



FCTUC DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
FACULDADE DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

Avaliação experimental do comportamento dinâmico e acústico de pavimentos mistos madeira- betão

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Civil
na Especialidade de Estruturas

Autor

Pedro Daniel Marques Valente de Almeida

Orientador

Alfredo Manuel Pereira Geraldês Dias

Luís Manuel Cortesão Godinho

Esta dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor, não tendo sofrido correcções após a defesa em provas públicas. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC declina qualquer responsabilidade pelo uso da informação apresentada

Coimbra, Julho, 2013

AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Doutor Alfredo Dias, pela orientação e apoio demonstrado durante a realização deste estudo.

Ao co-orientador, Prof. Doutor Luís Godinho, pela total disponibilidade e dedicação, prestada no decorrer da elaboração desta dissertação.

Um agradecimento especial ao Carlos Eduardo, pelo conhecimento transmitido e pelo apoio incansável em toda a fase experimental deste estudo.

Aos meus pais um grande obrigado por todo o esforço e sacrifício, pela possibilidade de concretização deste objectivo. Agradeço também à minha irmã e restantes familiares, um obrigado por todo incentivo e ajuda prestada ao longo da minha vida académica.

Aos meus colegas de curso que fizeram parte desta caminhada, pelos bons momentos e apoio que me deram.

À Joana Rita, amiga que me acompanhou neste último ano do curso, pelas palavras de coragem que me deu e o apoio demonstrado.

Aos funcionários do Laboratório de Estruturas e do ITeCons, pela colaboração neste estudo. Também um agradecimento ao Carlos Caiado, Luís Ferreira e Rui Saldanha, pela ajuda nas betonagens.

Este trabalho foi possível com colaboração de várias empresas. Agradeço à CIMPOR, pela cedência de cimento, à CORTICEIRA AMORIM, pela disponibilização de agregados de cortiça expandida, à BETÃO LIZ, pelo fornecimento do betão, à GYPTEC IBÉRICA, pela montagem e fornecimento do tecto falso, aos ARMAZÉNS DO CALHABÉ, pelo transporte dos provetes e ao ITeCons pela disponibilização do espaço de ensaio.

Ao projecto “LOGCork” financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, que permitiu a realização deste estudo.

Em memória da minha avó,

RESUMO

Os pavimentos mistos madeira-betão são uma das soluções crescentemente empregues como solução de reabilitação, de pavimentos de madeira. Esta solução tem vantagens importantes quer em termos de utilização, quer em termos de segurança aos estados limites últimos. De entre as vantagens de comportamento em situação de utilização destacam-se a menor ocorrência de vibrações ou o maior isolamento acústico aos sons aéreos. Relativamente a questões de segurança destacam-se a maior capacidade de carga que estas soluções apresentam relativamente aos pavimentos de madeira simples.

Este trabalho tem como objectivo a avaliação dos ganhos que podem ser esperados com este tipo de solução, em termos dos aspectos relacionados com a utilização, nomeadamente rigidez dinâmica e isolamento sonoro. Tal será conseguido através da realização de ensaios experimentais dinâmicos e sonoros. Estes serão realizados inicialmente em configurações com uso de madeira isolada e posteriormente em configurações mistas madeira-betão obtidas usando os elementos de madeira anteriormente testados.

Os resultados obtidos são sempre que possível comparados com outras soluções de referência, bem como, com resultados obtidos através de modelos disponíveis, nomeadamente os modelos regulamentares.

ABSTRACT

The wood-concrete floors are one of the solutions increasingly used as a possible solution for the rehabilitation, of timber floors. This solution has significant advantages in terms of both serviceability and ultimate limit states. In terms of serviceability the main advantages are related with lower occurrence of vibrations and the lower transmission of airborne sounds. In terms of ultimate limit states the main advantages are related with increased load carrying capacity, when compared to the original timber floor.

The aim of this work is the assessment of the potential gains, regarding that can be expected when this technique is used, namely dynamic stiffness and sound insulation. This will be achieved by through the performance of experimental tests. The tests will be performed in timber specimens and after that composite timber-concrete specimens will be prepared and tested in the same conditions.

The results are whenever possible compared with other reference solutions available in the Literature, as well as with results obtained from available models, including the one indicated in the codes.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
ÍNDICE	iv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE QUADROS	ix
SIMBOLOGIA.....	x
ABREVIATURAS.....	1
1 INTRODUÇÃO.....	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Enquadramento Histórico	4
2.2 Estruturas mistas madeira-betão.....	5
2.3 Análise Acústica.....	7
2.3.1 Generalidades	7
2.3.2 Noções de Isolamento Acústico a Sons de Percussão.....	9
2.3.3 Noções de Isolamento Acústico a Sons Aéreos.....	11
2.3.1 Exigências regulamentares.....	13
2.4 Análise Dinâmica	14
2.4.1 Generalidades	14
2.4.2 Fundamentos teóricos.....	15
3 ASPECTOS DO DIMENSIONAMENTO.....	18
3.1 Generalidades	18
3.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais	19
4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS	21
4.1 Caracterização das lajes	21
4.1.1 Elementos madeira	21
4.1.2 Ensaio do modo de elasticidade estático.....	22

4.1.3 Ensaio dinâmico	24
4.1.3.1 Ensaio do modo de elasticidade dinâmico.....	24
4.1.3.2 Ensaio de caracterização dinâmica	25
4.1.2 Elemento betão	27
4.1.2 Ligação madeira-betão	28
4.2 Execução das lajes	29
4.2 Ensaios dos provetes cúbicos	32
5 Ensaios Acústicos	33
5.1 Introdução	33
5.2 Descrição dos ensaios	33
5.2.1 Local e equipamentos de ensaio	33
5.2.2 Isolamento a sons aéreos.....	35
5.2.3 Isolamento a sons de percussão	36
5.3 Descrição dos provetes	37
5.4 Resultados obtidos	40
5.4.1 Desempenho das lajes.....	40
5.4.2 Desempenho do tecto falso	42
5.4.3 Índices de isolamento ponderados	44
6 ENSAIOS DINÂMICOS	46
6.1 Equipamentos de medição.....	46
6.2 Procedimento do ensaio	47
6.3 Provetes ensaiados.....	48
6.4 Resultados	48
6.4.1 Laje LOGCork	48
6.4.2 Laje de madeira	50
6.4.3 Laje madeira-betão	51
6.5 Análise comparativa	53
7 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO	54
7.1 Considerações finais.....	54
7.2 Trabalhos futuros	55
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	56

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Cálculo do L_n, w segundo NP EN ISO 717-2:2009(Tadeu et al, 2007)	10
Figura 2.2 - Transmissão directa e secundária (Tadeu et al, 2007).....	11
Figura 2.3 - Ajuste dos valores de isolamento á curva convencional de referência (NP EN ISO 717-1:2009)	13
Figura 2.4 - Representação de um OL1GL (Rebelo, 2004)	15
Figura 2.5 - Modos de vibração típicos de pavimentos (Thomas M. Murray et al, 2003)	16
Figura 3.1 - Secção transversal e distribuição de tensões (EC5)	18
Figura 4.1- Esquema de ensaio MOE dos toros de madeira (EN 14251)	22
Figura 4.2 - Ensaio MOE dos elementos de madeira	23
Figura 4.3 - Ensaio MGT	25
Figura 4.4 - Pormenores de ensaio (apoio encastrado, carga suspensa, acelerómetros)	26
Figura 4.5 - Exemplo gráfico magnitude-frequência.....	26
Figura 4.5 - Ligadores (à esquerda os toros; à direita laje mista madeira-betão)	29
Figura 4.6 - Aplicação do soalho.....	29
Figura 4.7- Esquema de cofragem da laje LOGCork.....	30
Figura 4.8 – Armadura construtiva (à esquerda Laje LOGCork; à direita Laje madeira-betão)	31
Figura 4.9 - Betonagem da laje LOGCork (à esquerda aplicação do betão; à direita provetes cúbicos)	31
Figura 4.10 – Betonagem do pavimento com vigas de lamelado colado	32
Figura 5.1 –Esquema das câmaras acústicas verticais (IteCons).....	34
Figura 5.2 - Ilustração dos equipamentos utilizados: a) sistema aquisição multicanal B&K 3560-C-T46; b) microfone B&K 4190; c) fonte ruído aéreo B&K 4292; d) fonte ruído percussão B&K 3207; e) girafa giratória B&K 3923; f) calibrador B&K 4231.....	35
Figura 5.3 - Fonte ruído aéreo e microfone móvel instalados na câmara emissora.....	36
Figura 5.4 – Microfone móvel e fonte sonora na câmara receptora	36
Figura 5.5 – Máquina de percussão (à esquerda sobre o flutuante de madeira, à direita sobre o soalho).....	37

Figura 5.6 – Laje LOGCork (à esquerda aplicação do revestimento flutuante de madeira na laje; à direita parte inferior da laje LOGCork vista da câmara receptora).....	38
Figura 5.7 - Preenchimento do vazio entre o soalho e as vigas de bordo	38
Figura 5.8 – Parte inferior da laje de madeira vista da câmara receptora.....	39
Figura 5.9 - Processo de montagem do tecto falso em gesso cartonado	39
Figura 5.10 – Vista da câmara receptora da laje madeira-betão.....	40
Figura 5.11 - Resultados em laboratório para isolamentos de sons aéreos.....	41
Figura 5.12 – Resultados em laboratório para isolamento a sons de percussão.....	41
Figura 5.13 - Curvas de redução a sons aéreos com tecto falso	43
Figura 5.14 - Curvas de redução a sons de percussão com tecto falso.....	43
Figura 6.1 - Equipamentos de medição (acelerómetro; módulo de aquisição; software).....	47
Figura 6.2 – Impacto no pavimento	47
Figura 6.3- Esquema do ensaio dinâmico (à esquerda laje de madeira e madeira-betão; à direita Laje LOGCork)	48
Figura 6.4 - Espectro de resposta da laje LOGCork (pontos 11,10,9 e 8).....	49
Figura 6.5 - Espectro de resposta da laje LOGCork (pontos 11,1,2,3 e 4).....	49
Figura 6.6 - Espectro de resposta da laje de madeira (pontos 8,7 e 6).....	50
Figura 6.7 - Espectro de resposta da laje de madeira (pontos 8,3,2 e 1).....	51
Figura 6.8 - Espectro de resposta da laje de madeira-betão (pontos 8,7 e 6)	52
Figura 6.9 - Espectro de resposta da laje de madeira-betão (pontos 8,3,2 e 1)	52

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 2.1 - Limites de $L'nT, w$ para edifícios habitacionais e mistos ou unidades hoteleiras impostos pelo RRAE.	13
Quadro 2.2 - Limites de DnT, w para edifícios habitacionais e mistos ou unidades hoteleiras impostos pelo RRAE.	13
Quadro 3.1 - Factores K_{mod} e Y_M	19
Quadro 3.2 – Valores característicos dos elementos de madeira	20
Quadro 3.3- Propriedades resistente e módulos de elasticidade dos dois betões.....	20
Quadro 4.1 - Comprimentos dos elementos madeira	21
Quadro 4.2 - Massas volúmicas dos elementos madeira escolhidos.....	22
Quadro 4.3 - Diâmetros nominais dos toros de madeira.....	23
Quadro 4.4 - Módulos de elasticidade dos elementos de madeira	24
Quadro 4.5 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos elementos de madeira	25
Quadro 4.6 - Frequências próprias dos elementos de madeira.....	27
Quadro 4.7 - Composição do betão leve.....	27
Quadro 4.8 - Características do ligador.....	29
Quadro 4.9 - Caracterização do betão em cada laje mista	32
Quadro 5.1 – Índices globais de isolamento a sons aéreos e de percussão	44
Quadro 6.1- Frequências próprias dos modos de vibração da laje LOGCork	50
Quadro 6.2 - Frequências próprias dos modos de vibração da laje de madeira	51
Quadro 6.3 - Frequências próprias dos modos de vibração da laje madeira-betão.....	53

SIMBOLOGIA

- ΔL_w - Índice de redução sonora a sons de percussão
 $D_{n,w}$ - Índice de isolamento sonoro a sons aéreos
 E_{cm} - Módulo de elasticidade secante do betão
 $f_{c,k}$ - Valor característico da tensão de rotura do betão à compressão aos 20 dias de idade
 f_{ctm} - Valor médio de rotura do betão à tracção simples
 $f_{m,k}$ - Resistência à flexão da madeira
 $f_{t,o,k}$ - Resistência à tracção paralela ao fio da madeira
 K_{mod} - Coeficiente de modificação da resistência
 L_n - Nível de pressão sonora de percussão normalizado
 $L_{n,w}$ - Índice de isolamento sonoro a sons de percussão
 L_p - Nível de pressão sonora
 p - Pressão sonora
 ρ - Massa volúmica
 Y_M - Coeficiente de segurança do madeira
 f_{cm} - Valor médio de rotura do betão à compressão

ABREVIATURAS

B&k – Brüel & Kjaer

CEN – Comité Européen de Normalisation

EC0 – Eurocódigo 0

EC1 – Eurocódigo 1

EC2 - Eurocódigo 2

EC5 – Eurocódigo 5

EN – European Norm

ISO – International Organization for Standardization

ITeCons – Instituto de Investigação e desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção

LNEC – Laboratório Nacional de Engenharia Civil

NP – Norma Portuguesa

RRAE – Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios

WCTE – World Conference on Timber Engineering

1 INTRODUÇÃO

As soluções de estruturas mistas madeira-betão são cada vez mais utilizadas, tanto em alternativa aos pavimentos de madeira tradicionais, como para a reabilitação dos mesmos, pois esta solução permite a conservação da estrutura existente do edifício, não apresentando os inconvenientes da substituição completa por elementos de betão, tais como: o aumento do peso da estrutura, ou a eventual alteração em termos arquitectónicos que poderia conduzir a uma perda de valor arquitectónico das construções antigas.

Em alguns edifícios antigos é comum existirem pavimentos constituídos por vigas de madeira e revestidos com soalho. Nestas situações a sua reabilitação com recurso a esta técnica de construção permite, aproveitar a estrutura existente e acrescentar betão sobre o próprio soalho (com função de cofragem) ou mesmo sobre as vigas. Deste modo é criada uma estrutura mista de madeira-betão com peso bastante inferior em relação às estruturas de betão armado que resulta numa diminuição da carga sobre a estrutura de suporte do edifício. A combinação destes dois materiais resulta numa estrutura eficiente, pois o betão trabalha essencialmente à compressão, enquanto a madeira trabalha fundamentalmente à tracção, originando aumento de rigidez à flexão e capacidade de carga relativamente às estruturas de madeira (Ceccotti, 1995).

Relativamente ao uso de estruturas mistas de madeira-betão, em detrimento das estruturas de madeira, estas apresentam vantagens na diminuição das vibrações devido a cargas dinâmicas no pavimento, assim como maiores níveis de isolamento acústico. Em relação aos sons aéreos, os ganhos devem-se ao aumento da massa e em relação aos ruídos de impacto apresenta melhorias, devido ao aumento do amortecimento (Ceccotti, 1995).

Dando seguimento a trabalhos de investigação já realizados no Departamento de Engenharia Civil da Universidade, pretende-se com esta Dissertação de Mestrado de Engenharia Civil, realizar uma análise dos ganhos em termos acústicos e de comportamentos dinâmico, das lajes mistas madeira-betão em relação aos pavimentos de madeira. Para isso foi realizado o dimensionamento e execução de duas lajes madeira-betão para posterior ensaio experimental. A primeira estrutura mista é constituída por elementos de madeira de secção circular de Pinheiro Bravo que irão ser designados como toros e betão leve com agregados de cortiça, beneficiando o comportamento acústico e dinâmico da estrutura, pois a cortiça apresenta um elevado coeficiente de dissipação de energia. Ao longo desta dissertação, esta estrutura vai ser

designada como laje LOGCork devido ao facto, de esta ser constituída por Logs (toro) e Cork (cortiça). A segunda estrutura mista tem como base a laje de madeira tradicional, que é constituída por elementos de madeira lamelada colada GL24C de secção rectangular e revestida com soalho tradicional, sendo que posteriormente irá ser betonada, dando origem então ao pavimento misto de madeira-betão.

