

DESEMPENHO DINÂMICO E ACÚSTICO DE PAINÉIS SANDUÍCHE DE POLÍMEROS REFORÇADOS COM FIBRAS DE VIDRO

Albano Neves e Sousa¹, Carlos Tiago¹, Pedro Sanches¹

¹UTL – Universidade Técnica de Lisboa, IST, DECivil, ICIST, Av. Rovisco Pais, 1, 1049-001 Lisboa, Portugal
{albano.nsousa@civil.ist.utl.pt; carlos.tiago@civil.ist.utl.pt; pmmsanches@civil.ist.utl.pt}

Resumo

Na reabilitação de edifícios antigos de alvenaria, é usual substituir os pavimentos vigados de madeira por materiais tradicionais (aço e betão), os quais, além de introduzirem cargas permanentes significativas que aumentam a vulnerabilidade sísmica dos edifícios, colocam problemas construtivos associados às operações de transporte e colocação dos materiais em espaços exíguos. Como alternativa podem ser utilizados materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP “Fibre Reinforced Polymer”), tais como painéis sanduíche constituídos por polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP “Glass FRP”). Estes materiais apresentam: elevada resistência mecânica; leveza; isolamento térmico; reduzida manutenção; elevada durabilidade; e custos cada vez mais competitivos. No entanto, o comportamento acústico deste tipo de pavimentos leves é geralmente fraco, condicionando, portanto, o processo de dimensionamento. Assim, é importante desenvolver ferramentas simples de previsão do desempenho acústico destes painéis sanduíche.

Neste artigo são apresentados modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos, os quais foram desenvolvidos para previsão inicial do desempenho dinâmico e acústico de painéis sanduíche de GFRP com espuma rígida de poliuretano (PU) como camada intermédia. Os modelos foram utilizados também para identificar os parâmetros que controlam o comportamento destes painéis sanduíche.

Palavras-chave: reabilitação, pavimentos leves, painéis sanduíche, GFRP, elementos finitos.

Abstract

In rehabilitation of old masonry buildings, timber-joisted floors are usually replaced by traditional materials (steel and concrete), which not only introduce significant dead loads in existing constructions, thus increasing their seismic vulnerability, but also poses constructive problems associated to transport and placement operations in narrow spaces. As an alternative, fibre reinforced polymer materials (FRP), such as glass fibre reinforced polymer (GFRP) sandwich panels, may be used. These materials present: high mechanical resistance; lightness; thermal insulation; low maintenance; improved durability; and increasingly competitive costs. However, the acoustic behaviour of such lightweight floors is generally poor, thus conditioning the design process. Therefore, it is important to develop simple tools for prediction of the acoustic performance of these sandwich panels.

In this paper, numerical models based on the finite element method, which were developed for initial prediction of the dynamic and acoustic performance of GFRP sandwich panels with rigid polyurethane (PU) foam as interlayer, are presented. The numerical models were used also to identify the factors which control the behaviour of these sandwich panels.

Keywords: rehabilitation, lightweight floors, sandwich panels, GFRP, finite elements.

PACS no. 43.40.Ey, 43.55.Ti

1 Introdução

A aplicação do aço e betão na reabilitação de pavimentos de edifícios antigos é normalmente associada a operações complicadas de transporte e colocação dos materiais em espaços exíguos. Estes materiais introduzem também um aumento significativo das cargas permanentes, o que afecta a vulnerabilidade sísmica dos edifícios intervençados.

Assim, é importante identificar soluções construtivas alternativas, as quais podem passar pela utilização de materiais poliméricos reforçados com fibras (FRP “Fibre Reinforced Polymer”), tal como acontece com os painéis sanduíche constituídos por polímeros reforçados com fibra de vidro (GFRP “Glass FRP”). Estes painéis leves apresentam elevada resistência mecânica, com necessidades de manutenção reduzidas e elevada durabilidade, tudo a custos cada vez mais competitivos. Adicionalmente, exibem ainda características isolantes térmicas. No entanto, o comportamento acústico deste tipo de pavimentos leves é geralmente fraco, sendo este o parâmetro de desempenho que condiciona o seu dimensionamento.

Nestas condições, torna-se importante desenvolver ferramentas simples de previsão do desempenho acústico destes painéis sanduíche com vista a permitir o seu rápido dimensionamento.

