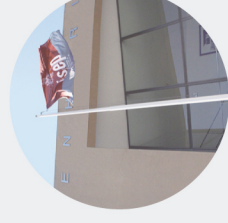




## Reabilitação de Edifícios - Pavimentos Leves

**TIAGO LUÍS GOMES FERREIRA**

Fevereiro de 2017



## Reabilitação de Edifícios - Pavimentos Levs

TIAGO LUÍS GOMES FERREIRA  
Fevereiro de 2017



# Reabilitação de Edifícios

## Pavimentos Leves

Tiago Luís Gomes Ferreira

Dissertação submetida para satisfação parcial dos requisitos do grau de

**Mestre em Engenharia Civil – Ramo de Construções**

Orientador: Duarte Barroso Lopes

Fevereiro de 2017





## **AGRADECIMENTOS**

Antes de mais, gostaria de agradecer a todos os colegas, professores e funcionários que me viram crescer como engenheiro. O vosso apoio e ensinamentos irão me definir ao longo de toda a minha carreira.

Ao meu orientador Engenheiro Duarte Lopes, pela sua dedicação e ensinamentos, pois é nas situações de debate e desacordo onde é possível aprender mais.

Ao Francisco, João, Joana e Filipa, sem vocês este percurso não teria o mesmo significado, obrigado por todos os momentos partilhados.

À minha família pelo apoio incondicional, particularmente aos meus pais, por toda a juventude que me proporcionaram, pelos valores transmitidos e por todos os sacrifícios para que fosse possível concluir este ciclo. Um eterno, obrigado.

À Mafalda, pelo seu apoio, incentivo e compreensão, que me ajudaram sempre a dar um passo em frente.

Por fim, aos meus amigos mais próximos, que me acompanharam ao longo de todo o meu percurso e tornaram o percurso mais fácil.



## RESUMO

Sendo a reabilitação um processo de grande importância na construção civil em Portugal, a escolha dos materiais a utilizar é um parâmetro fulcral devido ao impacto que terá na estrutura pré-existente. Atualmente no mercado existem soluções alternativas ao betão armado, aço enformado a quente ou vigotas pré-esforçadas, tais como a madeira ou o aço enformado a frio. Estes últimos materiais, permitem soluções construtivas leves, com baixo peso específico quando comparadas com as soluções tradicionais.

Neste trabalho, foram inventariadas soluções construtivas leves disponíveis no mercado em Portugal, tendo sido comparado o custo e peso por área com as soluções tradicionais. Adicionalmente, foi estudado o comportamento acústico das soluções construtivas leves através de métodos comuns (lei da massa) e alternativos (método de Sharp e Meisser), assim como uma comparação dos resultados obtidos nos diferentes métodos.

Foi possível identificar que as soluções leves, de madeira e aço, possuem um peso por metro quadrado bastante inferior a qualquer solução tradicional, na ordem dos 20%. No comportamento acústico, não foi possível chegar aos valores de estimativa acústica propostos nos pavimentos em madeira. Todos os autores analisados proponham valores de isolamento acústico bastante altos, valores estes que não se aproximam dos valores estimados. Por outro lado, os valores do isolamento acústico nos pavimentos em LSF foram muito próximos dos propostos.

Os pavimentos leves são a solução mais apropriada para obras de reabilitação, devido ao seu peso por metro quadrado, logo, menor esforço/carga nas paredes resistentes.

### **Palavras-Chaves:**

Pavimentos leves, *Light Steel Frame*, Madeira, Sons Aéreos, Sons de Percussão, Sharp e Meisser



## **ABSTRACT**

Being the rehabilitation a process with a big importance in portuguese civil construction, the choice the ideal materials to be used is a major parameter due to, the impact that would have in the pre-existent construction. Currently, the market has alternative solutions to the concrete, the lightweight precast concrete or the traditional steel joints such as the light steel frame or the wood. These last materials, provide lightweight construction solutions, with a low specific weight when compared with the traditional solutions.

In this document, there had been compiled lightweight constructive solutions available in the Portuguese market, and then compared the price and weight with the traditional solutions. Moreover, it had been studied the acoustic performance of the lightweight solutions through the common methods (law of mass) and the alternatives (Sharp method and Meisser method), and then the obtained results were compared.

It was possible to identify that the lightweight solutions, wood and light steel frame, have a weight per square meter significantly low when compared with any traditional solution (20% of the weight. It was not possible to reach the estimated values suggested for the wood floor. Because all the studied authors proposed sound insulation values very high, values which are not close to the estimated values. On the other hand, the values of the acoustic insulation of the light steel frame floor were very close from the suggested ones.

It was concluded that the lightweight floors are suitable solutions for rehab constructions due to its weight per square meter, which leads to a less effort in the load-bearing walls.

### **Keywords:**

Lightweight floors, Light Steel Frame, Wood, Airborne Sounds, Percussion Sounds, Sharp, Meisser





## Índice Geral

Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	v
Abstract.....	vii
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivos.....	1
1.2 Métodos utilizados.....	1
2 Estado da Arte - Pavimentos Leves.....	3
2.1 Light Steel Frame.....	3
2.1.1 Constituintes.....	4
2.1.2 Construção em LSF.....	16
2.1.3 Pavimentos em LSF.....	21
2.2 Pavimentos em Madeira.....	27
2.2.1 Constituintes.....	27
2.2.2 Constituição dos Pavimentos em Madeira.....	30
2.2.3 Pavimentos de Madeira.....	36
2.3 Acústica de Pavimentos.....	44
2.3.1 Acústica de espaços.....	45
2.3.2 Sons Aéreos.....	48
2.3.3 Sons de Percussão.....	62
2.3.4 Curvas de Referência.....	67
3 Caso de Estudo.....	71
3.1 Pavimentos Leves vs Pavimentos Pesados.....	71
3.2 Comportamento Acústico de Pavimentos.....	73
3.2.1 Soluções Estudadas.....	73
3.2.2 Regulamento Requisitos Acústicos de Edifícios.....	78



4	Resultados.....	80
4.1	Pavimentos Leves Vs Pesados.....	80
4.1.1	Solução em LSF.....	80
4.1.2	Solução em Madeira.....	82
4.1.3	Solução em Betão Armado.....	83
4.1.4	Solução em Vigotas Pré-esforçadas.....	84
4.1.5	Comparação entre Pavimentos.....	85
4.2	Comportamento Acústico dos Pavimentos.....	87
4.2.1	Considerações Finais sobre o Método de Sharp e o Método de Meisser.....	92
5	Conclusões.....	95
6	Bibliografia.....	97

## Índice de Tabelas:

Tabela 2.1 – Perfis C e U mais comuns em LSF (Rego, 2012) .....	6
Tabela 2.2 – Valores de resistência de uma placa OSB/3 em condições húmidas (BS EN 12369-1:2001 - Wood-based panels -Characteristic values for structural design -Part 1: OSB, particleboards and fibreboards, 2001) .....	8
Tabela 2.3 – Valores médios de rigidez de uma placa OSB/3 em condições húmidas (BS EN 12369-1:2001 - Wood-based panels -Characteristic values for structural design -Part 1: OSB, particleboards and fibreboards, 2001) .....	8
Tabela 2.4 – Diferentes espessuras e comprimentos de parafusos (adaptado de Rodrigues, 2006)) .....	10
Tabela 2.5 Vãos máximos (em mm) de vigas simples (adaptado de Rodrigues, 2006) .....	22
Tabela 2.6 Vãos máximos (em mm) de vigas contínuas (adaptado de Rodrigues, 2006) .....	23
Tabela 2.7 – Valores de tensão de rotura de alguns materiais (Adaptado de Pinho, 2005) .....	29
Tabela 2.8 – Valores característicos da madeira de classe C16 (BS EN 338:2009 Structural timber - Strength classes, 2009) .....	36
Tabela 2.9 – Vãos máximos de um pavimento composto por madeira de classe C16 (Adaptado de (BSW Timber Group, n.d.) .....	37
Tabela 2.10 – Valores características de resistência e rigidez para vigas compostas de madeira, BCI Joints (AA.VV., 2013) .....	39
Tabela 2.11 – Vãos máximos para vigas compostas de madeira, BCI Joints (AA.VV., 2013) .....	40
Tabela 2.12 -Espectro de ruído rosa vs espectro de ruído de tráfego urbano (Patricio, 2002) .....	50
Tabela 2.13 – Valores corretivos devido às transmissões marginais (Patricio, 2002) .....	51
Tabela 2.14 – Velocidade de propagação do som em vários materiais/elementos (Sampaio, 2016) .....	55
Tabela 2.15 – Valores de K para o método de Meisser (Sampaio, 2016) .....	60
Tabela 2.16 – Exemplos de valores de redução do som de percussão (Sampaio 2016) .....	64
Tabela 2.17 – Determinação do valor de correção para as transmissões marginais (Silva, 2015) .....	66
Tabela 2.18 – Comparação STC com $R_w$ , (Desart, 2002) .....	70
Tabela 3.1 – Constituição e Peso de PLSF1 .....	73

Tabela 3.2 – Constituição e Peso de PLSF2 .....	74
Tabela 3.3 – Constituição e Peso de PLSF3 .....	74
Tabela 3.4 – Constituição e Peso de PLSF4 .....	75
Tabela 3.5 – Constituição e Peso de PLSF-A.....	75
Tabela 3.6 – Constituição e Peso de PLSF-B.....	75
Tabela 3.7 – Constituição e Peso de PM1 .....	76
Tabela 3.8 – Constituição e Peso de PM2 .....	76
Tabela 3.9 – Constituição e Peso de PM3 .....	77
Tabela 3.10 – Constituição e Peso de PM4 .....	77
Tabela 3.11 – Constituição e Peso de PM-A.....	77
Tabela 4.1 – Materiais usados no pavimento de LSF .....	81
Tabela 4.2 – Materiais usados no pavimento de madeira maciça classe C16 .....	83
Tabela 4.3 – Valores parciais do pavimento de betão armado.....	84
Tabela 4.4 – Características do Piso P2-BL23x21-24 proposto pela Presdouro (anexo 5).....	85
Tabela 4.5 – Quantidades totais para pavimentos em vigotas .....	85
Tabela 4.6 – Comparação pavimentos leves com pavimentos pesados.....	86
Tabela 4.7 – Comparação de resultados de isolamento acústico para pavimentos em LSF.....	87
Tabela 4.8 – Comparação de resultados de isolamento acústico para pavimentos em Madeira .....	89
Tabela 4.9 – Comparação de resultados de isolamento acústico para outros pavimentos em Madeira..	90
Tabela 4.10 – Comparação de resultados de isolamento acústico para outros pavimentos .....	91
Tabela 4.11 – Comparação do isolamento acústico quando variam os valores de $C_L$ e $\eta$ .....	92