Para um estudo mais realista relativamente ao comportamento acústico das três lajes, irão ser usadas soluções construtivas, para os revestimentos de tecto e pavimento, presentes na construção civil actual. Vai ser utilizado apenas sobre as lajes mistas um revestimento flutuante em madeira base em aglomerado de cortiça, sendo que na laje de madeira o soalho tem a função de revestimento, logo não será usado qualquer outro revestimento. Outra solução usada passa pela aplicação de um tecto falso em gesso cartonado na laje de madeira, estando assim suspenso nas vigas de madeira lamelada colada. Devido à impossibilidade do uso desta solução na laje LOGCork, os resultados desta foram extrapolados de modo a ser possível uma comparação do comportamento das três lajes. Todos os ensaios acústicos, foram realizados nas câmaras acústicas do Instituto de Investigação e Desenvolvimento Tecnológico em Ciências da Construção (IteCons).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Enquadramento Histórico

Esta técnica de construção tem sido ao longo dos tempos cada vez mais utilizada devido às suas vantagens. Nas últimas décadas, houve um acréscimo do uso desta técnica em aplicações estruturais tais como reabilitação de pavimentos de madeira, construção de pavimentos novos assim como usada na estrutura de tabuleiros de pontes (Christopher Mettem, 2003). As estruturas de madeira-betão aparecem entre as duas Grandes Guerras, pois, devido ao consumo de grandes quantidades de aço levou a uma escassez do mesmo para a construção (Van der Linden, 1999). Para contornar este problema teve que se pensar em outros tipos de materiais com boas propriedades para a construção, e assim começou-se a utilizar a madeira como elemento estrutural, sendo ainda utilizado em construções correntes.

O início da investigação desta nova técnica de construção remete-nos á 80 anos atrás. Os primeiros testes foram realizados em vigas mistas de madeira-betão por McCullough nos EUA, com o intuito de desenvolver uma ponte sustentável no estado de Oregon (Lukaszewska, 2009). Apesar de esta técnica ter-se iniciado por volta da década de 30, só na década de 70 é que se começou a aprofundar melhor o estudo de técnicas sobre o assunto, e desde então tem havido uma grande evolução em tudo o que diz respeito a esta técnica. Em 1960 Postulka descreveu a reabilitação na antiga URSS de mais de 10 mil m² de pavimentos de madeira através de soluções mistas madeira-betão, tendo sido usado este método num edifício em Bratislava, na qual concluiu que o custo da reabilitação era menos de metade no caso de optar pela construção de um novo pavimento (Van der Linden, 1999). Tal facto deve-se ao aproveitamento da estrutura já existente, pois esta continua como função estrutural no caso das vigas e no caso da existência de soalho, este funciona como cofragem para a implementação da laje de betão (Branco J. e Cruz P., 2002). Como já foi referido no início deste subcapítulo esta técnica foi utilizada também na construção de pontes, como por exemplo o relatório apresentado, referente á ponte construída na Nova Zelândia em 1957, em que mais uma vez com recurso a esta técnica obteve-se uma boa relação custo-benefício. Após alguns anos de utilização, apresentou na sua globalidade um excelente comportamento (Cone M., 1963).

2.2 Estruturas mistas madeira-betão

É cada vez mais usual a utilização desta técnica de construção, pois, a combinação dos materiais madeira e betão, permite explorar o melhor das propriedades mecânicas de cada um e assim criar uma estrutura eficiente. Por um lado temos o betão que funciona à compressão e a madeira resiste à tracção. Comparando os pavimentos de madeira com este tipo de solução, esta apresenta vantagens relativamente ao comportamento acústico e dinâmico. O uso de estruturas mistas de madeira-betão em detrimento dos pavimentos de madeira melhora o isolamento acústico devido à presença da camada de betão, pois esta leva a um aumento da massa da estrutura, melhorando significamente o isolamento acústico a sons aéreos comparado com os pavimentos de madeira e por outro lado comparativamente aos pavimentos de betão, o isolamento aos sons de percussão apresenta melhor comportamento por causa do maior amortecimento que a madeira provoca (Ceccotti, 1995).

Relativamente às estruturas de betão, estas por vezes tendem a apresentar fendas na zona de tracção e assim permitem a penetração de humidade, originando a danificação da armadura de aço. Por outro lado a parte inferior de uma laje de betão (cerca de 40% a 60% da profundidade) quando fendilhada, já não se encontra a resistir e assim sendo se essa zona for substituída por madeira com boas propriedades de resistência à tracção, conduz a uma redução da espessura do betão, ficando este apenas a funcionar à compressão, o que leva a ter no final uma estrutura mais leve e mais rígida (Lukaszewska, 2009). O uso de betões de agregados leves é uma excelente alternativa ao tradicional betão normal, pois este permite a redução do peso próprio da estrutura e conseqüentemente redução da carga no elemento de suporte o que significa uma vantagem no caso de reabilitação de pavimentos, pois os edifícios antigos podem não ter a necessária capacidade de carga (Jorge, 2005). Segundo a norma NP EN 206-1, o betão leve pode ser produzido totalmente com agregados leves ou apenas uma parte e depois de seco em estufa, apresenta uma massa volúmica superior ou igual a 800 Kg/m³ e nunca superior a 2000 Kg/m³. No caso de betão normal a massa volúmica varia dos 2000 Kg/m³ a 2600 Kg/m³.

De salientar que as estruturas mistas de madeira-betão têm um bom desempenho no comportamento ao fogo, pois a camada de betão funciona como um isolante, pois é um material não combustível, fazendo que o fogo não se propague tão facilmente quando comparado com um pavimento de madeira. Em caso de incêndio, as vigas de madeira da estrutura mista podem ser mais resistentes que vigas de aço ou de betão pré-esforçado (Ceccotti, 1995). Tal acontecimento deve-se ao facto de a madeira mesmo sendo um material combustível, em caso de incêndio ter um comportamento favorável, pois ao ser consumida

pelo fogo são criadas duas camadas: camada calcinada e camada pirólise. Estas camadas permitem deixar a madeira interior totalmente inalterada.

A camada calcinada isolante forma-se devido à rápida combustão da camada superficial da madeira, sendo que sob esta existe outra camada designada camada de pirólise. Devido à baixa condutibilidade térmica do carvão a camada calcinada reduz a velocidade de combustão em profundidade e isola termicamente o interior do elemento, permitindo manter as propriedades do material inalteradas, concluindo assim que a madeira tem melhor comportamento ao fogo que outros materiais estruturais (Branco,2003).

Por outro lado pode considerar-se a madeira como o material ambientalmente sustentável, pois comparando com os principais materiais de construção (betão, aço e alumínio), este é reciclável, renovável, biodegradável e transformável à base de um baixo custo energético (Marques L., 2008). De salientar que nesta dissertação, os toros de madeira de pinho bravo português utilizados foram provenientes de desbaste florestal, não sendo submetidos a qualquer tipo de tratamento, ou seja, apresentavam-se no seu estado natural. O desbaste florestal controlado tem um papel importante, pois permite o crescimento florestal evitando a extensão de doenças e ao mesmo tempo diminui o risco de incêndios (Morgado, 2008). O uso da madeira acarreta benefícios na questão da diminuição do efeito de estufa, devido ao facto de equilibrar o CO₂ na atmosfera, uma vez que por cada 1m³ de madeira é absorvido cerca de uma tonelada de CO₂ (Jorge, 2005). Além da madeira maciça, neste estudo foi utilizado também o material derivado da madeira designado por madeira lamelada colada. Este material consiste na colagem de lamelas nas faces, que por sua vez estas são feitas através colagem de várias peças de madeira de comprimento variável topo-a-topo. Este processo permite ter vigas mais homogéneas e evita a tendência de fendilhar, pois a colagem aleatória das lamelas, permite que as tensões geradas numa lamela sejam distribuídas pelas outras. Com a técnica lamelado colado é possível obter elementos de grandes dimensões e de eixo curvo. Este produto tem como principais vantagens, a boa relação entre o peso e a resistência mecânica, a grande estabilidade dimensional, a homogeneidade e isotropia. Este produto assim como a madeira é apropriada para ambientes adversos, pois tem um excelente comportamento, uma vez não sofre qualquer tipo de corrosão ou oxidação, daí a ser muito utilizado em coberturas de piscinas e edifícios semelhantes.

Por fim, a nível económico as estruturas de madeira-betão são competitivas em relação a um pavimento de betão. A avaliação dos gastos não pode ser feita só tendo em conta o custo/metro quadrado, pois existem outras causas em ter em conta. Esta técnica no que diz respeito à execução, é mais rápida devido ao facto de se utilizar menos quantidades de betão, o que representa uma redução de tempo para a execução de cofragens assim como para processos de estabilização (Ceccotti, 1995).

2.3 Análise Acústica

2.3.1 Generalidades

Nos edifícios é cada vez mais frequente a presença de fontes de ruído, tanto no interior como no exterior. O som pode ser considerado como o resultado de uma vibração imposta por uma fonte num determinado meio e que é sentida pelo ouvido humano. Este facto origina um desgaste na qualidade de vida do ser humano, pois o conforto acústico nem sempre é o melhor. O ruído exerce um efeito nocivo e incomodativo sobre o ser humano, o que é bastante prejudicial para a saúde, podendo mesmo levar à perda de audição no caso de exposição contínua a níveis sonoros altos, assim como outros efeitos no organismo, tais como o stress, a fadiga e perturbações ao nível do sono e portanto o ruído não somente dificulta a comunicação verbal, mas influi directamente no comportamento fisiológico e emocional das pessoas expostas a ele em qualquer situação e ambiente (Acústica Aplicada, 2007). Por estas razões, o estudo do comportamento acústico em edifícios tem-se evidenciado na construção civil. Neste campo não existem muitos estudos e é assim importante analisar o comportamento acústico de estruturas de madeira-betão, para perceber os ganhos desta técnica na construção relativamente aos pavimentos tradicionais de madeira assim como em relação aos pavimentos de betão.

Para reduzir os efeitos causados pelos ruídos, muitas técnicas e produtos foram desenvolvidos e têm sido usados principalmente na construção civil, visando a adequar os ambientes das edificações às exigências de qualidade e conforto requeridos, garantindo o bem-estar das pessoas. A solução para este problema requer o uso de materiais destinados ao isolamento acústico que minimizem a propagação desses ruídos, sendo a exigência de desempenho acústico variável de acordo com o tipo de edificação.

A utilização de cortiça, como agregado na constituição do betão leve acrescenta vantagens no comportamento acústico de construções que incorporem esse material. A cortiça é material 100% natural, inalterável, eficiente e reciclável. A melhoria do isolamento sonoro utilizando os agregados de cortiça deve-se ao facto deste material ter uma grande capacidade de absorção sonora e das características antivibráticas, o que lhe confere um bom isolante acústico.

A colocação de um tecto falso com revestimento acústico, na parte inferior dos elementos de suporte dos pisos é também um método eficaz para reduzir a transmissão do ruído. O tecto falso em gesso cartonado com lã de rocha permite a anulação de ressonâncias devido ao seu

grau elevado de absorção do som. A lã de rocha é um material fibroso e elástico, que dissipa a energia das ondas sonoras reduzindo significativamente a intensidade dos dB.

Schimd (Schimd M, 2005) realizou um estudo no âmbito de um programa Suíço HOLz21. O objectivo consistiu em realizar medições acústicas de modo a criar um modelo baseado na Norma SIA 181 em vigor naquele país, avaliando o comportamento acústico em pavimentos mistos de madeira-betão para que em fase de projecto seja possível ter uma estimativa do mesmo. Foram ensaiados seis tipos de pavimentos mistos de madeira-betão no total de oito andares em várias construções de madeira segundo as normas de ensaio DIN EN ISO 140-4 e DIN EN ISO 140-7.

Pavimento	Valores de sons aéreos em dB			Valores de sons de percussão em dB		
	R _w medido	R _w calculado	Diferença	L _w medido	L _w calculado	Diferença
A_1	59.0	59.0	0.0	45.0	45.0	0.0
A_2	60.0	59.0	1.0	46.0	45.0	1.0
A_3	58.0	59.0	-1.0	46.0	45.0	1.0
B_4	62.8	56.7	-6.1	47.2	49.0	-1.8
C_5	57.2	56.7	-0.5	53.6	49.0	4.0
D_6	64.0	57.3	-6.7	48.5	47.0	0.6
E_7	59.0	56.1	-2.9	52.0	50.1	1.9
F_8	54.0	57.1	3.1	51.0	48.3	2.7

Os pavimentos do tipo A apresentam uma espessura de 22 cm dos quais, 12 cm são de betão. Para os restantes pavimentos a espessura varia entre os 20 e 22 cm, sendo a relação madeira/betão diferente para os pavimentos D onde a camada de betão é de 16 cm. De modo diferente, os pavimentos E e F têm a camada de madeira superior à de betão.

Através dos resultados experimentais e estimados pode ver-se que a diferenças dos resultados se situam em ± 3 dB para os sons aéreos assim como os de percussão. Nota-se uma diferença do isolamento dos sons aéreos entre de valores medidos e calculados em dois pavimentos porque, o pavimento B_4 possui uma espessura de isolamento na ordem de 90 mm de espessura e no D_6 que possui um tecto falso em gesso que leva a melhoria de isolamento. Relativamente aos sons de percussão o que condiciona as diferenças é principalmente a qualidade construção. Sendo assim com este estudo conclui-se que os pavimentos mistos de madeira betão são uma boa solução para a construção.

2.3.2 Noções de Isolamento Acústico a Sons de Percussão

Os sons de percussão são derivados de impactos directos no elemento de compartimentação como, por exemplo, a queda, o arrastar de objectos e passos de pessoas. Estes impactos fazem com que o som se possa alastrar a todo o edifício devido às rigidezes das ligações e assim ser sentido em todo ele e não só no local de origem. Assim, estes tipos de sons podem ser considerados como os mais gravosos, em comparação com outros tipos de som. Normalmente estes sons são mais incidentes nos pavimentos do que nas paredes e por isso devem ser tidas em especial atenção as verificações das exigências de acústicas dos compartimentos subjacentes a estes (LNEC, 2000).

O som é caracterizado principalmente pela intensidade e frequência. A frequência do som é caracterizada pelo número de ciclos completos de uma onda sonora durante um período de tempo e esta é expressa em Hz. Relativamente à intensidade do som é caracterizada pela energia que a onda sonora transporta por unidade de área e é directamente proporcional ao quadrado do valor eficaz da pressão sonora. O valor eficaz da pressão sonora, designa-se como a pressão do ar do meio envolvente. Devido ao facto de o ouvido humano detectar pressões sonoras distintas situadas geralmente entre 2×10^{-5} Pa e 20 Pa obriga ao uso de uma escala logarítmica para representação da mesma. O nível de pressão sonora L_p , em decibel (dB) é dada por :

$$L_p = 20 \times \log\left(\frac{p}{p_0}\right) \text{ [dB]} \quad (1)$$

Onde p_0 é o valor de pressão sonora de referência correspondente ao valor zero da escala decibel.

Igualmente no caso da frequência sonora o ouvido humano é capaz de detectar sons com frequência que se situam ente os 20 Hz e 20000 Hz. O ouvido tem mais sensibilidade para frequências médias e altas sendo que para valores inferiores a 20 Hz os sons não são detectados, isto deve-se à transmissão e dissipação de energia no interior do ouvido. Os valores para a sensibilidade máxima situam-se entre 350 Hz e 4000 Hz e a partir deste valor a sensibilidade reduz novamente. Para valores inferiores a 350 Hz, ou seja, baixas frequências o ouvido humano apenas detecta sons para intensidade bastante superiores àquelas que correspondem ao limiar de audibilidade para frequências altas (Tadeu et al, 2007).

A caracterização do isolamento sonoro a sons de percussão pode se feita segundo dois métodos: método experimental e método de estimação, sendo descrito apenas o primeiro. O

método experimental geralmente utilizado é o definido pela ISO/CEN, que permite a caracterização da transmissão de sons de percussão no domínio da frequência através das técnicas consagradas nas normas ISO 10140-3:2010 e NP EN ISO 717-2:2009 (LNEC, 2000).

Este ensaio experimental em laboratório consiste, no uso de uma máquina de percussão normalizada colocada em várias posições do elemento de separação no recinto emissor, que através de choques provoca percussão e assim é possível determinar o nível sonoro efectivo L_n em vários pontos do recinto receptor. A expressão normalizada que permite o cálculo do nível de pressão sonora tendo em conta os efeitos de reverberação no recinto receptor é dada por

$$L_n = L_{med} - 10 \log\left(\frac{A_0 Tr_{med}}{0,16V}\right) \quad (2)$$

Em que

L_{med} - média dos sons de percussão no recinto receptor (em bandas de 1/3 de oitava);

A_0 - 10 m^2 é o valor de referência da área de absorção;

Tr_{med} - valor médio do tempo de reverberação no recinto receptor (em bandas de 1/3 oitava);

V - volume do recinto receptor;

Para além da caracterização é necessário quantificar o isolamento sonoro de elementos de compartimentação independentemente da frequência do som. Essa caracterização é feita através do valor único $L_{n,w}$ definido pelo Regulamento dos Requisitos Acústicos de Edifícios. Esse valor é obtido através do ajuste da curva L_n a uma curva convencional de referência representada na figura 2.1.