Neste artigo são apresentados modelos numéricos baseados no método dos elementos finitos (MEF), os quais foram desenvolvidos para previsão inicial do desempenho dinâmico e acústico de painéis sanduíche de GFRP com espuma rígida de poliuretano (PU) como camada intermédia. Os modelos de análise estrutural foram validados por comparação com resultados experimentais obtidos em ensaios de pavimentos leves de teste, nomeadamente um pavimento em Plexiglas e um pavimento vigado de madeira.

2 Análise de vibrações estruturais

Foi criado um programa de cálculo para efectuar a análise dinâmica de estruturas. O programa foi desenvolvido no ambiente Matlab [1] e considera uma discretização espacial baseada no método dos elementos finitos. A análise no domínio do tempo pode ser realizada com base em esquemas de aproximação por diferenças finitas ou com base no método da sobreposição modal, assumindo-se, em qualquer dos casos, comportamento física e geometricamente linear.

A discretização espacial do meio tridimensional é efectuada com elementos de barra e casca, contemplando a deformação por corte, ou com elementos sólidos isoparamétricos.

Foram tidos em conta aspectos de discretização que visam aumentar a aplicabilidade do MEF no domínio das frequências mais elevadas, não tendo sido possível, no entanto, cobrir todo o intervalo das audio-frequências.

O programa de cálculo desenvolvido permite grande liberdade na criação e análise de modelos, mas requer uma análise cuidada dos resultados obtidos. Esta tarefa é facilitada através da visualização de resultados em formato VTK e uso subsequente do programa MayaVi [2].

2.1 Biblioteca de elementos finitos utilizada pelo programa de cálculo

O elemento de barra apresenta 12 graus de liberdade e permite considerar os modos de deformação axial, por torção e flexão. Todas as grandezas relevantes para a análise foram avaliadas analiticamente e introduzidas no programa de cálculo. A aproximação utilizada para a flexão baseia-se na solução exacta do problema da barra homogénea de Timoshenko [3]. O campo de deslocamentos é expresso por um polinómio cúbico $C1$ e o campo de rotações é dado por um polinómio quadrático. Ambos dependem da relação entre as rigidezes de flexão e corte. A matriz de massas associada foi deduzida

por Reddy [4]. Para os elementos axiais e de torção foram utilizadas funções de forma lineares de Lagrange C0.

O elemento de casca apresenta número de nós variável, com seis graus de liberdade por nó, e incorpora modos de deformação de membrana e flexão. Foi criada uma biblioteca de elementos finitos isoparamétricos triangulares e quadrangulares. Os elementos triangulares podem ter três, seis ou dez nós, produzindo aproximações lineares, quadráticas ou cúbicas, respectivamente. Os elementos quadrangulares podem ter oito, nove, doze ou dezasseis nós. A integração numérica das contribuições de membrana, flexão e corte para a matriz de rigidez são efectuadas de forma independente, de modo a reduzir os efeitos de *locking* de corte e membrana. São consideradas apenas matrizes de massa consistentes. A rigidez associada aos graus de liberdade de *drilling* é considerada simplificada de acordo com Chróscielewski *et al.* [5], não adicionando massa a estes graus de liberdade.

Os elementos sólidos isoparamétricos implementados incluem as famílias dos tetraedros, hexaedros e dos prismas (elementos de transição *wedge-shaped*). Os elementos tetraédricos podem ter quatro ou dez nós, produzindo aproximações lineares ou quadráticas, respectivamente. Os elementos hexaédricos podem ter oito, vinte ou vinte e sete nós. Os elementos de transição podem ter seis, quinze ou dezoito nós. As famílias de elementos implementadas fornecem um leque de possibilidades de modelação que não estão normalmente disponíveis em programas comerciais, sendo esta uma das vantagens do programa de cálculo desenvolvido. Em particular, é possível explorar discretizações com elementos de ordem superior, *i.e.*, é possível explorar o refinamento-*p*, o que pode ser útil na aproximação da resposta dinâmica em frequências mais elevadas.

De modo a gerar representações geométricas precisas do modelo real, a ligação entre os campos de deslocamentos de elementos de casca e de elementos sólidos pode ser efectuada recorrendo a elementos de barra rígidos, obtendo-se, desta forma, soluções estritamente compatíveis.