## Índice de Figuras

Figura 2.1 – Tipos de perfis em aço enformado a frio (Rego, 2012) .....	5
Figura 2.2 –Dimensões de LSF (Fonte: Futureng.pt) .....	5
Figura 2.3 – Ligação do pavimento de LSF com frechal de madeira em parede (AA.VV., 1997) .....	10
Figura 2.4 – Ligação pavimento de LSF com frechal de pedra (AA.VV., 1997).....	11
Figura 2.5 – Ligação pavimento de LSF a uma outra estrutura em aço leve(Anónimos, 1997).....	11
Figura 2.6 – Alçado de uma estrutura - In line framing (Rego, 2012) .....	12
Figura 2.7 – Ligação entre viga perimetral e vigamento (Anónimos, 1997) .....	13
Figura 2.8 – Reforço de vigamento de LSF (AA.VV., 1997).....	13
Figura 2.9 – Pormenores de perfis compostos (Rego, 2012) .....	14
Figura 2.10 – Piso seco em LSF (Rodrigues, 2006).....	15
Figura 2.11 – Pavimento húmido com vigas C (Moreira, 2012) .....	15
Figura 2.12 – Pavimento húmido com chapa perfilada (Moreira, 2012) .....	15
Figura 2.13 – Montagem de painéis em obra (Fonte: Fututreng.pt, Portfólio, Moradia Margaride, Visitado em 7.17.2016) .....	17
Figura 2.14 – Montagem de painéis (Fonte: Futureng.pt, Portfólio, Moradia Algoz, Visitado em 7.17.2016) .....	18
Figura 2.15 – Montagem da estrutura em fábrica (Fonte: Futureng.pt, Construção modular, Visitado em 28.10.2016) .....	19
Figura 2.16 – Terminologia dos elementos de um edificio em LSF (Fonte: Futureng.pt) .....	20
Figura 2.17 - Representação do piso seco em LSF (Rodrigues, 2006) .....	21
Figura 2.18 – Pavimento em LSF (PLSF1) (SCI, 2003).....	24
Figura 2.19 – Pavimento em LSF (PLSF2) (SCI, 2003).....	25
Figura 2.20 – Pavimento em LSF (PLSF3) (SCI, 2003).....	26
Figura 2.21 – Pavimento em LSF (PLSF4) (SCI, 2003).....	27
Figura 2.22 – Efeito de esforços de flexão (Oliveira, 2013).....	30

Figura 2.23 – Pavimento de madeira mais comum nos edifícios tradicionais portugueses (Oliveira, 2013)	31
Figura 2.24 – Ferrolhos de ligação (Oliveira, 2013)	33
Figura 2.25 – Tipos de suporte de frechais (Oliveira, 2013)	34
Figura 2.26 – Tarugamento Simples (Oliveira, 2013)	35
Figura 2.27 – Tarugamento de cruzeta (Oliveira, 2013)	35
Figura 2.28 – Tarugamento entalonado (Oliveira, 2013)	36
Figura 2.29 – BCI Joints (AA.VV., 2013)	38
Figura 2.30 – Pavimento de Madeira (PM1) (AA.VV., 2002)	41
Figura 2.31 – Pavimento de Madeira (PM2) (AA.VV., 2002)	42
Figura 2.32 – Pavimento de Madeira (PM3) (AA.VV., 2002)	43
Figura 2.33 – Pavimento de Madeira (PM4) (AA.VV., 2002)	44
Figura 2.34 – Redução sonora em função da frequência relativa, (Patricio, 2002)	52
Figura 2.35 – Redução de transmissão sonora em função da massa superficial (Patricio, 2002)	53
Figura 2.36 – Ábaco para determinar acréscimo de isolamento sonoro em elementos duplos (Patricio, 2002)	54
Figura 2.37 – Método de Sharp para elementos Simples (Sampaio, 2016)	56
Figura 2.38 – Comparação de valores entre Lei da Massa, método de Sharp em elementos finos e grossos (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980)	57
Figura 2.39 – Comparação de uma parede dupla com material absorvente ou não. Os elementos de construção são MDF com 0,64 e 0,32 com um espaçamento de 16cm (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980)	59
Figura 2.40 – Representação dos pontos para método de Meisser (Sampaio, 2016)	61
Figura 2.41 – Método de Meisser (Sampaio, 2016)	62
Figura 2.42 – Gráfico para calculo de $\Delta L_w$ (Silva, 2015)	65
Figura 2.43 – Curva de referência proposta por EN 717-1 para sons aéreos, adaptado de (Samoylenko & Didkovskiy, 2013)	68

Figura 2.44 – Curva de referência proposta por EN 717-1 para sons de percussão (Patricio, 2002).....	69
Figura 3.1 - Planta do pavimento a estudar .....	72
Figura 3.2 – Cachorro de Pedra ( Fonte: Wikipedia, Cachorro (Arquitetura)).....	72
Figura 4.1 - Pavimento P2-BL23x21-24, proposto por Presdouro (anexo 5).....	84

# **1 INTRODUÇÃO**

## **1.1 OBJETIVOS**

Os objetivos deste trabalho agrupam-se em três temas: a pesquisa de soluções de pavimentos leves, a comparação entre soluções construtivas tradicionais e leves e o estudo de métodos de estimativa de desempenho acústico.

Quanto ao primeiro ponto foram apuradas soluções de pavimentos em aço enformado a frio e em madeira, estudadas as suas características e métodos de dimensionamento, onde foi dada maior relevância a tabelas de pré-dimensionamento para dar um contexto prático. Como base para o segundo ponto foram levantadas soluções de pavimentos, com os respectivos revestimentos.

No segundo ponto, que está ligado com o terceiro ponto, irão ser comparadas soluções leves com as tradicionais relativamente ao custo e peso da estrutura, que depois se relaciona com a exequibilidade da solução.

Por fim, foram estudados os métodos de estimativa de desempenho acústico e de que forma estes se aproximam ou não com os dados defendidos ao longo do primeiro capítulo.

## **1.2 MÉTODOS UTILIZADOS**

Para atingir os objetivos propostos foram estudadas publicações, estudos e dissertações encaradas de uma forma crítica. Irá ser dada preferência a documentos de autores com alguma relevância na engenharia civil.

O trabalho tenta apresentar um sentido prático, que consiga ser interpretado não apenas por engenheiros, mas por qualquer trabalhador de construção civil e permita ter uma “noção” do quê que é pavimento leve e o que é necessário, sem ser preciso elaborar um projeto estrutural. Para atingir este

## *Introdução*

objectivo secundário, sempre que possível serão apresentadas tabelas de pré-dimensionamento e soluções construtivas padronizadas.

Por fim, relativamente aos métodos de estimativa de desempenho acústico, sempre que possível, irão ser transcritos os métodos originais propostos pelos autores do mesmo, salientando as respetivas correções, de forma a não permitir diferentes interpretações do mesmo método.



## 2 ESTADO DA ARTE - PAVIMENTOS LEVES

Considera-se um pavimento leve a estrutura que suporta uma laje de piso que não é constituída por betão armado ou vigotas pré-esforçadas.

Considera-se um pavimento, laje ou piso, qualquer estrutura útil, que separa dois espaços planos horizontais e permita a utilização sobre a mesma. Na era pombalina os pavimentos eram constituídos por vigamentos de madeira reforçadas por tarugos. A partir do século XX começaram a ser utilizados diferentes materiais, tais como o betão armado e mais tarde as vigotas pré-esforçadas e os perfis metálicos enformados a quente.

Por uma estrutura leve são aceitas maioritariamente duas definições: composta por um material leve possui um peso específico reduzido, inferior a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , ou por um elemento que devido a sua baixa espessura, garante um peso reduzido à solução estruturada. A madeira enquadra-se na primeira definição, com um peso específico na ordem dos  $700 \text{ kg/m}^3$ . Os perfis enformados a frio, por sua vez, enquadram-se na segunda definição. Apesar de não se considerar o aço um material leve, devido a que, no Lsf, são usados como vigamentos perfis de aço de baixa espessura, é formada uma solução construtiva com um baixo peso por metro quadrado.

Neste capítulo irão ser abordados dois tipos de pavimentos leves, de madeira e de perfis enformados a frio. Irá ser demonstrada o processo construtivo de cada uma das soluções assim como algumas soluções construtivas e respetivas características e desempenho.

### 2.1 LIGHT STEEL FRAME

*Light Steel Frame* (LSF) ou *light steel framing* é um método construtivo usado para edifícios de pouca volumetria, que usa perfis enformados a frio de chapa galvanizada com baixa espessura para obter um esqueleto estrutural. É um tipo de construção considerado sustentável devido ao baixo número de desperdícios produzido, ao material é 100% reciclável e o sistema de fixação é normalmente através de fixação mecânica. Todos estes fatores contribuem para que o consumo de água seja praticamente nulo.

Os perfis enformados a frio em contraste com os enformados a quente (elementos produzidos geralmente através de extrusão em moldes) são perfis de baixa espessura cuja geometria se obtém com processos de corte e quinagem (dobragem) à temperatura ambiente.

Em termos geométricos a secção de corte ou dobra é sempre reta e são as suas dimensões que caracterizam morfologicamente o perfil. Podem ainda ser incorporadas dobras suplementares, como no caso dos C ou Ue, nas extremidades denominadas rigificadores (*stiffners*), que têm como função melhorar o comportamento mecânico. (Moreira, 2012).

## **2.1.1 Constituintes**

### **2.1.1.1 Perfis enformados a frio**

Os perfis de Isf são obtidos através de chapa galvanizada de S280 ou S350 e possuem características físicas e mecânicas que cumprem o previsto no Eurocódigo III, parte 1-3. A galvanização, necessária para proteger os perfis da corrosão, é aplicada ainda antes de os perfis serem cortados ou dobrados, através da imersão da chapa de ferro em banho quente (galvanização a quente) de zinco ou zinco-alumínio. Apesar de que os padrões referidos em *Prescriptive Method for Residential Cold-Formed Steel Framing* apenas exija a galvanização Z250, 275 mg de zinco por metro quadrado, em situação adversas, está é a que é geralmente aplicada (AA.VV., 2009a).

A geometria das secções pode variar entre secções simples (*single open sections*) e secções compostas abertas ou fechadas (*open/close built-up sections*), conforme ilustrado na Figura 2.1.

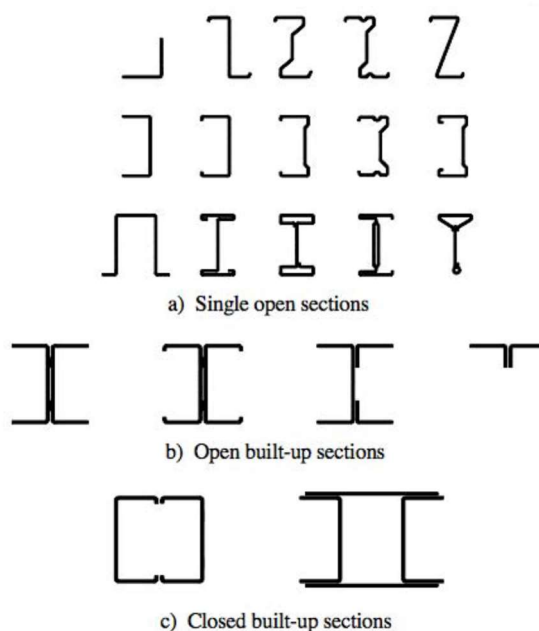


Figura 2.1 – Tipos de perfis em aço formado a frio (Rego, 2012)

Existem secções, que pela sua facilidade de processo de fabrico e integração com a construção e arquitetura, são mais usais. Por exemplo, perfis com a forma de U simples, são usado como bloqueadores e guias enquanto que o U enrijecido (C ou Ue) é usado para reforço da alma, montantes, vigas, vergas e ombreiras, constituindo o perfil mais vulgar de uma estrutura LSF (Rego, 2012).

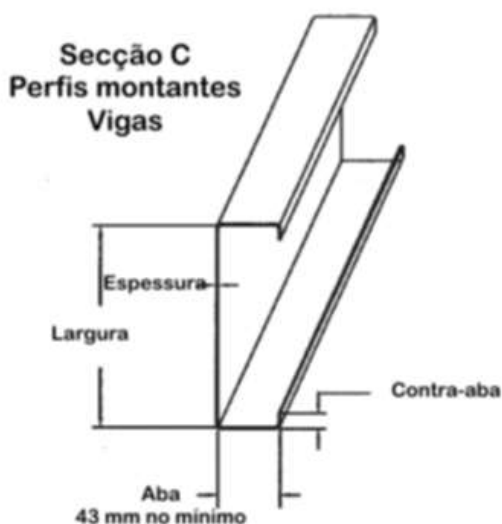


Figura 2.2 –Dimensões de LSF (Fonte: Futureng.pt)

Tipo	Altura ( $b_w$ )	Aba ( $b_f$ )	Espessura ( $t_n$ )	Contra-aba (D)
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
C ou Eu	90	43	1,5	15
	150		1,5	
	200		2	
	250		2,5	
U	93		1,5	-
	153		1,5	
	204		2	
	255		2,5	

Tabela 2.1 – Perfis C e U mais comuns em LSF (Rego, 2012)

De uma forma geral usam-se perfis C90 e C150 para as paredes interiores e exteriores, respetivamente. Relativamente ao vigeamento é usado uma viga com uma secção maior, normalmente entre 200 e 250 mm. As espessuras mais usuais, conforme demonstrado na Tabela 2.1, variam entre 1,5 e 2,5 mm, apesar de ser possível encontrar perfis com espessura inferior ( $\approx 1\text{mm}$ ) ou superior (3 ou 3,5 mm). A escolha da secção e da espessura depende do carregamento a que o elemento está sujeito.