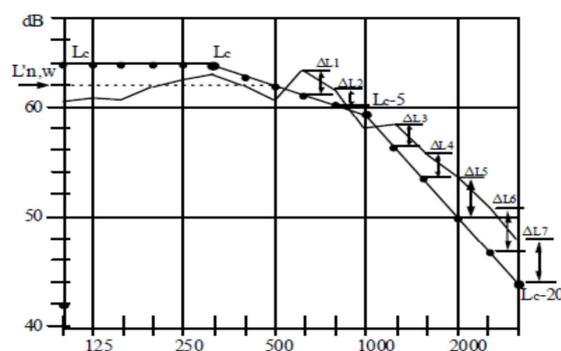


Figura 2.1 - Cálculo do $L_{n,w}$ segundo NP EN ISO 717-2:2009(Tadeu et al, 2007)

A curva de referência é ajustada de modo a que o valor médio do desvio em sentido desfavorável, calculado através da razão entre a soma dos desvios no mesmo sentido e as bandas de frequências seja o maior possível, mas nunca ultrapassando o valor de 2 dB. Após o ajustamento, o valor $L_{n,w}$ é dado pela ordenada da curva de referência para a frequência de 500 Hz.

A redução de transmissão sonora a sons de percussão pode ser feita recorrendo a revestimentos de pavimentos com características elásticas e flexíveis, assim como através do uso de um pavimento flutuante que consiste em colocar um material resiliente entre camadas rígidas. A diferença entre o valor $L_{n,w}$ antes e após a colocação do isolamento, é dada por ΔL_w havendo já valores de ΔL_w para vários materiais obtidos experimentalmente (Tadeu et al, 2007).

2.3.3 Noções de Isolamento Acústico a Sons Aéreos

Segundo a sebenta de Acústica Aplicada (Tadeu et al, 2007), a transmissão de sons aéreos entre compartimentos é efectuada através das ondas aéreas que incidem no elemento de separação, produzidos por uma fonte sonora. Estes ruídos podem ser oriundos do funcionamento de equipamentos, do diálogo de pessoas e da actividade resultante da utilização corrente. A determinação do isolamento sonoro a sons aéreos entre compartimentos é um fenómeno complexo, pois depende não só das condições do recinto emissor e receptor assim como do elemento de separação. A transmissão de sons entre compartimentos pode ser directa ou indirecta. A transmissão directa é feita através do elemento de separação, enquanto a transmissão indirecta é feita por meio dos elementos adjacentes. Para perceber melhor este fenómeno pode ver-se a figura 2.2.

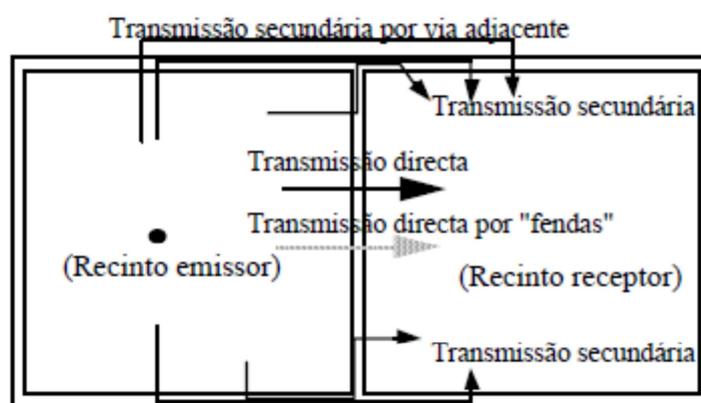


Figura 2.2 - Transmissão directa e secundária (Tadeu et al, 2007)

Em laboratório além de estar prevista uma junta de separação entre câmaras, que permite um maior isolamento conduzindo a que as transmissões indirectas possam ser desprezadas, é também necessário assegurar que não existem ligações rígidas entre elas.

Tal como na caracterização do isolamento sonoro a sons de percussão, para sons aéreos existem também dois métodos para a caracterização, os experimentais e estimação. Apenas vai ser descrito o primeiro ensaio. O método experimental em laboratório utilizado é a ISO/CEN que está de acordo com as normas ISO 10140-2:2010 e NP EN 717-1:2009. Para a realização deste tipo de ensaios é produzido um campo sonoro reverbado por meio de uma fonte sonora, colocada no recinto emissor. Para recepção dos níveis sonoros é instalado no recinto receptor um microfone montado num sistema rotativo.

Devido ao facto de a medição em laboratório ser complexa, o resultado do isolamento a sons aéreos não pode ser feita apenas pela diferença dos níveis de pressão sonora entre recintos, obrigando a ter em conta o fenómeno de reverberação no recinto receptor. Segundo a norma ISO 10140-2:2010 a fórmula para o isolamento corrigido é dada por

$$R = L_1 - L_2 + 10 \times \log \frac{S \times T_r}{0,16 \times V} \quad (3)$$

Em que

L_1 = Nível de pressão sonora no recinto emissor;

L_2 = Nível de pressão sonora no recinto receptor;

S = Área do elemento de separação;

T_r = Tempo de reverberação do recinto receptor;

V = Volume da sala receptora;

Tal como acontece no isolamento a sons de percussão, no caso dos sons aéreos é também necessário quantificar o isolamento sonoro de elementos de compartimentação à custa de um valor único $D_{n,w}$. Este valor consiste na comparação entre a curva dos valores medidos de índice de redução sonora com a curva convencional de referência conforme disposto na Norma NP EN ISO 717-1:2009. Este processo é igual ao usado nos sons de percussão (Tadeu et al, 2007).

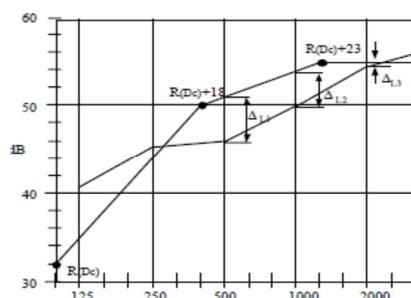


Figura 2.3 - Ajuste dos valores de isolamento á curva convencional de referência (NP EN ISO 717-1:2009)

2.3.1 Exigências regulamentares

O regulamento nacional que rege os limites de isolamento sonoro em edifícios é o RRAE (Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios). Para edifícios habitacionais e mistos ou unidades hoteleiras, o regulamento impõe limites apresentados no quadro.. para os valores $L'_{nT,w}$ e $D_{nT,w}$ de sons de percussão e aéreos respectivamente.

Quadro 2.1 - Limites de $L'_{nT,w}$ para edifícios habitacionais e mistos ou unidades hoteleiras impostos pelo RRAE

Tipo de edifício	Local		$L'_{nT,w}$ (dB)
	Emissor	receptor	
Habitacional e misto ou unidades hoteleiras	Pavimento de outros fogos ou locais de circulação comum do edifício	Interior dos quartos ou zonas de estar de fogos	≤ 60
	Pavimento de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão	Interior dos quartos ou zonas de estar de fogos	≤ 50

Quadro 2.2 - Limites de $D_{nT,w}$ para edifícios habitacionais e mistos ou unidades hoteleiras impostos pelo RRAE.

Tipo de edifício	Local		$D_{nT,w}$ (dB)
	Emissor	receptor	
Habitacional e misto ou unidades hoteleiras	Compartmento de um fogo	Quartos ou zonas de estar de outro fogo	≥ 50
	Locais de circulação comum do edifício	Quartos ou zonas de estar de outro fogo	≥ 48
	Caminho de circulação vertical, quando edifício tenha ascensores		≥ 40
	Garagem de estacionamento automóvel		≥ 50
	Edifícios destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão		≥ 58

2.4 Análise Dinâmica

2.4.1 Generalidades

Todos os pavimentos estão sujeitos a acções dinâmicas provenientes de vibrações como, por exemplo, a queda de objectos ou o caminhar de pessoas e também os fenómenos naturais, que é o caso dos sismos. Tais vibrações podem levar ao desconforto dos utilizadores, assim como afectar a estrutura devido à ocorrência de deformações. É assim importante avaliar as vibrações na estrutura de modo a perceber os benefícios que a camada de betão introduz nos pavimentos tradicionais de madeira. Tal permitirá concluir se a combinação madeira-betão é viável e uma solução construtiva interessante. A avaliação do comportamento dinâmico de pavimentos pode ser feita através de ensaios experimentais, resultado da aplicação de uma acção dinâmica sobre o mesmo e através dos resultados estruturais obtidos é possível avaliar o seu comportamento. Estes ensaios permitem identificar as características dinâmicas como as frequências próprias e amortecimento dos pavimentos.

Segundo Ceccotti (Ceccotti, 1955), relativamente aos pavimentos tradicionais de madeira, as soluções mistas de madeira-betão permitem uma melhoria do comportamento dinâmico. A presença da camada de betão beneficia a estrutura em termos de rigidez e assim pode-se considerar que a rigidez no plano pode ser infinita que conduz a que em caso de catástrofe natural como é o sismo, a estrutura mantenha a sua forma assim como da sua envolvente permitindo processos simplificados de verificação sísmica referente a esse pressuposto. Também o efeito mola característicos nos pavimentos de madeira é reduzido devido ao aumento do factor de amortecimento.

Um artigo realizado no âmbito do WCTE 2010 (Rijal R. et al, 2010), estudou o comportamento dinâmico de pavimentos compostos por madeira e betão. Este documento tem como principal objectivo dar importância às acções dinâmicas a que os pavimentos estão sujeitos diariamente, sendo necessário a determinação da frequência própria e amortecimento dos mesmos. A razão desta relevância passa por esta solução ser cada vez mais utilizada ao invés dos pavimentos de madeira tradicionais. Através de estudos efectuados, conclui-se que as vantagens dos pavimentos mistos dependem do sistema de ligação utilizado.

Crespo (Crespo, 2009) na sua dissertação estudou a medição de vibrações induzida por passos de humanos em pisos de madeira. Devido à madeira ser um elemento construtivo muito utilizado ao longo dos anos, este acarreta desvantagens em relação às vibrações e de modo que se realizaram vários testes com o objectivo de demonstrar que esta solução pode ser aceitável e também testes em duas direcções distintas com a finalidade de perceber como o comprimento influencia as vibrações. Após os testes realizados concluiu-se que a solução de

pavimentos de madeira não cumpre níveis satisfatórios sendo necessário um melhor desempenho para que seja uma boa solução construtiva.

2.4.2 Fundamentos teóricos

Segundo Smith (Smith J.W., 1988), em projectos de estruturas susceptíveis a vibrações é importante avaliar o seu comportamento dinâmico seguindo os três passos seguintes:

- Identificação das cargas dinâmicas no que se refere a frequências e amplitudes;
- Analisar a resposta da estrutura de modo a adquirir tensões, frequências e acelerações;
- Através de os resultados obtidos realizar a verificação por intermédio de critérios especificados garantindo a inexistência de problemas provocados pela vibração;

A equação do movimento de um sistema dinâmico, neste caso considerando um oscilador linear de um grau de liberdade (OL1GL) é dada por

$$my'' + cy' + ky = p(t) \quad (4)$$

Em que

my'' - força de inércia;
 cy' - força de amortecimento;
 ky - força elástica
 $p(t)$ - força exterior

O esquema de um OL1GL pode ser representado por uma massa ligada a uma mola e um amortecedor sujeita a uma força exterior como se observa na figura 2.3.

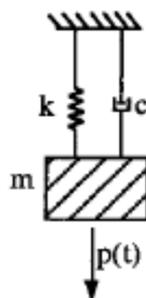


Figura 2.4 - Representação de um OL1GL (Rebelo, 2004)

Um caso particular da equação do movimento designa-se por vibração livre, que consiste em considerar $p(t) = 0$, significando que não existe nenhuma força exterior que excite a estrutura. Deduzindo a equação (4) é possível definir as expressões de cálculo da frequência circular natural ω_n e o factor de amortecimento viscoso ξ dadas por

$$\omega_n^2 = \frac{k}{m} \quad (5)$$

$$\xi = \frac{c}{2m \omega_n} \quad (6)$$

A frequência própria depende assim da rigidez (k) do sistema e da massa (m). Quando existe vibração forçada se a frequência de excitação resultante da mesma coincide com a frequência própria do pavimento esta pode levar a danos graves. Este efeito designa-se com estado de ressonância, sendo que a amplitude de vibração é dependente do amortecimento e da rigidez do pavimento. A forma de minimizar esse efeito, passa por alterar a rigidez da estrutura por meio da alteração das condições de apoio ou adoptando um sistema de amortecimento para reduzir a amplitude de ressonância. (Rebello, 2004). Os pavimentos sujeitos a vibração livre, sofrem movimentos designados por modos de vibração, que estão associados às suas frequências próprias (Thomas M. Murray et al, 2003).

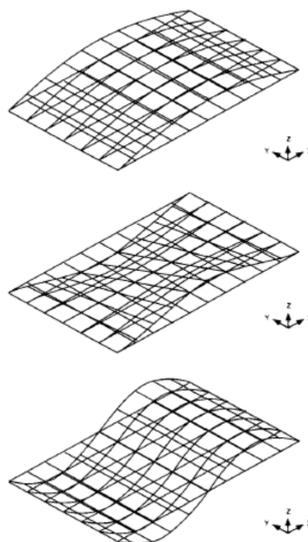


Figura 2.5 - Modos de vibração típicos de pavimentos (Thomas M. Murray et al, 2003)

Segundo um artigo publicado no WCTE 2010 (Rajendra Rijal et al, 2010) , ao projectar um pavimento deve-se ter atenção às frequências naturais não serem inferiores a 3 Hz para impedir o efeito de ressonância. É referenciado nesse artigo que o ser humano é susceptível de perturbações para um intervalo de frequências entre 4 e 8 Hz, concluindo assim que os pavimentos devem exceder o valor máximo do intervalo (Smith I. et al, 1988). Do mesmo modo são recomendados valores mínimos das frequências próprias para pavimentos leves com ou sem ocupação. No caso de ocupação o valor deve ser superior a 15 Hz e sem ocupação é aconselhado o valor exceder os 14 Hz (J.D. Dolan et al, 1999). Segundo Ross e Pellirin (Ross, R.J. e Pellirin R.F., 1994) No caso de uma viga simplesmente apoiada com uma carga distribuída a frequência própria dos pavimentos pode ser estimada por

$$EI = \frac{f^2 w L^3}{2,46g} \quad (7)$$

Onde

E - módulo de elasticidade

I - momento de inércia

f - frequência própria

w - massa da viga

L - comprimento da viga

g - aceleração da gravidade

Relativamente ao factor de amortecimento, este é expresso como percentagem do amortecimento crítico ou em forma de razão entre amortecimento viscoso e o amortecimento crítico. Este factor traduz a dissipação da energia mecânica produzida pela acção dinâmica induzida no pavimento, sendo importante ao seu estudo. O amortecimento crítico é o valor de amortecimento viscoso para o qual a estrutura de vibração livre depois de excitada repousa sem oscilação e depende não só do tipo de estrutura a ser estudada, mas também dos materiais que a compõem, das ligações e condições de apoio. Normalmente os valores aconselhados para o factor de amortecimento estão entre 0,01 e 0,05, existindo valores recomendados nesse intervalo para cada tipo de utilização a que o pavimento está sujeito (Murray T.M. et al, 2003).

3 ASPECTOS DO DIMENSIONAMENTO

3.1 Generalidades

Os pavimentos ensaiados foram dimensionados tendo em atenção os seguintes pressupostos:

O dimensionamento foi realizado recorrendo ao modelo analítico simplificado presente no Anexo B na EN 1995-1-1:2004 (EC5) em conjunto a bibliografia de Ceccotti (Ceccotti, 1995), sendo que para o elemento betão foi respeitado todas os requisitos de segurança do EN NP 1992-1-1:2004 (EC2).

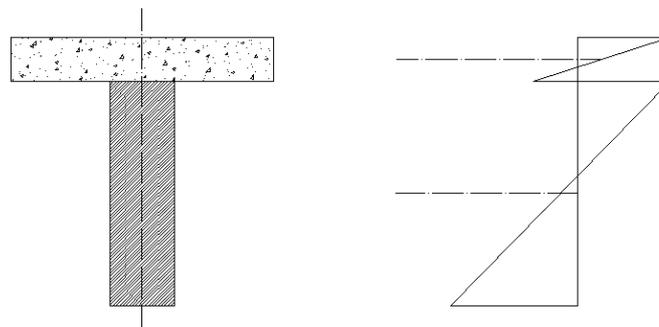


Figura 3.1 - Secção transversal e distribuição de tensões (EC5)

Todas as acções e combinações de acções foram determinadas para edifícios segundo as normas EN 1990:2002 0 (EC0) e EN 1991-1-1:2002 (EC1) respectivamente.