2.2 Métodos de análise no domínio do tempo

A discretização no tempo pode ser efectuada através de esquemas de aproximação de Newmark [6] ou através do método de sobreposição modal. A comparação entre os dois métodos constitui uma forma de controlar o erro obtido na análise. No método de Newmark, o erro resulta dos valores adoptados para o passo no tempo e para as constantes α e γ utilizadas no cálculo incremental da resposta em cada instante. Com o método da sobreposição modal, o erro resulta do número de modos naturais de vibração considerados e do número de funções trigonométricas utilizado na aproximação da variação da carga ao longo do tempo. Ambos os métodos apresentam grande sensibilidade ao valor do coeficiente de amortecimento dos materiais, pelo que este parâmetro deverá ser estimado cuidadosamente e, sempre que possível, calibrado.

3 Validação do método

Para efeitos de validação do programa, a função de transferência entre a força de impacto aplicada num dado ponto de dois pavimentos de teste e a velocidade registada nesse ponto (mobilidade) foi comparada com resultados obtidos por via experimental [7].

Um dos pavimentos de teste é constituído por uma laje em Plexiglas com 2,40 m \times 1,20 m, com 12 mm de espessura, reforçada com vigas com espaçamento de 40 cm aparafusadas à laje em dezasseis pontos igualmente espaçados (Figura 1). As vigas apresentam secção transversal rectangular com 18,7 mm de espessura e 235 mm de altura. Foram consideradas na modelação as seguintes propriedades do material: $\rho = 1190 \text{ kg/m}^3$; $E = 3,3 \text{ GPa}$; $\nu = 0,37$ [7, 8]. Cada viga tem dois apoios simples nas extremidades.

A laje e as vigas foram modeladas com elementos finitos de casca quadrangulares de nove nós e a ligação conferida pelos parafusos foi modelada com elementos de barra de Timoshenko com as propriedades mecânicas do aço.

Na Figura 1 são indicados os pontos onde foi efectuada a avaliação da mobilidade.

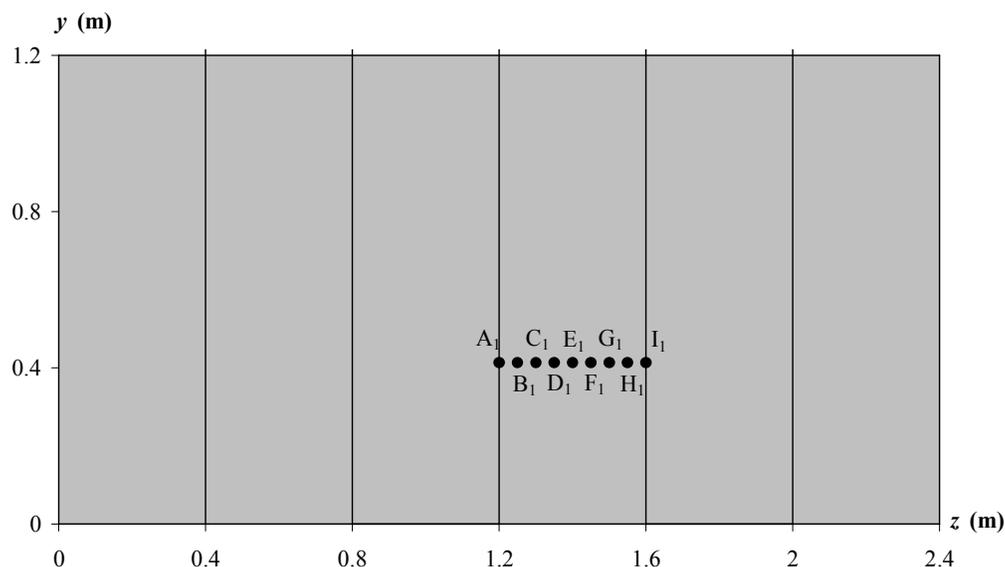


Figura 1 – Pontos A₁ a I₁ para avaliação da mobilidade do pavimento de teste em Plexiglas.