Ao longo deste documento serão apresentadas tabelas de pré-dimensionamento que permitem analisar essa relação.

### 2.1.1.2 OSB – Placas de partículas orientadas

As placas de partículas orientadas designadas pela abreviatura anglo-saxónica OSB (*Oriented Strand Board*) são comercializadas em várias dimensões e espessuras e tem uma função estrutural de suporte de carga. Estas placas são produzidas a partir de partículas de madeira obtidas de árvores de crescimento rápido, maioritariamente de pinho marítimo. Estas partículas têm dimensões medias de 1 a 2,5 mm de espessura sendo depois aglomeradas sob calor e pressão usando resinas e produtos químicos que tornam a madeira completamente inerte e resistente à água. Alguns fabricantes adicionam produtos químicos que lhes conferem um efeito retardador ao fogo (AA.VV., 2009a). “O que diferencia este tipo de produtos dos aglomerados de partículas tradicionais (contraplacado) é o facto de na sua fabricação não serem inseridas partículas de dimensão muito reduzida (serradura)” (Moreira, 2012).

Relativamente à categorização do OSB existem várias formas de o fazer, enquanto que as normas americanas (PS2-92) e canadiana (CSA standard 0325.0.) o classificam quanto à finalidade (F-floor, R-roof e W-wall, para pisos, tetos ou paredes, respetivamente), tipo (1 ao 3) e classe (A, B e C) a norma europeia EN 300 classifica segundo condições higrométricas e classes resistentes, cada uma indicada para certos tipos de utilização e condições, existindo 4 categorias:

- OSB/1 - Painéis comuns para utilização interior e em condições secas;
- OSB/2 - Painéis para suporte de carga e utilização em condições secas;
- OSB/3 - Painéis para suporte de carga e utilização em condições húmidas;
- OSB/4 - Painéis de elevada resistência para suporte de carga e utilização em condições húmidas.

As condições higrométricas são definidas pelo Eurocódigo 5-1-1. Aqui é considerado como classe de serviço 1 ou como condições secas, quando à temperatura ambiente, a humidade relativa é superior a 65% apenas algumas semanas por ano, sendo que a humidade média da madeira nunca é superior a 12%. Por sua vez considera-se como classe de serviço 2 ou condições húmidas, quando à temperatura ambiente de 20°C a humidade relativa apenas vai exceder os 85% algumas semanas por ano, sendo que a humidade média da madeira não excede os 20%. É ainda considerada uma classe 3, quando as condições são mais húmidas que na classe 2.

As classes utilizadas na construção LSF são a OSB/3 e a OSB/4 com espessuras mínimas de 11 cm nas paredes e cobertura e de 18 mm para os pavimentos. Apesar disso conforme as exigências da aplicação, as espessuras das placas podem variar desde os 6mm até aos 22mm (Moreira, 2012).

Nas tabelas seguintes (Tabela 2.2 e Tabela 2.3) encontram-se os valores de resistência e de rigidez, respetivamente, de uma placa de OSB/3, placa para suporte de carga, utilizada em condições húmidas.

		Valores de Resistência (MPa)							
Espessura (mm)	Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	Flexão paralela	Flexão Perpendicular	Tração Paralela	Tração Perpendicular	Compressão Paralela	Compressão Perpendicular	Corte Transversal	Corte Longitudinal
t <sub>nom</sub>	ρ	f <sub>m,0</sub>	f <sub>m,90</sub>	f <sub>t,0</sub>	f <sub>t,90</sub>	f <sub>c,0</sub>	f <sub>c,0</sub>	f <sub>v</sub>	f <sub>r</sub>
>6 a 10	550	18,0	9,0	9,9	7,2	15,9	12,9	6,8	1,0
>10 a 18	550	16,4	8,2	9,4	7,0	15,4	12,7	6,8	1,0
>18 a 25	550	14,8	7,4	9,0	6,8	14,8	12,4	6,8	1,0

Tabela 2.2 – Valores de resistência de uma placa OSB/3 em condições húmidas (BS EN 12369-1:2001 - Wood-based panels -Characteristic values for structural design -Part 1: OSB, particleboards and fibreboards, 2001)

		Valores médio de rigidez (GPa)						
Espessura (mm)	Flexão paralela	Flexão Perpendicular	Tração Paralela	Tração Perpendicular	Compressão Paralela	Compressão Perpendicular	Corte Transversal	Corte Longitudinal
t <sub>nom</sub>	E <sub>m,0</sub>	E <sub>m,90</sub>	E <sub>t,0</sub>	E <sub>t,90</sub>	E <sub>c,0</sub>	E <sub>c,0</sub>	G <sub>v</sub>	G <sub>r</sub>
>6 a 25	4,93	1,98	3,80	3,00	3,80	3,00	1,08	0,05

Tabela 2.3 – Valores médios de rigidez de uma placa OSB/3 em condições húmidas (BS EN 12369-1:2001 - Wood-based panels -Characteristic values for structural design -Part 1: OSB, particleboards and fibreboards, 2001)

### 2.1.1.3 Revestimento não-estrutural interior

De forma a garantir certas exigências funcionais do pavimento tais como resistência ao fogo, resistência térmica ou índice de redução acústica é necessário adicionar diferentes materiais ao pavimento.

Por exemplo, para garantir que o pavimento resiste ao fogo é adicionado, uma placa de gesso cartonado (comercialmente conhecido por pladur). Geralmente cada placa de 12 mm oferece uma resistência ao

fogo de 30 minutos, sendo a duração da resistência ao fogo proporcional à espessura das placas. Com duas placas de 12 mm obtém-se uma resistência de 60 minutos, necessário para pavimentos estruturais.

As placas de gesso cartonado funcionam como revestimento inferior de tetos, preso diretamente ao vigamento (tetos semirectos) ou através de uma estrutura secundária (tetos suspensos), normalmente composta por perfis ômega. O gesso cartonado possui resistência suficiente para que seja possível suportar elementos de pequena massa (por exemplo um candeeiro).

Relativamente ao isolamento acústico, pode-se utilizar placas de OSB ou de gesso cartonado como elementos de descontinuidade entre elementos e reduzindo assim as transmissões de vibrações, ao funcionar como uma membrana ressonante (2.3.1.2). É ainda utilizada uma manta de lã mineral, colocados entre o vigamento, com um peso específico que varia entre os 10 e 30 kg/m<sup>3</sup> que funciona como um material texturado (definição abordada em 452.3.1.1).

#### **2.1.1.4 Sistemas de fixação**

O sistema de fixação no sistema *Light Steel Framing* é um dos fatores mais importantes deste tipo de construção, não tanto, pelo tipo de ligação usado, mas sim, pelo espaçamento e disposição dos parafusos, pois considerando que se tratam de perfis de baixa espessura, se por algum motivo a fixação for mal dimensionada, pode ocorrer empenamento do perfil.

Apesar de ser possível o uso da soldadura não é aconselhável uma vez que degrada o recobrimento de zinco. Caso a ligação seja soldada é necessário aplicar nessa zona uma pintura rica em zinco. Os inconvenientes deste tipo de ligações são que além de que também é ser necessário mão-de-obra especializada e não é aconselhável soldar sobre peças zincadas. Com a ligação através de parafusos preserva-se a uniformidade, integridade e qualidade estrutural das peças.

Outro sistema de fixação usado são as buchas metálicas, usadas quando é necessário ligar os perfis a um elemento de betão. Podem usar-se buchas MTA ou CH (ou EKA). No caso das buchas MTA é necessária uma porca de aperto do lado do perfil. Em qualquer das duas hipóteses é necessário *à priori* fazer a furação no perfil (Rodrigues, 2006).

A fixação mais usada no LSF são os parafusos auto roscante (que abrem o seu próprio ofício e não necessitam de porca) de aço galvanizado ou inox, que devido a não ser necessário tanto rigor na ligação entre perfis (não ocorre a sobreposição de furos) facilitam a furação e montagem. Este tipo de ligação funciona tanto para as ligações entre perfis como entre os restantes revestimentos da estrutura, como o OSB ou o gesso laminado (Rodrigues, 2006).

O diâmetro e comprimento das ligações podem ter várias medidas, conforme demonstrado na Tabela 2.4, sendo a mais comum a bitola 8, com 4,2mm de diâmetro e 13mm de comprimento.

Bitola	Diâmetro (mm)	Comprimento (mm)
#8	4,2	12,7 a 25,4
#10	4,8	12,7 a 38,1
#12	5,5	12,7 a 38,1

Tabela 2.4 – Diferentes espessuras e comprimentos de parafusos (adaptado de Rodrigues, 2006))

A cabeça do parafuso mais usual é a cabeça sextavada ou a cabeça chata apesar de não haver qualquer tipo de regulamentação que defenda o uso de um tipo de cabeça em especial.

Relativamente à fixação entre elementos o *Prescriptive Method Cold Formed* propõe diferentes fixações dependentes do material, de como são exemplos as figuras seguintes.

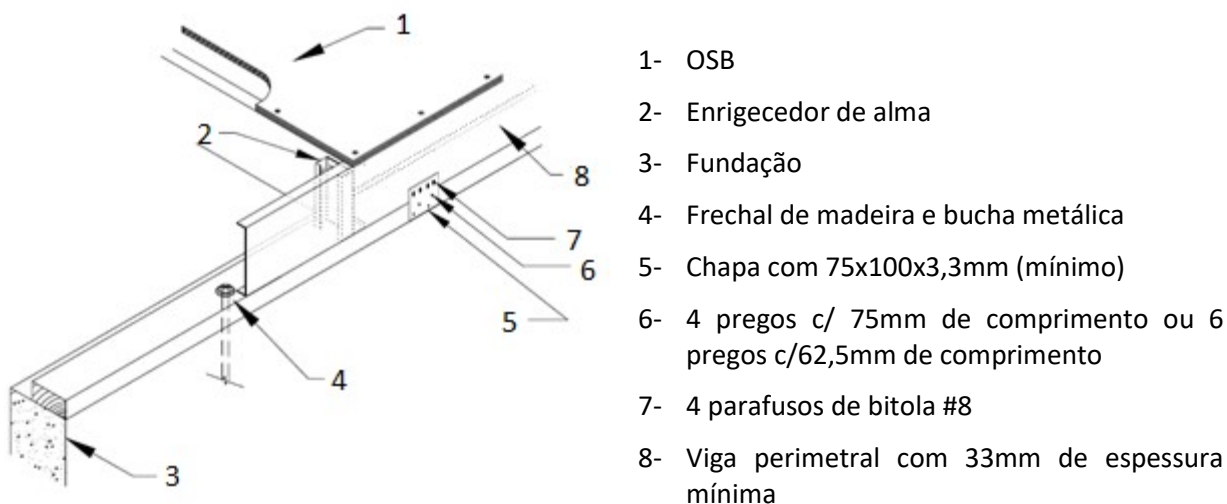


Figura 2.3 – Ligação do pavimento de LSF com frechal de madeira em parede (AA.VV., 1997)



