



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

João Filipe Ribeiro Alves

APTIDÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA
TRADICIONAIS E REFORÇADOS A AÇÕES DINÂMICAS
E EFEITO DIAFRAGMA

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas., orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão e apresentada ao Departamento de Engenharia Civil da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Julho de 2021

Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra
Departamento de Engenharia Civil

João Filipe Ribeiro Alves

APTIDÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA TRADICIONAIS E REFORÇADOS A AÇÕES DINÂMICAS E EFEITO DIAFRAGMA

SUITABILITY OF TRADITIONAL AND REINFORCED WOOD FLOORS FOR DYNAMIC AND DIAPHRAGM EFFECT

Dissertação de Mestrado Integrado em Engenharia Civil, na área de Especialização em Estruturas.,
orientada pelo Professor Doutor João Henrique Jorge de Oliveira Negrão.

Esta Dissertação é da exclusiva responsabilidade do seu autor. O Departamento de Engenharia Civil da FCTUC
declina qualquer responsabilidade, legal ou outra, em relação a erros ou omissões que possa conter.

Julho de 2021



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao meu orientador, Professor João Negrão pela constante disponibilidade em todo o meu percurso académico nesta instituição e sobretudo na realização desta dissertação, pelos ensinamentos transmitidos e por toda a dedicação.

À minha família por todo o carinho, suporte e educação que me proporcionaram e por me possibilitarem a minha formação académica, em especial à minha mãe pelo incondicional apoio. Aos meus amigos e colegas de curso que fizeram parte destes anos, em especial ao Francisco Filipe, ao Henrique Granjo, ao João Gonçalves e ao André Santos por todo o companheirismo e amizade. Aos amigos de longa data: Guilherme, Rui, Hugo e Renato.

Por último e não menos importante, agradeço à Cláudia por todo o carinho e apoio na realização deste trabalho.

RESUMO

A utilização da madeira como material estrutural na prática da construção civil remonta aos primórdios desta atividade. Com o desenvolvimento de novos materiais e técnicas construtivas mais atrativas a nível económico e de desempenho, reduziu-se a utilização deste material. Contudo, dada a crescente preocupação ambiental, a madeira tornou-se de novo num material de grande interesse pelas suas características: é um produto ecológico, natural, de fácil obtenção e processamento, com excelente comportamento ao fogo e excelente relação entre peso próprio e resistência.

Atualmente há uma crescente necessidade de assegurar a comodidade dos utilizadores e nesse sentido a realização de um estudo dinâmico na aplicação de madeira em pavimentos residenciais. Trata-se de um material leve e flexível, propenso a criar incómodo aos seus utilizadores pelas suas vibrações e como tal, deve ser garantido que as frequências destes pisos estejam limitadas entre determinados valores. O Eurocódigo 5 define um conjunto de requisitos para verificação do estado limite de utilização de vibração. Este conjunto de requisitos, aplicável a pavimentos residenciais, tem como principal objetivo estimar e limitar as frequências de vibração dos pavimentos de modo a não criar desconforto aos utilizadores e é baseado em duas condições: um parâmetro estático e um parâmetro dinâmico.

O comportamento dos pavimentos de madeira quando solicitados a forças no seu plano, como acontece por exemplo na ocorrência de sismos, é deficiente. Desta forma, é importante entender em que medida um reforço destes pavimentos é eficaz para colmatar este problema no comportamento de diafragma.

A presente dissertação é direcionada ao estudo paramétrico de algumas das inúmeras disposições possíveis destes tipos de pavimentos. É analisada a influência que cada tipologia tem no desempenho geral do pavimento a vibrações de forma a reduzir a propensão a efeitos dinâmicos não desejados na escolha de uma solução construtiva ou na reabilitação de estruturas que apresentem este tipo de deficiências. Será ainda abordado o estudo do reforço dos pavimentos para melhorar o comportamento de diafragma destes.

Palavras chave: pavimentos de madeira, estado limite de vibração, reforço de pavimentos

ABSTRACT

The use of wood as a structural material in the practice of civil construction dates back to the early times of this activity. With the growth of new materials and more attractive construction techniques in terms of economy and performance, the use of this material was reduced. However, given the growing environmental concern, wood becomes, again, a material of great interest due to its characteristics: it is an ecological product, natural, easy to obtain and process, with excellent behavior to fire and excellent relation between self-weight and resistance.

Nowadays, there is a growing need to ensure the comfort of users, and in this way, a dynamic study in the application of wood in residential flooring has been carried out. It is a light and flexible material, prone to create discomfort to its users by its vibrations and as such, it must be guaranteed that the frequencies of these floors are limited between certain values. Eurocode 5 defines a set of standards for verification of the use limit state of vibration. This set of standards, applicable to residential floors, has as the main purpose to estimate and limit the vibration frequencies of floors to not create discomfort to users and is based on two conditions: a static parameter and a dynamic parameter.

The behavior of wooden floors, when subjected to forces in its plane, as happens, for example, in the occurrence of earthquakes, is deficient. Thus, it is necessary to understand to what extent a strengthening of these floors is effective to overcome this problem in diaphragm behavior.

The present dissertation is directed towards the parametric study of some of the numerous possible arrangements of these types of floors. The influence that each typology has on the overall vibration performance is analyzed to reduce the propensity to unwanted dynamic effects in the choice of a construction solution or in the rehabilitation of structures that present this type of deficiencies. The study of the reinforcement of floors to improve their diaphragm behavior will also be addressed.

Keywords: wood floors, vibration limit state, strengthening

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	i
RESUMO	ii
ABSTRACT	iii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento geral e motivação.....	1
1.2. Objetivos e metodologia	2
1.3. Estrutura do documento	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. A madeira como elemento construtivo	4
2.1.1. Enquadramento histórico.....	4
2.1.2. Propriedades físicas e químicas da madeira	5
2.1.3. Elementos constituintes dos pavimentos de madeira	7
2.2. Princípios básicos de sistemas em vibração.....	11
2.2.1. Noções básicas de movimento harmónico simples	11
2.2.2. Efeitos do amortecimento.....	15
2.3. Sensibilidade humana a vibrações	17
2.3.1. Estudo de desconforto humano sujeitos a vibrações dos pavimentos.....	17
2.4. Comportamento no plano de pavimentos de madeira.....	19
2.5. Projeto de estruturas de madeira	19
2.5.1. Eurocódigo 5 – Dimensionamento de estruturas de madeira	20
2.5.2. Dimensionamento de lajes mistas madeira-betão	20
3. MODELAÇÃO NUMÉRICA	22
3.1. Definição de materiais e dimensões	22
3.2. Modelação de grelha.....	25
3.2.1. Condições de apoio	25
3.2.2. Elementos de madeira e lajeta de betão	26
3.3.3. Modelação de diafragmas.....	27
4. DESEMPENHO DINÂMICO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA	29
4.1. Frequências e modos de vibrações	29

4.2. Resultados do modelo numérico e segundo o EC5.....	29
4.2.1. Resultados numéricos	29
4.2.2. Resultados segundo o EC5	33
4.3. Comparação de resultados.....	36
5. ESTADO LIMITE DE VIBRAÇÃO.....	37
5.1. Especificações regulamentares	37
5.2. Deslocamentos e velocidades de resposta a um impulso unitário	38
5.2.1. Resultados numéricos	39
5.2.2. Resultados segundo o EC5	41
5.2.3. Análise de resultados	42
5.3. Verificação do estado limite de vibração	43
6. DIAFRAGMAS.....	45
6.1. Resultados	45
6.1.1. Ação sísmica na direção XX	45
6.1.2. Ação sísmica na direção YY	46
6.2. Análise de resultados	47
7 Considerações finais.....	48
7.1. Conclusões.....	48
BIBLIOGRAFIA.....	50

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento geral e motivação

A Engenharia Civil tem vindo a debater-se constantemente no sentido evolutivo da atividade. Recorrentemente são apresentados novos desafios, novas exigências construtivas e impostos mínimos de conforto e de serviço mais exigentes. Não obstante, é de extrema importância não negligenciar outros aspetos que atualmente merecem grande preocupação por parte da Engenharia Civil como por exemplo a sustentabilidade: é imperativo que se selecionem materiais e técnicas construtivas que vão ao encontro da utilização sustentável dos recursos.

A construção tradicional portuguesa emprega desde muito cedo a madeira e esta foi acompanhando a evolução por progressos tecnológicos que permitiram a sua adaptação e a integração de outros materiais como a alvenaria e o betão. Tratando-se de um dos poucos materiais renováveis a sua utilização afigurou-se muito conveniente acrescida das suas propriedades físicas e químicas que garantem um bom desempenho, ao facto de ser um material esteticamente agradável, ao seu bom comportamento ao fogo e elevado conforto térmico que proporciona.

A relevância deste material não se cinge aos novos edificados. Há uma grande necessidade de intervir em estruturas antigas e em Portugal o mercado de reabilitação de edifícios está em clara ascensão. Facto comum de grande parte destes edifícios com necessidade de intervenções por deficiências operacionais, é a presença da madeira como elemento estrutural em pavimentos, coberturas e paredes.

Focando a atenção nos pavimentos de madeira é frequente identificarem-se problemas de ordem vibracional. Trata-se de estruturas relativamente leves e flexíveis que quando solicitadas desenvolvem grandes deslocamentos, vibrações e também ruído. Assim, os projetistas enfrentam cada vez mais a necessidade de garantir aos utilizadores o sentimento de conforto e segurança, por via de uma análise dinâmica rigorosa dos pavimentos e conseqüentemente da adoção de soluções que cumpram os requisitos impostos. Devido ao seu baixo desempenho quando solicitados a forças horizontais, também é necessário implementar medidas que visem o reforço deste tipo de pavimentos para assim garantir o seu correto funcionamento sobretudo quando sujeitos a forças de origem sísmica que tendem a criar grandes deslocamentos.

O dimensionamento das estruturas de madeiras foi durante muito tempo regido pelo livro de Tomás Mateus uma vez que não existiam regulamentos nem exigências relativas aos parâmetros de cálculo necessários. Mais tarde, a publicação do Eurocódigo 5 permitiu aos projetistas ter uma base de cálculo que visasse não só a capacidade resistente das estruturas, mas também garantir as condições mínimas de serviço de forma a garantir o conforto dos utilizadores. No dimensionamento de pavimentos residenciais de madeira é possível através dos dispostos apresentados pelo Eurocódigo 5 realizar a verificação do estado limite de utilização por vibração de forma a reduzir os efeitos indesejados aos utilizadores.

1.2. Objetivos e metodologia

O principal objetivo da presente dissertação é conhecer em que medida os elementos que constituem os pavimentos tradicionais de madeira, as suas diferentes configurações e as condições de apoio influenciam o comportamento dinâmico e comparar com a formulação indicada no EC5. Conhecida a fraca capacidade de funcionamento destes pavimentos como diafragmas e conseqüente transmissão das forças horizontais produzidas pela ação sísmica, devido à sua elevada deformabilidade no plano, será também estudado em que medida a combinação dos elementos constituintes destes pavimentos de madeira e a aplicação de uma lajeta de betão num eventual reforço estrutural contribuem para um melhor comportamento.

Assim, de forma a obter todos os dados necessários para este estudo e posteriores conclusões este trabalho passa por:

- Estudar a madeira como material de construção e a influência das suas propriedades mecânicas no comportamento destas estruturas;
- Desenvolver modelos numéricos para um estudo por método dos elementos finitos que permitam simular o real comportamento dos pavimentos de madeira;
- Analise e aplicação da formulação do EC5 para o cálculo da frequência própria e da velocidade de resposta a um impulso unitário dos pavimentos
- Verificar os estados limite de vibração dos pavimentos por aplicação das condições do EC5.
- Estudar a influência do reforço estrutural por meio da aplicação de uma lajeta de betão no comportamento dos pavimentos de madeira como diafragma.

O software de cálculo utilizado para realizar o estudo por meio de uma análise pelo método dos elementos finitos foi o Robot Structural Analysis by Autodesk.

1.3. Estrutura do documento

Esta dissertação é formada por seis capítulos principais com a seguinte constituição:

- O presente capítulo introdutório ao tema e justificativo da necessidade da existência de um estudo neste âmbito bem como dos principais objetivos na realização deste trabalho
- No capítulo 2 é contextualizada a madeira e o seu uso na construção civil, é feita a sua caracterização física e química e explicado o seu emprego na construção de pavimentos de madeira. Nesta revisão bibliográfica são também introduzidos os princípios básicos dos sistemas em vibração e a sensibilidade humana a vibrações geradas em pavimentos. O estado da arte no que diz respeito a deformações no plano também é aqui apresentado tal como as metodologias de cálculo do EC5 no dimensionamento de estruturas de madeira
- No que diz respeito ao capítulo seguinte, é apresentada a modelação numérica realizada neste estudo paramétrico bem como todas as condições impostas ao modelo quer no estudo das suas vibrações quer no estudo dos pavimentos como diafragmas.
- O capítulo 4 foca-se no estudo do desempenho dinâmico dos pavimentos de madeira e em concreto dos pavimentos modelados. São apresentados os resultados obtidos tanto pelos modelos numéricos como pela formulação do EC5 e realizada uma análise de comparação de resultados
- O quinto capítulo é direcionado ao estudo do estado limite de vibrações em pavimentos de madeira: são comparadas as diferentes configurações dos pavimentos e analisados os resultados numéricos e pelo EC5 para os modelos definidos.
- No capítulo 6 é analisado em que medida o reforço dos pavimentos de madeira por intermédio de uma lajeta de betão contribui para melhorar o comportamento dos pavimentos como diafragmas. Serão comparadas configurações distintas de pavimentos e analisados os resultados obtidos.
- As conclusões encerram este trabalho onde será realizada uma análise global dos resultados obtidos bem como a sua significância para o estudo de pavimentos de madeira.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A madeira como elemento construtivo

2.1.1. Enquadramento histórico

A utilização da madeira como material de construção tem acompanhado o Homem praticamente desde a sua existência. Se inicialmente o Homem recorria a abrigos naturais como grutas e cavernas para se recolher como demonstra a figura 2.1, a abundância da madeira na natureza bem como o facto de se tratar de um material leve e resistente potenciou a construção destes abrigos por meio de paredes de pedra e cobertura vegetal (Oliveira *et al.*,1969). Por outro lado, a facilidade de estruturar uma cabana a partir de ramos e pequenos troncos ou canas tornou este material interessante quando utilizado em funções estruturais. Desde então a “técnica e a arte de trabalhar a madeira têm evoluído, começando por um processo manual e primitivo, até à vasta e engenhosa indústria moderna” (Lourenço e Branco, 2012).