O outro pavimento de teste é constituído por um pavimento de madeira com 4,50 m × 5,00 m, com 21 mm de espessura, reforçado com vigas de madeira com espaçamento de 78 cm. As vigas não estão colocadas de forma simétrica no pavimento (Figura 2). Uma das vigas de extremidade está a 22 cm do bordo, encontrando-se a outra a 10 cm do bordo oposto. As vigas apresentam uma secção transversal rectangular com 96 mm de espessura e 192 mm de altura e encontram-se ligadas à laje por vinte e três parafusos igualmente espaçados. Os materiais utilizados na laje e nas vigas são diferentes. A laje é constituída por um aglomerado de partículas de madeira com as seguintes propriedades: $\rho = 668 \text{ kg/m}^3$; $E = 2 \text{ GPa}$; $\nu = 0,30$ [7, 8]. As vigas são em madeira com as seguintes propriedades: $\rho = 400 \text{ kg/m}^3$; $E = 11 \text{ GPa}$; $\nu = 0,25$ [7, 8]. As vigas estão simplesmente apoiadas em ambas as extremidades.

Tal como anteriormente, a laje e as vigas foram modeladas com elementos finitos de casca quadrangulares de nove nós, tendo a ligação conferida pelos parafusos sido modelada com elementos de barra de Timoshenko.

Na Figura 2 são indicados os pontos deste pavimento onde foi efectuada a avaliação da mobilidade.

Na Figura 3 são apresentados, a título ilustrativo, os resultados obtidos para os espectros em bandas de frequências de terços de oitava da parte real da mobilidade nos pontos A₂ a E₂ do pavimento de teste em madeira.

Observa-se, em conformidade com resultados obtidos experimentalmente por Mayr e Nightingale [7] e numericamente por Neves e Sousa [8] que, nas baixas frequências, a mobilidade dos pontos sobre a viga ou próximos da viga, aproxima-se da mobilidade característica da viga, tendendo, nas altas frequências (acima dos 1000 Hz), para a mobilidade característica da laje. Nos pontos mais próximos do meio vão, a mobilidade aproxima-se mais da mobilidade característica da laje, aumentando a convergência nas altas frequências.

Obtêm-se conclusões análogas relativamente ao pavimento de Plexiglas.

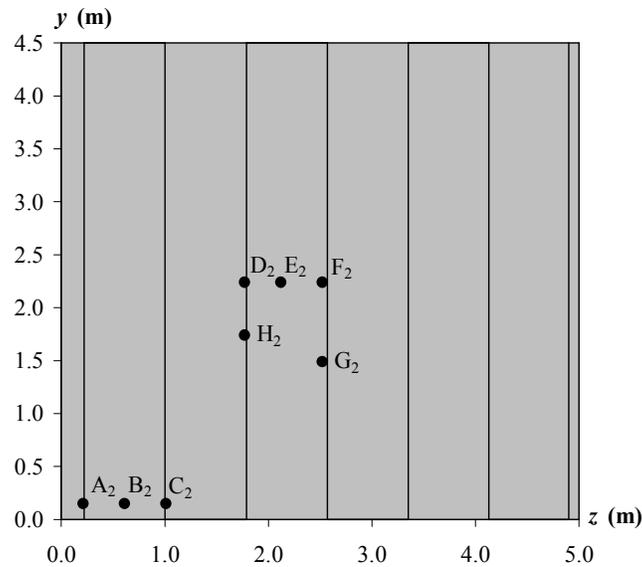


Figura 2 – Pontos A₂ a H₂ para avaliação da mobilidade do pavimento de teste em madeira.