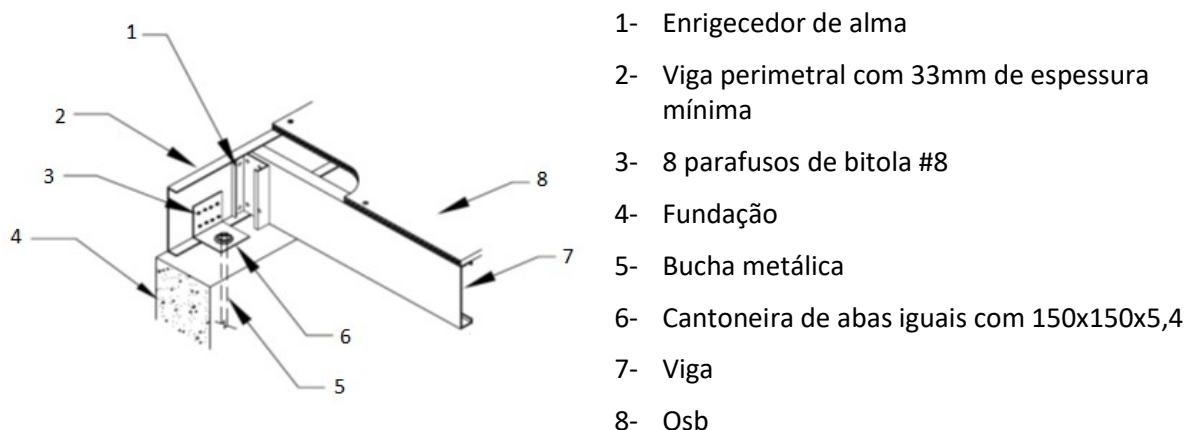


Figura 2.4 – Ligação pavimento de LSF com frechal de pedra (AA.VV., 1997)

Relativamente ao espaçamento entre parafusos, nos montantes, que na generalidade dos casos são perfis complexos (junção de vários perfis), varia de acordo com as cargas a que estão sujeitos. O *Prescriptive Method Cold Formed* propõe espaçamentos mínimos, mas não será abordado pois não se enquadra no tema.

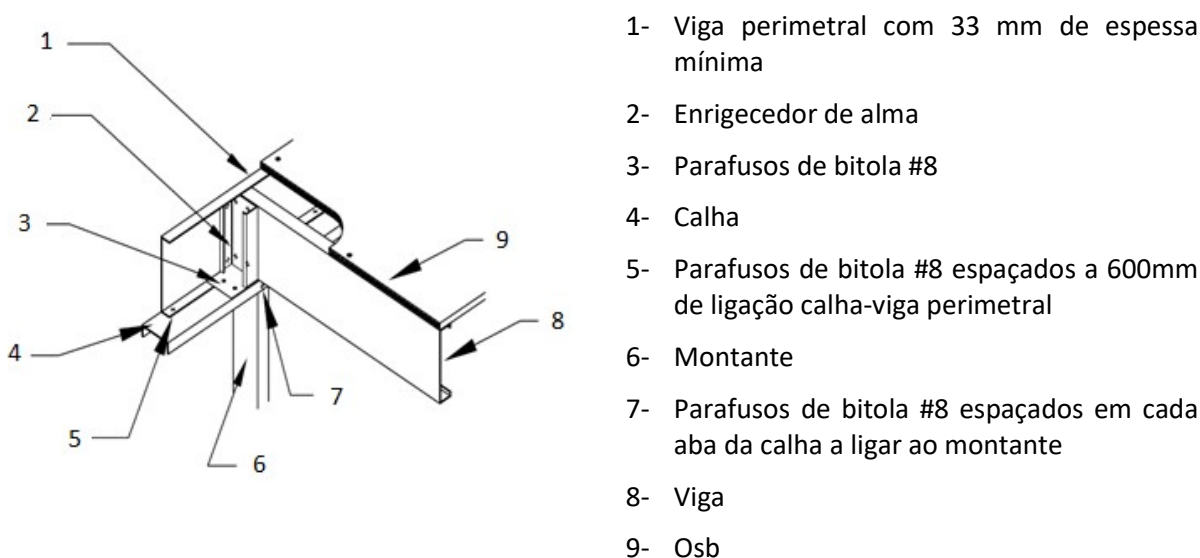


Figura 2.5 – Ligação pavimento de LSF a uma outra estrutura em aço leve (Anónimos, 1997)

Para qualquer das situações apresentadas anteriormente o *Prescriptive Method Cold Formed* define o número de parafusos e a disposição destes, conforme apresentados anteriormente. Estão ainda descritas outras situações na norma, mas não irão ser abordadas pois não se enquadram no tema (abordam situações a meio vão ou em consola).

### 2.1.1.5 Características do Pavimento

A utilização de LSF em zonas urbanas, particularmente no centro histórico é aconselhável devido ao seu baixo peso, o que facilita o transporte, elevação e estrutura de apoio.

O LSF mostra ser especialmente vantajoso na substituição de pisos em madeira, pavimentos mais usuais na construção tradicional portuguesa. Devido ao seu baixo peso, na generalidade das situações, elimina a necessidade de reforçar a estrutura do edifício, sendo que em algumas situações é a única alternativa possível e ainda melhora o desempenho da estrutura perante um terramoto (Futureng, 2016).

É importante respeitar o conceito de estrutura alinhada, *in line framing*, que consiste em alinhar as almas das vigas com as almas dos montantes, como ilustrado na Figura 2.6. Por esta razão o espaçamento adotado entre os perfis, sempre que possível deve ser constante em toda a estrutura (Rego, 2012) .

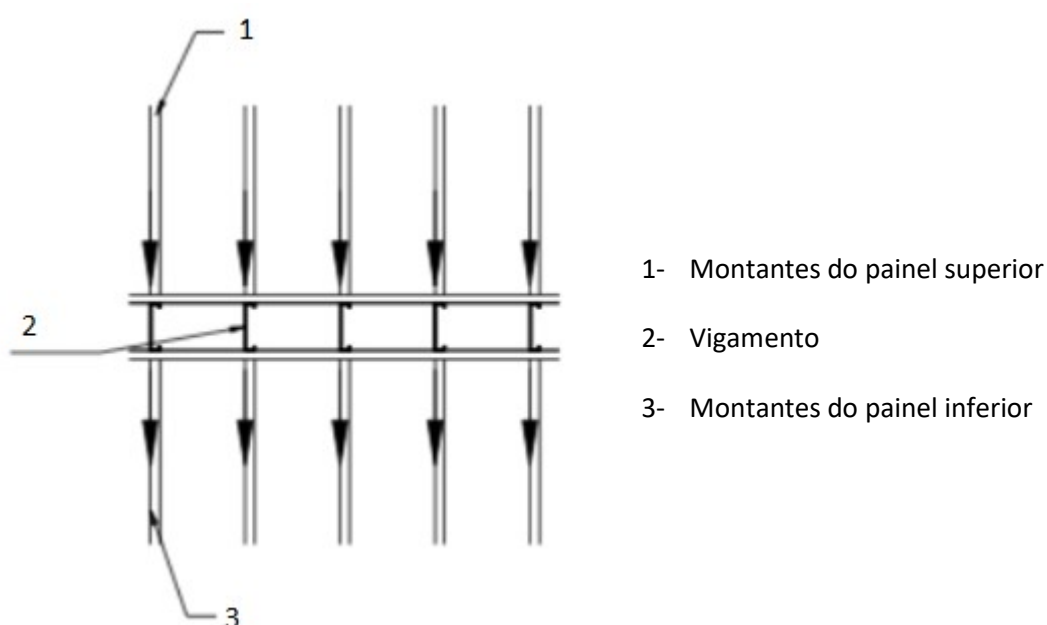


Figura 2.6 – Alçado de uma estrutura - *In line framing* (Rego, 2012)

As lajes de pavimento são normalmente compostas por elementos com altura de alma compreendida entre 150 e 300 mm e espessura entre 1,5 e 3 mm dependendo da envergadura do vão, do espaçamento dos perfis, da constituição do pavimento e das suas cargas.

A sua execução inicia-se pela fixação de perfis-guia perimetrais com recurso a secções em U (Moreira, 2012). São depois fixadas as vigas, normalmente perfis U ou Ue.

As ligações entre perfis são articuladas, com uma cantoneira ou com perfis C como esquadros de fixação como ilustrados na figura seguinte:

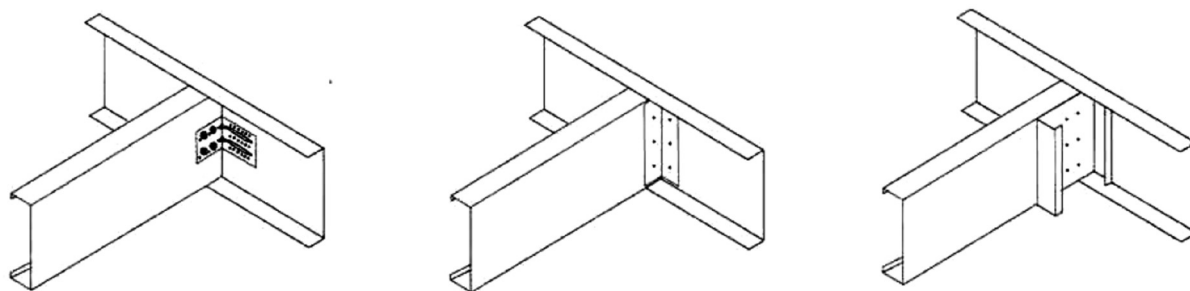
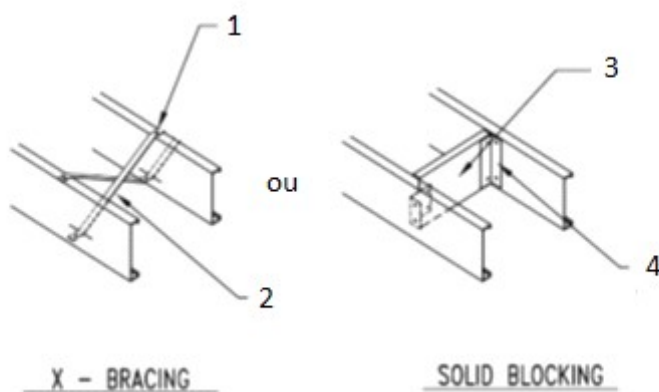


Figura 2.7 – Ligação entre viga perimetral e vigamento (Anónimos, 1997)

Poderão ainda ser usados reforços da alma em algumas situações, pois ao apoiar os montantes nas extremidades do piso, com a carga associada a estes a viga pode empenar. Estes reforços podem ser obtidos com o uso de um perfil de igual dimensão do vigamento ou com o uso de fitas de aço. Estas fitas com pelo menos 38mm de largura e 0,95mm de espessura são colocadas perpendicularmente ao vigamento sobre e sob este, unindo todos os perfis e travando-os lateralmente



- 1- Parafuso de bitola #8 em cada aba
- 2- Fitas de aço em X com 20mm de largura e 33mm de espessura
- 3- Perfil com 33mm de espessura, U ou Ue.
- 4- Cantoneira de abas iguais com 50x50x33 fixada através de 2 parafusos de bitola #8 em cada aba.

Figura 2.8 – Reforço de vigamento de LSF (AA.VV., 1997)

As vigas entre pisos podem ser consideradas como simplesmente apoiadas ou como contínuas. Nesta análise deve ser pensado todo o processo de construção: caso se opte pela opção simplesmente apoiada, os painéis de piso podem vir montadas de fabrica e depois encaixados na obra); por outro lado, caso se considere como contínua, devido ao menor momento positivo que esta solução apresenta, diminui-se a secção do perfil, reduzindo assim substancialmente o consumo de aço. Para impedir a encurvadura lateral

dos perfis devem ser travados lateralmente através de bloqueadores em perfis Ue ou U geralmente com as mesmas dimensões que o vigamento ou com fitas de aço galvanizado, perpendicularmente ao vigamento. Estes reforços devem estar conectados com a mesma ligação que é feita perfil-perfil e devem estar localizados a 1/3 do vão ou a meio do mesmo (Rodrigues, 2006) .