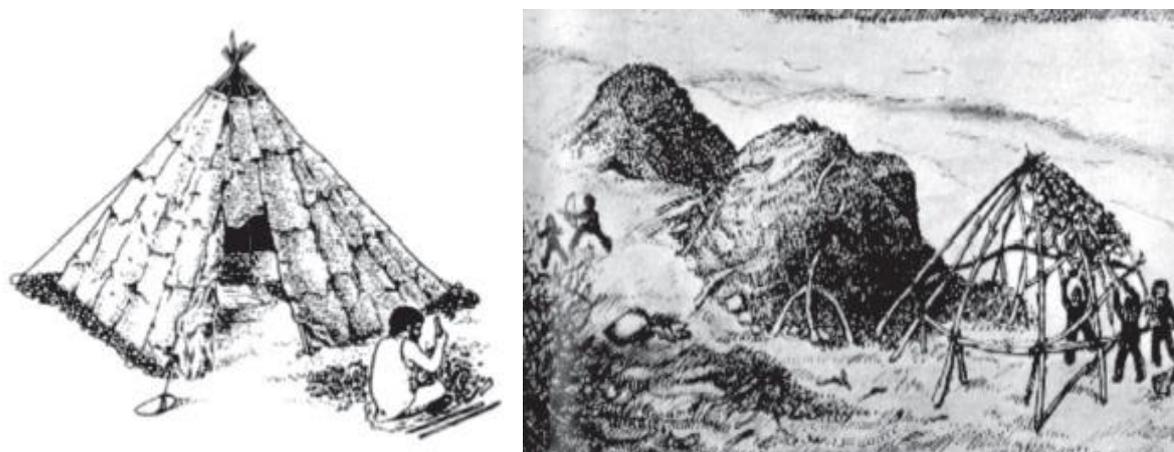


Figura 2.1 – Abrigos ancestrais (Lourenço e Branco,2012).

Já na Idade Antiga, com o nascimento das primeiras civilizações, o desenvolvimento da utilização da madeira levou a que estas civilizações comesçassem a utilizar este recurso natural para a construção de pavimentos em terraços a partir de troncos de palmeiras. Esta evolução verificou-se sobretudo nas margens do rio Nilo, no Egipto, onde este tipo de madeira era mais abundante. Também no norte da Europa, como a Escandinávia e a Noruega, observou-se a utilização da madeira como elemento horizontal, isto é, em pavimentos e coberturas que, no entanto, eram pouco eficazes à estanquicidade do vento e da água.

Os princípios da construção em madeira na Europa remontam à Idade Média e muitos deles perduram até aos dias de hoje. Foi neste período que se utilizou a madeira para além da forma cilíndrica. Tal evolução deve-se ao desenvolvimento dos materiais e técnicas de corte das árvores que permitiram a substituição nas habitações de troncos toscos por tábuas. Também foi nesta época que se arquitetou as Cruzes de Santo André, conhecido processo de triangulação. Contudo, o uso da madeira decresceu sobretudo devido à precariedade, tendo a pedra voltado a ser um dos materiais de destaque na construção civil.

O conhecimento sobre a arte de trabalhar a madeira foi sendo transmitido pelos mestres carpinteiros às gerações seguintes e sofrendo um notório processo evolutivo. É na Idade Moderna que se assiste a construções sobre estacas de madeira, cravadas na terra ou em zonas pantanosas e à utilização do tijolo de alvenaria para o preenchimento de paredes. É neste período que Lisboa é devastada pelo sismo de 1755 e Marquês de Pombal procede à reconstrução da cidade. Neste episódio da história da construção em Portugal a madeira foi fundamental para a criação do sistema de gaiolas pombalinas (figura 2.2) que conferiam às estruturas melhor comportamento a sismos: tratavam-se de estruturas mais leves e flexíveis que apresentavam melhor comportamento a estes fenómenos naturais do que as paredes de alvenaria, tanto de pedra como de tijolo (Mascarenhas, 2009).



Figura 2.2 - Gaiolas pombalinas.

(http://www-ext.lnec.pt/LNEC/DE/NESDE/images/gaiol_const_sism_3.jpg)

2.1.2. Propriedades físicas e químicas da madeira

A madeira é um elemento natural abundante na natureza cuja estrutura biológica se apresenta muito complexa. É composta por variados produtos químicos de onde se destacam a celulose, hemicelulose, lenhina, sais minerais e diferentes estruturas celulares garantido assim o

propósito da planta em vida. Enquanto material vivo as suas principais funções são a garantia de suporte da árvore, a condução de água e sais minerais desde a raiz até às folhas e ainda o armazenamento da matéria bioquímica. A utilização da madeira na construção civil requer um conhecimento elevado da sua anatomia devendo assim ser garantido o conhecimento da sua origem e de formas de tratamento para os fins pretendidos (Wood Handbook, 1999)

- Estrutura anatómica dos troncos de árvores

O corte transversal do tronco de uma árvore permite-nos identificar a olho nu algumas particularidades da estrutura biológica da madeira: a estrutura do troco de árvores apresenta-se regra geral circular, formada por camadas concêntricas de material, o lenho, e revestida exteriormente por uma camada denominada casca. No centro apresenta-se o cerne, de cor mais escura e de forma circular. Assim a heterogeneidade da madeira assume-se como uma das características principais deste material.

A casca tem como função a proteção mecânica e a proteção a agentes biológicos e apresenta-se ainda fundamental para limitar a evaporação de água existente no tronco. Já o lenho ou borne, formado por anéis de crescimento de forma concêntrica é responsável pela condução de água desde as raízes até às folhas. Por cada ano de crescimento da árvore, desenvolve-se um anel de crescimento de tom escurecido correspondente ao crescimento durante o Outono e Inverno e um anel mais claro correspondente ao crescimento no período da Primavera e Verão. É esta estrutura dos troncos da madeira a de maior interesse de exploração para a construção uma vez que apresenta propriedades físicas e químicas que lhe garantem um bom desempenho estrutural. O cerne, no centro do tronco, corresponde aos vestígios remanescentes do crescimento inicial da planta.

- Anisotropia e ortotropia

A anisotropia, característica dos materiais cujas propriedades variam com as diferentes direções dos materiais é uma das propriedades da madeira. Esta propriedade deve-se sobretudo à forma das células, à sua orientação e à estação de crescimento. Assim, consoante o corte e o fim desejado das peças daí resultantes, a resistência das mesmas varia segundo as seguintes direções:

Direção axial: no sentido das fibras, longitudinalmente (preferencial)

Direção radial: sentido transversal ao tronco

Direção tangencial: transversal aos anéis de crescimento

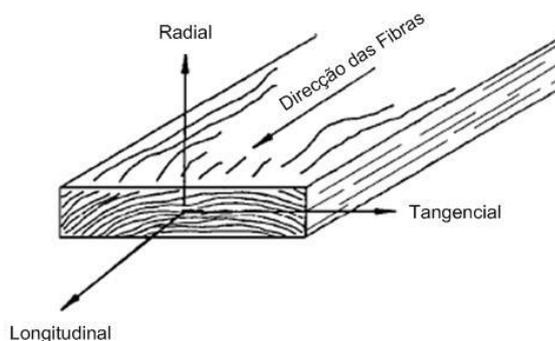


Figura 2.3 – Direções das fibras (Wood handbook, 2010).

- Propriedades resistentes da madeira

As propriedades resistentes da madeira e a sua baixa massa volúmica tornam este material interessante a nível estrutural. Dos diversos fatores que influenciam o comportamento mecânico deste material quando sujeito a ações destacam-se sobretudo a duração e direção das ações sendo a última característica a que poderá provocar maiores diferenças de grandeza, devido à sua anisotropia. Também o teor de humidade tem muita influência no comportamento mecânico da madeira sendo que a sua resistência é máxima quando esta se apresenta anidra.

Relativamente à resistência à tração, compressão e corte são muito variáveis pela direção de aplicação da ação relativamente à direção das fibras, isto é, quando aplicada no sentido paralelo das fibras, a sua resistência é bastante elevada. Quando sujeita a esforços de tração, na direção das fibras, poderemos ter valores característicos que variam entre 8 e 42MPa. Na direção perpendicular à direção das fibras, a sua resistência varia entre 1 e 2 MPa.

A sua resistência à compressão assume valores de 40% do valor de resistência à tração no sentido paralelo às fibras, variando por isso entre 14 e 34MPa. Na direção ortogonal, pode variar entre 2 e 13,5MPa.

Quando sujeitas a flexões estáticas, a madeira garante também um bom comportamento além da sua ótima relação peso/resistência (Cruz, 2013).

2.1.3. Elementos constituintes dos pavimentos de madeira

A aplicação da madeira na construção de pavimentos perdura há vários séculos e isso deve-se ao seu bom desempenho. A estrutura principal dos pavimentos de madeira é constituída pelo vigamento e pelo soalho podendo ainda apresentar elementos secundários como tarugos e

sarrafos. Segurado (1942) classifica as vigas, sarrafos e tarugos como obras de tosco, isto é, aplicação da madeira apenas serrada e sem qualquer acabamento que poderá ficar ou não à vista. Já o soalho classifica-o como uma obra de limpos uma vez que deverá contemplar um melhor acabamento já que se destinam a ficar à vista.

Vigamento

O vigamento é o conjunto de elementos de secção constante, paralelamente dispostos e com um afastamento constante entre si. Em construções anteriores ao século XX podem apresentar-se como paus rolados resultado do simples aparamento dos troncos de madeira sendo mais usual a utilização de vigas em quina e obtidas a partir do lenho das árvores por apresentar melhor resistência (Dias, 2008).

Estas vigas ou barrotes podem ser apoiados diretamente sobre as paredes de alvenaria ou em frechais: vigas que servem de suporte às vigas principais, de arestas chanfradas e com secção relativamente menor (0.10m x 0.10 m) (Bonfim, 2001). Estes podem estar contidos na parede, ser assentes em consolas de aço ou em cachorros metálicos ou de madeira. A utilização de frechais apresenta vantagens uma vez que permite uma distribuição de cargas mais eficaz sobre as paredes ao invés da aplicação direta das vigas sobre as paredes que se traduzem em cargas pontuais elevadas que podem provocar danos à alvenaria (Segurado, 1942).

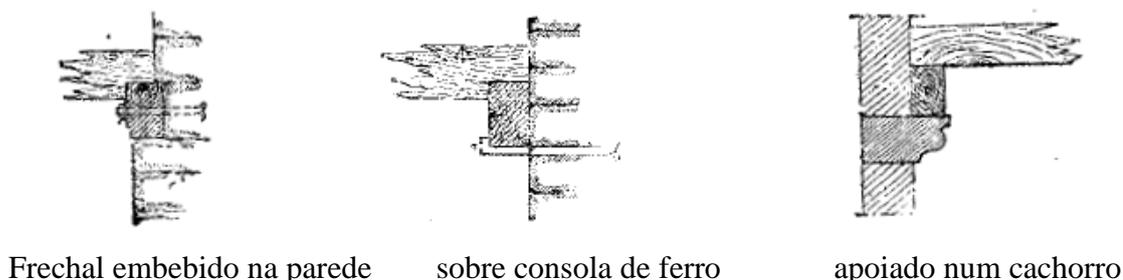


Figura 2.4 – Apoios de vigas (Segurado, 1942).

As vigas devem ser afastadas equitativamente de 0,40m a 0,70m. Este afastamento é dependente da carga, da resistência da madeira aplicada e do vão, sendo que este último não deve ultrapassar os 5m para pisos residenciais (Martins, 2010).

Tarugos

Os tarugos são elementos de madeira de secção igual ou inferior à secção das vigas e têm comprimento igual ao espaçamento entre estas. São colocados de baixo para cima entre as vigas

de forma a pressionar as vigas para cima, contrariando assim as cargas que atuarão posteriormente e a sua fixação é feita geralmente por pregos. Os tarugos são colocados nos espaços livres entre vigas a uma distância entre si de 1,5 a 2,0m (Costa, 1955). A utilização destas peças na construção de pavimentos tem como objetivo a estabilização dos pavimentos quando as vigas são muito compridas. Este fenómeno ocorre devido ao bambeamento das vigas muito esbeltas devido à sua elevada flexibilidade aliada ao seu grande comprimento. (Alvarez e Calleja, 2000).



Figura 2.5 - Tarugamento em vigamento de secção retangular (Ilharco, 2006).

Sarrafos

A distribuição de cargas nos pavimentos de madeira constituídos apenas por soalho aplicado sobre vigas ocorre maioritariamente de forma unidirecional. De forma a garantir uma eficaz distribuição quando assim é necessário, recorre-se à aplicação de sarrafos (Negrão, 2017). Os sarrafos são elementos de madeira, de secção inferior à secção das vigas e são aplicados perpendicularmente e diretamente sobre as vigas principais através de pregagem. O vão destas vigas secundárias deve ser tal, que perfaça o vão total entre paredes na direção ortogonal à direção das vigas principais e a sua fixação nas paredes de alvenaria ocorre de igual forma à das vigas principais. A aplicação destes elementos de madeira revela-se muito prático quando é necessário interromper o vigamento como por exemplo para a introdução de caixas de escadas e chaminés (Cruz, 2013).

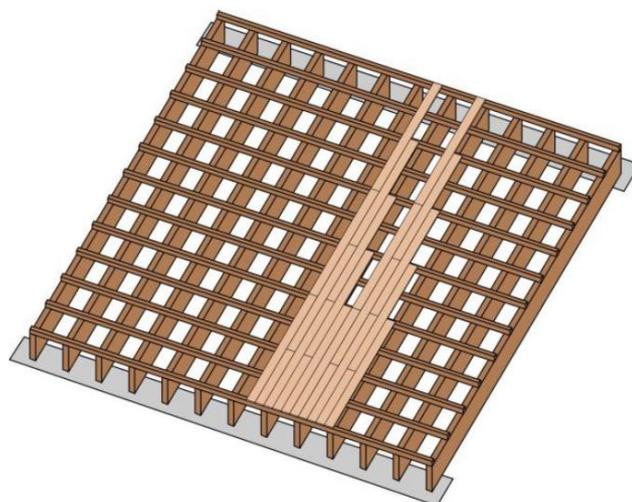


Figura 2.6 – Disposição de sarrafos (Negrão,2017).

Soalho

O soalho é outro dos elementos constitutivos dos pavimentos de madeira e tem como objetivo a criação de uma superfície plana que cobre toda a área necessária para a utilização humana. São aplicados sobre as vigas ou sarrafos, perpendicularmente a estes, com espessuras que variam entre 0,020m e 0,022m e larguras entre 0,10m e 0,20m. Estas tábuas podem ainda apresentar comprimentos entre 1,0m e 2,0m sendo este comprimento influenciado pelo espaçamento entre vigas ou sarrafos. A sua fixação é feita por meio de pregos nas extremidades das tábuas de forma a consolidar a ligação às vigas onde assentam (Cruz, 2013).