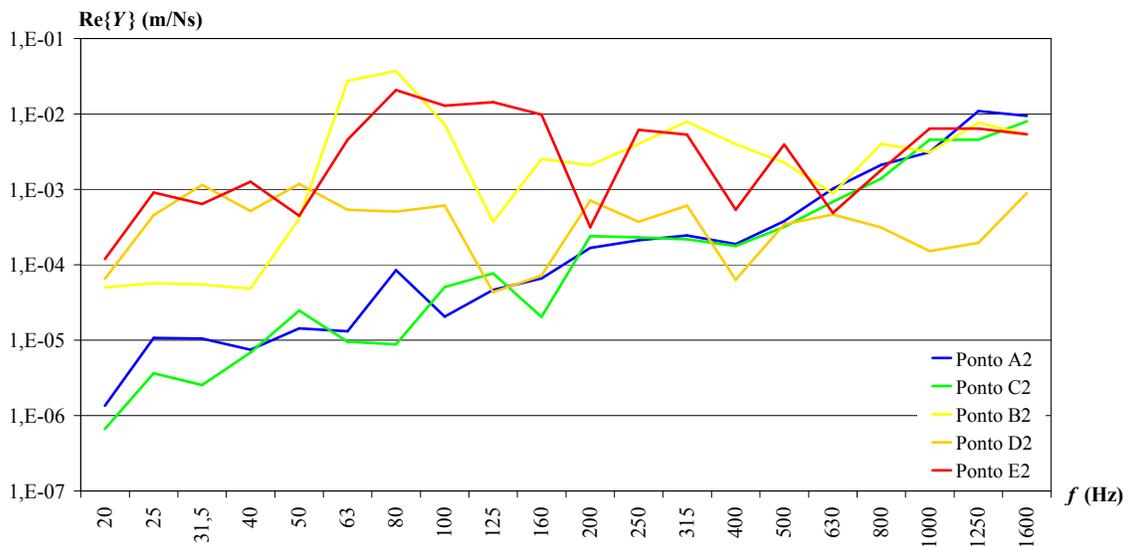


Figura 3 – Espectro em bandas de frequências de terços de oitava da parte real da mobilidade nos pontos A₂ a E₂ do pavimento de teste em madeira.

Nas Figuras 4 a 5 são apresentados, respectivamente para os pavimentos de teste em madeira e Plexiglas, alguns modos de vibração calculados pelo programa, os quais foram confirmados por comparação com resultados obtidos com programas comerciais, nomeadamente com o SAP2000 [9]. A visualização gráfica foi obtida através do programa MayaVi [2].

Os resultados apresentados têm ainda carácter preliminar, sendo desejável a realização de uma maior quantidade de testes de validação. No entanto, existem boas indicações da fiabilidade do programa, pelo que o mesmo pode ser utilizado na previsão do desempenho de painéis sanduíche de GFRP com espuma rígida de poliuretano como camada intermédia.

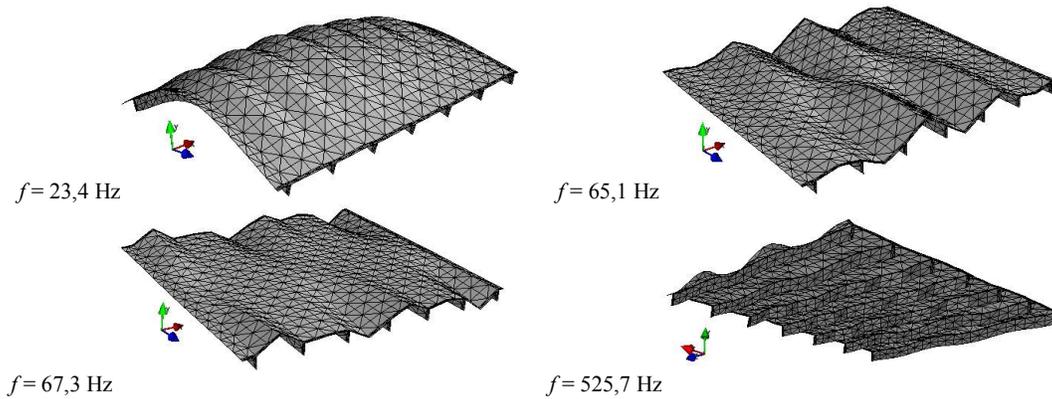


Figura 4 – Alguns modos de vibração naturais do pavimento de teste em madeira.