Poderão ser ainda usadas, para evitar o excessivo tamanho do perfil, em vez das vigas comuns U, Ue ou Z, para evitar o excessivo tamanho do perfil, usar vigas compostas, que são vigas que utilizam dois ou mais perfis unidos por parafusos para formar um perfil. No cálculo destes perfis considera-se que estes perfis funcionam como um só reduzindo bastante a encurvadura (Rego, 2012).

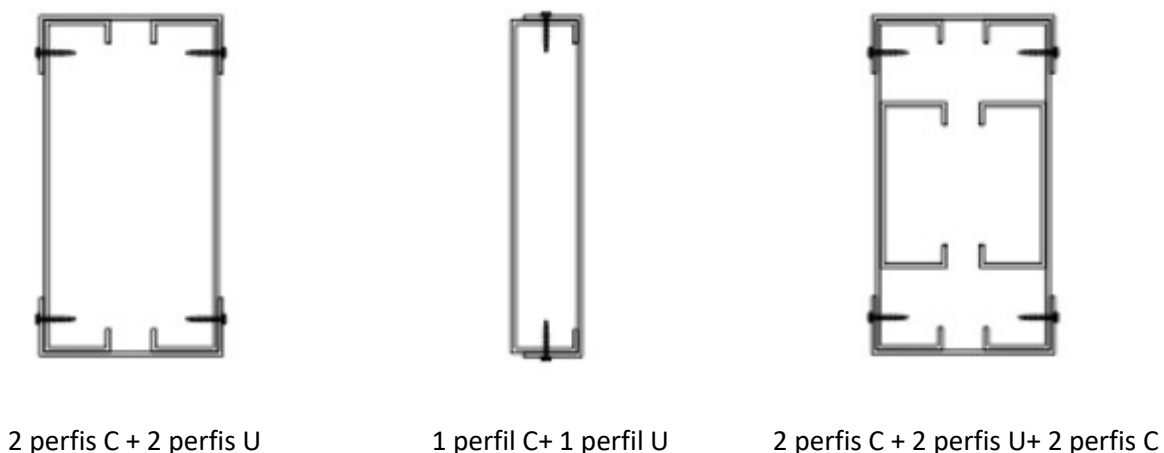


Figura 2.9 – Pormenores de perfis compostos (Rego, 2012)

Após a montagem do vigamento pode criar-se o plano de pavimento através de duas soluções, piso seco ou piso húmido. A primeira, chamada de piso seco (Figura 2.10), consiste na fixação de painéis de revestimento estrutural, OSB/3 ou OSB/4 com uma espessura superior a 18mm. Sobre este piso pode ser usado o material que se pretender de forma aumentar as características desejadas. Sob as vigas, coloca-se, com o auxílio de outros perfis ou aparafusado diretamente ao perfil, o revestimento. Na figura seguinte está exemplificada uma opção de piso seco, com o auxílio de um perfil ómega para apoiar o revestimento do teto e assim diminuindo a transmissão de vibração aos outros elementos (Moreira, 2012) .

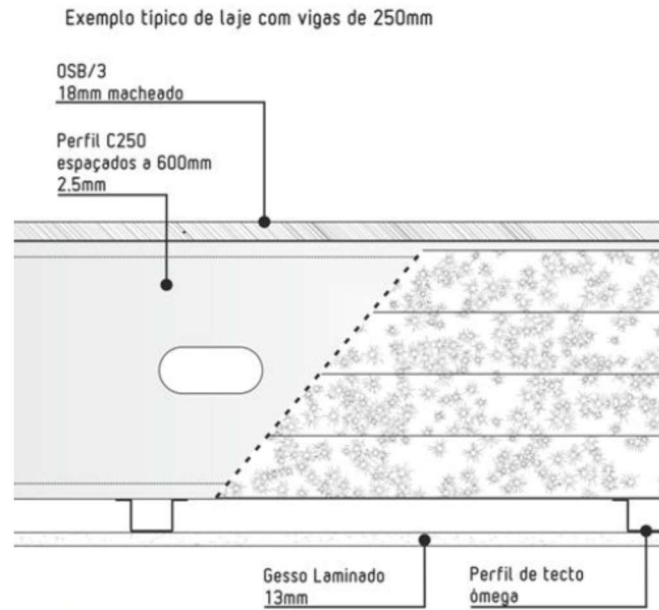


Figura 2.10 – Piso seco em LSF (Rodrigues, 2006)

A segunda opção para pavimentos intitulada piso húmido (Figura 2.11 e Figura 2.12), consiste no uso de uma laje mista ou laje colaborante, que é constituída por uma chapa enformada a frio perfilada e à qual se aplica uma lâmina de compressão de betão com cerca de 40mm, aumentando consideravelmente o peso específico do piso. Nesta situação é aconselhável ter atenção ao seu peso em reabilitação de edifícios. A chapa perfilada tem várias funções em simultâneo: serve como base de trabalho, cofragem, resiste aos esforços de flexão e dispensa o uso de tarugos para o contraventamento (Moreira, 2012). Na figura seguinte está exemplificado uma tipologia de piso húmido.

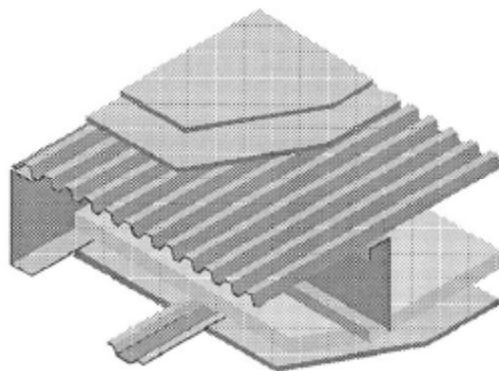


Figura 2.11 – Pavimento húmido com vigas C (Moreira, 2012)

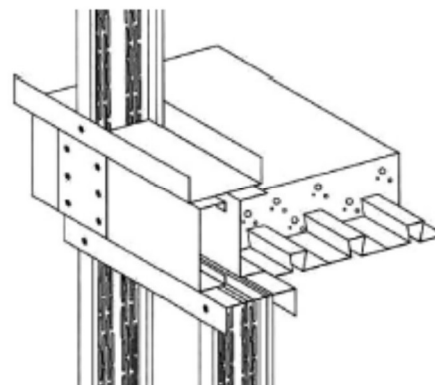


Figura 2.12 – Pavimento húmido com chapa perfilada (Moreira, 2012)

### 2.1.2 Construção em LSF

Antes de ser apresentado o esquema estrutural dos pavimentos é necessário perceber como é que o sistema LSF é construído.

O princípio base do sistema LSF é dividir a estrutura numa grande quantidade de elementos estruturais, fazendo com que cada um resista a uma pequena parcela da carga total aplicada. Para isso existem três métodos básicos de construção em LSF:

- Construção tradicional (*Stick-built*)
- Construção em painéis (*panelized*)
- Construção modular

#### 2.1.2.1 Construção *Stick-Built*

Este é o método de construção mais usual do mundo, tanto no sistema LSF como em qualquer outro. Consiste na montagem dos elementos estruturais no local e corresponde ao nível mínimo de pré-fabricação. Neste método os perfis são montados e aparafusados no chão e só depois erguidos na posição final. Depois de erguidos são colocados os restantes revestimentos interiores e exteriores.

Este tipo de construção apresenta algumas vantagens em relação às restantes: as tolerâncias construtivas são maiores, pois é possível fazer os ajustes na montagem dos perfis em obra, e não é necessária maquinaria pesada para levantamento dos elementos, pois como são construídos um a um, o seu peso nunca é muito elevado e o transporte para o estaleiro é sempre feito de forma mais eficiente.

Apesar disso, apresentam sempre a desvantagem de ter um grau reduzido de pré-fabricação, sendo necessário um estaleiro de obra com uma grande área para acomodar os elementos, maquinaria leve para o corte e aparafusamento dos perfis e o tempo em obra é muito mais elevado pois a construção é feita maioritariamente em estaleiro de obra (Rego, 2012).



Figura 2.13 – Montagem de painéis em obra (Fonte: Fututreng.pt, Portfólio, Moradia Margaride, Visitado em 7.17.2016)

### 2.1.2.2 Construção em Painéis

O segundo método apresentado pode ser interpretado como um método com um nível médio de pré-fabricação, uma vez que, neste método as paredes, pisos ou coberturas são montados e aparafusados em oficina sendo apenas necessário levantá-los e coloca-los na posição correcta em obra. Este método é tão mais eficiente quanto mais se repetir as formas, tipos e dimensões. Além disso os painéis já podem vir de oficina com as instalações necessárias e os revestimentos de fábrica.

Como principais vantagens deste método, quando comparado com os outros dois, tem que se salientar a rapidez de construção, pois grande parte dos elementos são feitos em fábrica, o que resulta também na redução significativa dos custos de estaleiro em obra, e, devido à grande parte da produção ser fabril, é possível a automação das tarefas produtivas e o controlo de qualidade dos produtos é mais rigoroso (Rego, 2012).



Figura 2.14 – Montagem de painéis (Fonte: Futureng.pt, Portfólio, Moradia Algoz, Visitado em 7.17.2016)

### 2.1.2.3 Construção Modular

O último método referido é a construção modular e tal como o nome indica, consiste na pré-fabricação total da estrutura, inclusive as instalações necessárias e os revestimentos interiores e exteriores. Em obra apenas é necessária organizar os módulos lado a lado e em altura. Hoje em dia, em muitos países, diferentes tipos de edifícios são construídos desta forma (Rego, 2012).

A grande diferença deste tipo de construção em painéis, é que enquanto neste tipo se constrói simultaneamente o módulo completo, na construção por painéis, apenas é possível a construção do piso depois da construção das paredes.

Relativamente às suas vantagens as mais evidentes são a rapidez da construção e a redução de mão de obra, devido ao facto de ser tudo construído em fabrica e com medidas standard, além disso, o controlo de qualidade é extremamente rigoroso. As desvantagens mais manifestas, são o transporte e montagem em obra, pois devido ao seu tamanho exige equipamento de dimensões consideráveis (<http://www.futureng.pt/construcao-modular>, Visitado em 28.10.2016)





Figura 2.15 – Montagem da estrutura em fábrica (Fonte: Futureng.pt, Construção modular, Visitado em 28.10.2016)

#### 2.1.2.4 Terminologia

De forma a compreender o que é o LSF, é importante perceber com clareza os vários elementos que a compõem. Este método é caracterizado por possuir um esqueleto estrutural feito em aço, formado por diversos elementos de perfis enformados a frio que ligados entre si resistem às cargas necessárias. Como foi explicado acima existem outros elementos que compõem o sistema LSF e que podem ter outros objetivos além do estrutural (Rego, 2012).

Na figura seguinte são apresentados esses elementos e é feita uma breve legenda para uma melhor interpretação dos elementos que compõem o sistema.