Laje mista madeira-betão

A necessidade de reforço estrutural dos pavimentos de madeira poderá passar pela construção de uma laje de betão sobre o pavimento de madeira. Nesse sentido é de relevante interesse intervir o mínimo possível o piso de madeira já existente de forma a não descaracterizar a construção a nível arquitetónico (Lourenço e Branco, 2013). Este reforço baseia-se na aplicação de uma lâmina de betão com 4,00 a 5,00cm de espessura, diretamente sobre soalho, funcionando este como cofragem perdida. A ligação destes materiais é realizada por meio de conectores metálicos, pregos, parafusos ou cavilhas (Lourenço e Branco, 2013). A colocação de uma rede electrossoldada respeitando o correto recobrimento pode ser uma excelente solução para evitar a fendilhação da lâmina de betão

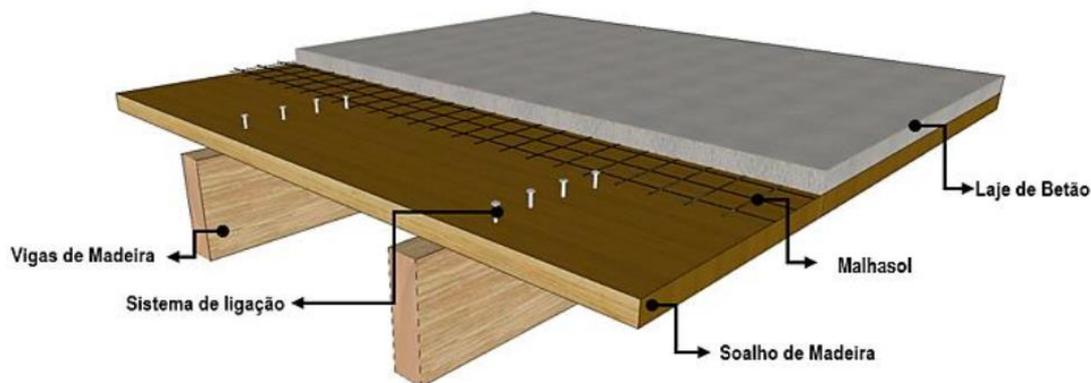


Figura 2.7 – Laje mista madeira-betão (Fernandes, 2016).

2.2. Princípios básicos de sistemas em vibração

2.2.1. Noções básicas de movimento harmónico simples

Um sistema unidimensional pode apresentar um movimento harmónico simples quando o seu equilíbrio estável, o repouso, é perturbado e consequentemente apresenta oscilações sempre na mesma direção em torno da sua posição inicial. (Tripler, Mosca, 2009). Por ação de forças restauradoras tais como a gravidade, tensões e outras, o sistema desenvolve-se no sentido de retomar a sua posição de equilíbrio inicial, o repouso. Este fenómeno é apresentado pela lei de Hooke, em que o valor da força é proporcional ao deslocamento de um sistema elástico linear (Pain, 1992)

$$F = -ky(t) \quad [\text{N}] \quad (2.1)$$

Onde F é a força em [N], k representa a rigidez [N/m] e $y(t)$ é o deslocamento [m] no instante de tempo t [s]. As forças restauradoras provocam aceleração que repõem o sistema à posição de equilíbrio inicial. Esta aceleração é definida com a variação da velocidade ao longo de um período de tempo como nos demonstra 2ª Lei de Newton:

$$F = m \ddot{y}(t) \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

Onde m representa a massa em [kg] e $\ddot{y}(t)$ a aceleração ao longo do tempo [m/s^2].

No caso de o sistema vibrar indeterminadamente, não havendo assim perda de energia, diz-se que o sistema está em vibração livre não amortecida. Por igualdade da Lei de Hooke e da 2ª Lei

de Newton, nasce a equação diferencial de segunda ordem conhecida como equação do movimento:

$$\begin{aligned}m \ddot{y}(t) + k y(t) &= 0 \\ \ddot{y}(t) &= -\frac{k}{m} y(t) \\ \ddot{y}(t) &= -\omega^2 y(t)\end{aligned}\tag{2.3}$$

Onde m e k são constantes, ω representa a frequência angular que é expressa por:

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad [\text{rad/s}]\tag{2.4}$$

A solução para a equação é:

$$y(t) = Y \sin(\omega t + \varphi)\tag{2.5}$$

Ou:

$$y(t) = Y \cos \varphi \sin \omega t + Y \sin \varphi \cos \omega t = A_1 \sin \omega t + A_2 \cos \omega t\tag{2.6}$$

$$A_1 = Y \cos \varphi, \quad A_2 = Y \sin \varphi,$$

$$\tan \varphi = \frac{A_2}{A_1},\tag{2.7}$$

$$Y = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$$

Onde φ é determinado pelas condições iniciais e A_1 e A_2 são constantes. A constante Y é representativa da amplitude e φ a fase angular [rad]. Se a curva sinusoidal for considerada na sua generalidade, o deslocamento máximo é a unidade e a fase angular representa a posição inicial do ciclo de oscilação.

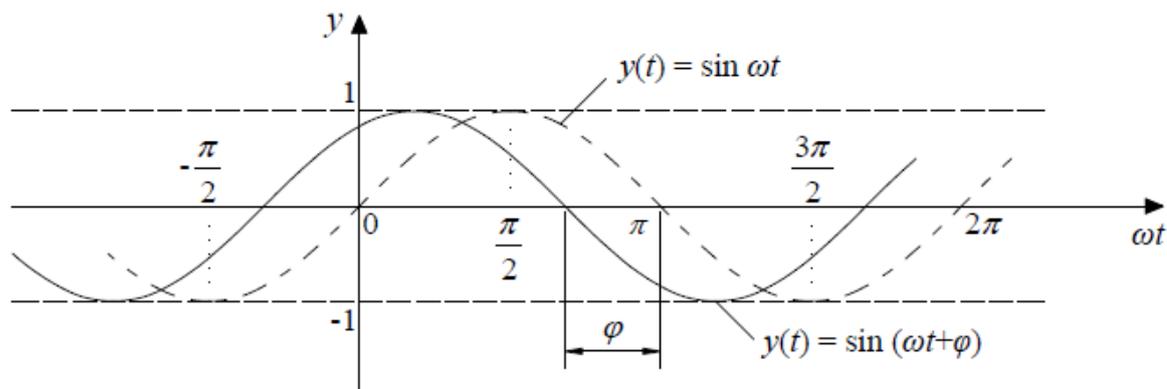


Figura 2.8 - Deslocamento de fase da curva sinusoidal ao longo do eixo das abscissas (Bartsch, 1999).

Esta equação mostra-nos que a frequência é tanto maior quando maior for a rigidez e, por outro lado, será menor quanto maior for a massa. A frequência é usualmente denotada de Hertz (Hz) e a sua unidade representa uma vibração, ou ciclo, por segundo [1/s]. Assim, a relação entre ω e f é:

$$f = \frac{\omega}{2\pi} \quad [\text{Hz}] \quad (2.7)$$

O período, T , representa o tempo de oscilação [s] e é obtido por a função inversa de f :

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi}{\omega} \quad [\text{s}] \quad (2.8)$$

No movimento harmónico simples, o deslocamento em relação à posição de equilíbrio inicial pode ser relacionado com a velocidade e a aceleração tal como representado na figura 2.9:

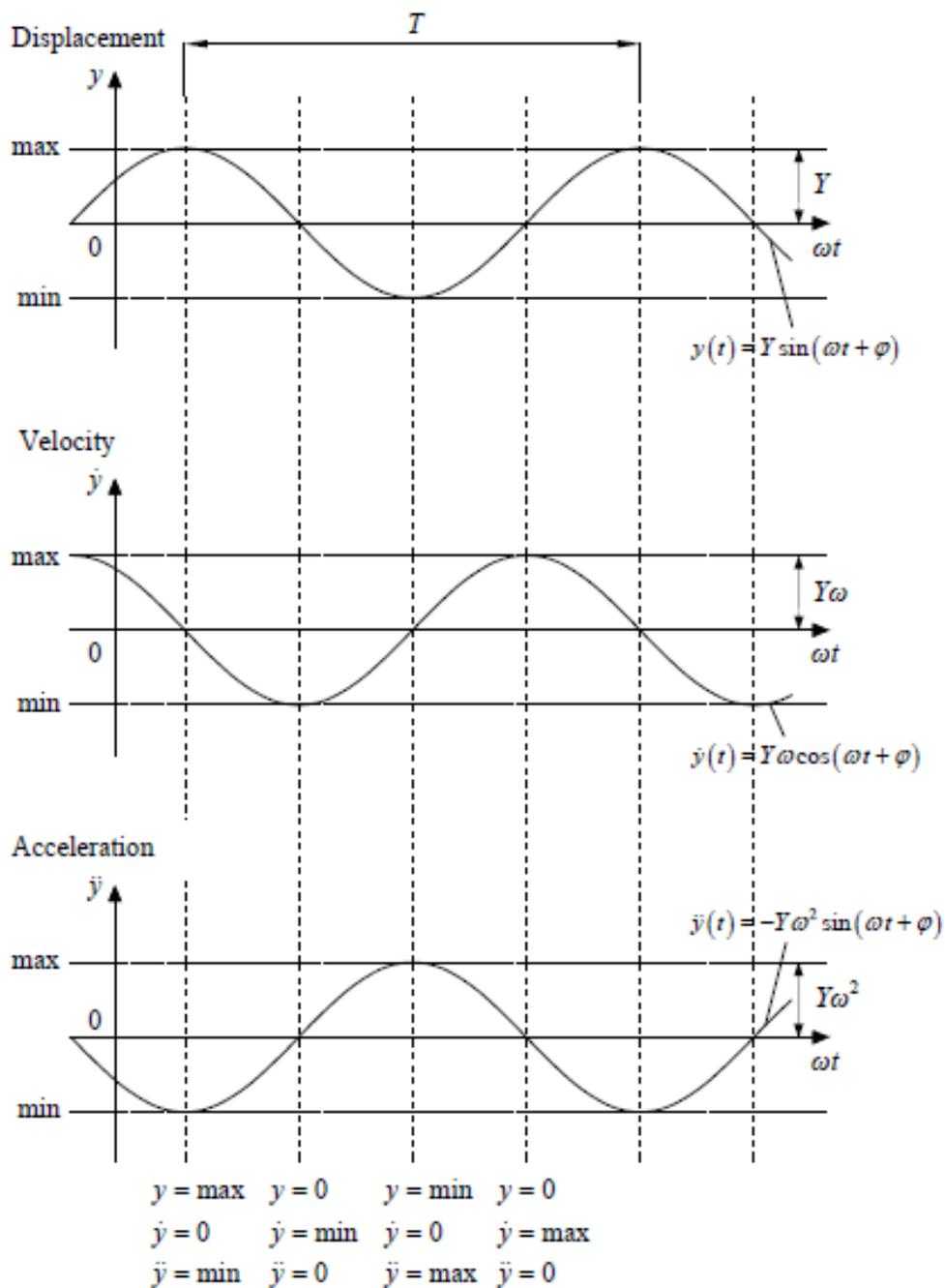


Figura 2.9 – Movimento harmónico simples

Na curva sinusoidal representativa do movimento, o ponto de inflexão da curva representa a posição de equilíbrio a partir da qual o movimento iniciou. O valor da velocidade é máximo na passagem do corpo pela posição inicial e a aceleração é nula quando o deslocamento é máximo.

2.2.2. Efeitos do amortecimento

A vibração não amortecida existe apenas em teoria, isto porque ocorre sempre a dissipação de energia tornando os sistemas amortecidos. O efeito do amortecimento desacelera o movimento do sistema e muitas vezes o amortecimento viscoso é assumido descrevendo-se como uma resistência contra o movimento forte, mas finita que atua na direção oposta ao movimento e é proporcional ao movimento (Pain, 1992):

$$F = -c \dot{y}(t) \quad [\text{N}] \quad (2.8)$$

Onde c é o coeficiente de amortecimento em $[\text{kg/s}]$ ou $[(\text{Ns})/\text{m}]$.

Aplicando o fator de amortecimento à Lei de Hooke e à 2ª Lei de Newton, vem:

$$\begin{aligned} m \ddot{y}(t) &= -k y(t) - c \dot{y}(t) \\ m \ddot{y}(t) + c \dot{y}(t) + k y(t) &= 0 \end{aligned} \quad (2.9)$$

A solução na seguinte forma é apresentada por Pain e Thomson (Pain 1992, Thomson 1993):

$$y(t) = Ae^{\lambda t} \quad (2.10)$$

Onde A e λ são constantes.

Por substituição desta equação na equação do movimento, vem:

$$(m\lambda^2 + c\lambda + k)Ae^{\lambda t} = 0 \quad (2.11)$$

Sendo $Ae^{\lambda t} \neq 0$, é obtida a seguinte equação quadrática:

$$m\lambda^2 + c\lambda + k = 0 \quad (2.12)$$

Consequentemente:

$$\lambda_{1;2} = -\frac{c}{2m} \pm \sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}} \quad (2.13)$$

Para $\lambda_1 \neq \lambda_2$ a solução assume a forma:

$$y(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_2 e^{\lambda_2 t} \quad (2.14)$$

Uma vez que a equação diferencial é de segunda ordem, serão obtidos dois valores de A. Deste modo, A1 e A2 devem ser determinadas pelas condições iniciais.

No entanto, quando $\lambda_1 = \lambda_2$, só existe uma solução para λ e de forma a satisfazer as condições iniciais sendo uma equação diferencial de segunda ordem, segundo Pain e Thomson (Pain, 1992, Thomson, 1993) vem:

$$y(t) = (A_1 + A_2 t) e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \quad (2.16)$$

Tendo em conta a raiz quadrada da equação anterior, o movimento pode ser sobreamortecido quando:

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 > \frac{k}{m} \quad (2.17)$$

E assim a equação pode ser expressa como:

$$y(t) = e^{-\left(\frac{c}{2m}\right)t} \left(A_1 e^{\left(\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right)t} + A_2 e^{-\left(\sqrt{\left(\frac{c}{2m}\right)^2 - \frac{k}{m}}\right)t} \right) \quad (2.18)$$

Enquanto um sistema fortemente amortecido exhibe um movimento exponencial para a posição de equilíbrio até atingir o repouso, o amortecimento crítico exhibe as mesmas propriedades, mas o movimento ocorre de forma muito mais rápida. Desta forma, em ambos os casos, não ocorre um movimento oscilatório e os expoentes da equação anterior são números reais e a raiz quadrada da equação equivale a zero para amortecimento crítico, que ocorre quando:

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 = \frac{k}{m} \quad (2.19)$$

Porém, o caso mais comum nas estruturas de engenharia civil é o movimento sub-amortecido. O sistema inicia o seu movimento oscilatório em torno da sua posição inicial de equilíbrio e os deslocamentos vão diminuindo até ao instante de tempo em que retoma o repouso. Esta situação ocorre quando:

$$\left(\frac{c}{2m}\right)^2 < \frac{k}{m} \quad (2.20)$$

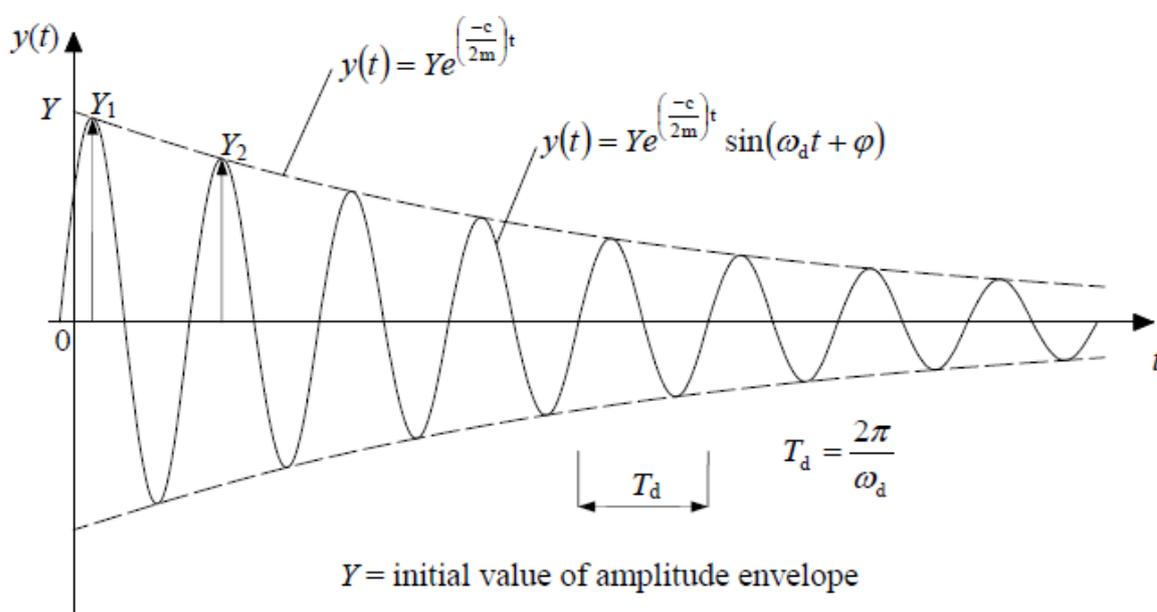


Figura 2.10 – Amplitude do movimento (Bartsch, 1999)

2.3. Sensibilidade humana a vibrações

2.3.1. Estudo de desconforto humano sujeitos a vibrações dos pavimentos

A ação de locomoção humana sobre os pavimentos pode considerar-se como um conjunto de impactos, tratando-se cada um desses impactos como uma vibração transitória constituída por duas componentes. A primeira componente atua entre os 30ms e 100ms e é referente ao impacto criado pelo contacto do calcanhar sobre o pavimento. A segunda parte da vibração transitória é referente à vibração livre que diminui ao longo do tempo (Hu, et al., 2001). As frequências naturais da estrutura constituem a vibração livre e segundo Hu, et al. (Hu, et al., 2001) somente as frequências mais baixas poderão ser excitadas pelo impacto da passada humana.