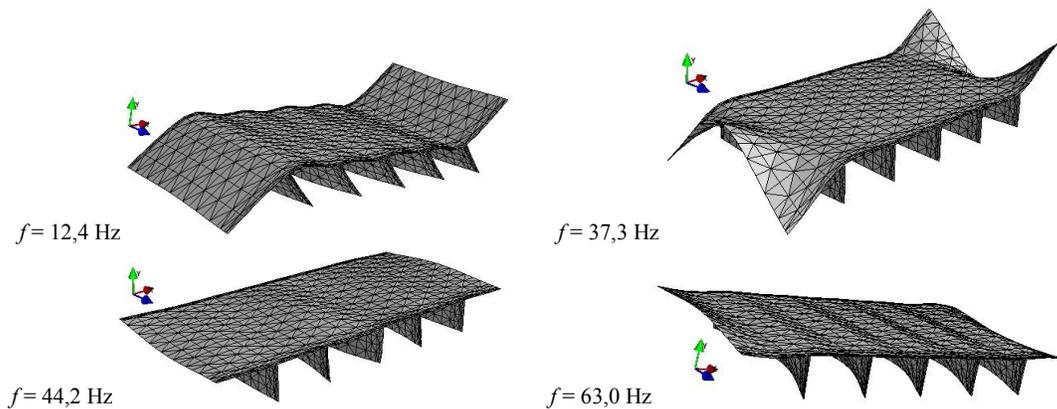


Figura 5 – Alguns modos de vibração naturais do pavimento de teste em Plexiglas.

4 Aplicação do método aos painéis sanduíche de GFRP com PU

Com o objectivo de caracterizar o desempenho dinâmico e acústico de painéis sanduíche de GFRP com camada intermédia em espuma rígida de poliuretano, optou-se por testar, experimentalmente, painéis quadrados com 3,56 m de lado e espessura total de 134 mm, correspondente a duas lâminas (inferior e superior) de GFRP com 7 mm de espessura cada uma e a uma camada intermédia de PU com 120 mm de espessura. Este protótipo está ainda em execução, pelo que os ensaios experimentais não foram ainda realizados.

Assim, nesta fase do estudo, é possível apenas estimar o desempenho dinâmico por via da modelação numérica.

Algumas das propriedades dos materiais constituintes do painel foram já avaliadas por via experimental. No entanto, ainda existem algumas propriedades que carecem de verificação experimental, nomeadamente no que se refere à camada intermédia em PU. Tendo em conta estas limitações, as propriedades consideradas no modelo de elementos finitos basearam-se, sempre que possível, nos dados obtidos experimentalmente, sendo utilizados nas restantes situações os dados disponíveis em bibliografia [10]. Foram então consideradas as seguintes propriedades para as lâminas de GFRP: $\rho = 1800 \text{ kg/m}^3$; $E = 25 \text{ GPa}$; $\nu = 0,30$. Para a camada de PU considerou-se: $\rho = 100 \text{ kg/m}^3$; $E = 15 \text{ MPa}$; $\nu = 0,30$.

Consideraram-se todos os bordos do pavimento simplesmente apoiados, pois será esta a condição de apoio nos ensaios de caracterização do desempenho dinâmico e acústico.

A camada de PU foi modelada com elementos sólidos de oito nós e as lâminas de GFRP foram modeladas com elementos finitos de casca de quatro nós.

Na Figura 6 apresentam-se alguns modos de vibração naturais do painel, os quais foram, mais uma vez, confirmados com modelação paralela com um programa de elementos finitos comercial, nomeadamente o SAP2000 [9].

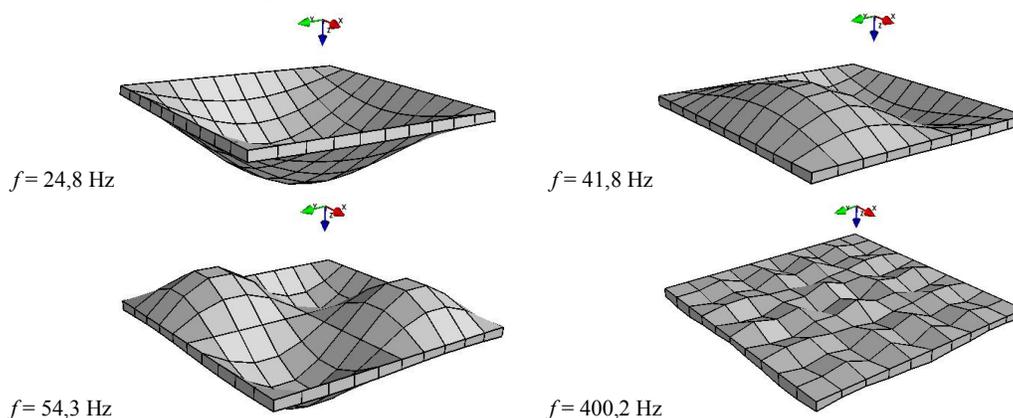


Figura 6 – Alguns modos de vibração naturais do painel sanduíche em GFRP com PU.