Apesar de a estrutura estudada ser uma laje mista madeira-betão, o cálculo vai ser realizado considerando uma viga de secção transversal em T retirada da mesma tal como é apresentado da figura 3.1.

3.2 Propriedades físicas e mecânicas dos materiais

Segundo Ceccotti (Ceccotti, 1995), para o dimensionamento de estruturas mistas madeira-betão é dito que, para uma análise global o cálculo de tensões e deformações, são utilizados os valores médios da rigidez e do módulo de escorregamento dos materiais, devido a questões de segurança do EC5. A utilização do valor característico do módulo de elasticidade com o valor médio do módulo de escorregamento não levaria a um dimensionamento pelo lado da segurança.

Como foi dito anteriormente, vão ser utilizados dois tipos de elementos de madeira para as lajes, sendo o primeiro elemento madeira maciça com secção circular de Pinheiro Bravo Português e o segundo elemento com madeira de secção rectangular lamelada colada GL24C de Casquinha Branca. No que diz respeito ao primeiro elemento de madeira, as propriedades resistentes vão ser assumidas da dissertação realizada pelo Morgado (Morgado, 2008) e para o segundo elemento de madeira os valores utilizados estão presentes da norma NP EN 1194. Para o cálculo foi ainda necessário assumir valores de modificação da resistência K_{mod} , assim como, o factor de segurança γ_M ambos definidos no EC5. Em ambos os valores foi tido em conta a classe de serviço 1 como se observa no quadro 3.1.

Quadro 3.1 - Factores K_{mod} e γ_M

	K_{mod}	γ_M
Madeira Maciça	0,8	1,3
Madeira Lamelada Colada	0,6	1,25

Tal como acontece para os elementos madeira, também vai ser utilizado dois tipos de betão. Para a laje LOGCork constituída por elementos de secção circular, o betão escolhido para a execução da laje é um betão leve com agregados de cortiça, em que as suas propriedades já foram estudadas anteriormente noutro projecto, pelo qual vai ser assumido esses valores. No caso da laje mista de madeira-betão com elementos de madeira lamelada colada, o betão utilizado é um betão pronto de classe C25/30, onde as suas propriedades se encontram na secção 3 do EC2.

Relativamente aos ligadores, estes vão ser do tipo cavilhas de aço, provenientes do corte de varões de aço, em que suas propriedades vão ser assumidas novamente de um projecto já realizado anteriormente.

Para os elementos de madeira e betão foram utilizados para o dimensionamento os valores apresentados nos quadros 3.2 e 3.3 respectivamente.

Quadro 3.2 – Valores característicos dos elementos de madeira

	Toros	GL24C
$f_{m,k}$ (MPa)	53,8	24
$f_{t,o,k}$ (MPa)	32,3	14
$f_{v,k}$ (Mpa)	3,8	2,2

Quadro 3.3- Propriedades resistente e módulos de elasticidade dos dois betões

	Betão leve	Betão C20/25
f_{ck} (MPa)	17	25
f_{ctm} (MPa)	2,2	2,6
E_{cm} (MPa)	18100	31000
ρ (Kn/m ³)	18,7	24

4 ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Este estudo tal como já foi referido, tem como objectivo a preparação e ensaio de duas lajes mistas de madeira-betão e uma de madeira de dimensão 3,5mx3,5m, sendo que no caso da laje LOGCork o afastamento entre vigas é de 0,5m, enquanto que no caso da laje de madeira e madeira-betão o afastamento é de 0,75m, sendo a ligação madeira-betão assegurada por ligadores de aço do tipo cavilhas.

Assim neste capítulo irá descrito todo o processo de fabrico das lajes incluindo todo o processamento dos materiais.

4.1 Caracterização das lajes

4.1.1 Elementos madeira

Todos os resultados apresentados neste capítulo apenas se referem aos elementos utilizados na execução das lajes.

Os toros utilizados neste trabalho foram provenientes de zonas florestais da Beira Litoral e apresentam-se no seu estado bruto. O outro elemento de madeira consiste em elementos fabricados de madeira lamelada colada GL24C de Casquinha Branca. Apesar dos toros de madeira ensaiados nesta dissertação serem provenientes de uma zona distinta do estudo realizado por Morgado (Morgado,2008), foram assumidos para o pré-dimensionamento esses valores relativos às propriedades mecânicas.

A amostra é de treze toros de madeira e sete vigas de lamelado colado. Previamente foram realizados vários ensaios para posterior escolha apenas dos elementos necessários ao fabrico das lajes. As dimensões dos elementos madeira são apresentadas no quadro seguinte

Quadro 4.1 - Comprimentos dos elementos madeira

Toros	L(m)	GL24C	L(m)
1	3,523	1	3,501
2	3,553	2	3,501
5	3,536	3	3,501
6	3,485	6	3,501
7	3,554	7	3,505
9	3,589	-	-
12	3,530	-	-

O cálculo das massas volúmicas dos elementos madeira, foi efectuado com base na sua pesagem e respectivas dimensões. Para o caso da madeira lamelada colada, o cálculo é directo visto que a secção é uniforme em todo o seu comprimento longitudinal. Tal não acontece nos toros, obrigando à medição dos diâmetros nas extremidades, de modo a estabelecer uma superfície cilíndrica de afunilamento. Os dados obtidos relativos às massas volúmicas são os indicados no quadro 4.2.

Quadro 4.2 - Massas volúmicas dos elementos madeira escolhidos

Toros	ρ (Kg/m ³)	GL24C	ρ (Kg/m ³)
1	673,00	1	419,88
2	622,91	2	429,88
5	663,53	3	410,36
6	615,19	6	424,16
7	545,93	7	425,16
9	507,34	-	-
12	614,63	-	-

4.1.2 Ensaio do modo de elasticidade estático

O cálculo do módulo de elasticidade (MOE) dos toros e da madeira lamelada colada, foram determinados conforme a norma EN 14251 e a EN 408 respectivamente. O esquema de ensaio para determinação do módulo de elasticidade global e local segundo as normas é apresentado nas figuras seguintes.

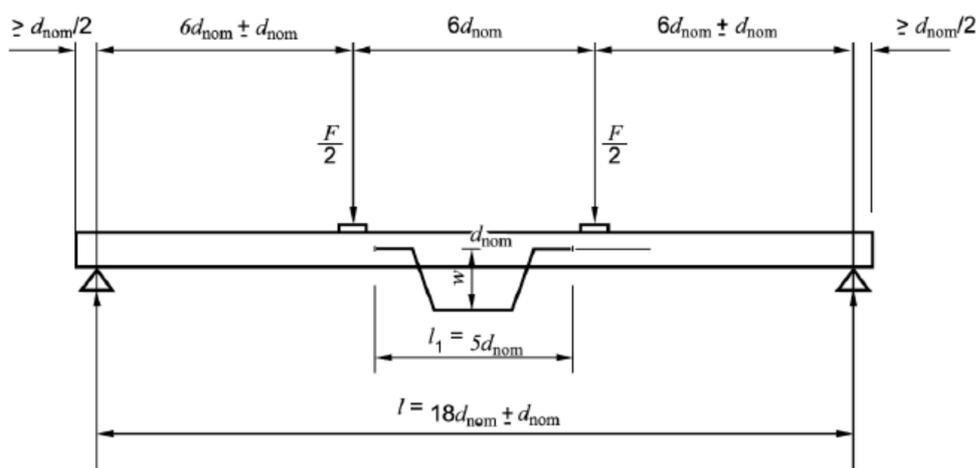


Figura 4.1- Esquema de ensaio MOE dos toros de madeira (EN 14251)

Para a madeira lamelada colada o esquema de ensaio é idêntico, sendo as distâncias em função da altura do elemento, ao contrário dos toros que são em função do diâmetro nominal.



Figura 4.2 - Ensaio MOE dos elementos de madeira

No caso dos toros, é necessária a determinação do diâmetro nominal, tal como se observa na figura. Os valores foram calculados com base no diâmetro máximo e mínimo seguindo a EN 14251 e são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 4.3 - Diâmetros nominais dos toros de madeira

Toros	D_{nom} (mm)
1	118,0
2	139,00
5	130,0
6	132,0
7	113,0
9	122,0
12	137,8

Através dos dados obtidos nos ensaios foi possível calcular os respectivos módulos de elasticidade de cada toro assim como de cada viga de madeira lamelada colada, seguindo as indicações das normas EN14251 e EN408.

Quadro 4.4 - Módulos de elasticidade dos elementos de madeira

Toros	$E_{m,g}(GPa)$	$E_{m,g}(GPa)$	GL24C	$E_{m,g}(GPa)$	$E_{m,g}(GPa)$
1	16,75	14,72	1	12,73	12,76
2	9,89	10,13	2	13,40	13,73
5	15,78	14,08	3	12,86	13,49
6	10,95	9,48	6	12,51	12,99
7	13,75	15,93	7	13,98	15,01
9	11,16	11,47	-	-	-
12	13,99	12,52	-	-	-

No caso dos toros, as normas EN 14251 e EN 408 obrigam a que o quadrado do coeficiente de correlação entre o momento e a deformação, assim como entre a força aplicada e a deformação seja superior a 0,99, verificando-se para todos os toros. Em todas as vigas de lamelado colado, o quadro do coeficiente de correlação entre a força aplicada e a deformação também foi superior a 0,99 tal como é imposto na norma EN 408.

Relativamente aos coeficientes de correlação entre os módulos de elasticidade locais e globais, os valores foram $r^2 = 0,87$ e $r^2 = 0,96$ para os toros de madeira e as vigas GL24C respectivamente. O coeficiente de correlação difere dos toros para as vigas GL24C, devido à diferença de valores entre os módulos de elasticidade locais e globais dos próprios, estando esta diferença relacionada com as características de cada elemento, sendo que as vigas de lamelado colado apresentam uma secção constante em todo o seu comprimento longitudinal, o que não acontece nos toros de madeira que além de terem secções de diferentes diâmetros apresentam curvaturas o que pode vir a explicar a baixa correlação.

4.1.3 Ensaio dinâmico

4.1.3.1 Ensaio do modo de elasticidade dinâmico

Completando o estudo do módulo de elasticidade dos elementos madeira, é determinado também o módulo de elasticidade dinâmico, cujo esquema de ensaio se apresenta na figura 4.3. Para esta determinação foi necessário introduzir os dados do teor de água, a massa de cada elemento e a respectiva dimensão da secção transversal. No caso dos toros foi necessário calcular a secção transversal equivalente, pois o equipamento usado só aceita secções transversais rectangulares. Os valores obtidos são apresentados no quadro 4.5.

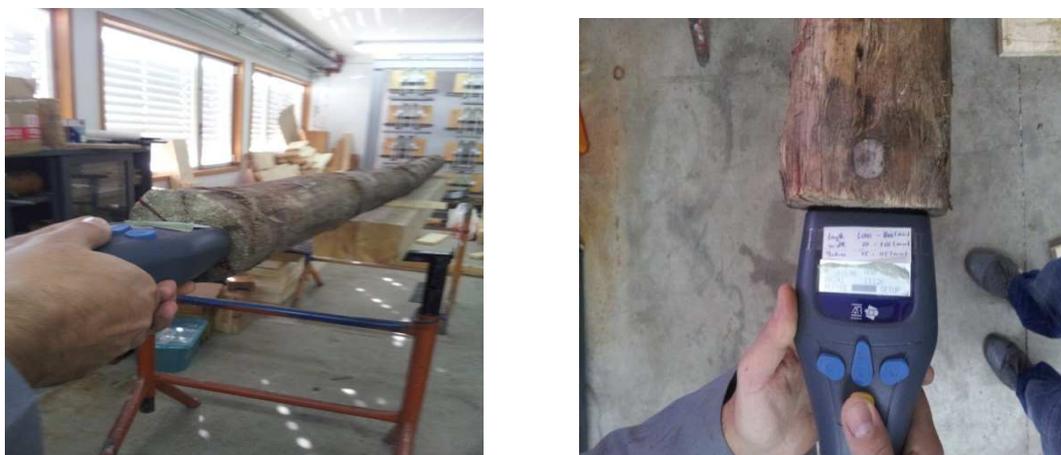


Figura 4.3 - Ensaio MGT

Quadro 4.5 – Módulos de elasticidade dinâmicos dos elementos de madeira

Toros	$E_{dyn}(GPa)$	GL24C	$E_{dyn}(GPa)$
1	14,54	1	9,86
2	12,27	2	10,93
5	14,53	3	10,67
6	13,17	6	10,94
7	11,13	7	10,95
9	10,35	-	-
12	14,10	-	-

Em relação à correlação entres os módulos de elasticidade estáticos e dinâmicos, no caso dos toros apresenta o valor de $r = 0,87$ o que é satisfatório, ao contrário das vigas de lamelado que se obteve uma correlação de $r = 0,66$. Este valor é relativamente baixo para o qual não se encontrou explicação.

Tal como já foi referenciado no ponto 4.1.1 a amostra é superior ao necessário para o fabrico das lajes, pelo que após estes ensaios foram escolhidos apenas os elementos a utilizar para o seu fabrico. O critério de escolha recaiu nos elementos com maior modo de elasticidade global, tendo sido seleccionados sete toros e cinco vigas GL24C.

4.1.3.2 Ensaio de caracterização dinâmica

Este ensaio consiste na caracterização dinâmica dos elementos madeira de modo a obter as suas frequências próprias. O ensaio foi realizado tendo em conta os elementos madeira duplamente encastrados, pois caso assumisse viga simplesmente apoiada, esta estava sujeita a

grandes vibrações. O ensaio dinâmico consistiu na colocação a meio vão de uma carga suspensa de massa próxima dos 20 Kg que foi libertada instantaneamente provocando a

vibração no elemento de madeira. Para a medição dos dados recorreu-se a dois acelerómetros colocados no topo e na base do meio vão de cada elemento.



Figura 4.4 - Pormenores de ensaio (apoio encastrado, carga suspensa, acelerómetros)

Os resultados obtidos através do programa são dois gráficos, um de aceleração-tempo e outro de magnitude-frequência. Na figura 4.5 pode ver-se um exemplo de um gráfico de magnitude-frequência onde se pode ver perfeitamente o pico correspondente à frequência própria. Os valores das frequências obtidos são apresentados nos quadros para os toros e vigas GL24C respectivamente.

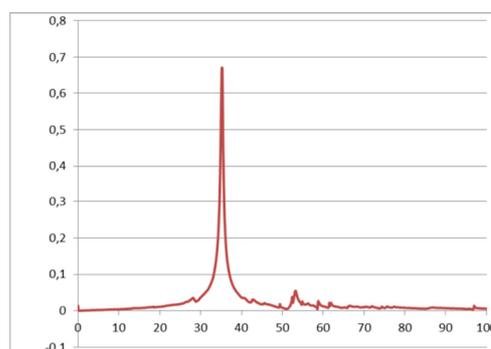


Figura 4.5 - Exemplo gráfico magnitude-frequência

Quadro 4.6 - Frequências próprias dos elementos de madeira

Toros	f (Hz)	GL24C	f (Hz)
1	37,4	1	41,2
2	34,0	2	42,9
5	38,3	3	41,9
6	36,5	6	41,9
7	36,3	7	41,6
9	37,0	-	-
12	35,2	-	-

4.1.2 Elemento betão

Tal como referenciado anteriormente, para as duas lajes mistas de madeira-betão são utilizados dois tipos de betão, o betão leve e betão pronto C20/25.

Conceptualmente o desenvolvimento do betão leve consistiu na substituição de alguns agregados por agregados de cortiça expandida, que neste correspondeu à substituição de 40% do volume de areia pela mesma quantidade de cortiça com granulometria 0/3 e do mesmo modo para a brita, substituindo 20% do volume pelo mesmo valor em cortiça de granulometria 3/10. Esta composição específica foi alvo de estudo detalhado em trabalhos anteriores, sendo indicada no quadro 4.7.

Relativamente ao betão pronto de classe C20/25 é desconhecida a sua composição, pois esta não foi fornecida pela empresa que o forneceu.

Quadro 4.7 - Composição do betão leve

Agregados	Quantidade (Kg/m ³)
Areia	465,5
Brita 1	831,2
Cimento 42,5 I	300,0
Água	191,2
Cortiça 0/3	16,2
Cortiça 3/10	12,4
Adjuvante	2,4

Forma preparados provetes de cúbicos com os dois tipos de betão utilizados, com o objectivo de determinar as suas propriedades mecânicas tais como a resistência à compressão, o módulo de elasticidade e a sua massa volúmica.