Um dos estudos mais antigos conhecido sobre o desconforto causado em humanos de pavimentos em vibração foi realizado em 1931 por Reiher e Meister (Reither e Meister, 1931). Neste estudo, 10 pessoas foram submetidas a vibrações horizontais e verticais de pavimentos estando de pé ou deitadas sobre a plataforma vibratória. As diferentes percepções das vibrações foram classificadas em seis categorias, desde “não perceptível” a “muito desconfortável / perigoso em caso de longa exposição”. Estes testes demonstraram que para vibrações em estado estacionário onde as pessoas foram expostas ao longo de cinco minutos a uma oscilação sinusoidal, o limiar da percepção estava num valor constante, produto entre o deslocamento e a frequência, a velocidade constante. No que diz respeito a vibrações mais fortes a aceleração e as suas variações ao longo do tempo mostraram-se mais influentes. Nos testes em que se infligiram vibrações transitórias causadas por até seis impactos por segundo, o fator de amortecimento foi obtido para que dificilmente fosse percebido. Para tal este valor deveria ser igual ou superior a 0,1. (Reiher e Meister, 1931).

Posteriormente, e num estudo aplicado a lajes mistas de aço e betão, Lenzen (Lenzen, 1966) ao estudar a sensibilidade humana ao comportamento vibracional dos pavimentos, observou que o fator que mais influenciava as vibrações no efeito que provocavam ao ser humano às vibrações, era o fator de amortecimento das oscilações. As variações de amplitude bem como a sua frequência demonstraram ter um menor efeito nos humanos. Os seres humanos não seriam sensíveis a vibrações amortecidas a um nível insignificante de cinco ciclos. No caso de o sistema se manter vibrando após doze ciclos, a reação humana seria a mesma que um sistema em vibração estacionário.

Foi em 1982 que Ohlsson (Ohlsson, 1982), conduziu os seus estudos nesta área e que viriam a ser fundamentais para um correto dimensionamento de pavimentos de madeira aos estados de vibração. Os testes de Ohlsson permitiram fazer uma classificação dos pavimentos no que diz respeito à flexibilidade e vibrações destes. No seu estudo, Ohlsson recorreu a quinze pessoas que avaliaram a performance dos pavimentos e concluiu que uma redução do vão destes pavimentos conduzia a um melhor comportamento destes e em testes que simulavam o impacto criado pelo ser humano a caminhar sobre estes, concluiu que em modos de vibração antissimétricos eram propensos a criar maior desconforto nos utilizadores. Ohlsson, a partir dos resultados obtidos no seu estudo também concluiu que para além da frequência fundamental do pavimento, o espaçamento entre valores dos primeiros modos de vibração contribui para o desconforto causado aos utilizadores. Assim Ohlsson introduziu parâmetros dinâmicos com o objetivo de limitar as vibrações: em pavimentos cuja frequência fundamental registre valores acima de 8 Hz, deve-se limitar a velocidade de pico produzida por um impulso unitário no centro do pavimento, para além de limitar a deformação estática.

2.4. Comportamento no plano de pavimentos de madeira

A integridade das estruturas de edifícios é por vezes posta em causa quando submetida a forças horizontais, provocadas pelo vento ou por sismos e a estabilidade das estruturas é garantida por recurso a núcleos de paredes resistentes e lajes que garantam um comportamento de diafragma rígido. Assim, os diafragmas assumem-se muito importantes nas estruturas de engenharia civil. Independentemente do tipo de ação externa aplicada ou do tipo de material que constitui o diafragma, estes não só transferem toda a ação horizontal para o sistema periférico resistente como fazem a ligação de todos os elementos estruturais e não estruturais, garantindo a integridade das estruturas (Moroder, 2016).

Grande parte dos pavimentos são projetados sobretudo para resistirem a forças verticais, geradas pela força gravítica, assumindo-se erradamente que possuem igualmente elevada resistência e rigidez no seu plano. Contudo, em casos específicos como os pavimentos de madeira, esta dedução não se verifica dada a baixa rigidez no plano acabando por ser negligenciada a sua consideração no projeto destes pavimentos (Scarry, 2015).

Geralmente, as ações horizontais principais a considerar no projeto de estruturas são o vento e o sismo. As forças provocadas pelo vento aplicado nas fachadas e cobertura dos edifícios é transmitida diretamente nas lajes que posteriormente transmitem os esforços para núcleos de paredes resistentes ou a pilares (Peixoto, Neves, 2004). No que diz respeito aos sismos, é de elevada complexidade uma vez que estão associados a diversos fatores entre os quais o tipo de terreno, a frequência e intensidade do sismo. De forma simplificada pode ser realizada uma análise estática de forças (Peixoto, Neves, 2004).

2.5. Projeto de estruturas de madeira

O dimensionamento de estruturas de madeira em Portugal, careceu até meados do século XX de regulamentos e normas que, não só caracterizassem física e mecanicamente este tipo de material, mas também que definissem os procedimentos de cálculo necessários para um correto e uniforme dimensionamento. Esta lacuna bibliográfica prendeu-se sobretudo com a crescente utilização das estruturas metálicas e de betão armado que se assumiram à época muito mais interessantes devido ao seu ótimo desempenho estrutural.

Foi em 1961 que o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) publicou o livro “Bases para o Dimensionamento de Estruturas de Madeira” (Mateus, 1961). Apesar desta publicação não se tratar de um regulamento, tornou-se um excelente recurso uma vez que especificava algumas regras básicas de dimensionamento (Cruz, 2013).

Contudo, a inexistência de regulamentação que definisse regras para o dimensionamento de estruturas de madeira continuava a ser uma lacuna para os projetistas em Portugal. Com o passar dos anos, a publicação apresentada pelo LNEC afigurava-se obsoleta e Portugal estava pouco desenvolvido nesta área comparativamente com outros países que tinham desenvolvido melhores técnicas construtivas em madeira. Foi então que Portugal adotou o Eurocódigo 5 – Dimensionamento de Estruturas de Madeira (NP-EN:1995-1-1:2004), um dos Eurocódigos estruturais focado apenas nas madeiras e que regulamenta e uniformiza as regras de projeto de estruturas de madeira nos países da Comunidade Europeia.

2.5.1. Eurocódigo 5 – Dimensionamento de estruturas de madeira

O Eurocódigo 5 (EC5) é o regulamento vigente em Portugal e noutros países da Comunidade Europeia para o dimensionamento de estruturas de madeira. Este documento é parte integrante de um conjunto de Eurocódigos Estruturais, publicado pelo Comité Europeu de Normalização (CEN) e é resultado de um trabalho de cerca de 40 anos (Pina, 2008).

Em Portugal, a publicação deste regulamento é da responsabilidade do Instituto Português da Qualidade (IPQ) e, embora ainda não esteja disponível em língua portuguesa, a sua última versão é datada de Novembro de 2004. O Eurocódigo 5 é formado por 3 partes: o volume 1.1 focado nas regras gerais de dimensionamento e regras para edifícios, a parte 1.2 que define as regras de dimensionamento das estruturas de madeira ao fogo e a parte 2 destinada ao dimensionamento de pontes.

O EC5 apresenta um conjunto extenso de regras de dimensionamento e tem como base a verificação da segurança tanto a estados limites últimos como de utilização. Para tal, aplica coeficientes parciais de segurança que visam minorar a capacidade resistente do material e majorar as ações sendo que as propriedades mecânicas da madeira são apresentadas neste mesmo documento. O EC5 assume-se ainda importante pois detalha o dimensionamento de ligações, incluindo as ligações com peças metálicas (Cruz, 2013).

2.5.2. Dimensionamento de lajes mistas madeira-betão

O dimensionamento de estruturas mistas de madeira e betão, ao contrário do que já existe para as estruturas de aço-betão, ainda não são regidas por um regulamento específico que permita o cálculo estrutural tendo em conta a combinação destes materiais tão distintos. Desta forma, o cálculo para estruturas de madeira e betão deve ser efetuado por combinação dos Eurocódigos específicos para estruturas de cada um dos materiais, no caso da madeira o EC5 (EN1995, 2004) e no caso do betão o EC2 (EN1992, 2004). A chave do cálculo deste tipo de estruturas reside

no sistema de ligação entre os diferentes materiais, tendo sempre em conta a diferença de módulos de elasticidade. Assim, poderá adotar-se uma metodologia de cálculo assumindo a estrutura como rígida ou semirrígida. No primeiro caso, de ligações rígidas, não é assumido o escorregamento entre os dois materiais sendo assim possível aplicar a teoria de Bernoulli onde as secções de mantêm planas depois da deformação se forem planas antes da ocorrência desta. Esta metodologia de calculo afigura-se vantajosa no sentido em que pelas equações de resistências de materiais, a secção é homogeneizada. Considerando a ligação como semirrígida, não é desprezável o escorregamento que ocorre no plano de ligação madeira-betão e desta forma a lei de Bernoulli não é válida. Esta consideração no tipo de ligação implica um cálculo mais rigoroso e complexo.

No presente caso de estudo, onde se considerará a existência de uma ligação rígida, é de extrema importância o cálculo da rigidez efetiva da seção e para o efeito, o Anexo B do EC5-parte 1 (EN1995,2005) apresenta equações baseadas na rigidez de ligação dos dois materiais para o cálculo de ligações como se apresenta na imagem seguinte:

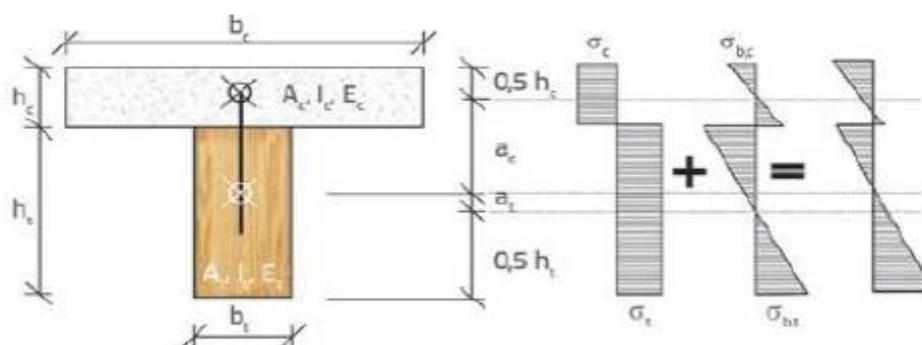


Figura 2.11 - Representação da secção mista e das tensões normais (Stepinac M, *et al.*, 2015)

Por dedução das equações de equilíbrio das distribuições de tensões apresentadas na imagem anterior obtém-se a rigidez efetiva à flexão (EI)_{ef} dada pela seguinte equação:

$$(EI)_{ef} = E_c I_c + E_t I_t + \gamma_c E_c A_c a_c^2 + \gamma_t E_t A_t a_t^2 \quad (2.21)$$

Onde:

c , corresponde à lâmina de compressão formada por betão

t , corresponde à secção de madeira em tração

I_t e I_c a inércia da madeira e do betão em relação ao seu eixo neutro

E_c e E_t o módulo de elasticidade do betão e da madeira, respetivamente

A_c e A_t as áreas das secções de betão e de madeira

a_c e a_t as distancias dos centros geométricos das secções formadas por cada tipo de material ao centro geométrico global

γ_c e γ_t o coeficiente que representa a rigidez da ligação que neste caso é de valor unitário

3. MODELAÇÃO NUMÉRICA

Neste capítulo apresentam-se os parâmetros necessários para a definição dos modelos numéricos de forma a obter todas as informações necessárias para este estudo paramétrico. Os modelos foram desenvolvidos através do *software* Robot Structural Analysis by Autodesk, sendo este software de cálculo estrutural por análise de elementos finitos

3.1. Definição de materiais e dimensões

Em Portugal, a tradição nas construções de madeira remete-nos sobretudo para a utilização de madeiras dos tipos resinosas e choupou. A NP EN 338 (NP EN 338:2003) estabelece um sistema de classificação das madeiras tendo em conta as suas resistências. Para as madeiras do tipo resinosas atribui doze classes: C14, C16, C18, C20, C22, C24, C27, C30, C35 C40, C45 e C50. Desta forma, optou-se por escolher uma madeira do tipo C24. Trata-se de uma madeira com uma boa resistência à flexão que é facilmente encontrada em diversas construções de madeira e vulgarmente conhecida como Casquinha (NP EN 1912,2003). No seguinte quadro apresentam-se as propriedades de uma madeira com as características da madeira da classe C24 adotada, segundo a NP EN 338:2003

Propriedades de Resistência [MPa]	Simbologia	Valor [N/mm ²]
Flexão	$f_{m,k}$	24
Tração Paralela ao Fio	$f_{t,0,k}$	14
Tração Perpendicular ao Fio	$f_{t,90,k}$	0,5
Compressão Paralela ao Fio	$f_{c,0,k}$	21
Compressão Perpendicular ao Fio	$f_{c,90,k}$	2,5
Corte	$f_{v,k}$	2,5

Propriedade de Rigidez	Simbologia	Valor [kN/mm ²]
Módulo de Elasticidade Paralelo ao fio (valor médio)	$E_{0,mean}$	11
Módulo de Elasticidade Paralelo ao Fio (valor característico)	$E_{0,05}$	7,4
Módulo de Elasticidade Perpendicular ao Fio (valor médio)	$E_{90,mean}$	0,37
Módulo de Distorção (valor médio)	G_{mean}	0,69

Massa volúmica (valor característico)	ρ_k	350
Massa volúmica (valor médio)	ρ_{mean}	420

Relativamente ao betão utilizado na modelação da laje mista, optou-se pela utilização de um betão regular C30/37 segundo o EC2 (NP EN 1992-1-1, 2010). Sendo o reforço estrutural o principal objetivo da utilização do betão, decidiu-se que este betão, cuja resistência é considerável, era o mais adequado uma vez que é facilmente produzido em central de betão e o seu custo não é acrescido relativamente a outros betões com outros tipos de exigências de qualidade. Em seguida apresentam-se as características gerais deste tipo de betão, segundo o EC 2 (NP EN 1992-1-1, 2010):

Simbologia	Valor
f_{ck} (MPa)	30
$f_{ck,cube}$ (MPa)	37
f_{cm} (MPa)	38
f_{ctm} (MPa)	2,9
$f_{ctk,0,05}$ (MPa)	2,0
$f_{ctk,0,95}$ (MPa)	3,8
E_{cm} (GPa)	33
ϵ_{c1} (‰)	2,2

Para definição das dimensões do pavimento foi tido em conta a sua aplicação em edifícios residenciais e considerando as dimensões que provocariam maiores efeitos indesejados. Desta forma modelou-se o pavimento com 4,8m de vão nas duas direções uma vez que, regra geral, são as dimensões máximas dos vãos em edifícios correntes de habitação e devido à dificuldade de encontrar elementos de madeira em perfeitas condições de aplicabilidade que superem este comprimento.