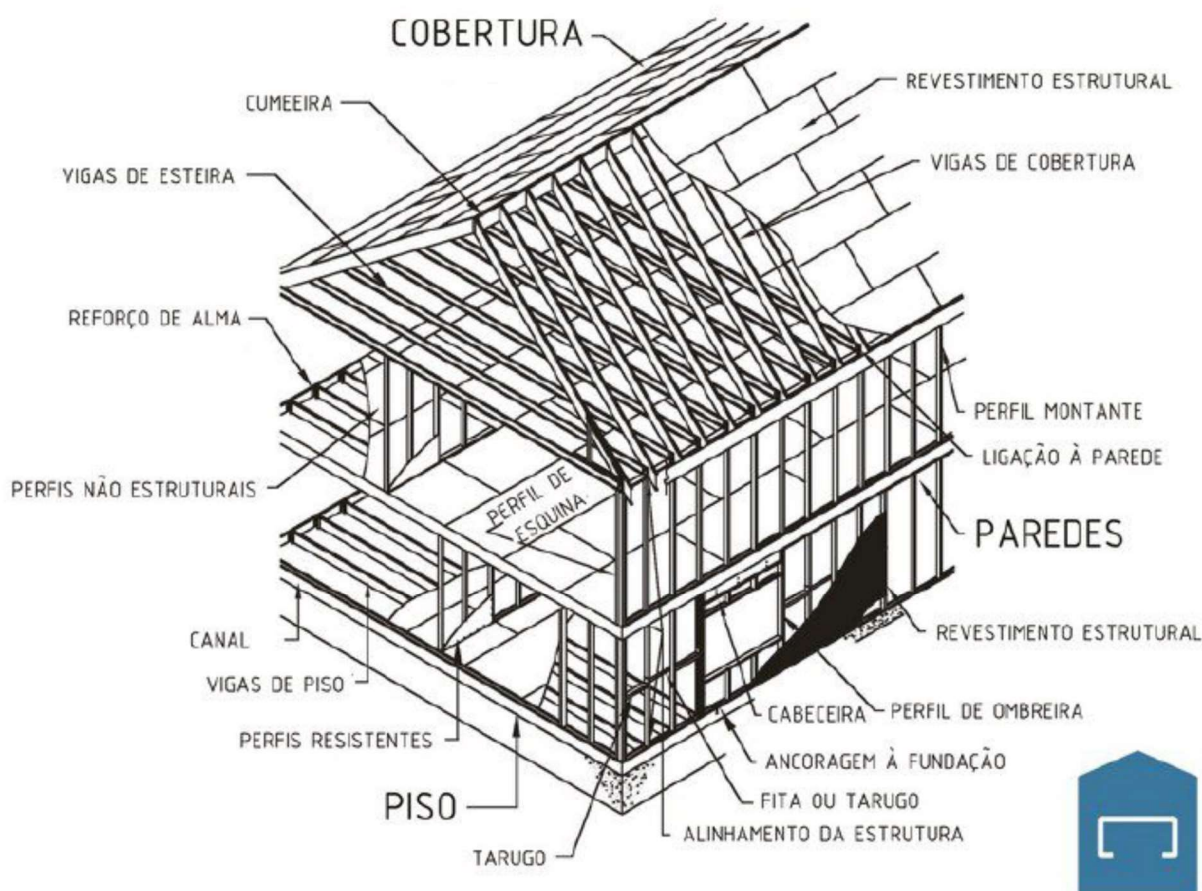


Figura 2.16 – Terminologia dos elementos de um edifício em LSF (Fonte: Futureng.pt)

Da figura anterior, de acordo com a informação publicada pela Futureng, podemos observar:

- Bloqueador ou tarugo (blocking): perfil utilizado no travamento lateral de montantes e vigas;
- Fita (*flat strap*): fita de aço galvanizado usada na horizontal ou na diagonal como elemento de contraventamento;
- Guia ou canal (*track*): perfil utilizado na base e no topo dos painéis de parede e no encabeçamento das vigas;
- Montante (*stud*): perfil utilizado verticalmente na composição de painéis de parede;
- Ombreira (*jack stud*): perfil utilizado verticalmente para apoio da verga;
- Reforço de alma (*web stiffener*): perfil utilizado verticalmente no apoio de vigas;
- Cabeceira ou verga (*header*): perfil utilizado horizontalmente sobre as aberturas para suporte da estrutura;

- Viga (joist): perfil utilizado como viga de piso.

### 2.1.3 Pavimentos em LSF

#### 2.1.3.1 Pré-dimensionamento de Pavimento em LSF

Na seleção dos perfis enformados a frio é usado o Eurocódigo 3 parte 1.3 onde se encontram as especificações para o dimensionamento de estruturas com perfis enformados a frio. Relativamente às placas estruturais como OSB ou outros materiais similares, os valores limites das suas propriedades mecânicas são definidas na norma EN 12369-1-2001.

Os Estados Unidos da América, como pioneiros no uso do LSF em substituição da construção em madeira fazem uma análise diferente da Europa. Nos EUA e Canada, para construção em LSF raramente é necessário um projeto estrutural porque os construtores apenas têm que seguir as tabelas previamente estabelecidas no documento *“Prescriptive Method for Residential Cold-Formed Steel Framing”*. Nestas tabelas são definidos os diferentes tipos de ligações dos pavimentos aos outros elementos, dimensões do perfil a usar, espaçamento dos elementos de fixação e do próprio vigamento.

Esta abordagem é mais simplista que a europeia, em que é necessário o cálculo de cada um dos componentes, dando um resultado mais preciso, mas num processo moroso.

A obra de Francisco Carlos Rodrigues defende esta abordagem, mas ao contrário da legislação americana este justifica as opções tomadas tornando-se mais fácil para o leitor entender o que o levou à escolha daquele perfil. Como resultado da sua obra foram apresentadas umas tabelas de pré-dimensionamento que irão ser apresentadas ao longo deste capítulo (Rodrigues, 2006).

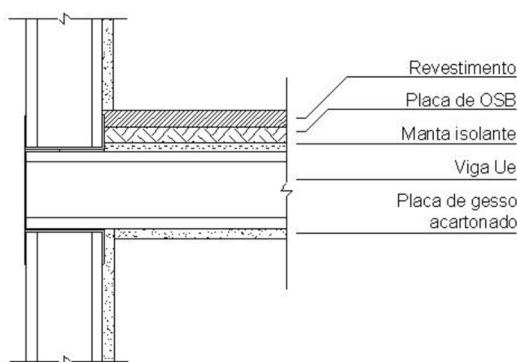


Figura 2.17 - Representação do piso seco em LSF (Rodrigues, 2006)

## Estado da Arte – Pavimentos Leves

A solução defendida por Rodrigues é de piso seco com um peso de com  $0,48 \text{ kN/m}^2$ ,  $48,95 \text{ kg/m}^2$  (forro de gesso cartonado com 12,5mm de espessura, estrutura de aço entrepiso, piso seco e revestimentos usais) conforme apresentado na figura anterior.

Como referido anteriormente, da obra de Rodrigues, resulta nas seguintes tabelas, que relacionam o vão máximo com o vigamento e espaçamento entre vigas (Rodrigues, 2006). Estas tabelas não dispensam o comum dimensionamento, mas é possível obter uma ideia do perfil e espaçamento necessário para construir um pavimento comum.

Vigas Simples – Sobrecarga de $1,5 \text{ KN/m}^2$								
Perfil C ou Ue	Sem enrijecedor de alma				Com enrijecedor de alma			
	Espaçamento (mm)							
Secção	300	400	500	600	300	400	500	600
140x40x0,95	2489	1879	1549	1244	3530	3225	3022	2768
140x40x1.25	3860	3505	3302	2413	3860	3505	3302	3048
140x40x1.55	4140	3759	3276	3530	4140	3759	3530	3276
140x40x2,25	4445	4038	3784	3505	4445	4038	3784	3505
140x40x2,46	4927	4495	4216	3911	4927	4495	4216	3911
200x40x0,95	-	-	-	-	4775	4089	3733	3352
200x40x1.25	4216	3175	2641	2108	5207	4724	4445	4140
200x40x1.55	5588	5080	4470	3556	5588	5080	4800	4445
200x40x2,25	5994	5461	5130	4749	5994	5461	5130	4749
200x40x2,46	6705	6096	5740	5308	6705	6096	5740	5308
250x40x1.25	-	-	-	-	3248	5689	5181	4648
250x40x1.55	6527	4902	4064	3251	6731	6121	5740	5334
250x40x2,25	7239	6553	6172	5588	7213	6553	6172	5740
250x40x2,46	8077	7340	6908	6400	8077	7340	6908	6400
300x40x1.25	-	-	-	-	7137	6172	5638	5054
300x40x1.55	-	-	-	-	7848	7112	7213	5969
300x40x2,25	8432	7645	6502	5207	8432	7645	7213	6680
300x40x2,46	9423	8559	8051	7467	9423	8559	8051	7467

Tabela 2.5 Vãos máximos (em mm) de vigas simples (adaptado de Rodrigues, 2006)

É interessante verificar que o enrijeecedor apenas é vantajoso em vigas com espessuras inferiores a 2,25mm, e que acima desta espessura não produz qualquer efeito, pois a viga com ou sem o enrijeecedor a partir de um certo valor vai empenar, e daí o vão máximo não variar.

Perfil C ou Ue	Vigas contínuas – Sobrecarga de 1,5 KN/m <sup>2</sup>							
	Sem enrijeecedor de alma				Com enrijeecedor de alma			
	Espaçamento (mm)							
Secção	300	400	500	600	300	400	500	600
140x40x0,95	2514	2006	1727	1422	3911	3403	3098	2768
140x40x1.25	3556	2870	2489	2082	4775	4114	3759	3352
140x40x1.55	4470	3657	3225	2743	5359	4648	4241	3784
140x40x2,25	5588	4834	4114	3530	5943	5232	4775	4267
140x40x2,46	6629	6019	5664	4953	6629	6019	5664	5080
200x40x0,95	-	-	-	-	4394	3556	3098	2616
200x40x1.25	3759	2997	2565	2133	5918	5080	4673	3810
200x40x1.55	5105	4114	3556	2997	7010	6070	5537	4953
200x40x2,25	6578	5384	4724	4013	7874	6832	6223	5562
200x40x2,46	8991	7747	6883	6578	8991	8178	7518	6705
250x40x1.25	-	-	-	-	6553	5461	4800	4089
250x40x1.55	5156	4114	3556	2946	7772	6731	6146	5486
250x40x2,25	7137	5791	5029	4241	9296	8051	7975	6578
250x40x2,46	10414	8636	7670	6578	10820	9728	8864	7924
300x40x1.25	-	-	-	-	6502	5257	4597	3860
300x40x1.55	-	-	-	-	8432	7239	6654	5435
300x40x2,25	7239	5816	5054	4241	9931	8610	7848	7010
300x40x2,46	11379	9398	8280	7086	12573	11176	10210	9144

Tabela 2.6 Vãos máximos (em mm) de vigas contínuas (adaptado de Rodrigues, 2006)

Contrariamente ao constatado nas vigas simples, nas vigas contínuas já é notório o aumento do vão máximo, pois a viga está mais habilitada a suportar os momentos negativos.

É possível concluir que com um enrijeecedor de alma, o vão máximo de uma viga contínua aumenta na ordem dos 33% quando comparado ao de uma viga sem enrijeecedor. Além disso, mais uma vez, é possível identificar que apenas é possível executar pavimentos com vigas com menor espessura se esta tiver o

enrriquecedor de alma. Em relação à continuidade do vigamento, a diferença é na ordem dos 10% ou 15%, sendo geralmente uma opção relacionada com a facilidade de construção ou não de um ou outro sistema.

Relativamente à opção de vigas simples quando comparadas com as vigas contínuas é possível observar que o vão máximo só é maior em prol das contínuas quando se falam de perfis com espessura igual ou superior a 1,55mm. Isto deve-se ao facto de que com espessuras inferiores às constadas a tendência das vigas para empenar com os momentos fletores negativos é grande, sendo necessário uma alma mais espessa.

### 2.1.3.2 Exemplos de soluções de Pavimentos

Sendo um dos objetivos do presente documento o levantamento de pavimento em LSF, irão ser apresentados 4 tipos de pavimentos propostos pela obra intitulada *Acoustic Performance of Light Steel framed systems* (SCI, 2003)

As opções apresentadas são opções padronizadas para qualquer tamanho ou tipo de vigamento em que o que varia são os restantes elementos, para lhe conferir as características pretendidas.