O cálculo do módulo de elasticidade médio do betão E_{cm} é determinado conforme as disposições presentes no Quadro 3.1 da NP EN 1992-1-1:2004.

$$E_{cm} = 22 \times (f_{cm}/10)^{0,3} \quad (8)$$

Como o módulo de elasticidade do betão leve vai ser inferior ao do betão C20/25 para a mesma classe, o EC 2 apresenta um coeficiente η_e que permite relacionar os dois módulos e que é dado por

$$\eta_e = \left(\frac{\rho}{2200}\right)^2 \quad (9)$$

Onde ρ representa a massa volúmica do betão leve (Kg/m^3)

Assim o módulo de elasticidade médio do betão leve foi determinado com base na resistência média à compressão do betão f_{lcm} e vem dado pela seguinte expressão.

$$E_{lcm} = 22 \times (f_{lcm}/10)^{0,3} \times \eta_e \quad (10)$$

4.1.2 Ligação madeira-betão

Para as duas lajes madeira-betão, utilizou-se apenas um tipo de ligador. O ligador consiste em cavilhas de aço, provenientes do corte de varões S500 com o diâmetro $\phi 8$. O ligador foi colocado na madeira com recurso a pré-furação, com um espaçamento de 10 cm.

Os comprimentos dos ligadores diferem nas duas lajes, pois a laje mista madeira-betão tem o soalho como revestimento, obrigando o aumento de comprimento dos mesmos. No caso dos toros, o comprimento do ligador é de 12 cm dos quais 8 cm estão inseridos na madeira e os restantes 4 cm estão embebidos no betão. Para as vigas lameladas coladas devido ao soalho apresentar uma espessura de 2 cm, o comprimento do ligador é de 14 cm.



Figura 4.5 - Ligadores (à esquerda os toros; à direita laje mista madeira-betão)

O ligador usado foi caracterizado mecanicamente num estudo anterior. Os valores das suas propriedades mecânicas são apresentados no quadro seguinte.

Quadro 4.8 - Características do ligador

	$F_{m\acute{a}x}(KN)$	$K_{\zeta}(KN/mm)$
Valor médio	12,0	7,4
Valor máximo	15,2	19,0
Valor mínimo	9,2	3,0
Desvio-padrão	1,378	4,591
COV	11%	62%

4.2 Execução das lajes

O fabrico da laje de madeira consistiu apenas na aplicação de soalho sobre as vigas GL24C originando assim um pavimento tradicional.



Figura 4.6 - Aplicação do soalho

A preparação das lajes mistas madeira-betão foi realizada no ITeCons. Como a dimensão final de cada provete era considerável, o transporte dos mesmos poderia levar a que houvesse danos nas estruturas que posteriormente iria afectar os ensaios efectuados. Assim no Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra foi planeada toda a estrutura da cofragem de modo a que depois se tornasse fácil o transporte. Inicialmente foi marcado o espaçamento dos ligadores nas duas lajes e após esta tarefa procedeu-se à pré-furação e colocação dos mesmos.

De modo a evitar a transferência de água do betão para a madeira, os toros de madeira foram envolvidos por um filme plástico assim como toda a estrutura da cofragem. Este procedimento trouxe vantagens ao nível da descofragem e da eliminação do atrito. No caso da laje com vigas GL24C a betonagem iria ser feita sobre o soalho e assim sendo colocou-se o filme plástico sobre o mesmo. Os toros foram colocados na estrutura de cofragem e aplicou-se uma régua de aglomerado de madeira em todo o perímetro da laje garantindo assim uma altura mínima de 5 cm. A irregularidade dos toros fez com que algumas zonas não cumprissem a altura pretendida e também pelo mesmo motivo originou vazios entre os toros e a estrutura da cofragem na qual foi preenchida com silicone.



Figura 4.7- Esquema de cofragem da laje LOGCork

No provete com vigas GL24C o processo de preparação para a betonagem foi mais simples, pois o soalho que foi colocado sobre as vigas de modo a recriar um pavimento tradicional de madeira, serviu de cofragem e foi então apenas necessário colocar uma régua de aglomerado em todo o seu perímetro de modo a garantir também os 5 cm de betão. De salientar que para os dois provetes foi necessário recorrer à colocação de duas vigas de bordo perpendiculares às vigas principais de cada laje devido a requisitos das câmaras de ensaio acústicas.

De seguida foi colocada a armadura construtiva, constituída por uma malha electro soldada Ø5 10*10, a uma altura de 2,5 cm da camada de betão, conseguida com recurso a espaçadores torre como é visível nas figuras seguintes.

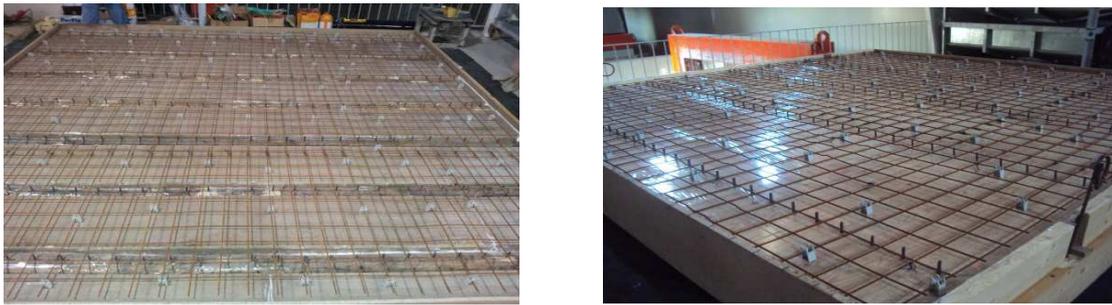


Figura 4.8 – Armadura construtiva (à esquerda Laje LOGCork; à direita Laje madeira-betão)

A betonagem e os ensaios das duas lajes, não foram realizados em simultâneo devido às questões de espaço do laboratório de ensaio. Assim foi feita primeiro a betonagem e ensaio da laje LOGCork e posteriormente foi betonado a laje madeira-betão e conseqüentemente ensaiada. Ao mesmo tempo do enchimento do pavimento foram fabricados provetes cúbicos, de modo a serem ensaiados mais tarde para determinação das características do betão.



Figura 4.9 - Betonagem da laje LOGCork (à esquerda aplicação do betão; à direita provetes cúbicos)

Para a laje de madeira-betão como já foi referido anteriormente foi utilizado betão pronto. Assim sendo a betonagem foi feita directamente do veiculo de transporte para a cofragem e vibrando-se logo de seguida. Do mesmo modo da laje anterior, simultaneamente com a betonagem do betão foram também feitos provetes cúbicos. Após a cura inicial do betão nas duas lajes, foi feita a descofragem das mesmas.



Figura 4.10 – Betonagem do pavimento com vigas de lamelado colado

4.2 Ensaios dos provetes cúbicos

A caracterização mecânica de cada betão utilizado foi feita através do ensaio à compressão de provetes cúbicos, com aresta 150 mm, segundo a norma EN 12390-3. Para cada betão utilizado neste estudo, foi possível a determinação da resistência à compressão média e respectivas massas volúmicas. O módulo de elasticidade médio E_{cm} para o betão C25/30 foi calculado de acordo com as disposições presentes no quadro 3.1 da NP EN 1992-1-1. No caso do betão leve este foi determinado, conforme a equação (10) descrita no subcapítulo 4.1.2. Os resultados obtidos são indicados no quadro 4.10.

Quadro 4.10 - Caracterização do betão em cada laje mista

Laje	f_{cm} (MPa)	ρ (Kg/m ³)	ρ (KN/m ³)	E (GPa)
LOGCork	9,95	1807,4	18,074	14,826
Madeira-betão	24,43	2355,6	23,556	28,760

5 Ensaio Acústicos

5.1 Introdução

Os pavimentos de madeira representam as soluções construtivas habitualmente usadas nos edifícios antigos existentes na maioria dos centros históricos de cidades europeias. Contudo, em edifícios a reabilitar estas soluções levam a alguma dificuldade em garantir os padrões de desempenho acústicos satisfatórios. Hoje em dia, é cada vez mais corrente recorrer a ensaios acústicos que podem ser feitos in situ ou em laboratório, que permitem quantificar o índice de isolamento em função de diferentes soluções construtivas, que possam ser adoptadas na fase de projecto ou posteriormente em obra.

Foram realizados um total de dez ensaios acústicos, divididos em sons de percussão e aéreos nas cinco soluções propostas neste estudo. Como referido anteriormente, usa-se elementos nomeadamente revestimento flutuante em madeira e tecto falso em gesso cartonado, com a finalidade de aumentar o isolamento sonoro, sendo que a ordem de ensaios foi a seguinte:

- Laje mista de madeira-betão com cortiça e revestimento flutuante em madeira
- Laje de madeira
- Laje de madeira com tecto falso constituído por lã de rocha e gesso laminado
- Laje mista madeira-betão, com revestimento flutuante em madeira e com tecto falso constituído por lã de rocha e gesso laminado
- Laje mista madeira-betão, com revestimento flutuante em madeira

Foi assim possível caracterizar acusticamente as duas soluções de pavimentos e materiais utilizados como isolante de ruído. Nos capítulos seguintes irão ser descritos os tipos de ensaios realizados, será feita a descrição de todos os provetes realizados e posteriormente são apresentados os resultados obtidos e consequentemente discussão dos mesmos.

5.2 Descrição dos ensaios

5.2.1 Local e equipamentos de ensaio

Os ensaios acústicos em laboratório são realizados em câmaras acústicas reverberantes que permitem ensaios de isolamento a sons aéreos e simultaneamente isolamento a sons de percussão. Existem dois tipos de câmaras acústicas, as horizontais destinadas a ensaios de elementos de separação verticais e as câmaras verticais para elementos de

separação/compartimentação horizontais, tais como pavimentos ou revestimentos de pisos. Neste estudo como se trata de analisar pavimentos os ensaios foram feitos nas câmaras verticais que consistem em duas câmaras (emissora e receptora) sobrepostas, sendo a emissora móvel permitindo assim, a construção do provete num espaço adjacente a este e posteriormente transportado e colocado no interior das câmaras na posição de ensaio.

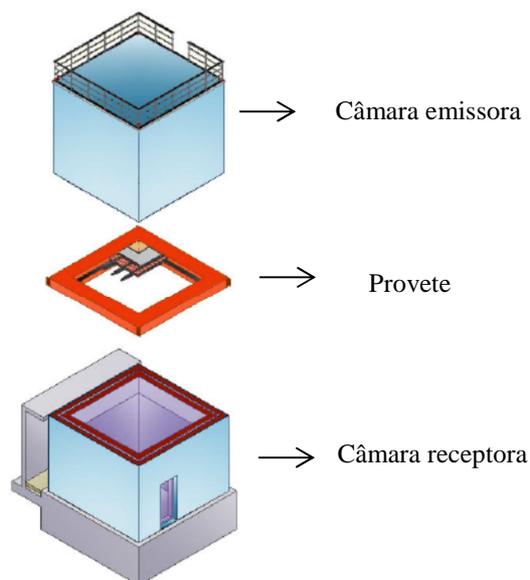


Figura 5.1 –Esquema das câmaras acústicas verticais (IteCons)

Estas câmaras têm de respeitar todas as exigências presentes na norma ISO 10140-1:2010, completada com as indicações estabelecidas nas normas de ensaio ISO 10140-2:2010, ISO 10140-3: 2010 e ISO 10140-4: 2010. Estas exigências baseiam-se principalmente ao nível da dimensão, ao tempo de reverberação que devem exibir, ao ruído de fundo aceitável, à relevância das transmissões marginais e ao coeficiente de perdas admissível para a estrutura envolvente do provete. Para o tal, o compartimento emissor tem uma forma cúbica com arestas a rondar os 3,75 m e paredes com 50 cm de espessura constituída por multicamada em “Viroc”. Em relação ao compartimento receptor este apresenta uma forma paralelepípedica, com dimensões de 3,92 m x 3,92 m x 4,72 m munida de paredes duplas de betão armado e alvenaria de aproximadamente 50 cm de espessura.

Devido á imposição de limites da ISO 10140-1:2010 em termos de tempo de reverberação nas baixas frequências, são colocados painéis difusores e caixas-de-ressonância em ambas as câmaras para contribuir para a sua redução. Alguns painéis possuem lã mineral no seu interior e têm três dimensões diferentes, nomeadamente $1,25 \times 1,25 \text{ m}^2$, $1,00 \times 1,00 \text{ m}^2$ e $0,75 \times 0,75 \text{ m}^2$. Estes foram dispostos de forma a garantir as melhores condições de difusibilidade e colocados com diferentes inclinações relativamente às paredes das câmaras.

Os equipamentos de ensaio utilizados foram os que o IteCons habitualmente utiliza nos ensaios normalizados, para a determinação do isolamento de sons aéreos e de percussão nomeadamente: sistema de aquisição multicanal Pulse Bruel & Kjaer 3560-C-T46; microfones 1/2" Bruel & Kjaer 4190; girafas giratórias Bruel & Kjaer 3923; Calibrador acústico Bruel & Kjaer 4231; fontes de ruído aéreos OMNIPOWER Bruel & Kjaer 4292; fonte de ruído de percussão Bruel & Kjaer 3207.

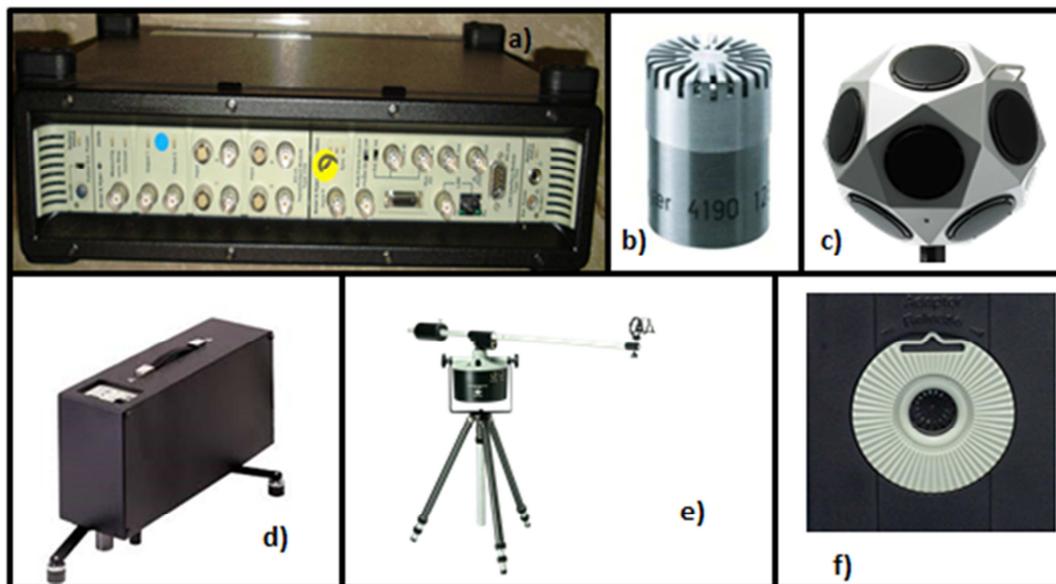


Figura 5.2 - Ilustração dos equipamentos utilizados: a) sistema aquisição multicanal B&K 3560-C-T46; b) microfone B&K 4190; c) fonte ruído aéreo B&K 4292; d) fonte ruído percussão B&K 3207; e) girafa giratória B&K 3923; f) calibrador B&K 4231

5.2.2 Isolamento a sons aéreos

Previamente ao ensaio, foi colocado o provete num aro metálico e assim foi transportado e depois instalado sobre a câmara receptora. Posteriormente é sobreposta a câmara emissora tal como o esquema da figura... do capítulo anterior. Devido à existência de uma pequena folga entre o provete e o aro metálico em todo o seu perímetro, foi necessário colmatar a mesma com lã de rocha e fita cola isolante de modo a minimizar as transmissões secundárias.

O procedimento de ensaio consiste, primeiramente, na colocação da fonte de ruído aéreo no compartimento emissor em duas posições diferentes, e de um microfone móvel de 1 m de raio de varrimento. Este é colocado numa única posição e se movimenta num plano com cerca de 10° de inclinação, sendo o período de rotação 32 s que permite medir o nível sonoro na câmara emissora. Ambos os aparelhos são dispostos respeitando os afastamentos aos difusores, às paredes do compartimento assim como entre si, conforme é indicado na norma.