Tendo em conta as cargas habituais a aplicar sobre os pavimentos residenciais de madeira e tendo sido observado em outros estudos as dimensões correntes do vigaamento na tradição deste tipo de construções, adotaram-se vigas de 0,08 x 0,16 m² com um espaçamento de 0,40m entre o eixo principal destas.

Nos modelos que contemplam sarrafos, dispostos perpendicularmente e sobre as vigas principais, adotou-se uma secção transversal de 0,04 x 0,06 m² e um afastamento entre estas de 0,40m.

Os tarugos, peças de madeira dispostas perpendicularmente entre as vigas principais com a principal função de garantir a distribuição de carga do pavimento conferindo a este maior rigidez, foram modelados com uma secção transversal de $0,08 \times 0,14 \text{ m}^2$. Os tarugos foram introduzidos no modelo a $1/3$ e $2/3$ ao longo do eixo longitudinal das vigas, ou seja, a $1,6\text{m}$ e a $3,2\text{m}$.

Relativamente ao soalho, e de forma a poder estudar em que medida o facto de este ser contínuo ou formado por um conjunto de peças com desenvolvimento longitudinal contribui para um melhor comportamento dinâmico dos pavimentos, modelou-se com uma secção transversal de $0,12 \times 0,022 \text{ m}^2$. Foram criados dois modelos sendo que o primeiro é constituído por soalho contínuo, isto é, sem qualquer descontinuidade ao longo dos seus $4,80\text{m}$ de desenvolvimento (figura 3.1) e o segundo modelo formado por tábuas de soalho intervaladas de $1,60\text{m}$ e $3,20\text{m}$ (figura 3.2).

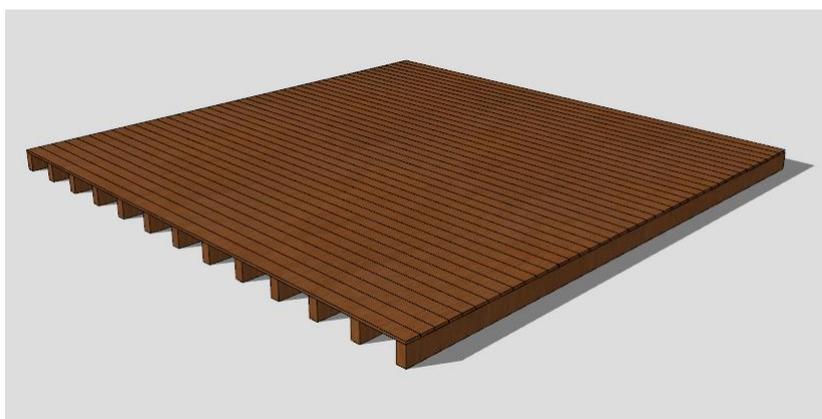


Figura 3.1 - Modelo 1: Soalho contínuo aplicado sobre vigas.



Figura 3.2 - Modelo 2: Soalho contínuo com ligação a um terço do vão ou dois terços do vão, em quincôncio.

Por fim, a modelação da laje mista foi realizada com o modelo base de soalho aplicado sobre vigas sobre o qual se inseriu uma camada de betão de 0,06m.

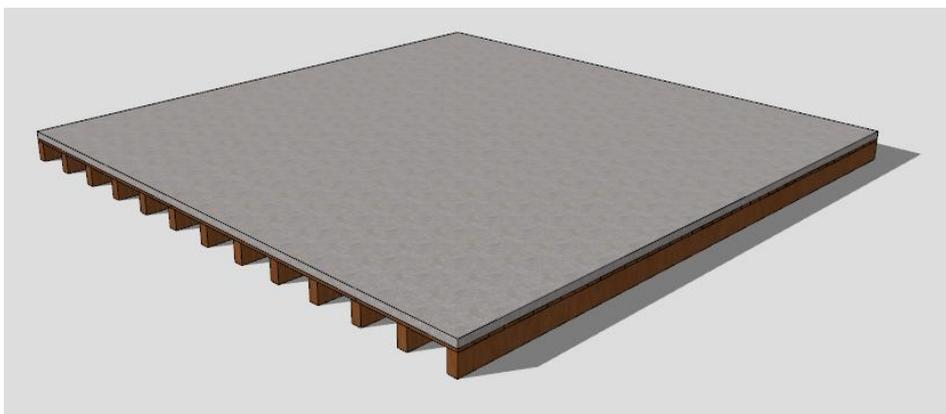


Figura 3.3 – Modelo de soalho contínuo com ligação a um terço do vão ou dois terços do vão

3.2. Modelação de grelha

A modelação dos pavimentos de madeira foi realizada com base no modelo de grelha. Nesta tipologia de modelação para resolução pelo método dos elementos finitos os elementos de madeira são representados por elementos de barra lineares que unem dois nós. A cada nó podem estar associadas 3 translações e 3 rotações segundo x, y e z.

3.2.1. Condições de apoio

Um dos objetivos deste estudo é compreender em que medida as condições de apoio influenciam o comportamento dos pavimentos de madeira. Deste modo realizaram-se dois modelos distintos quanto às condições de apoio: modelos de pavimentos apoiados nos quatro lados e modelos apoiados em apenas dois lados opostos.

A primeira tipologia de pavimentos, os modelos apoiados nas quatro extremidades, é semelhante aos pavimentos que apoiam sobre paredes rígidas circundantes. As restrições de deslocamentos e rotação impostas nas condições de apoio destes modelos foram as translações verticais e as rotações em torno do eixo perpendicular ao lado do pavimento considerado.

As mesmas condições de apoio foram impostas nos modelos apoiados em dois lados, as extremidades das vigas.

3.2.2. Elementos de madeira e lajeta de betão

As restrições de translações e de rotações nos elementos de madeira que compõem os pavimentos, por serem de elevada relevância para o estudo destes, foram igualmente impostas particularmente em cada caso. À exceção dos nós dos elementos que correspondem igualmente aos nós dos apoios, todos os outros foram libertados para poderem sofrer translações verticais. No que diz respeito às peças contínuas de madeira, como é o caso das vigas principais, a cada elemento finito foi restringida a rotação segundo o eixo da peça, impedindo assim que as peças sofram movimentos por torção.

No caso específico dos modelos que incluem tarugos, e uma vez que se tratam de elementos descontínuos, é necessário considerar a rigidez de rotação (K) nas suas ligações às vigas. O cálculo deste parâmetro é essencial para garantir a correta distribuição das forças às vigas e “baseia-se na hipótese de que, por ação de uma força P aplicada numa viga, os tarugos adjacentes sofrem apenas movimento transversal de corpo rígido causado pelo escorregamento das ligações. Esta hipótese fundamenta-se no pequeno comprimento do tarugo, que resulta em rigidezes de rotação e translação elevadas dessa barra. Por outro lado, a rotação de corpo rígido do tarugo é impedido pelo seu confinamento entre as duas vigas adjacentes, contraventadas pelos tarugos seguintes. O movimento relativo tarugo-viga tem valores iguais e sentidos opostos na viga carregada e nas adjacentes, devendo-se à parte da força P que é repartida pelos tarugos para as vigas vizinhas.” (Negrão, 2017).

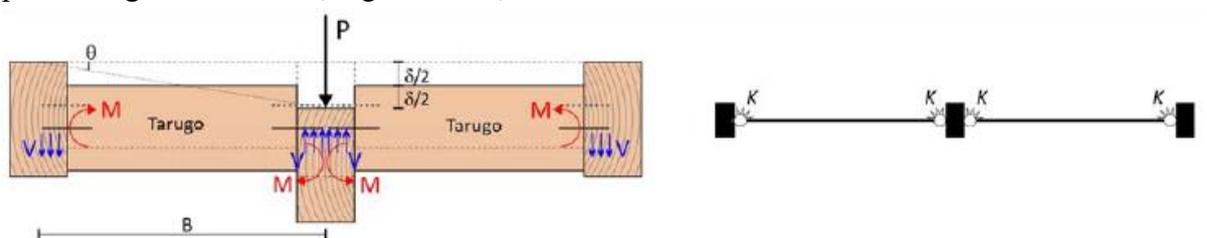


Figura 3.4 – Rigidez de torção de ligação tarugos-vigas (Negrão, 2017).

O deslocamento vertical da viga produzido pela força P sobre ela aplicada é representado por δ , B a distância entre o eixo das vigas e θ representa a rotação relativa do tarugo, obtida por:

$$\theta \cong \text{tg } \theta = \delta/B \quad (3.1)$$

Do qual resulta para uma rotação unitária:

$$\delta = B \quad (3.2)$$

Considerando que as ligações entre as vigas e os tarugos são efetuadas por aplicação de parafusos ou cavilhas, o módulo de escorregamento por ligador e superfície de corte, segundo a NP EN 1995-1-1:2004 [2] é dado por:

$$K_{ser} = \rho_m^{1,5} d/23 \quad (3.3)$$

Sendo ρ_m o valor médio da massa volúmica e d o diâmetro do ligador.

Esta expressão é aplicável a ligadores fixados perpendicularmente ao fio das vigas. Por incompatibilidade na ligação aos tarugos, admite-se igualmente válida na ligação destes em que o ligador penetra paralelamente ao fio.

Neste caso de estudo, a madeira apresenta um valor médio de massa volúmica de 420 kg/m³ e aplicando ligadores de 10mm, o valor de K_{ser} é de:

$$K_{ser} = 420^{1,5} * 10/23 = 3742,36 \text{ N/mm (ou kN/m)} \quad (3.4)$$

O deslocamento vertical relativo, δ , é resultado da igual repartição pelas duas ligações entre os topos do tarugo e as vigas, sendo a força transversal de:

$$V = K_{ser} * B/2 = 748,47 \text{ kN} \quad (3.5)$$

Por aplicação da equação de equilíbrio de momentos, determinou-se o valor do momento M , correspondente à rigidez de rotação aparente nas ligações tarugo-viga a inserir no modelo representando uma mola:

$$\text{Sum } M = 0 \Leftrightarrow VB = 2M \Leftrightarrow M = VB/2 = 748,47 * 0,4/2 = 149,69 \text{ kNm/rad} \quad (3.6)$$

3.3.3. Modelação de diafragmas

Os pavimentos de madeira apresentam deficiências no que diz respeito ao comportamento como diafragmas rígidos. Uma vez que as vigas apresentam reduzida rigidez axial e devido ao seu comportamento maioritariamente unidirecional por ausência de sarrafos ou de outro elemento perpendicular às vigas que lhe confira rigidez suficiente para evitar a distorção do pavimento, é necessário estudar em que medida a existência de um reforço por meio de uma lajeta de betão aplicada sobre o soalho, melhora este comportamento. Assim, este estudo focou-se em três modelos já aqui estudados: o modelo de soalho contínuo aplicado diretamente sobre as vigas,

o modelo que contempla a existência de sarrafos perpendiculares às vigas e o modelo misto de madeira-betão.

Sendo a ocorrência de um sismo a situação mais danosa para as estruturas dos edifícios, para a modelação dos diafragmas foi tida em consideração as forças horizontais aplicadas nos pavimentos produzidas por um abalo sísmico. Assim, foram criados os três modelos cujo perímetro é composto por paredes de alvenaria à exceção de uma face de forma a ser possível separar as componentes de translação e de rotação/torção das ações horizontais (Negrão, 2017).

Primeiramente foram definidas as condições de apoio dos modelos e para tal foi necessário definir que os pavimentos seriam suportados por paredes de alvenaria de 0,8m de espessura e 4,0m de altura. Assim, modelaram-se apoios elásticos horizontais com uma rigidez de valor igual à rigidez de translação de uma parede com as dimensões definidas. Ainda foi necessário definir um módulo de elasticidade de 1GPa e assim obter uma rigidez para apoios espaçados de 0,40m de:

$$K = 3EI/L^3 = 3 \times (1 \times 10^6) \times (0,4 \times 0,8^3 / 12) / 4,0^3 = 800 \text{ kN/m} \quad (3.7)$$

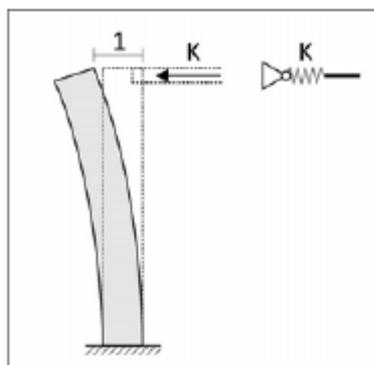


Figura 3.5 – Rigidez de translação de uma parede

De forma a definir simplificada as forças pseudo-estáticas produzidas pelo abalo sísmico, e de maneira a retratar um sismo com elevada magnitude, considerou-se uma aceleração horizontal de 0,15g e admitiu-se que os peso das paredes contribuía unicamente para a massa da estrutura, obtendo um valor da força por metro de parede:

$$F_x = F_y = 0,8 \times 4,0 \times 22 \times 0,15 = 10,56 \text{ kN/m} \quad (3.8)$$

Esta carga horizontal distribuída perfaz um valor concentrado de 101,38 kN na direcção xx e de 50,69 kN na direcção yy, uma vez que nesta direcção a carga é repartida pelas duas paredes de alvenaria.

4. DESEMPENHO DINÂMICO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA

4.1. Frequências e modos de vibrações

Os pavimentos solicitados por ações dinâmicas desenvolvem respostas essencialmente caracterizadas pela sua frequência própria. Esta define-se pela frequência do modo de vibração fundamental e é a menor frequência de vibração natural da estrutura. Assim, quando as estruturas são sujeitas a ações dinâmicas, desenvolvem respostas resultantes da combinação de modos de vibração e cuja contribuição dos modos de vibração mais elevados representa menor importância para o desenvolvimento da resposta da estrutura. Ao seu primeiro modo de vibração corresponde a deformação inicial gerada, sujeita à menor rigidez e assim a que cria maior deformação.

Desta forma, um pavimento que apresenta maior frequência de vibração é necessariamente um pavimento mais rígido e menor será a amplitude da vibração. Para o efeito de determinação do valor das frequências próprias, bem como dos correspondentes modos de vibração, deve-se considerar a estrutura em regime livre não amortecido.