Na Figura 7 apresenta-se o espectro em bandas de terços de oitava da parte real da mobilidade avaliada no centro do painel. A Figura 7 mostra que o painel apresenta elevada mobilidade, mesmo quando comparada com a mobilidade de outros pavimentos leves. Observa-se também a elevada variabilidade espectral da mobilidade, mesmo para frequências elevadas, o que terá consequências ao nível do desempenho acústico.

5 Conclusões

No presente artigo foi apresentado um programa de cálculo baseado no método dos elementos finitos para a avaliação do desempenho dinâmico de estruturas. O programa foi desenvolvido com o objectivo de estimar a resposta acústica de espaços fechados face a elementos de construção em vibração. Nesta fase, apenas a componente estrutural está concluída e testada, estando a componente acústica (interacção estrutura-fluido) em fase avançada de desenvolvimento.

O programa de cálculo foi desenvolvido para permitir maior liberdade na modelação de sistemas estruturais do que aquela que normalmente se obtém com programas comerciais. Outro objectivo consistiu na tentativa de alargar o intervalo de frequências de aplicação do método dos elementos

finitos sem comprometer em demasia o tempo de cálculo. Este objectivo foi apenas parcialmente conseguido.



Figura 7 – Espectro em bandas de frequências de terços de oitava da parte real da mobilidade no centro do painel sanduíche de GFRP com camada intermédia de poliuretano.

Finalmente, o programa é adequado para a modelação do desempenho dinâmico e acústico de novos elementos de construção, como é o caso dos painéis sanduíche em GFRP com camada intermédia de poliuretano estudados no presente artigo. O programa permite prever as características dinâmicas do painel e, dessa forma, conduzir a fabricação do protótipo a ensaiar no sentido de acelerar o desenvolvimento de soluções construtivas aptas a serem introduzidas no mercado.

As conclusões do presente artigo apresentam carácter preliminar mas, ainda assim, indicam que os painéis sanduíche GFRP apresentam elevada mobilidade e elevada variabilidade espectral da mobilidade, mesmo em frequências médias a altas. É assim fundamental a realização de ensaios experimentais sobre o protótipo para validação e calibração dos modelos, bem como a realização posterior de uma análise paramétrica por via numérica para definir critérios adequados de dimensionamento.

Referências

- [1] The MathWorks Inc. *MATLAB, The Language of Technical Computing - Version R2012a*, 2012.
- [2] Ramachandran, P.; Varoquaux, G. MayaVi: a package for 3D visualization of scientific data, *Computing in Science and Engineering*, 13(2), 40–51, 2011.
- [3] Kanok-Nukulchai, W.; Dayawansa, P.H.; Karasudhi, P. An exact finite element model for deep beams, *International Journal of Structures*, 1(1), 1–7, 1981.
- [4] Reddy, J.N. On the dynamic behaviour of the Timoshenko beam finite elements, *SADHANA - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 24(3), 175–198, 1999.

- [5] Chróscielewski, J.; Makowski, J.; Stumpf, H. Genuinely resultantshell finite elements accounting for geometric and material non-linearity, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 35(1), 63–94, 1992.
- [6] Hughes, T.J.R. *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Dover Publications, Inc, Mineola, Nova Iorque, EUA, 2000.
- [7] Mayr, A.R.; Nightingale, T.R.T. On the mobility of joist floors and periodic rib-stiffened plates, *Actas do Inter-Noise 2007*, Istambul, Turquia, 28-31 de Agosto de 2007.
- [8] Neves e Sousa, A. Low frequency impact sound transmission through timber-joisted floors, *Actas do 15th International Congress on Sound and Vibration*, Daejeon, Coreia do Sul, 6-10 de Julho de 2008, pp. 1227-1234.
- [9] Computers and Structures, Inc., *SAP2000 User's Manual*, Berkeley, Califórnia, EUA, 2007.
- [10] Cardoso, G.T. *Caracterização da espuma rígida de poliuretano (PU) derivada de óleo de mamona (ricinnus communis) para isolamento térmico na construção civil*, Tese de Mestrado em Ciência e Engenharia de Materiais, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil, 2010.