A primeira solução apresentada é composta por um painel com 20mm de OSB na face superior da laje de piso e uma placa de gesso cartonado de 12mm. O vigamento tem uma altura de 150mm de altura e uma manta com 100mm de lã mineral entre os perfis.

Esta composição resulta num isolamento a sons aéreos de 42 dB e uma resistência ao fogo de 30 minutos (SCI, 2003).

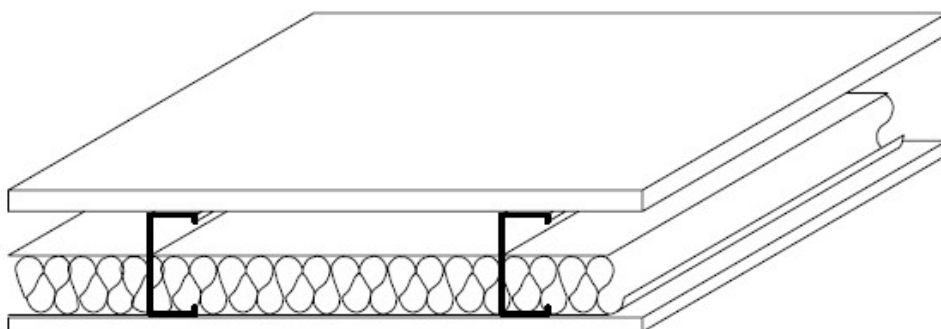


Figura 2.18 – Pavimento em LSF (PLSF1) (SCI, 2003)

O pavimento apresentado apenas é exequível para divisão de pisos entre o mesmo fogo devido ao seu isolamento acústico menor que 48 dB (“RRAE, Decreto-Lei nº96/2008 de 9 de Junho,,” 2008) artigo 5, ponto 1, alínea c) e da sua resistência ao fogo de 30 minutos, quando o limite mínimo exigível pela legislação é 60 minutos (“Portaria 1532/08 de 29 de Dezembro,,” 2008) artigo 17, ponto 2, aliena a). É importante referir que a resistência ao fogo mínima de 60 minutos é para edifícios com mais de 9 m e inferiores a 28 m (categoria de risco II). Para edifícios com uma altura inferior a 9 m (categoria de risco I) o pavimento apenas tem que resistir ao fogo 30 minutos.

Relativamente aos pisos de separação de fogos foram apresentadas 3 soluções diferentes. As primeiras duas são muito semelhantes ao nível de isolamento a sons aéreos e sons de percussão.

A 1ª solução de divisão de fogos é composta por um pavimento composto por uma placa de OSB com 18mm de espessura, 19mm de gesso cartonado, 25 a 30mm de lã mineral em placa e novamente uma placa de OSB, normalmente com 15mm de espessura sobre o vigamento. O vigamento tem novamente uma altura mínima de 150mm com 100mm de lã mineral entre os perfis. Sob o vigamento usa-se um perfil resiliente, geralmente ómega para segurar as duas placas de 12mm de gesso cartonado.

Esta solução tem um isolamento sonoro de sons aéreos de 48 a 52 dB e 54 a 57 dB a sons de percussão. A sua resistência ao fogo é de 60 minutos devido às duas placas de gesso cartonado (SCI, 2003).

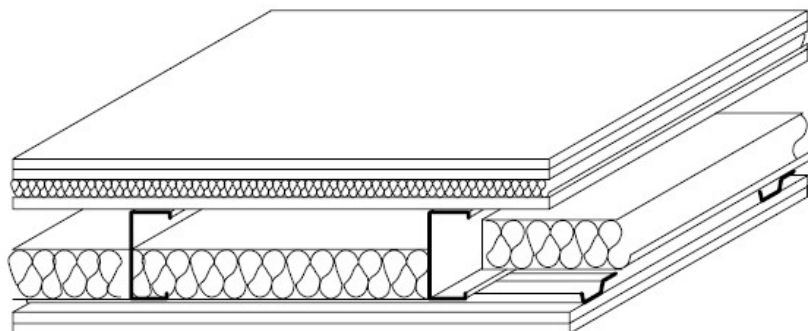


Figura 2.19 – Pavimento em LSF (PLSF2) (SCI, 2003)

O pavimento apresentado acima satisfaz os requisitos necessários para separação de fogos. As duas camadas de gesso acartonado garantem-lhe a resistência ao fogo de 60 minutos enquanto que a manta

flexível, a camada de OSB e de gesso cartonado garantem mais 6 a 10 dB de isolamento acústico a sons aéreos e de percussão.

Esta solução diferencia-se da anterior pelo uso de ripas de madeiras com uma tira de espuma na face inferior em vez da lã mineral. A sua resistência ao fogo é a mesma e apenas vai variar o isolamento a sons aéreos para 50 a 52 dB (SCI, 2003).

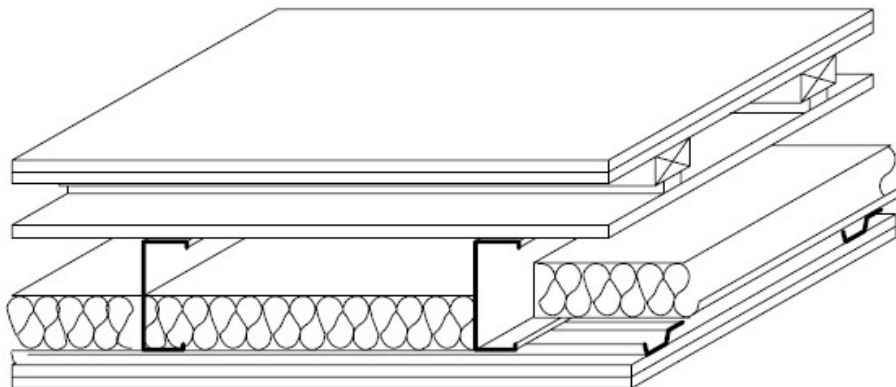


Figura 2.20 – Pavimento em LSF (PLSF3) (SCI, 2003)

Nesta solução, em vez de ter os elementos acima do vigamento como na figura 2.14, tem um “segundo vigamento”. Por isso mesmo deve ser estudado como um elemento duplo e apesar de não ter a camada flexível, tem uma segunda caixa de ar, que funciona da mesma maneira.

Por fim, a quarta solução em LSF e terceira para pavimentos de separação de fogos é uma solução com um vigamento duplo, em que a laje superior é constituída por uma placa de OSB com 18mm, 19 mm de gesso cartonado, o vigamento com 100 mm de lã minerais entre os perfis e uma placa de OSB, geralmente com 15mm. A laje inferior apenas é composta por um novo vigamento, agora sem lã mineral, um perfil resiliente, normalmente um perfil ómega e duas placas com 12mm de gesso cartonado.

Esta solução não apresenta uma resistência ao fogo diferente das anteriores e relativamente aos sons aéreos é muito semelhante, 46 a 54 dB, dependendo de como é ligado aos elementos adjacentes. Relativamente aos sons de percussão, oferece um isolamento acústico a sons de percussão de 56 a 60 dB, um pouco superior às opções anteriores (SCI, 2003).



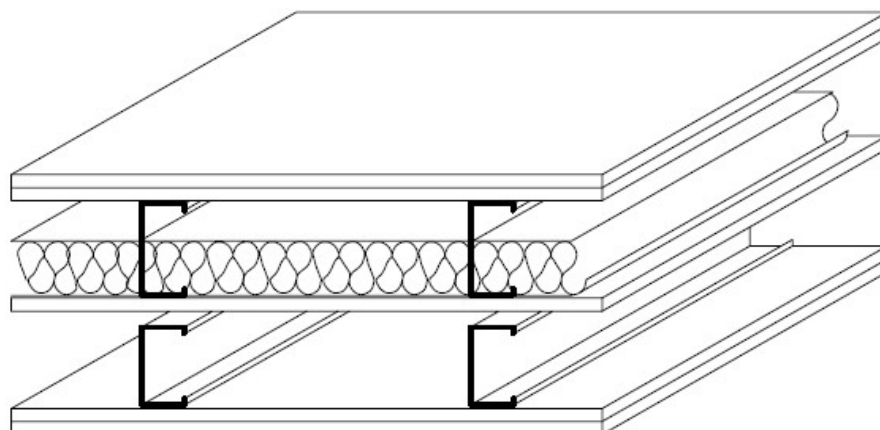


Figura 2.21 – Pavimento em LSF (PLSF4) (SCI, 2003)

Por outro lado, a terceira opção apresenta um isolamento mais vantajoso, mas é uma solução mais complexa pois devido a ser um pavimento duplo (com dois vigamentos) requer maior altura do pavimento e um sistema de fixação perimetral completamente diferente para as duas faces não estarem ligadas.

No segundo capítulo do presente trabalho irão ser utilizados alguns métodos empíricos para verificar o isolamento acústico das soluções acima listadas.

## **2.2 PAVIMENTOS EM MADEIRA**

A madeira é dos materiais estruturais mais antigos na construção civil, mas a sua aplicação em estruturas tem vindo a ser substituída por outros materiais como o betão ou os perfis enformados a quente. Contudo continua a ser usada em obras de reabilitação devido ao seu baixo peso específico quando comparado com outros materiais tradicionais.

### **2.2.1 Constituintes**

#### **2.2.1.1 Madeira**

##### **2.2.1.1.1 Tipos de madeira mais utilizados**

A madeira é um material complexo com uma organização macroestrutural muito elaborada e uma matéria heterogénea que resulta da transformação de um organismo vivo, a árvore. A sua estrutura e características vão ser influenciadas por diversos fatores que influenciaram o desenvolvimento da árvore, tais como as condições climáticas, características do solo, altitude, entre outros (Oliveira, 2013) .

Na escolha da madeira é importante ter em conta a predominância local das espécies. No norte de Portugal, por exemplo, as madeiras mais utilizadas nos elementos estruturais, pavimentos e coberturas são o castanho, o carvalho e por vezes o pinho de riga e pinho nacional; Relativamente ao resto do país a madeira mais utilizada é a de Pinho (Dias, 2008) .

Irão ser referidas algumas características(Dias, 2008), das madeiras mais utilizadas em Portugal:

- “Castanho, *Castanea sativa mill*, é uma madeira de folhosa dura, leve, fácil de trabalhar e muito durável, tendo sido usada nas coberturas devido à sua elevada resistência à humidade, apesar de relativamente suscetível aos ataques de caruncho (proveniente de Trás-os-montes, Beiras e Algarve)”;
- “Carvalho, *Quercus robur*, é uma madeira de folhosa dura, “relativamente” fácil de trabalhar. É resistente e durável, apresentando o inconveniente de ter uma massa volúmica elevada (proveniente de Trás-os-Montes e Douro)”;
- “Pinho Bravo, *Pinus pinaster*, (também conhecido por Pinho Nacional) é uma madeira resinosa moderadamente dura e pesada, fácil de trabalhar para vigamentos. É muito utilizada em Portugal, pela sua grande abundância, sendo por isso também relativamente barata. Foi muito utilizada na construção de estacas. Ainda assim, tem o inconveniente de ser suscetível a ataque bióticos, apresentar muitos nós e fendilhar com facilidade”;
- “Pinho Manso, *Pinus pinea*, é uma madeira semelhante ao Pinho bravo, mas com a presença de mais nós, sendo considerada uma das melhores madeiras para vigamentos e soalhos”;
- “Pinho Silvestre, *Pinus sylvestris*, (Pinho de riga ou casquinha) é uma madeira leve e muito fácil de trabalhar”;

### 2.2.1.2 Propriedades mecânicas

Ao longo do ciclo de vida de uma árvore, irão ser essencialmente aplicados sobre ela esforços de flexão, causados pela ação do vento e esforços de compressão devido ao seu peso próprio. Devido à sua anisotropia (quando uma característica varia de acordo com a direção onde é aplicada) é necessário ter

em conta, no cálculo das suas propriedades mecânicas, as direções em que o esforço é exercido, pois apresentam valores com uma diferença significativa (Oliveira, 2013).