4.2. Resultados do modelo numérico e segundo o EC5

4.2.1. Resultados numéricos

A modelação numérica das diferentes configurações dos pavimentos possibilita a determinação da frequência fundamental dos mesmos. Ainda assim é necessário garantir a correta compatibilização dos diferentes elementos que constituem o modelo quando se sobrepõem segundo um padrão de ortogonalidade. É por isso necessário garantir que os momentos flectores nos elementos dos níveis superiores de elementos não geram torções nos elementos adjacentes e para tal é necessário modelar libertações de rotação segundo o eixo dos elementos. Este procedimento permite assim eliminar as interações momento flector-torção entre o soalho-vigas ou o soalho-sarrafos-vigas para os modelos em estudo.

Os resultados obtidos por via numérica apresentam-se na seguinte tabela:

Frequências fundamentais (Hz)		Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre vigas	9,66	9,65
	Soalho sobre vigas com tarugos	12,92	12,92
	Soalho sobre sarrafos	13,07	13,06
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre vigas	9,67	9,66
	Soalho sobre vigas com tarugos	13,04	13,03
	Soalho sobre sarrafos	13,82	13,81
	Laje mista madeira-betão	14,89	

A deformação dos pavimentos, correspondente ao seu primeiro modo foi também obtida na modelação numérica. Esta deformação corresponde à maior deformada que os pavimentos exibem quando solicitados a ações dinâmicas conforme se apresenta em seguida para a tipologia de soalho contínuo:

Apoiado em dois lados:

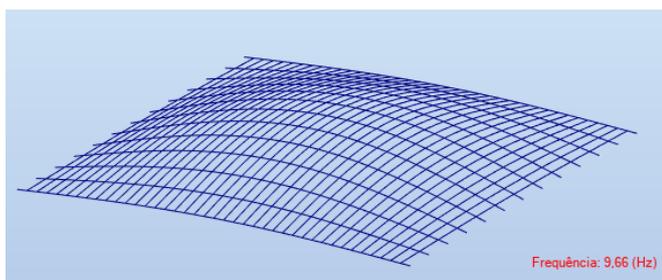


Figura 4.1 - Modelo de soalho sobre vigas.

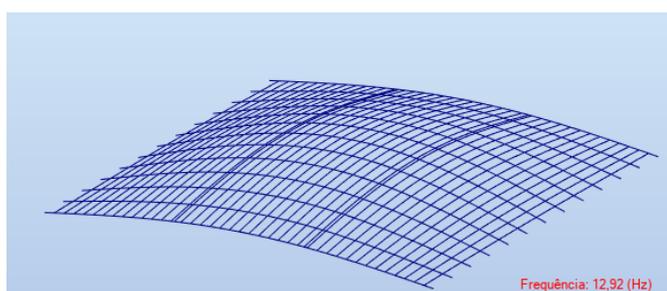


Figura 4.2 - Soalho sobre vigas com tarugos.

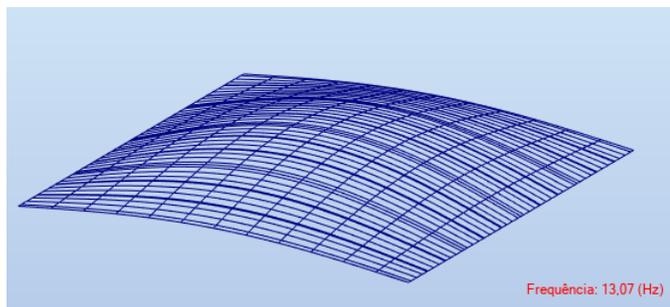


Figura 4.3 - Soalho sobre sarrafos

Apoiado em quatro lados:

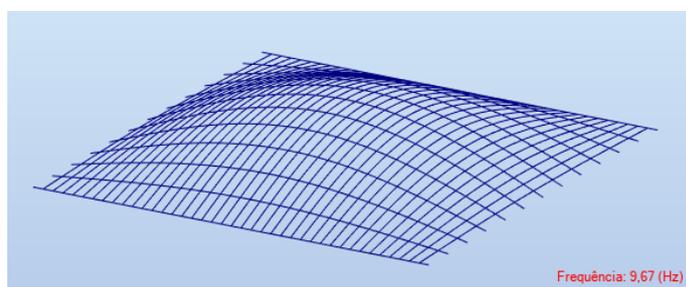


Figura 4.4 - Modelo de soalho sobre vigas

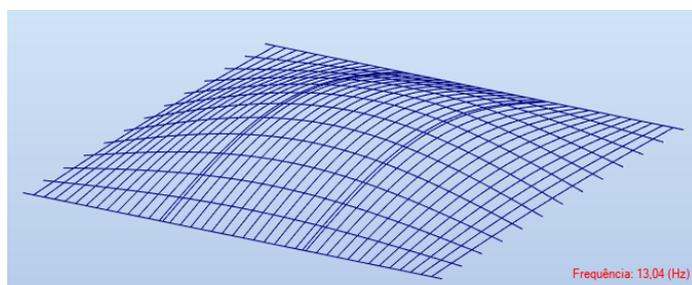


Figura 4.5 - Soalho sobre vigas com tarugos

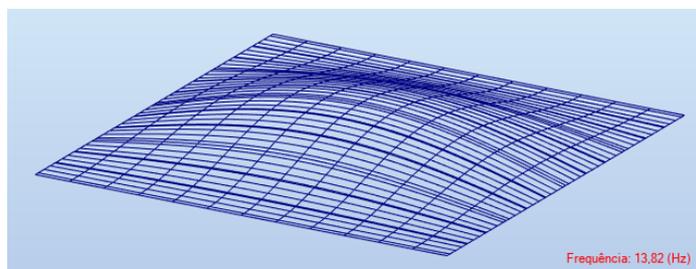


Figura 4.6 - Soalho sobre sarrafos

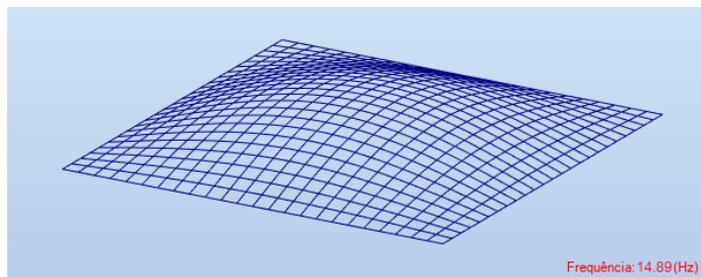


Figura 4.7 -Laje mista madeira-betão

Da análise cuidada da tabela é possível concluir que, tal como era expectável, são os modelos com mais ligações e conseqüentemente mais rígidos que garantem maior valor de frequência própria de vibração e por isso criam menor desconforto aos utilizadores. Nesse sentido a introdução de tarugos a 1/3 e 2/3 do vão apresenta um acréscimo da frequência fundamental de 25% relativamente ao modelo de base “soalho sobre vigas”. A configuração do pavimento que introduz os sarrafos na sua constituição, permitindo assim uma uniformização da distribuição de cargas e dada a sua elevada rigidez comparativamente com os restantes modelos é o modelo que apresenta melhores performances. Ainda assim as diferenças não são significativas quando comparado com o modelo de tarugos.

Os resultados obtidos pela introdução no modelo das juntas de soalho a 1,60m e 3,20m, em quincôncio (modelo 2), revelam que as diferenças são residuais. Isto deve-se à reduzida contribuição da rigidez do soalho na rigidez global modelo e a introdução de libertações que simulem a junta do soalho não irá desenvolver diferenças significativas.

No que concerne às condições de apoio, as variações não são significativas para os modelos apoiados nos quatro bordos ou apenas em dois lados opostos. Esta constatação verifica-se apenas nos primeiros modos de vibração conforme tabela seguinte:

Modos de vibração								
Soalho aplicado sobre vigas			Soalho aplicado sobre vigas com tarugos			Soalho sobre sarrafos		
Apoiado em 2	Apoiado em 4	Variação (%)	Apoiado em 2 lados	Apoiado em 4 lados	Variação (%)	Apoiado em 2	Apoiado em 4	Variação (%)
9,66	9,67	0%	12,92	13,04	1%	13,07	13,82	5%
9,94	10,56	6%	13,38	16,29	18%	13,54	18,42	26%
10,40	13,77	24%	14,59	25,72	43%	14,56	28,74	49%
11,79	19,97	41%	19,58	40,76	52%	18,30	44,31	59%
15,60	28,95	46%	30,39	51,18	41%	27,19	52,09	48%
22,14	38,45	42%	45,91	52,11	12%	41,13	53,50	23%
31,15	38,69	19%	51,18	55,80	8%	51,91	57,88	10%
38,45	39,68	3%	51,93	59,91	13%	52,40	64,52	19%
38,67	40,31	4%	53,96	64,14	16%	54,05	67,02	19%
39,47	42,24	7%	56,59	77,60	27%	56,86	81,85	31%

O modelo de laje mista madeira-betão, devido ao seu incremento de rigidez, resultou em valores de frequência própria de vibração mais elevados, com um acréscimo de 54% relativamente ao modelo de soalho sobre vigas que lhe dá origem

4.2.2. Resultados segundo o EC5

A determinação de frequências fundamentais de pavimentos de madeira segundo a formulação do Eurocódigo 5 (EN 1995-1-1:2004) é apresentada na fórmula (4.1) e aplicável em pavimentos de madeira simplesmente apoiados e cujo desenvolvimento em planta se apresenta como retangular ou quadrado:

$$f_1 = \frac{\pi}{2l^2} \sqrt{\frac{(EI)_l}{m}} \quad (4.1)$$

f_1 – frequência fundamental do pavimento, em Hz

l – comprimento das vigas, em m

m – massa do pavimento por unidade de área, em kg/m²

$(EI)_l$ – rigidez de flexão em relação ao eixo forte das vigas, em Nm²/m

O cálculo da rigidez de flexão em relação ao eixo forte das vigas, foi realizado segundo a secção tipo para cada configuração do pavimento. Assim para cada secção consideraram-se apenas as secções dos elementos constituintes do pavimento que contribuem para a rigidez do pavimento

segundo o eixo forte. No caso do modelo simplificado de soalho aplicado sobre vigas, foi apenas considerada a rigidez das vigas existentes por metro de pavimento e desconsiderou-se a contribuição do soalho uma vez que a rigidez de flexão segundo YY apenas seria afectada caso houvesse elevados momentos torsores nos elementos de soalho, o que não se verifica:

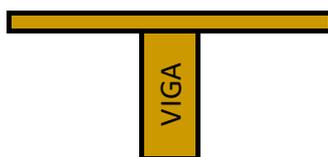


Figura 4.8 – Secção modelo de soalho sobre vigas.

Também no modelo que incorpora tarugos foi desconsiderada a contribuição do soalho bem como dos tarugos. Estes últimos, desenvolvendo-se segundo XX também não influenciam expressivamente a rigidez de flexão do pavimento segundo YY.



Figura 4.9 – Secção modelo de soalho sobre vigas com tarugos.

O modelo que incorpora soalho, sarrafos e vigas pela sua distribuição ortogonal sobreposta, segundo o eixo forte das vigas terá ainda a secção das peças de soalho a contribuir para a rigidez de flexão. Para tal, e uma vez que as peças não estão ligadas diretamente entre si, o resultado da rigidez de flexão obtido pelo somatório das rigidezes das secções constantes por metro linear de pavimento (direcção perpendicular)



Figura 4.10 – Secção modelo de soalho sobre sarrafos.

Por fim, o cálculo da rigidez de flexão segundo o eixo forte das vigas do pavimento reforçado por intermédio da execução de uma lajeta de betão sobre o soalho, foi executado segundo o

Anexo B do EC5-parte 1 (EN1995,2005), considerando que a ligação madeira-betão é rígida e que é baseada na rigidez de ligação dos dois materiais

$$(EI)_{ef} = E_c I_c + E_t I_t + \gamma_c E_c A_c a_c^2 + \gamma_t E_t A_t a_t^2 \quad (4.2)$$

Com:

$$a_c = \left(\frac{hc+ht}{2} \right) - at \quad ; \quad at = \frac{\gamma E_c A_c (hc+ht)}{2(\gamma E_c A_c + E_t A_t)} \quad (4.3)$$

Em que:

A_c = área de betão = 0,06 m²

A_t = área da secção de madeira = 0,032 m²

E_c = $E_{\text{betão}}$ = 33 GPa

E_t = E_{madeira} = 11 GPa

I_c = Inércia da secção de betão segundo o seu eixo neutro = 1,80 x 10⁻⁵ m⁴

I_t = Inércia da secção de madeira segundo o seu eixo neutro = 6,83 x 10⁻⁵ m⁴

Resultado assim num valor de $(EI)_1 = 4,96 \times 10^{-5}$

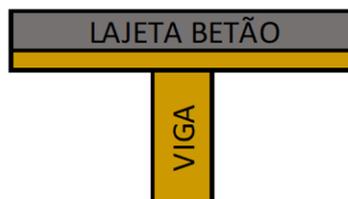


Figura 4.11 – Secção modelo de laje mista madeira-betão.

Na tabela seguinte são apresentados os valores resultantes da aplicação da fórmula (7.5) do Eurocódigo 5 para os modelos em estudo:

Frequência Fundamental (Hz) - EC5		Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Modelo Simples	11,73	11,73
	Modelo com Tarugos	11,73	11,73
	Modelo com Sarrafos	11,54	11,54

APOIADO EM 4 LADOS	Modelo Simples	11,73	11,73
	Modelo com Tarugos	11,73	11,73
	Modelo com Sarrafos	11,54	11,54
	Laje mista madeira-betão	21,69	

A formulação do EC5 para a determinação da frequência fundamental de vibração dos pavimentos em estudo resulta em valores aproximados aos resultados obtidos numericamente. Verifica-se ainda a igualdade de resultados dos modelos apoiados em dois e em quatro lados que se deve à não consideração das condições de apoio na fórmula (7.5) do EC5. No que diz respeito ao reforço do pavimento de soalho aplicado sobre vigas por intermédio de uma lajeta de betão, regista-se o acréscimo de cerca de 85%.

4.3. Comparação de resultados

A estimativa da frequência própria de cada pavimento, dada pela fórmula (4.1) do EC5, é calculada com base nos seguintes parâmetros: massa e rigidez de flexão segundo o eixo forte das vigas principais e comprimento das vigas. Sendo este igual para todos os modelos e reduzida a diferença de massa entre modelos à exceção do modelo misto de madeira-betão, os resultados obtidos pelo EC5 são sobretudo dependentes da rigidez de flexão.

A diferença percentual entre o valor da frequência fundamental obtida numericamente ou pela formulação do EC5 é de cerca de 17% para os modelos de soalho aplicado sobre vigas, de 9% no caso dos modelos que apresentam travamento das vigas por meio de tarugos e de cerca de 16% nos modelos que apresentam sarrafos. É no modelo de laje mista madeira-betão que a diferença assume valores significativos, de cerca de 31%.

No que diz respeito ao estudo da influência do comprimento do soalho e sua disposição, verificou-se pelos valores obtidos pelos modelos numéricos que a diferença é residual. Tal como era expectável são os modelos mais rígidos que apresentam maior valor de frequência própria de vibração e nesse sentido o modelo de laje mista apresenta-se como uma boa solução em situações que seja necessário incrementar a sua frequência, pese embora o seu significativo aumento de massa.