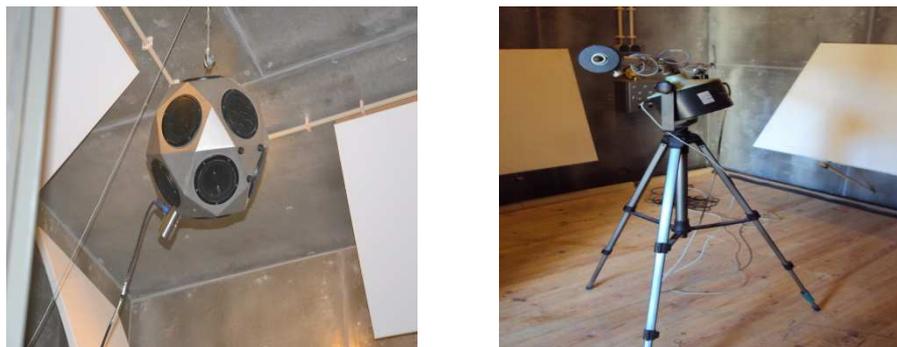


Figura 5.3 - Fonte ruído aéreo e microfone móvel instalados na câmara emissora

Em simultâneo, é medido o nível sonoro na câmara receptora para as mesmas posições da fonte de ruído aéreo que se encontra no compartimento emissor, utilizando outro microfone com as mesmas características. Depois de desligar a fonte sonora, é medido o ruído de fundo no compartimento receptor através do varrimento do microfone móvel. No mesmo compartimento, é posteriormente medido o tempo de reverberação, considerando pelo menos uma posição para a fonte sonora e três posições de microfone para registo de dois decaimentos (veja-se figura 5.4).



Figura 5.4 – Microfone móvel e fonte sonora na câmara receptora

A obtenção da curva de isolamento sonoro normalizado é determinada de acordo com a norma ISO 10140-2:2010, e o correspondente índice de isolamento é calculado conforme a norma NP EN ISO 717-1:2009.

5.2.3 Isolamento a sons de percussão

O ensaio de isolamento a sons de percussão foi efectuado em conformidade com a norma ISO 10140-3:2010.

Neste caso a fase de preparação do provete igual ao ensaio de isolamento a sons aéreos. Depois de completada esta tarefa, procede-se então ao ensaio de isolamento a sons de

percussão. Este ensaio consiste na instalação da fonte sonora de ruído de percussão, conhecida como máquina de percussão, que é colocada em quatro posições diferentes sobre o provete, sendo medido o nível sonoro na câmara receptora usando um microfone móvel nas mesmas condições do ensaio anterior. No posicionamento da máquina de percussão e do microfone, foram garantidas as distâncias mínimas que a norma exige.



Figura 5.5 – Máquina de percussão (à esquerda sobre o flutuante de madeira, à direita sobre o soalho)

Posteriormente ao ensaio com a máquina de percussão é avaliado o ruído de fundo no compartimento receptor utilizando o microfone nele instalado. De seguida, tal como no ensaio anterior, é medido o tempo de reverberação no mesmo compartimento, considerando um total de seis decaimentos para três posições de microfone, e uma posição da fonte de ruído aéreo. A curva de isolamento sonoro normalizado é definida conforme a norma ISO 10140-3:2010, e consequentemente o índice de isolamento é determinado de acordo com a NP EN ISO 717-2:2009.

5.3 Descrição dos provetes

Tal como dito anteriormente foram executados três tipos de pavimentos. Recorreu-se ainda a elementos adicionais com a finalidade de melhorar o seu desempenho acústico resultando num total de cinco provetes para ensaio. Assim o primeiro provete a ser ensaiado consistiu na laje LOGCork, composta por vigas de madeira de secção circular com secções transversais de diâmetro entre os 130 e 150 mm e uma lajeta armada de betão com cortiça de espessura 50 mm na qual é implantado um revestimento flutuante em madeira com espessura de 12 mm com base em aglomerado de cortiça. A área total do provete é de aproximadamente 3,53 x 3,53 m² que depois é apoiada em todo o seu perímetro numa largura de 20 cm sobre o aro

metálico. A abertura do ensaio apresenta dimensões livres de 3,16 m x 3,16 m a que corresponde a uma área de aproximadamente 10 m².

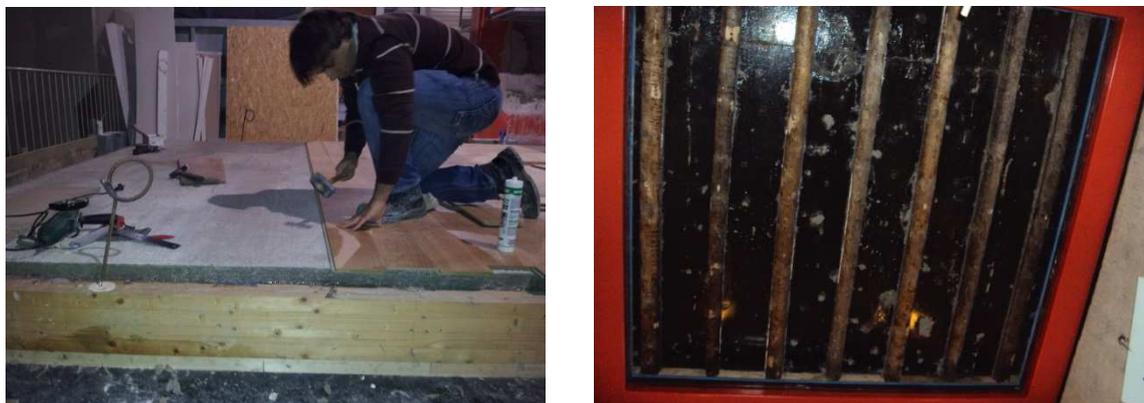


Figura 5.6 – Laje LOGCork (à esquerda aplicação do revestimento flutuante de madeira na laje; à direita parte inferior da laje LOGCork vista da câmara receptora)

Recorrendo à laje de madeira foram originados quatro tipos de soluções, sendo a primeira solução a laje base. Devido às vigas de madeira lamelada colada serem ligadas a duas vigas de bordo perpendiculares às mesmas, originou um vazio entre o soalho e as vigas de bordo, na qual foi colmatado com lã de rocha e tapada na parte interior e exterior com peças de madeira em todo o seu perímetro. As peças de madeira do lado exterior foram colocadas de modo a que na futura betonagem da laje fosse já garantido a altura da lâmina de betão.



Figura 5.7 - Preenchimento do vazio entre o soalho e as vigas de bordo

O provete tem uma área total de 3,53x3,53 m² e a forma de acondicionamento no aro de ensaio assim como a abertura de ensaio é igual ao descrito no provete anterior.



Figura 5.8 – Parte inferior da laje de madeira vista da câmara receptora

Posteriormente ao ensaio de isolamento de sons aéreos e percussão da laje de madeira, esta foi retirada do aro metálico para montagem do novo elemento de construção. Na parte inferior da laje de madeira é instalado um tecto falso em gesso cartonado. Daí deriva uma caixa-de-ar com aproximadamente 400 mm de espessura com recursos a acessórios metálicos de suspensão aparafusados às vigas de madeira lamelada colada, sendo esse espaço preenchido em grande parte com lã de rocha de espessura 70 mm e peso de 70 Kg/m^3 . De seguida é colocada uma estrutura em perfis metálicos na qual são aparafusadas as placas de gesso laminado Gyptec BA13A com 12,5 mm de espessura e logo após procedeu-se ao respectivo barramento das juntas. Toda a execução do tecto falso ficou a cargo da empresa “Gyptec Ibérica-Gessos Técnicos, SA” que forneceu também todo o material necessário.

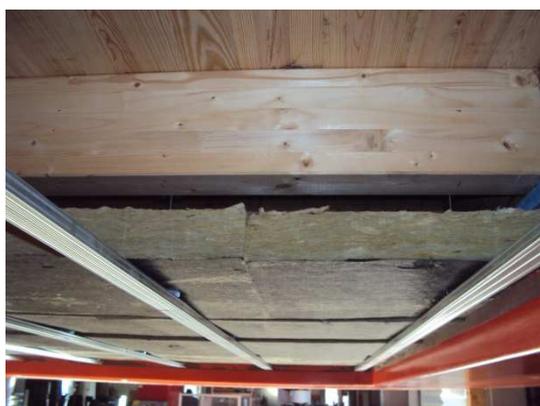


Figura 5.9 - Processo de montagem do tecto falso em gesso cartonado

Depois de esta solução construtiva ter sido ensaiada, manteve-se o tecto falso em gesso cartonado e realizou-se a aplicação de uma lâmina de betão pronto de classe C20/25 sobre o pavimento de soalho, cujo processo de execução já foi descrita no capítulo 4.2. Após a

secagem do betão foi aplicado o mesmo revestimento flutuante em madeira utilizado na laje LOGCork.



Figura 5.10 – Vista da câmara receptora da laje madeira-betão

A última solução construtiva consistiu na retirada de todo o tecto falso em gesso cartonado mantendo o revestimento flutuante em madeira, aplicando-se o mesmo procedimento dos ensaios anteriores.

5.4 Resultados obtidos

Neste subcapítulo são apresentados os principais resultados obtidos nos ensaios experimentais. A análise será feita primeiramente avaliando o comportamento acústico em termos de isolamento a sons aéreos e a sons de percussão das lajes base. Posteriormente é feita uma análise do efeito da incorporação do tecto falso nas lajes construídas, como forma de procurar avaliar viabilidade das soluções construtivas propostas.

5.4.1 Desempenho das lajes

Assim, este primeiro grupo de resultados tem como objectivo perceber qual o comportamento acústico de cada uma das soluções construtivas executadas neste estudo, considerando apenas soluções de base com revestimento superficial. Na figura 5.11 são apresentados os resultados para o isolamento a sons aéreos para os três tipos de soluções.

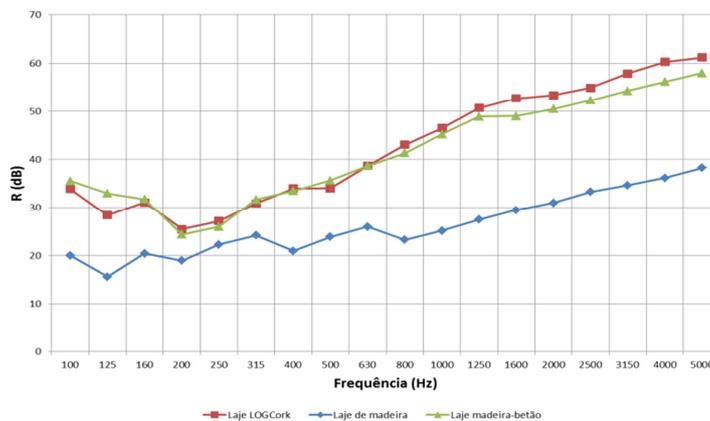


Figura 5.11 - Resultados em laboratório para isolamentos de sons aéreos

Analisando o gráfico de isolamento a sons aéreos, pode-se constatar que as soluções constituídas com uma lajeta de betão têm uma performance bastante superior em relação á solução com laje de madeira simples, sendo esse facto evidente nas frequências altas que apresentam uma diferença próxima dos 20 dB. A solução laje de madeira que tem como revestimento apenas o soalho tem um comportamento acústico bastante fraco, pois a sua capacidade de redução sonora mesmo tratando-se de frequências altas nunca excede os 40 dB. Este resultado já era esperado, pois a laje de madeira era apenas revestida com soalho com espessura de 22 mm o que significa que a laje exhibe uma massa bastante reduzida, pelo qual não possibilita um comportamento acústico apropriado. Conclui-se que as duas outras soluções, a implantação de uma lâmina de betão faz com que melhore consideravelmente o comportamento acústico com destaque para a laje LOGCork que em frequências altas apresenta o melhor desempenho acústico. Este facto pode dever-se ao aglomerado de cortiça introduzido no betão, que apesar de tornar a estrutura mais leve, possibilita uma maior dissipação da energia no processo de transmissão.

Em relação ao isolamento de sons de percussão são apresentados na figura 5.12 os resultados obtidos para as mesmas três soluções seleccionadas anteriormente.

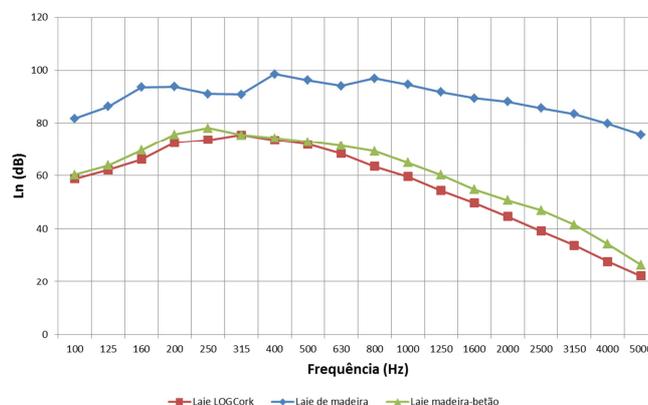


Figura 5.12 – Resultados em laboratório para isolamento a sons de percussão

Observando a figura constata-se mais uma vez o mau desempenho da laje de madeira com revestimento de soalho, desta vez em relação ao isolamento de sons de percussão. Pode-se verificar que para esta solução os níveis de percussão normalizados medidos no compartimento receptor exibem repetidamente valores acima dos 90 dB e mesmo em frequências altas, estes valores situam-se acima dos 70 dB. Com a inclusão da lâmina de betão e do revestimento flutuante em madeira, o comportamento a sons de percussão melhora significativamente para todas as frequências sendo que em alguns casos a diferença supera os 40 dB. Tal como acontece no isolamento a sons aéreos, neste ensaio também a laje LOGCork é a que apresenta melhor comportamento em relação à laje de madeira-betão. É possível que tal facto aconteça mais uma vez pela presença da cortiça na composição do betão, que origina uma maior dissipação da energia.

5.4.2 Desempenho do tecto falso

Depois de analisadas as soluções convencionais apenas com revestimento superficial, pretende-se agora conhecer o comportamento das mesmas lajes com a inclusão de um tecto falso que origina soluções construtivas que normalmente são usadas em edifícios. Tal como referido anteriormente na descrição dos provetes foi implementado um tecto falso do tipo Gyptec BA13A, com placas de gesso laminado de espessura 12,5 mm, com uma caixa-de-ar de 400 mm preenchida com lã de rocha de 70 Kg/m³ e 70 mm de espessura. De realçar que que não foi possível a realização de ensaio com tecto para a laje LOGCork e por esse motivo o resultado foi obtido através de uma extrapolação a partir dos resultados da laje madeira-betão tendo em consideração a seguinte relação:

$$R = R^{cortiça} + \Delta R^{tecto} \quad (11)$$

$$L_n = L_n^{cortiça} - \Delta L_n^{tecto} \quad (12)$$

Com

$$\Delta R^{tecto} = R^{madeira-betão+tecto} - R^{madeira-betão} \quad (13)$$

$$\Delta L_n^{tecto} = L_n^{madeira-betão} - L_n^{madeira-betão+tecto} \quad (14)$$

Assim na figura 5.13 são apresentados as curvas de redução sonora a sons aéreos para os três tipos de soluções.

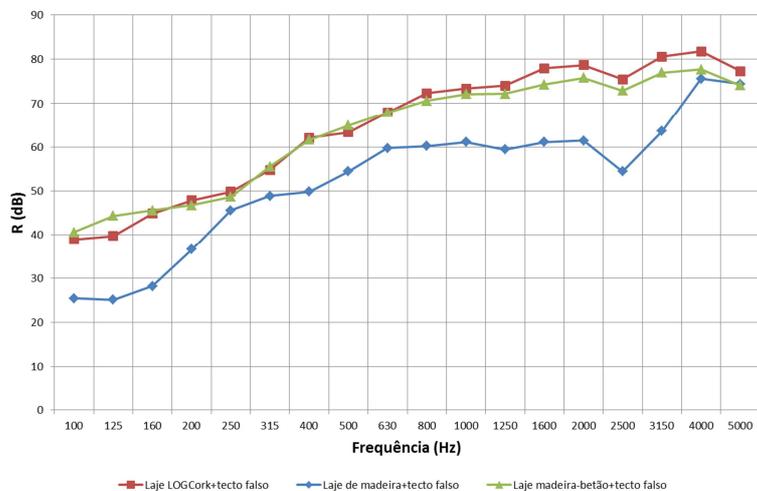


Figura 5.13 - Curvas de redução a sons aéreos com tecto falso

Observa-se que novamente as soluções com lâmina de betão tal como esperado apresentam um melhor comportamento, com a laje LOGCork e madeira-betão a apresentarem valores bastantes satisfatórios. A inclusão do tecto falso nestas duas lajes fez acrescer o seu desempenho em 23 dB. Em relação à laje de madeira, de realçar o melhoramento do desempenho acústico desta solução com a incorporação do tecto falso que leva a um aumento de isolamento de 24 dB, permitindo que esta respeite os requisitos da legislação portuguesa. Existe uma quebra de isolamento em todas as soluções para uma frequência a rondar os 2500 Hz, que provavelmente se deve ao efeito de uma frequência crítica (associada ao tecto falso).

