinâmicas em condições normais de utilização, sofrem variações pequenas em valor e ordenamento embora, contra a expectativa inicial, a solução mista apresente uma ligeira redução da frequência fundamental. Ainda assim, todos os valores se mantêm acima (ou apenas ligeiramente abaixo, no caso referido) do valor de 8Hz o qual, nos termos do EC5 [2], requer um estudo dinâmico aprofundado. Todas as soluções de madeira apresentam capacidades de repartição de carga comparáveis, mas a solução mista madeira-betão é muito mais eficaz para este fim, sendo particularmente eficiente para repartição de carga das vigas de bordo dos painéis de pavimento.

No que respeita ao comportamento no plano, foi de novo modelado um pavimento tradicional, com vigas e sarrafos, e comparados os seus resultados com os de duas soluções possíveis de reforço, respetivamente uma solução mista madeira-betão com uma lajeta executada *in situ* e o pavimento original com uma treliça horizontal metálica, para melhoria do comportamento no plano. Foram considerados separadamente os efeitos devidos à translação e à torção causadas pela ação sísmica,

tendo-se concluído que a solução mista apresenta um comportamento de diafragma praticamente perfeito. O pavimento de referência tem baixa capacidade de distribuição de forças horizontais, confirmando a ideia da sua inadequação para essa finalidade. A treliça de reforço melhora sensivelmente esse desempenho mas, nomeadamente no caso de torções significativas, é aconselhável o uso de uma topologia fechada, preferencialmente acompanhando o contorno do pavimento, para se obter um desempenho adequado.

## REFERÊNCIAS

- [1] CEN-Comité Européen de Normalization, EN 338: Structural timber - Strength classes, Brussels, 2009
- [2] CEN-Comité Européen de Normalization, EN 1995-1-1:2005, Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings, Brussels, 2004
- [3] CEN-Comité Européen de Normalization, EN 1992-1-1:2004+AC:2008, Eurocode 2 – Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings, Brussels, 2004
- [4] Autodesk Robot Structural Analysis, v. 2017, Autodesk, USA, 2016
- [5] CEN-Comité Européen de Normalization, EN 1998-1:2004, Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance - Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, Brussels, 2004