5. ESTADO LIMITE DE VIBRAÇÃO

5.1. Especificações regulamentares

A regulamentação para verificação dos estados limites de utilização em estruturas de madeira está presente na secção 7 do Eurocódigo 5 – Parte 1.1. No que diz respeito à limitação de vibrações dos pavimentos geradas pelo impacto criado sobre estes na utilização humana, o EC 5 adotou a metodologia proposta por Ohlsson (Ohlsson, 1982) que visava uma condição estática e uma condição dinâmica.

Uma vez que os pavimentos correntes de madeira com frequência fundamental inferior a 8Hz apresentam risco de ressonância quando excitados pelo ser humano ao caminhar sobre estes, o estudo deve ser mais rigoroso nestas circunstâncias. Assim, o EC5 é aplicável unicamente em pavimentos residenciais, cuja frequência fundamental é superior a 8 Hz e tem como pressuposto que o pavimento se encontra descarregado, isto é, apenas sujeito ao seu peso próprio e todas as suas cargas permanentes. (Cruz, 2013)

A imposição referente à limitação da deformação estática do pavimento, apresentada pela equação (5.1) do EC5, tem como propósito suprimir os movimentos gerados por vibrações de frequência inferior a 8Hz criados pelo caminhar humano sobre os pavimentos. Como raramente os pavimentos apresentam frequências fundamentais superiores a 8 Hz, considera-se que o impacto do calcanhar é de natureza semi-estática. Deste modo aplica-se uma condição estática em que “o quociente entre o deslocamento vertical instantâneo máximo (w), medido em mm, e a força concentrada vertical que o provoca (F), aplicada em qualquer ponto do pavimento e tendo em conta a distribuição da carga, medida em kN, deve ser inferior a um parâmetro a .” (Cruz, 2013)

$$\frac{w}{F} \leq a \quad (5.1)$$

A segunda condição imposta pelo EC 5 tem por base a limitação do valor de pico da velocidade de resposta a um impulso unitário. A ação de caminhar sobre um pavimento de madeira excita as componentes mais altas da frequência que por sua vez são influenciadas pelo coeficiente de amortecimento do sistema em vibração, pela massa e pela rigidez. Este valor de pico de velocidade de resposta ‘ v ’, é obtido em função do fator de amortecimento modal ξ que o EC 5

impõe que seja de 1%, pelo valor da frequência fundamental do pavimento (f_1) em Hertz e por um parâmetro b , como demonstra a seguinte equação:

$$v \leq b(f_1 \xi - 1) \quad (5.2)$$

No que diz respeito aos valores de a e de b o EC 5 exhibe um gráfico que fornece os valores aconselhados tendo em conta a melhor relação entre os parâmetros, sendo que para um melhor desempenho dos pavimentos, sugere que tenha um baixo valor de a e maior valor de b . No caso de necessidade de especificidade de informação, o EC 5 remete para o Anexo Nacional.

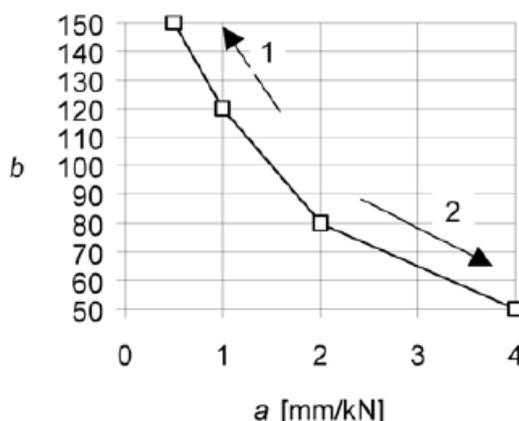


Figura 5.1 – Gráfico de relação a-b (Eurocódigo 5)

5.2. Deslocamentos e velocidades de resposta a um impulso unitário

O deslocamento estático vertical é o resultado da ação de uma carga pontual estática vertical aplicada no centro do pavimento provocando um deslocamento vertical. O cálculo aproximado deste deslocamento a meio vão pode ser obtido pela formulação de resistência dos materiais por aproximação do cálculo da flecha a meio vão de uma viga por ação do seu peso próprio e da carga pontual aplicada:

$$\delta_{\frac{1}{2}\text{vão}} = \frac{Fl^3}{48(EI)_l} + \frac{5pl^4}{384(EI)_l} \quad (5.3)$$

com:

F – valor da carga pontual, em N;

l – comprimento do vão da viga, em m;

p – valor da carga distribuída equivalente ao peso da viga por unidade de largura do pavimento, em N/m₂;

$(EI)_l$ – rigidez de flexão da viga por unidade de largura do pavimento, em Nm^2/m .

O valor da velocidade de resposta (v) a um impulso unitário pode ser obtido por aplicação da expressão (5.4) do EC 5:

$$v = \frac{4(0,4 + 0,6 n_{40})}{mbl + 200} \quad (5.4)$$

em que:

v – valor da velocidade de resposta a um impulso unitário (m/s);

n_{40} – número de modos de vibração com frequências inferiores a 40 Hz;

m – massa por unidade de área do pavimento em estudo (kg/m^2);

b – comprimento do pavimento na direção ortogonal ao eixo principal das vigas (m);

l – comprimento das vigas (m)

O valor de n_{40} é obtido por aplicação da equação (5.5) do EC 5:

$$n_{40} = \left\{ \left[\left(\frac{40}{f_1} \right)^2 - 1 \right] \left(\frac{b}{l} \right)^4 \frac{(EI)_l}{(EI)_b} \right\}^{0,25} \quad (5.5)$$

com:

f_1 – frequência própria do pavimento, em Hz;

$(EI)_l$ – rigidez de flexão segundo a direção perpendicular ao eixo das vigas e por unidade de largura do pavimento, em Nm^2/m ;

$(EI)_b$ – rigidez de flexão segundo a direção paralela ao eixo das vigas e por unidade de largura do pavimento, em Nm^2/m .

Esta expressão traduz o espaçamento de valores das primeiras frequências fundamentais do pavimento, através da relação entre a rigidez do pavimento na direção das vigas e a rigidez na direção ortogonal. (Cruz, 2013)

5.2.1. Resultados numéricos

A partir da modelação de pavimentos anteriormente apresentada simulou-se a aplicação de uma força pontual no centro do pavimento e conseqüente análise estática dos modelos, obtendo-se o deslocamento associado. Para o efeito foi aplicada uma carga de 1kN tendo-se obtido os seguintes valores para todos os modelos:

δ (mm)		Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre Vigas	2,165	1,827
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	1,722	1,748
	Soalho sobre Sarrafos	1,798	1,827
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre Vigas	2,151	2,168
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	1,722	1,722
	Soalho sobre Sarrafos	1,798	1,798
	Laje mista madeira-betão	0,1870	

Também neste caso é verificável por análise da tabela que o método de conceção dos pavimentos influencia a limitação das deformações geradas por aplicação de cargas. Mais uma vez se constata que os modelos mais rígidos apresentam um melhor comportamento sendo por isso os modelos de soalho sobre vigas os que apresentam maior valor de deslocamento. No mesmo sentido o comportamento do modelo de pavimento reforçado por meio de uma lajeta de betão se demonstrou uma opção interessante para limitação dos deslocamentos.

No que diz respeito à velocidade de resposta a um impulso unitário a sua simulação realizou-se por meio de uma função quadrangular tempo-força. Esta função no instante inicial é de 1N e tem a duração de 1 segundo. No que diz respeito ao coeficiente de amortecimento modal, considerou-se 1% pelo modelo de amortecimento de Rayleigh em que as matrizes de rigidez e de massa são diretamente proporcionais à matriz de amortecimento. Os resultados obtidos foram resultado da aplicação de incrementos de tempo de 0,01 segundos sendo assim possível determinar a velocidade máxima de resposta conforme a seguinte tabela:

v (m/s)		Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre Vigas	0,09116	0,10382
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	1,07211	0,73808
	Soalho sobre Sarrafos	0,64989	0,71802
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre Vigas	0,08625	0,10382
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	0,65858	0,78514
	Soalho sobre Sarrafos	0,71684	0,71647
	Laje mista madeira-betão	0,62681	

A análise dos resultados numéricos obtidos permite-nos perceber como é insignificante a diferença do comprimento e disposição da aplicação do soalho. Quanto às condições de apoio destaca-se aqui a não existência de um padrão nos resultados obtidos para os modelos de soalho aplicado diretamente sobre as vigas. Já nos modelos com travamento por meio de tarugos ou com sarrafos dispostos na direção transversal, os resultados são semelhantes quer estejam apoiados em duas das faces ou nas quatro.

O número de modos de vibração inferiores a 40Hz resultantes da simulação dos modelos apresentam-se na seguinte tabela:

	<i>n40</i>	Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre Vigas	6	6
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	5	5
	Soalho sobre Sarrafos	5	5
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre Vigas	4	5
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	3	3
	Soalho sobre Sarrafos	4	4
	Laje mista madeira-betão	2	

Da análise dos resultados obtidos, constata-se que os modelos mais rígidos apresentam um menor número de modos de vibração inferior a 40 Hz. Nesse sentido o reforço do pavimento de madeira por intermédio da construção de uma lajeta de betão, demonstra-se muito promissor apresentando apenas 2 modos de vibração cuja frequência é inferior a 40Hz. No que diz respeito às condições de apoio são os modelos apoiados em 4 lados que apresentam melhores resultados. Tal facto deve-se a restrição dos seus movimentos em todas as faces tornando-os por isso mais rígidos.

5.2.2. Resultados segundo o EC5

Por aplicação das expressões (5.4) e (5.5) apresentadas no EC5 foi possível determinar o número de modos de vibração abaixo dos 40 Hz bem como a velocidade de resposta a um impulso unitário que se apresentam nas seguintes tabelas:

	<i>n40</i>	Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre Vigas	5	5
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	3	3
	Soalho sobre Sarrafos	5	5
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre Vigas	5	5
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	3	3
	Soalho sobre Sarrafos	5	5
	Laje mista madeira-betão	2	

De igual forma ao constatado pelos modelos numéricos, o número de modos de vibração inferiores a 40 Hz obtidos pela formulação do EC5 tende a ser menor quanto maior for a rigidez

do pavimento. Também a laje mista madeira betão apresenta bons resultados obtendo-se apenas dois modos de vibração com frequência inferior a 40Hz.

Por aplicação da fórmula 5.4 do EC5 procedeu-se ao cálculo da velocidade de resposta a um impulso unitário. A expressão apresentada pelo EC5 relaciona de forma proporcional a velocidade de resposta com número de modos de vibração inferiores a 40Hz e, no sentido inverso, com a massa e dimensões do pavimento. Os resultados obtidos apresentam-se na seguinte tabela:

	v	Modelo 1	Modelo 2
APOIADO EM 2 LADOS	Soalho sobre Vigas	0,01899	0,01899
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	0,01134	0,01134
	Soalho sobre Sarrafos	0,01539	0,01539
APOIADO EM 4 LADOS	Soalho sobre Vigas	0,01899	0,01899
	Soalho sobre Vigas com Tarugos	0,01134	0,01134
	Soalho sobre Sarrafos	0,01539	0,01539
	Laje mista madeira-betão	0,00414	

Verifica-se que a formulação do EC5 não tem em consideração as condições de apoio. Assim os resultados obtidos são iguais quer nos modelos apoiados em dois ou quatro lados, o que na realidade não se verifica devido à rigidez de flexão dos pavimentos. São também neste caso os modelos de soalho aplicado sobre vigas os que apresentam maiores valores de velocidade de resposta. Já os modelos mais rígidos apresentam melhor comportamento em especial o modelo reforçado com a lajeta de betão.

5.2.3. Análise de resultados

A análise dos resultados obtidos tanto pelas expressões fornecidas pelo EC5 como pelo desenvolvimento de modelos numéricos no que concerne à velocidade de resposta a um impulso unitário permite perceber como a massa do pavimento e o valor da carga aplicada poderão influenciar os resultados. Assim, era expectável que o incremento de massa gerado pela introdução de elementos de madeira como os tarugos e os sarrafos provocasse uma diminuição da velocidade de resposta como se veio a verificar no caso da formulação pelo EC5, pese embora que comparando os modelos constituídos por sarrafos e por tarugos não se verificou essa linearidade. Já nos modelos numéricos verificou-se o oposto, com o aumento de velocidade de resposta quando acresce a massa introduzida dos modelos.

Comparando os resultados obtidos pelas duas metodologias de cálculo, verifica-se que há diferenças significativas sobretudo no modelo de laje mista madeira-betão

5.3. Verificação do estado limite de vibração

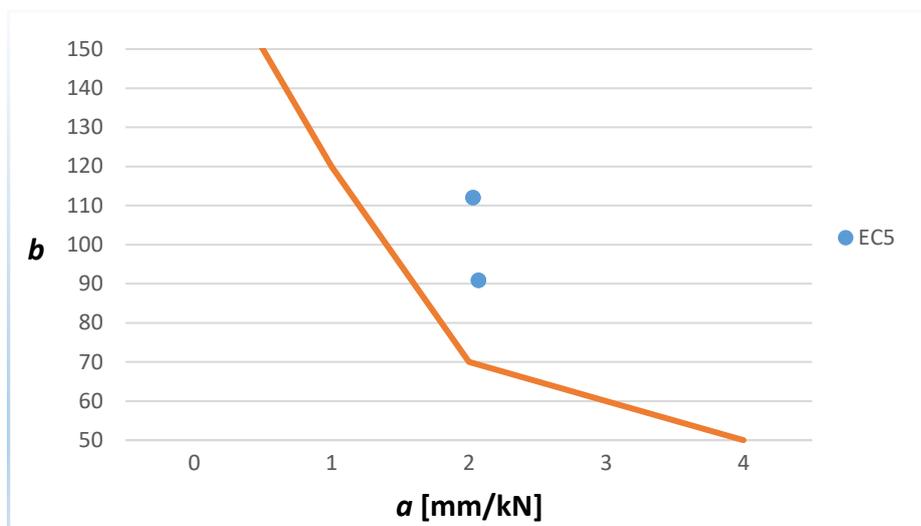
As fórmulas 7.3 e 7.4 do EC5 permitem-nos a obtenção dos parâmetros necessários para a verificação do estado estado limite de vibração de cada pavimento. Na seguinte tabela resumo apresentam-se os resultados obtidos para estes parâmetros pela formulação do EC5:

Tabela Resumo - Formulação EC5		Modelo 1		Modelo 2	
		a	b	a	b
APOIADO EM 2 LADOS	Modelo Simples	3,070	90,92	3,070	90,92
	Modelo com Tarugos	3,070	159,98	3,070	159,98
	Modelo com Sarrafos	3,031	112,06	3,031	112,06
APOIADO EM 4 LADOS	Modelo Simples	3,070	90,92	3,070	90,92
	Modelo com Tarugos	3,070	159,98	3,070	159,98
	Modelo com Sarrafos	3,031	112,06	3,031	112,06
	Laje mista madeira-betão	a		b	
		0,465		1105,02	

De igual forma, pela modelação numérica dos pavimentos procedeu-se ao cálculo parametrizado de a e de b cujos resultados se apresentam em baixo:

Tabela Resumo - Modelos numéricos		Modelo 1		Modelo 2	
		a	b	a	b
APOIADO EM 2 LADOS	Modelo Simples	2,165	16,02	2,180	13,78
	Modelo com Tarugos	1,748	0,92	1,748	1,42
	Modelo com Sarrafos	1,826	1,64	1,827	1,46
APOIADO EM 4 LADOS	Modelo Simples	2,151	17,10	2,168	13,78
	Modelo com Tarugos	1,714	1,62	1,714	1,32
	Modelo com Sarrafos	1,796	1,47	1,797	1,47
	Laje mista madeira-betão	a		b	
		1,370		1,73	

Com base no gráfico do EC5 que relaciona os parâmetros de a e de b para a verificação dos estados limite de vibração podemos concluir que os resultados obtidos para os modelos estudados se enquadram sendo todos os valores de a obtidos superiores a 0,5 e os valores de b superiores a 50. No que diz respeito aos valores obtidos numericamente, os valores de a são todos superiores a 0,5 contudo os valores de b são muito reduzidos ficando abaixo do valor de 50 que é utilizado como referência do eixo das ordenadas.