De seguida é apresentado na figura 5.14 as curvas de redução sonora, relativamente a sons de percussão.

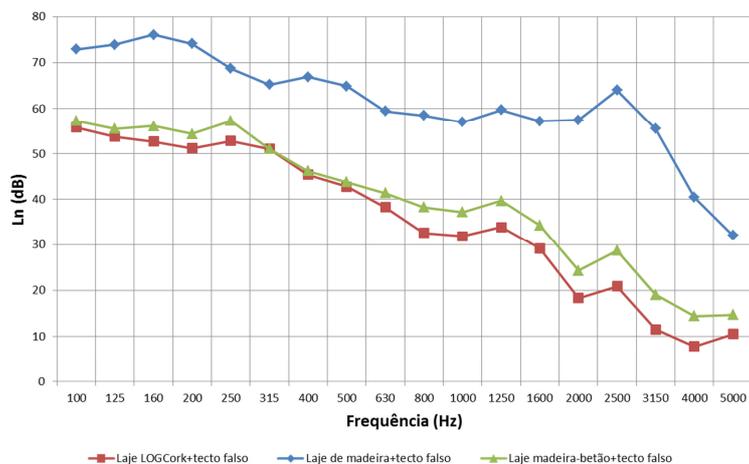


Figura 5.14 - Curvas de redução a sons de percussão com tecto falso

Neste caso mais uma vez se prova que as soluções que incluem a lâmina de betão têm o melhor comportamento, apresentando níveis sonoros de percussão normalizados muito satisfatórios, encontrando-se sempre abaixo dos 60 dB. Aqui a laje de madeira também apresenta melhorias quando está associada com um tecto falso, tendo um bom comportamento nas frequências altas tal como acontecia anteriormente nos sons aéreos. Da mesma maneira que se observa na figura.. relativa a sons aéreos, para sons de percussão o fenómeno que está relacionado com a frequência crítica do sistema também ocorre para frequências em redor dos 2500 Hz onde se observa um pico de quebra de desempenho.

5.4.3 Índices de isolamento ponderados

Depois de avaliadas as curvas de isolamento sonoro para todas as soluções vão-se agora analisar os índices globais de isolamento a sons aéreos e de percussão. Estes índices foram calculados conforme as normas NP EN ISO 717-7:2009 e NP ISO 717-2:2009, sendo os seus valores apresentados no quadro seguinte.

Quadro 5.1 – Índices globais de isolamento a sons aéreos e de percussão

Solução	R_w (dB)	Ln,w (dB)
Laje LOGCork	40	67
Laje de madeira	27	96
Laje de madeira-betão	40	69
Laje LOGCork + tecto falso	63 (*)	46 (*)
Laje de madeira + tecto falso	51	69
Laje de madeira-betão + tecto falso	63	48

Nota: (*) representam os valores extrapolados a partir da laje de madeira-betão com tecto falso

Através dos resultados apresentados no quadro, pode-se confirmar a análise feita no subcapítulo anterior relativamente às soluções constituídas com betão. Estas soluções no nível do desempenho acústico global, têm explicitamente um melhor comportamento em relação às constituídas apenas por madeira. Analisando os valores relativos a sons aéreos verifica-se que os índices globais (R_w) para a laje LOGCork e laje mista madeira-betão, ditam uma diferença de 13 dB para a laje de madeira. Com a inserção do tecto falso existe um acréscimo de desempenho de 23 dB para as lajes de betão e de 24 dB para a laje de madeira. Mesmo com desempenho inferior a laje de madeira assim como as outras soluções com tecto falso podem-se considerar com um comportamento satisfatório no que diz respeito á legislação portuguesa para sons aéreos.

No que diz respeito a sons de percussão, nota-se uma grande diferença dos índices globais (Ln,w) das lajes de betão para a laje de madeira sendo a essa diferença da ordem dos 30 dB, o

que significa que a solução com madeira evidencia-se como tendo um fraco desempenho. De realçar que a laje de madeira, mesmo com tecto falso obteve valores que não permitem satisfazer os requisitos regulamentares. Um comportamento melhorado poderá ser conseguido com recursos a camadas adicionais na superfície superior, que permitiria uma maior absorção de impacto. Em relação às lajes mistas apesar do seu melhor comportamento apenas com introdução do tecto falso é possível cumprir a legislação portuguesa sendo que valores obtidos são inferiores a 50 dB.

6 ENSAIOS DINÂMICOS

Normalmente os pavimentos são projectados face às cargas estáticas, embora as cargas dinâmicas sejam cada vez mais correntes e por esse motivo, se torna necessário a determinação dos parâmetros dinâmicos dos mesmos. Os pavimentos mistos são cada vez mais uma solução para os problemas das vibrações associadas aos pavimentos de madeira. Assim foram realizados ensaios nas três lajes, de modo a determinar as suas frequências próprias e estudar o seu comportamento dinâmico. Neste capítulo é descrito os equipamentos, o procedimento e os provetes para a realização dos ensaios experimentais. Posteriormente são apresentados os resultados obtidos e feita uma análise comparativa entre as soluções ensaiadas. De forma a facilitar a interpretação dos resultados obtidos, recorreu-se a um estudo efectuado em simultâneo com esta dissertação. Esse estudo foi feito, com auxílio de um programa de elementos finitos, onde se modelou apenas as lajes de madeira e madeira-betão. De referir que as modelações não foram feitas tendo em contas as vigas de topo, podendo influenciar os resultados. Deste modo, foi possível identificar as frequências próprias associadas a cada modo de vibração, assim como observar as representações gráficas dos mesmos.

6.1 Equipamentos de medição

Os ensaios dinâmicos foram realizados, com recurso a equipamentos específicos para o ensaio pretendido. Assim foi utilizado um acelerómetro de eixo vertical modelo Bruel&Kjaer 2646, que permite a medição das acelerações no pavimento quando sujeitos a uma acção dinâmica. Estes encontram-se ligados a um módulo de aquisição de alta precisão de dados modelo NI USB-4431, que conseqüentemente está conectado a um computador. O software usado para análise modal no domínio da frequência foi o NI LabVIEW SignalExpress. Ao receber os sinais dos acelerómetros o software processa e grava os dados para posterior análise sendo possível determinar os parâmetros dinâmicos da laje. Neste caso para as acelerações provocadas no pavimento, o programa apresenta o espectro de resposta em função da frequência.



Figura 6.1 - Equipamentos de medição (acelerómetro; módulo de aquisição; software)

6.2 Procedimento do ensaio

Para a determinação experimental das frequências próprias nas lajes estudadas nesta dissertação, procedeu-se inicialmente à marcação dos pontos onde foi colocado o acelerómetro. O mesmo é constituído por uma base magnética, pelo que se recorreu à colocação de anilhas metálicas nos pontos, permitindo assim a sua fixação. De seguida, procedeu-se ao varrimento de todos os pontos.

Existem várias metodologias para a realização de ensaios dinâmicos, são os exemplos mais comuns o teste de queda de calcanhar, martelo instrumentado, electrodinâmico e queda saco areia (Rijal R. et al, 2010). Neste caso usou-se um barrote de madeira para provocar excitação no pavimento, através do impacto do mesmo sobre o pavimento.



Figura 6.2 – Impacto no pavimento

Este procedimento foi repetido para todos os pontos da laje, provocando assim vibração durante um intervalo de tempo de modo permitindo a recolha dos dados por parte o módulo de aquisição.

6.3 Provetes ensaiados

Nos ensaios realizados para obtenção dos parâmetros dinâmicos, foram ensaiadas as três lajes em estudo nesta dissertação. Em cada laje foi escolhida apenas uma zona de ensaio, correspondendo a um quarto da laje. Para a laje LOGCork foram escolhidos um total de oito pontos distribuídos de forma a coincidirem com os toros de madeira. No caso da laje de madeira e madeira-betão o número de pontos é inferior, pois estas são constituídas por menos vigas. A marcação de pontos e a zona (X) onde foi provocada a excitação do pavimento é representado na figura... . As linhas a tracejado simbolizam as vigas das respectivas lajes.

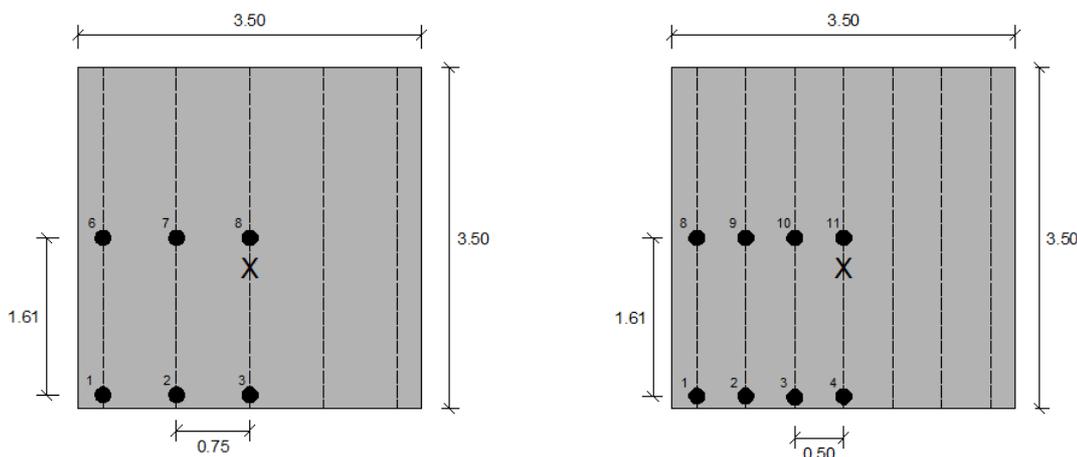


Figura 6.3- Esquema do ensaio dinâmico (à esquerda laje de madeira e madeira-betão; à direita Laje LOGCork)

6.4 Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos para as três soluções em estudo. Para cada solução são exibidos os respectivos gráficos magnitude-frequência, sendo os valores apresentados para frequências até 50 Hz. Cada gráfico corresponde às linhas horizontais dos pontos consideradas. A análise de resultados foi feita apenas para os três primeiros modos de vibração.

6.4.1 Laje LOGCork

Os resultados obtidos para a solução laje LOGCork tendo em conta o ponto central (ponto 11) como referência são apresentados nas figuras seguintes

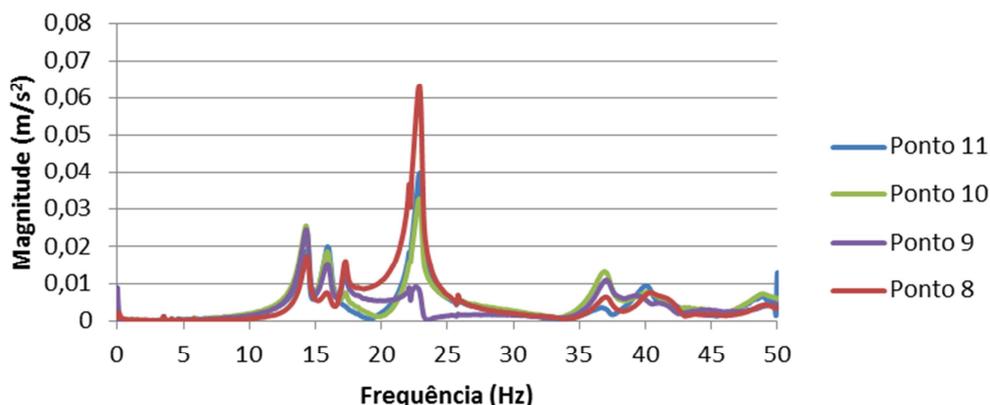


Figura 6.4 - Espectro de resposta da laje LOGCork (pontos 11,10,9 e 8)

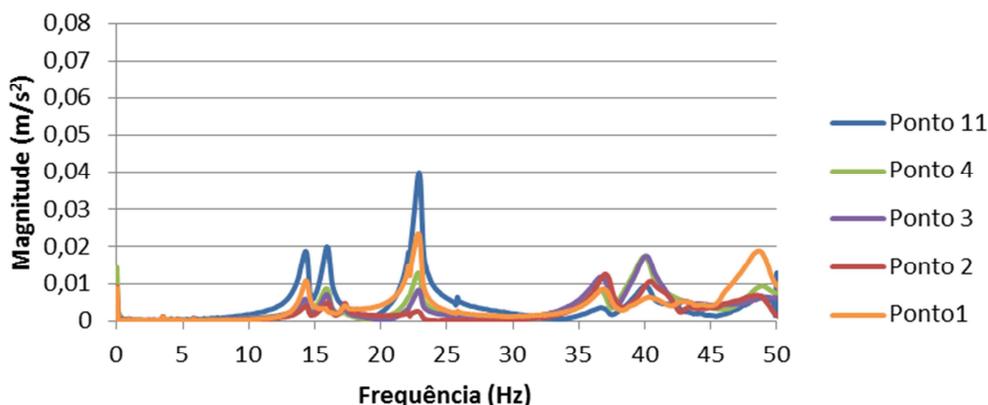


Figura 6.5 - Espectro de resposta da laje LOGCork (pontos 11,1,2,3 e 4)

Tal como referido anteriormente, a laje LOGCork foi única a não ser modelada no estudo efectuado em simultâneo com este. Por esse motivo, não foi possível obter os resultados teóricos para as frequências próprias associadas a cada modo de vibração. Na análise destes gráficos é assumido, que o comportamento é semelhante ao da laje madeira betão. Examinando os gráficos observa-se a presença de dois picos seguidos nas baixas frequências. Pressupõe-se que o segundo pico pertence ao primeiro modo de vibração, com uma frequência própria de 15,8 Hz. Observa-se para esse modo, que no ponto central existe uma grande amplitude, diminuindo nos pontos adjacentes correspondentes à linha de horizontal. Da mesma maneira acontece na linha de pontos junto à viga de topo, em que o ponto 1 acaba por apresentar apenas um ligeiro movimento, talvez pelo facto de estar próximo da ligação da

viga de topo. Sendo assim, o primeiro pico pode estar associado a uma frequência própria de uma certa zona da laje.

De seguida observa-se o segundo modo de vibração para uma frequência própria de 17,2 Hz. Pelas linhas do gráfico, constata-se que a viga central da laje corresponde ao eixo de inflexão do modo de vibração, pois os pontos 11 e 4 não apresentam picos. O movimento dos pontos é crescente ao modo que se aproxima dos apoios. O terceiro modo de vibração dá-se para uma frequência própria de 22,9 Hz, sendo as vibrações sentidas mais visíveis na zona central da laje e junto aos apoios. O quadro resumo dos valores obtidos experimentalmente são apresentados se seguida.

Quadro 6.1- Frequências próprias dos modos de vibração da laje LOGCork

Modo de vibração	f (Hz)
1º	15,8
2º	17,2
3º	22,9

6.4.2 Laje de madeira

Para a laje de madeira, o ponto central de referência é o ponto 8 e do mesmo modo da solução anterior são apresentados os respectivos gráficos.