6. DIAFRAGMAS

Os problemas detetados em edifícios antigos no que diz respeito ao seu comportamento a forças horizontais e nomeadamente à ação sísmica levam-nos à necessidade de os estudar de forma mais minuciosa. Os pavimentos de madeira quando solicitados a forças deste tipo exibem deformações excessivas no seu plano e é de relevante importância em que medida os pavimentos de madeira, nas diferentes tipologias, conseguem fazer a distribuição de forças horizontais, isto é, funcionar como diafragmas.

Conforme o autor Marini (Marini *et al.*; 2006) menciona no seu artigo, é necessário garantir uma ligação eficaz entre as lajes de madeira e as paredes que as suportam, bem como melhorar a rigidez dos próprios pavimentos. Nesse sentido, a aplicação de uma lajeta de betão sobre o pavimento de madeira poderá assegurar uma melhor repartição transversal das cargas aplicadas e garantir as condições de rigidez necessárias.

Assim, a realização deste estudo tem como propósito a análise e comparação do efeito de diafragma em três modelos distintos:

- Modelo de soalho aplicado diretamente sobre vigas
- Modelo de soalho aplicado sobre sarrafos e vigas
- Modelo de laje mista madeira-betão

6.1. Resultados

O estudo da distribuição de cargas às paredes realizou-se nas duas direções realizando-se por isso a modelação aplicando as cargas pseudo-estáticas em XX e YY. Sendo a direção das vigas principais a do eixo XX, a transmissão da força aplicada nestas dá-se pelas paredes dispostas segundo a direção YY. De forma análoga ocorre na direção perpendicular.

6.1.1. Ação sísmica na direção XX

A disposição das paredes na modelação da ação sísmica nesta direção provoca uma grande excentricidade entre o centro de massa do pavimento e a rigidez gerada pelas paredes resistentes gerando-se assim um elevado momento torsor e que deverá ser equilibrado pelas forças na direção YY, de sentidos opostos nas duas paredes (Negrão, 2017).

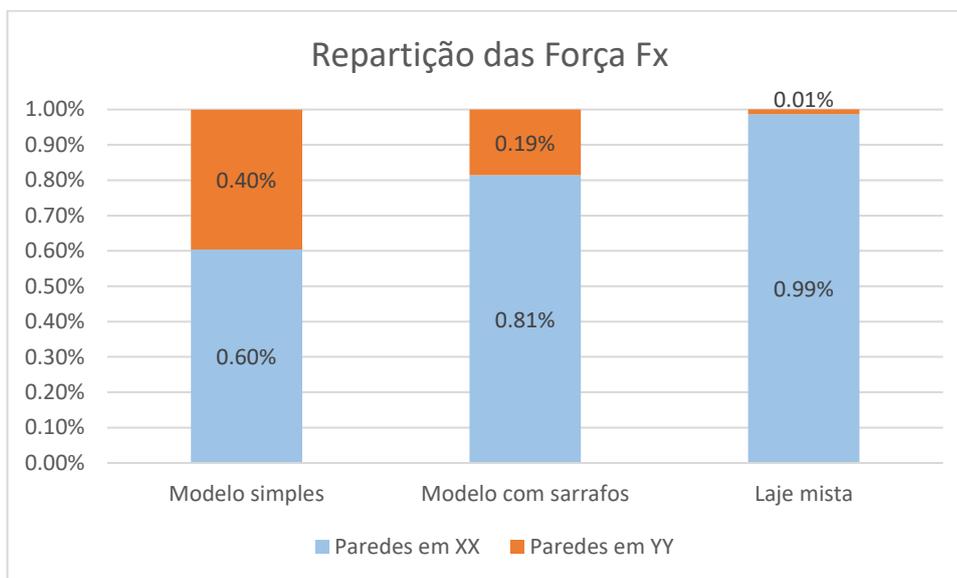


Gráfico 6.1 – Repartição das forças Fx

6.1.2. Ação sísmica na direção YY

Por efeito de diafragma, a mobilização das forças impostas na direção XX ocorrerá nas paredes em YY conforme demonstra o seguinte gráfico:

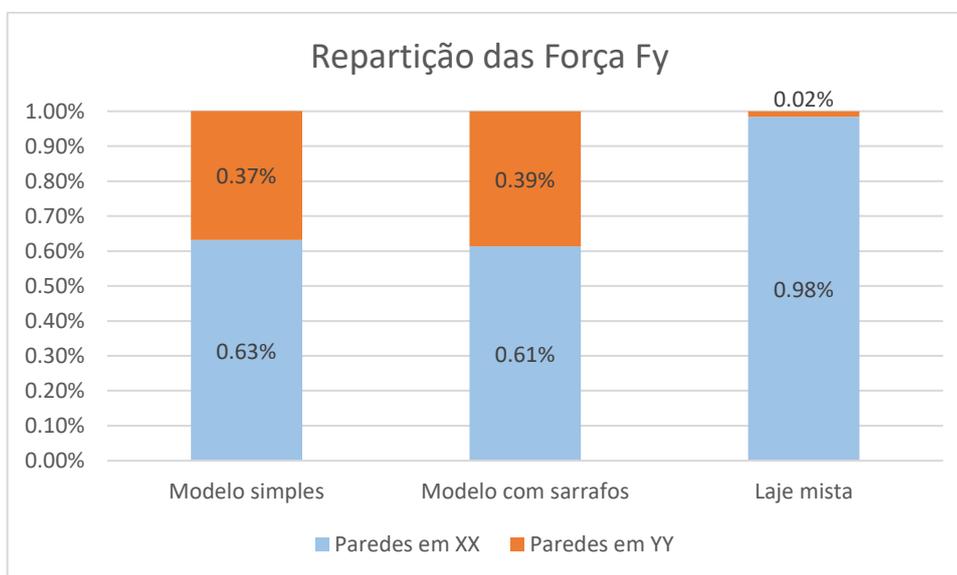


Gráfico 6.2 – Repartição das forças Fy

6.2. Análise de resultados

A análise dos resultados obtidos permite-nos concluir que para as diferentes configurações dos pavimentos estes comportam-se de forma muito diferente sendo que o pavimento de madeira-betão se distingue dos restantes. Como era expectável, para a configuração do pavimento usual em que o soalho é aplicado diretamente sobre as vigas, a repartição das forças segundo XX demonstra-se deficiente, comprovando assim o fraco desempenho deste tipo de pavimentos ao efeito de diafragma. Já o modelo que incorpora os sarrafos na constituição do pavimento apresenta uma melhoria de 21% relativamente ao anterior demonstrando assim que a disposição de sarrafos ortogonais às vigas conferem uma maior rigidez no plano do pavimento. O pavimento reforçado por meio de uma lajeta de betão com 0,06m de espessura representa uma boa solução para colmatar o deficiente comportamento dos pavimentos de madeira à aplicação de cargas horizontais permitindo uma transmissão de cerca de 98% das cargas às paredes resistentes dispostas na direção XX.

A distribuição das cargas na direção YY também é muito eficiente no modelo de laje mista madeira-betão, conferindo igualmente cerca de 98% da transmissão das cargas às paredes resistentes nesta direção. Nesta direção o comportamento do modelo de sarrafos mostra ser ligeiramente inferior ao modelo simplificado de soalho sobre vigas devido à excentricidade criada entre o centro de massa e as paredes resistentes que sustentam o pavimento.

7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

O presente capítulo tem como principal objetivo a apresentação das principais conclusões obtidas na realização do estudo parametrizado dos pavimentos de madeira modelados. Numa primeira parte o estudo incidiu sobre a dimensão e configurações da aplicação do soalho e a sua influência para a verificação dos estados limite de serviço. No mesmo sentido foi estudada a configuração de outros pavimentos com a introdução de tarugos, sarrafos e ainda o reforço por meio de uma lajeta de betão.

No que diz respeito à primeira parte deste estudo concluiu-se que a influência da diminuição do comprimento das tábuas de soalho, na determinação das frequências fundamentais dos pavimentos, era residual. Esta evidência prende-se com o facto da contribuição do soalho para a rigidez de flexão do pavimento ser diminuta, isto porque a sua secção é muito menor que a secção dos restantes elementos que compõem os pavimentos e desta forma a criação de mais singularidades na aplicação de tábuas com maior número de juntas não traduz efeitos significativos. Quando comparados os modelos simples (soalho aplicado sobre vigas), os modelos com tarugos e os modelos de soalho sobre vigas, são os pavimentos com melhor relação rigidez-massa que apresentam melhores resultados como era expectável. Neste sentido destaca-se o reforço do pavimento por intermédio de uma lajeta de betão, cujo aumento de rigidez lhe confere frequências fundamentais mais elevadas pese embora o seu elevado aumento de massa. As diferenças quando comparados os modelos apoiados em dois e em quatro lados revela-se, pela formulação do EC5, inexistentes. Isto porque a determinação da frequência própria do pavimento pela fórmula do EC5 não prevê esse fator que perante os resultados obtidos numericamente demonstra que influência a rigidez do pavimento. Nesse sentido a fórmula fornecida pelo EC5 é conservadora resultando em valores menores.

A segunda vertente deste estudo, direcionada para a análise dos parâmetros estabelecidos pelo EC5 na verificação dos estados limite de serviço, permitiu-nos perceber em que medida a formulação apresentada era compatível com tipologias diferentes de pavimentos. Assim no que diz respeito ao número de modos de vibração inferiores a 40Hz e à velocidade de resposta a um impulso unitários permite-nos concluir que a metodologia de cálculo estabelecida revela valores diferentes dos modelos numéricos. Neste sentido é de extrema relevância a necessidade de uma análise aprofundada das disposições presentes no EC5 quando se tratam de pavimentos com elementos adicionais como os tarugos ou os sarrafos. Também aqui a rigidez dos pavimentos quando apoiados em dois ou quatro lados não revela diferenças.

Por último, da realização do estudo da influência do reforço de um pavimento de madeira por meio de uma lajeta de betão, quando solicitado a ações de diafragma, concluiu-se que este método de conceção lhe confere um aumento substancial de rigidez no plano sendo por isso uma solução com ótimos resultados na distribuição das cargas às paredes laterais de apoio.

BIBLIOGRAFIA

1995-1-1:2004, E. "Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings."

Alvarez, R. A. M., F. A., Calleja, J. J. M. (2000). "Estructuras de Madera. Diseño e Cálculo." AITIM, Madrid.

BARTSCH H.-J. 1999. Taschenbuch mathematischer Formeln (18th Ed). Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser-Verlag, München, Wien.

Bonfim, O. N. D. J. (2001). "Garantia da Qualidade dos Pavimentos em Madeira em Edifícios de Habitação." Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Construção. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Costa, F. P. (1955). "Enciclopédia Prática da Construção Civil." F. Pereira da Costa - Portugália Editora, Lisboa.

Cruz, M. B. C. W. (2013). "Estados Limites de Utilização de Pavimentos de Madeira. Vibrações e Conforto." Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Dias, T. I. d. M. P. (2008). "Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos. Diagnóstico e Intervenção Estrutural." Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Reabilitação do Património Edificado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto.

EN 1912:2003. Structural Timber - Strength classes - Assignment of visual grades and species

EN 1995-1-1:2004. Design of Timber Structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings.

EN 338:2003. Structural timber - Strength classes

Hu, Lin J, Chui, Ying H e Onysko, Donald M. 2001. Vibrational serviceability of timber floors in residential construction. Progress in Structural Engineering and Materials, 2001

Ilharco, T., Guedes, J., Costa, A., Miranda, L., Silva, B. (2006). "Relatório Preliminar de Inspeção e Diagnóstico do Edifício do Largo de São Domingos nº80, 81 e 82". FEUP, Porto.

LENZEN K.H. 1966. Vibration of steel joist-concrete slab floors. *AISC Engineering Journal*, 3(3), 133–136.

Lourenço, P. B., Branco, J. M. (2012). "Dos Abrigos da Pré-História aos Edifícios de Madeira do Século XXI." Centro de Investigação Transdisciplinar "Cultura, Espaço e Memória".

Martins, T. F. R. M. (2010). "Dimensionamento de Estruturas de Madeira. Coberturas e Pavimentos." Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Civil. Instituto Superior Técnico - Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.

Mascarenhas, J. (2009). "Sistemas de Construção - O Edifício de Rendimento da Baixa Pombalina de Lisboa." Livros Horizonte.

Mateus, T. J. E. (1961). "Bases para o Dimensionamento de Estruturas de Madeira." Memória nº179. Lisboa.

Moroder, Daniel. "Floor Diaphragms in Multi-Storey Timber Buildings", New Zealand, 2016

Negrão, J. H. (2017). "Comportamento no Plano e Fora do Plano de Pavimentos de Madeira." II Congreso Latinoamericano de Estructuras de Madera.

OHLSSON S.V. 1982. Floor Vibration and Human Discomfort [Doctoral Thesis]. Department of Structural Engineering, Division of Steel and Timber Structures. Chalmers University of Technology. Göteborg, Sweden.

Oliveira, E. V., Galhano, F. and Pereira, B. (1969). "Construções Primitivas em Portugal." Lisboa: Instituto da Alta Cultura. Centro de Estudos de Etnologia.

PAIN H.J. 1992. *The Physics of Vibrations and Waves* (4th Ed). John Wiley & Sons. West Sussex, UK.

Pina, C. P., (2008). "Eurocódigos Estruturais. Ponto de Situação em Portugal." BE 2008 - Encontro Nacional de Betão Estrutural, Guimarães.

Reiher, H., & Meister, F. (1931). The effect of vibration on people. *Forschung Auf Dem Gebiete Des Ingenieurwesens*, 2(11), 381–386.

Scarry, J.M. (2015). Floor Diaphragms and a Truss Method for their Analysis. *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering* 48(1): 41-62.

Segurado, J. E. S. (1942). "Trabalhos de Carpintaria Civil." *Biblioteca de Instrução Profissional*, Livraria Bertrand, Lisboa.

THOMSON W.T. 1993. *Theory of Vibration with Application*. Stanley Thornes. London, UK.

Weckendorf, Jan. 2009. *Dynamic Response of Structural Timber Flooring Systems*. School of Engineering and the Built Environment - Edinburgh Napier University, Edinburgh, Scotland, 2009.