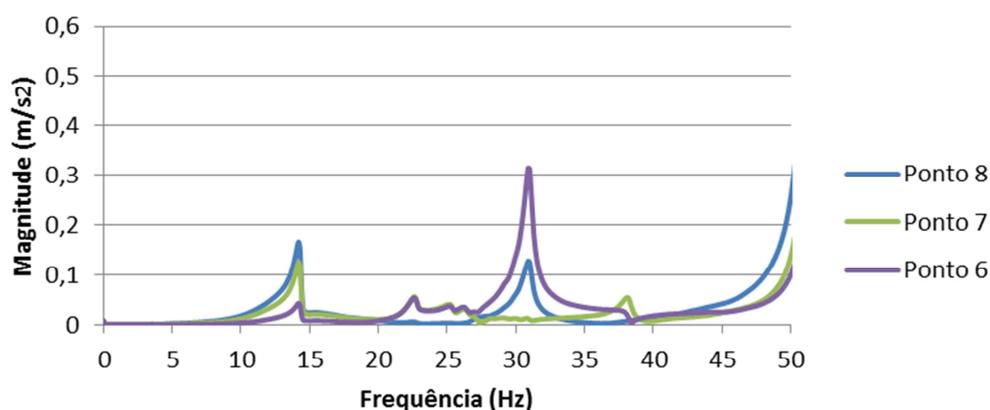


Figura 6.6 - Espectro de resposta da laje de madeira (pontos 8, 7 e 6)

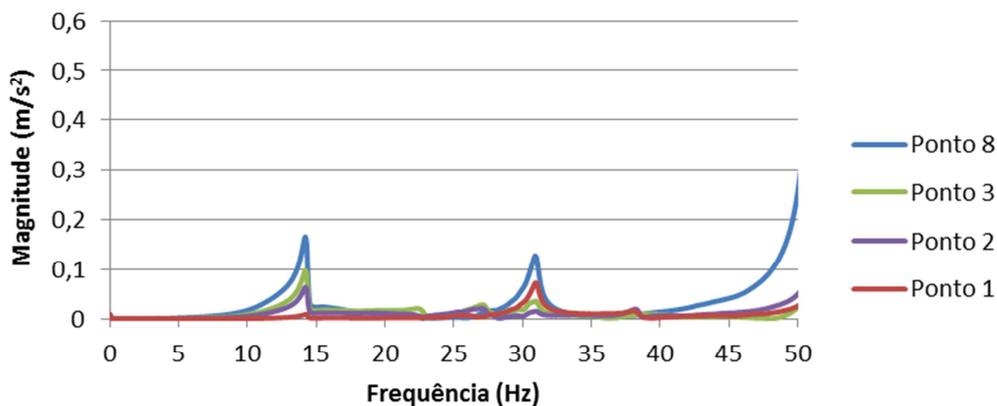


Figura 6.7 - Espectro de resposta da laje de madeira (pontos 8,3,2 e 1)

Analisando os gráficos para a laje de madeira, pode-se observar um pico para uma frequência própria de 14 Hz, no qual não pertence a nenhum modo de vibração do pavimento. Tal como a solução anterior, esta frequência pode estar relacionada apenas a uma zona da laje. O primeiro modo de vibração dá-se para uma frequência própria de 30,9 Hz. Os pontos 2 e 7 não apresentam nenhum pico, significando que não sofrem qualquer movimento, ou seja, nessa linha existe uma inflexão no modo de vibração. Desta forma explica-se que os pontos 8 e 6 apresentam as maiores amplitudes. Através do programa de elementos finitos, o segundo modo de vibração está associado a uma frequência própria de 34,3 Hz, mas nos resultados experimentais esse modo não é visível não havendo uma explicação para tal facto. O terceiro modo de vibração ocorre para uma frequência própria de 37,6 Hz. Neste caso a inflexão do modo de vibração verifica-se na linha dos pontos 8 e 3 e daí resulta um movimento mais evidente nos pontos 7 e 2. De salientar que esta solução apresenta valores algo elevados, para as frequências próprias. De seguida, é apresentado um quadro resumo das frequências próprias teóricas e obtidas experimentalmente, verificando-se que os valores se aproximam.

Quadro 6.2 - Frequências próprias dos modos de vibração da laje de madeira

Modo de vibração	f (Hz)	$f_{teórica}$ (Hz)
1º	30,9	32,5
2º	-	34,3
3º	37,6	38,3

6.4.3 Laje madeira-betão

Nesta laje, o esquema de pontos é igual à solução anterior, sendo os resultados apresentados de seguida

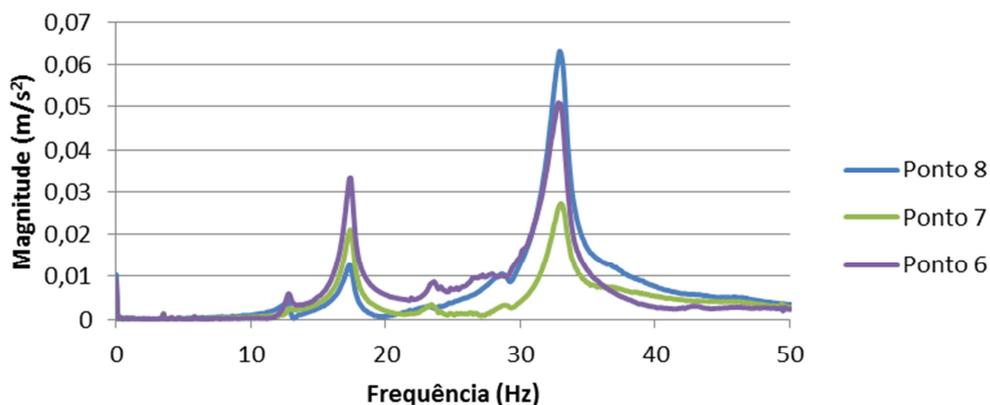


Figura 6.8 - Espectro de resposta da laje de madeira-betão (pontos 8,7 e 6)

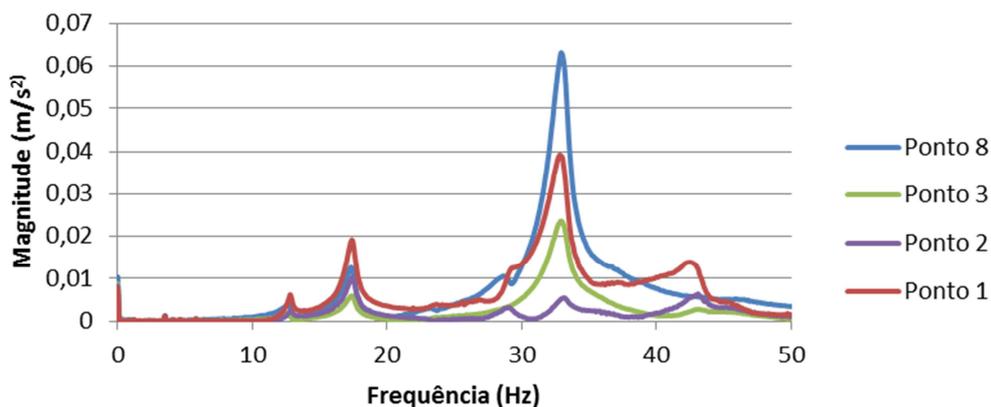


Figura 6.9 - Espectro de resposta da laje de madeira-betão (pontos 8,3,2 e 1)

Esta solução, tal como já foi referenciado ao longo desta dissertação, tem como base a laje de madeira. Por esse motivo, era de esperar a diferença de resultados entre si. Apesar de existir um pico para uma frequência de 12,8 Hz, o primeiro modo de vibração acontece para uma frequência própria de 17,3 Hz. Este resultado é muito semelhante ao obtido no estudo realizado em paralelo com este. Neste modo de vibração todos os pontos se movimentam, sendo a maior amplitude sentida no meio vão das vigas junto aos apoios. O segundo modo de vibração, analisando os gráficos, ocorre para uma frequência própria de 23,1 Hz. Os pontos 8 e 3 apresentam a mesma tendência, verificando-se uma zona de inflexão nessa linha de pontos. Tal como no modo anterior, o ponto 6 é a zona onde se sente mais a vibração. Junto às vigas de topo (pontos 1 e 2) essa vibração, não provoca qualquer movimento.

Observa-se o terceiro modo de vibração para uma frequência própria de 32,9 Hz. Este modo é algo semelhante ao primeiro, sendo que o ponto 8 apresenta uma grande amplitude, seguido novamente do ponto 6. Conclui-se assim, que num modo geral a zona onde é mais sentida a excitação do pavimento, é coincidente com o meio vão das vigas e próximo dos apoios. No quadro seguinte são apresentados em detalhe.

Quadro 6.3 - Frequências próprias dos modos de vibração da laje madeira-betão

Modo de vibração	f (Hz)	$f_{teórica}$ (Hz)
1º	17,3	17,5
2º	23,1	23,1
3º	32,7	37,4

6.5 Análise comparativa

Após a análise dos resultados obtidos através dos ensaios dinâmicos para as três soluções é possível tirar algumas conclusões. A frequência própria depende da razão entre a rigidez e a massa da estrutura, de modo que comparando a laje de madeira com a laje de madeira-betão nota-se uma redução das frequências, consequência do aumento da massa devido à presença do betão. Ambas as lajes apresentam maiores amplitudes a meio vão das vigas, diminuindo quando de aproximação das vigas de topo. Verificando os resultados das lajes mistas observa-se que a laje LOGCork apresenta frequências inferiores às da laje de madeira-betão. Essa laje, como já foi referido ao longo da dissertação, é constituída por betão leve com agregados de cortiça, tendo por isso um maior amortecimento. Por esse motivo a frequência própria apresenta valores mais reduzidos. Outro factor a ter em atenção é as frequências próprias dos toros serem inferiores às das vigas GL24C como se constata no quadro...podendo ser mais uma razão para a diferença de valores. Comparando os valores das frequências próprias experimentais com as teóricas, verifica-se que são inferiores mas estão próximas. Esta diferença pode se dever à presença das vigas de topo aparafusadas às vigas principais, nas quais não foram consideradas no estudo realizado.

7 CONCLUSÕES E TRABALHO FUTURO

7.1 Considerações finais

No presente estudo, pretendeu-se avaliar experimentalmente o comportamento acústico e dinâmico, de pavimentos de madeira e mistos madeira-betão. Nestes, foi utilizado betão leve com agregados de cortiça e betão normal, de modo a avaliar a influência deles a nível acústico e dinâmico. A realização dos ensaios experimentais em pavimento à escala real possibilitou analisar aprofundadamente o comportamento real dos mesmos, de acordo com as características de cada ensaio. Nos pavimentos mistos, foi utilizado betão leve com agregados de cortiça e betão normal, de modo a avaliar a influência deles a nível acústico e dinâmico.

Para melhorar o comportamento acústico dos pavimentos, recorreu-se a soluções construtivas, com a finalidade de aumentar o isolamento sonoro. Os resultados obtidos experimentalmente apenas com o revestimento superficial permitem concluir que, o pavimento misto madeira-betão constituída com betão leve, tem globalidade o melhor desempenho acústico. Tal facto prende-se, pela presença da cortiça que contribui para um grau elevado de isolamento acústico. O pavimento de madeira simples, tal como esperado é uma solução a evitar, pois apresenta um péssimo comportamento acústico. Conclui-se dos resultados que a presença do betão, só por si conduz a um aumento de isolamento sonoro, mas não o suficiente para cumprir os requisitos regulamentares.

A inclusão do tecto falso revela-se como uma excelente solução para aumentar o isolamento sonoro. Pode-se observar que para os pavimentos mistos o tecto falso provoca um acréscimo de isolamento sonoro superior a 20 dB. Os valores do pavimento misto com betão leve, apesar de serem obtidos através da extrapolação dos resultados do pavimento madeira-betão, podem levar a uma boa aproximação. Devido à presença do tecto falso, todas as soluções cumprem os requisitos regulamentares, concluindo assim que esta é uma solução a considerar para minimizar os sons.

O ensaio dinâmico permitiu o cálculo das frequências próprias associadas a cada modo de vibração dos respectivos pavimentos. Dos resultados obtidos experimentalmente foi possível observar, que elas variam com o tipo de solução. O pavimento de madeira apresenta as

frequências próprias mais elevadas, sofrendo uma redução com a presença da camada de betão, resultado do aumento da massa do pavimento.

O pavimento misto madeira-betão constituído com betão leve apresenta as frequências próprias mais reduzidas de todas as soluções. Apesar de esta apresentar uma massa inferior ao pavimento madeira-betão, os resultados são inferiores no pavimento com betão leve, pois a massa é um dos factores que influencia a frequência própria. Mais uma vez, uma das razões para esta ocorrência deve-se à presença do aglomerado de cortiça no betão, pois este absorve a energia mecânica produzida pela acção dinâmica, conduzindo a um maior amortecimento da estrutura. Todos os pavimentos apresentam frequências próprias superiores a 8 Hz, sendo por isso pouco provável a ocorrência de fenómenos de ressonância.

De um modo geral conclui-se que os pavimentos mistos madeira-betão são uma boa alternativa aos pavimentos de madeira podendo ser uma boa solução na reabilitação dos mesmos. Outro factor que se evidencia é as vantagens do uso do betão leve com agregados de cortiça em detrimento do betão normal.

7.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros propõe-se alargar o estudo do comportamento acústico a outras soluções correntes na construção civil. Neste caso, propõe-se a utilização de revestimentos cerâmicos e revestimentos vinílicos.

Propõe-se, também a realização de ensaios dinâmicos, de modo a obter uma ligação do comportamento dinâmico com acústico. Assim seria possível determinar o índice de redução sonora a sons de percussão e compara-los com os resultados obtidos nesta dissertação.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Branco, J.M. G. (2003). “Comportamento das Ligações Tipo Cavilha em Estruturas Mistas Madeira-Betão”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia da Universidade do Minho.
- Branco, J.M., Cruz, P.J. (2002). “Lajes Mistas de Madeira-Betão”. Número 15, Engenharia Civil, Universidade do Minho.
- Ceccotti A. (1995). “Timber-concrete composite structures”. STEP-Timber Engineering 2, Almere Centrum Hout: 1994: E13/1-E13/12, 1995
- CEN (2002). “Actions on structures – Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings”. EN 1991-1-1, Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2002). “Basis of structural design”. EN 1990, Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003). “Structural round timber – Test methods”. EN 14251, Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2003). “Structural timber – Strength classes”. EN 338, Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2004). “Design of timber structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings”, EN 1995-1-1, Comité Européen de Normalisation.
- CEN (2004). “Projecto de estruturas de betão – Parte 1-1: Regras gerais e regras para edifícios”, EN 1992-1-1, Comité Européen de Normalisation.
- Christopher Mettem (2003). “Structural Timber-Concrete Composites: Advantages of a Little Know Innovation”. The Structural Engineer, 2003
- Cone M. (1963). “A Composite Timber-Concrete Bridge”. TDA Bulletin No. 9.

- Crespo J.A. (2009). “Measurements of Vibrations in Wooden Floors Induced by Walking”. Bachelor’s Dissertation, Lund University, Lund.
- IPQ (2002). “Estruturas de madeira. Madeira lamelada-colada - Classes de resistência e determinação dos valores característicos”. Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2007). “Betão parte 1: Especificação, desempenho, produção e conformidade”. Norma Portuguesa, NP EN 206-1, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2009). “Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção – Parte 2: Isolamento sonoro a sons de percussão”. NP EN ISO 717-2, Instituto Português da Qualidade.
- IPQ (2009). “Acústica: Determinação do isolamento sonoro em edifícios e de elementos de construção – Parte 1: Isolamento sonoro a sons de condução aérea”. NP EN ISO 717-1, Instituto Português da Qualidade.
- ISO (2010). “Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 3: Measurement of impact sound insulation”. ISO 10140-3, International Organization for Standardization.
- ISO (2010). “Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 2: Measurement of airborne sound insulation”. ISO 10140-2, International Organization for Standardization.
- ISO (2010). “Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 1: Application rules for specific products”. ISO 10140-1, International Organization for Standardization.
- ISO (2010). “Laboratory measurement of sound insulation of building elements – Part 4: Measurement procedures and requirements”. ISO 10140-4, International Organization for Standardization.
- Jorge, L.F.C. (2005). “Estruturas mistas madeira-betão com a utilização de betões de agregados leves”. Tese de doutoramento, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- LNEC (2000). “Aspectos Regulamentares e Normativos no Domínio Do Ruído e das Vibrações”. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Portugal.
-

- Lukaszewska, E. (2009). “Development of Prefabricated Timber-Concrete Composite Floors”. Ph.D. thesis, Lulea University of Technology, Lulea.
- Marques, L.E.M.M. (2008). “O Papel da Madeira na Sustentabilidade da Construção”. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.
- Morgado, T.F.M. (2008). “Avaliação Estrutural da Madeira de Secção circular de Pinheiro Bravo”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Murray T.M. et al. (2003). “Floor Vibrations due to Human Activity”. American Institute of Steel Constructios, USA
- Rebello (2004). “Dinâmica de Estruturas”. Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Coimbra.
- Rijal R. et al. (2010). “Dynamic Behavior of Timber-Concrete Composite Flooring Systems”. World Conference on Timber Engineering.
- RRAE – “Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios”, aprovado pelo Decreto-Lei nº.129/2002 de 11/05, com a nova redacção dada pelo Decreto-Lei nº.96/2008 de 09/06”.
- Schmid, M. (2005). “Acoustic performance of Timber Concrete Composite Floors”. Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Rio de Janeiro.
- Smith J.W. (1988). “Vibration of Structures – Applications in civil engineering design ”. Chapman and Hall Ltd, London.
- Tadeu et al. (2007). “ Sebenta de Acústica Aplicada”. Departamento de Engenharia civil da Universidade de Coimbra, Coimbra.
- Van der Linden, M. L.R. (1999). “Timber-concrete composite floor systems”. Ph.D. thesis, Delft University of Tecnology, Delft.