As propriedades examináveis mais relevantes são a resistência à flexão e a resistência ao corte, apesar de as vigas de um piso estarem sempre sujeitas à tração e compressão. Devido a esse facto, as fibras da madeira devem apresentar-se sempre paralelas ao desenvolvimento da viga pois a sua resistência é consideravelmente mais forte quando comparada com a resistência à tração e compressão perpendicular às fibras.

Material	Tensão de rotura (MPa)				Corte	Flexão
	Tração		Compressão			
	//	⊥	//	⊥		
Pinho Bravo (classe C18*)	11	0,5	18	2,2	2	18
Pinho Bravo (classe C35*)	21	0,6	25	2,8	3,4	35
Betão (C20/25)	1,3		25		210	420
Aço (S400)	360		360		180	360

Tabela 2.7 – Valores de tensão de rotura de alguns materiais (Adaptado de Pinho, 2005)

#### 2.2.1.2.1 Resistência à tração paralela à fibra

A tração paralela à fibra quando comparada com outras resistências nomeadamente a compressão axial, é bastante elevada, podendo ser até 3 vezes superior, sendo esta a maior resistência da madeira. Este facto deve-se à aproximação de fibras que existe quando é imposta uma força de tração no sentido axial, aumentando a coesão e a aderência da peça (Oliveira, 2013) (Cruz, 2013)).

Cem comparação, a resistência à tração perpendicular às fibras é de 50 vezes inferior à tração paralela a estas, devido à falta de aderência das fibras nessa direção (Cruz, 2013)..

Normalmente os elementos não sofrem rotura por aplicação isolada do esforço de tração, mas quando este está associada a outras solicitações os valores de resistência verificam-se bastante inferiores aos referidos (Oliveira, 2013) .

#### 2.2.1.2.2 Resistência à compressão paralela à fibra

A resistência de um elemento à compressão é menor do que à tração, essencialmente pelo facto de que a compressão no sentido axial provoca a separação das fibras longitudinais.

A sua resistência está inteiramente ligada ao teor em água, pois atinge-se o valor máximo de resistência quando o teor de água é mínimo, mas quando este é igual ou maior que 30%, o seu ponto de saturação, a resistência torna-se mínima. O valor da resistência também pode variar com a massa volúmica da espécie da madeira. Quanto maior for a massa volúmica maior é a resistência.(Oliveira, 2013)

#### 2.2.1.2.3 Resistência à flexão

Um elemento de madeira encontra-se, quase sempre, sujeito a um esforço de flexão, pois para isso apenas é necessário um esforço em pontos isolados ou distribuídos ao longo da peça. No caso dos pavimentos, os esforços de flexão são causados pelo peso próprio do pavimento, pelo peso das paredes divisórias e pela ação excedida pela sobrecarga, tornando esta propriedade provavelmente a mais importante. O rácio de resistência à flexão da madeira com o seu peso é bastante elevada, comparativamente aos materiais tradicionais (Oliveira, 2013).

Como se pode observar na figura seguinte os esforços de flexão vão causar esforços de compressão e tração nas partes superior e inferior das peças, respectivamente. “Como o limite de resistência à compressão é atingido antes de ser atingida a resistência à flexão, as fibras superiores começam a plastificar e as fibras neutras vão progressivamente deslocando-se para baixo, em direção às fibras tracionadas. A rotura pode ocorrer por tração com estilhamento das fibras quando se atinge a tensão de roturas à tração das fibras inferiores”(Oliveira, 2013).

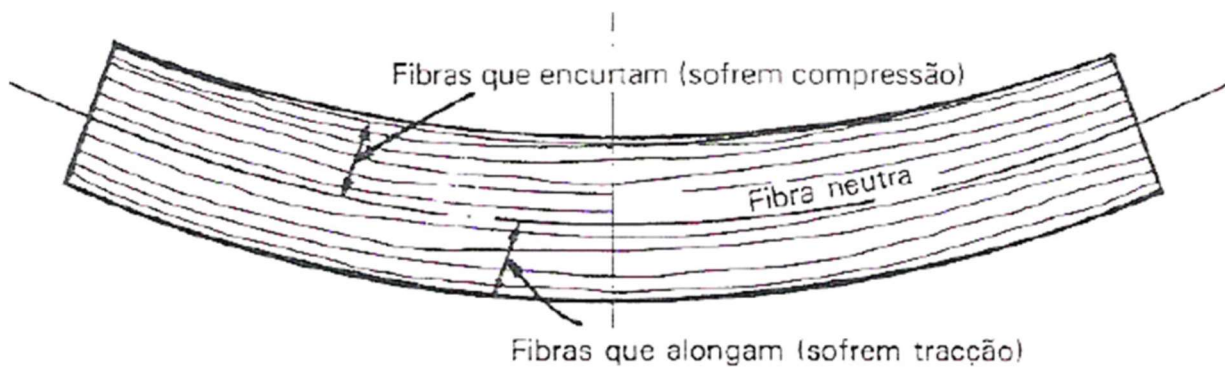


Figura 2.22 – Efeito de esforços de flexão (Oliveira, 2013)

### 2.2.2 Constituição dos Pavimentos em Madeira

Ao longo dos tempos a construção em madeira sofreu poucas variações. Sua constituição é formada essencialmente pelo vigamento apoiado geralmente nas paredes resistentes e o OSB (ou soalho) que além de ter a função de base do pavimento também trava a estrutura no sentido perpendicular ao vigamento. Poderão ainda existir os tarugos que têm como objetivo aumentar a resistência da estrutura, tornando-a

mais homogénea e melhorando o seu funcionamento a ações pontuais ou no próprio plano da estrutura. Sob o vigamento, antigamente, era utilizado o fasquiado que depois era estucado, atualmente usam-se placas de gesso cartonado.

Na figura seguinte é apresentada a solução construtiva de um pavimento estrutural de madeira mais comum em edifícios antigos (Oliveira, 2013).

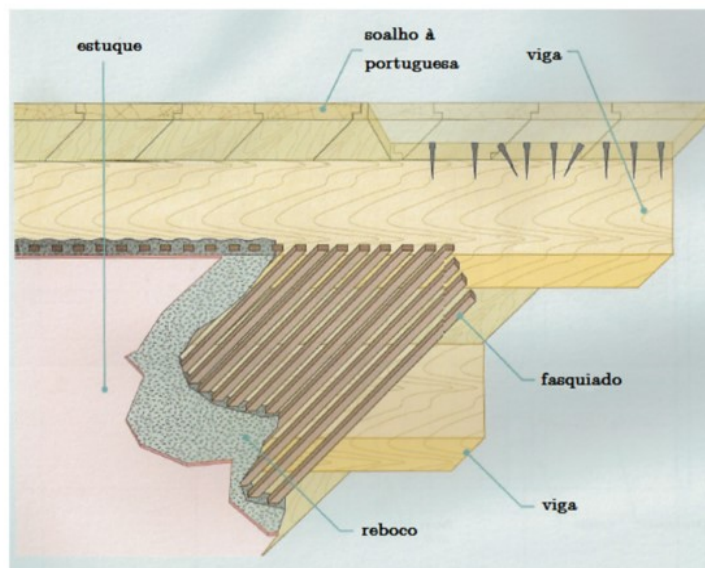


Figura 2.23 – Pavimento de madeira mais comum nos edifícios tradicionais portugueses (Oliveira, 2013)

### 2.2.2.1 Vigamentos

Os vigamentos são os principais constituintes dos pavimentos devido a serem os responsáveis pela rigidez dos elementos e a transmissão das ações para os outros elementos de suporte. O vigamento nos pavimentos de madeira é constituído, à semelhança do LSF, por uma série de elementos paralelos uns aos outros e com um espaçamento reduzido e constante. Antigamente estes elementos eram materializados por um troco de madeira maciça, de secção circular, tendo depois evoluído para vigas esquadriadas, de secção retangular. A secção das vigas varia com o espaçamento dados entre elas, o tipo de madeira a ser utilizada, os esforços aplicados e sobretudo o vão que é necessário vencer (Oliveira, 2013)

### **2.2.2.2 Secção das vigas**

Nos edifícios anteriores ao início do século XX o vigamento consistia no uso de troncos de madeira, sendo estes falqueados conforme fosse necessário. Em vigas de pavimentos seriam falqueados em duas faces paralelas, a superior e inferior, para a colocação do soalho e do fasquio. Nas vigas juntas às fachadas eram também falqueadas no lado encostado a estas. (Dias, 2008).

As dimensões das vigas apresentavam normalmente diâmetros entre 0,10 e 0,30 metros de diâmetro e com um comprimento de 4,0 a 7,0 metros. Devido a ser madeira maciça pouco trabalhada normalmente apresentava diferenças de diâmetro em cada uma das extremidades. Devido a esta variação, para manter a rigidez e homogeneidade do pavimento, a sua aplicação era feita alternada, junto a uma extremidade com o diâmetro mais pequeno estava uma com a extremidade maior (Dias, 2008).

A partir do século XX, começaram a ser usadas as vigas de secção retangular, com largura entre 0,07 e 0,12m e altura de 0,18 a 0,25m (Dias, 2008). Atualmente já são comercializadas quaisquer secções de vigas de madeira pretendidas, sendo que a madeira é comprada ao m<sup>3</sup>, apesar de esta apresentar preços diferentes, consoante as medidas pretendidas.

### **2.2.2.3 Espaçamento entre Vigas**

O espaçamento entre vigas varia entre 0,40 a 0,70m de eixo a eixo. Tanto a primeira como a última viga deve ser colocada encostada às fachadas, se possível. Antigamente, caso existissem tetos inferiores era comum o uso de um espaçamento entre vigas de 0,30m medida essa conveniente para pregar o fasquiado. Em vãos muito elevados era usual a colocação de uma ou mais vigas perpendiculares ao vigamento sob o mesmo. Por vezes, quando os vãos eram muito elevados eram comum colocar uma viga de maior dimensões a meio vão perpendicular ao vigamento de forma a diminuir assim a dimensão do vigamento (Dias, 2008).

O bom senso defende que se deve optar por um espaçamento entre vigas o maior possível, sempre que este verifique as normas e não traga problemas de utilização, pois quanto maior for o espaçamento entre vigas, menor será o peso próprio do pavimento. (Oliveira, 2013)

### **2.2.2.4 Apoios nas paredes**

Nas estruturas de madeira as ligações entre as paredes resistentes e o pavimento são, geralmente, o ponto mais sensível das estruturas. Caso esta ligação não seja executada ou projetada de forma correcta pode condicionar toda a estrutura através de inúmeras patologias e condicionar a estabilidade a estrutura (Oliveira, 2013).

As ligações poderiam ser usadas de formas diferentes, através do encastramento da viga, do auxílio de um ferrolho ou do apoio do vigamento num frechal.

Antigamente, a extremidade de cada viga, designada por entregas, era encastrada na parede resistente. As entregas deveriam penetrar na parede no mínimo 0.20 a 0.25m e preenchidas com alvenaria ordinária de forma garantir melhor estabilidade e reduzir as vibrações (Dias, 2008). Poderia também ser aplicada a regra de que a viga teria que penetrar na parede  $\frac{2}{3}$  da espessura do elemento de suporte ou mesmo em toda a extensão da parede. Caso fosse aplicado em toda a sua extensão e a parede fosse exterior poderia causar problemas ao vigamento, devido à exposição da extremidade da viga aos agentes atmosféricos. Neste caso os topos da viga poderia ter um tratamento com tinta de óleo ou alcatrão (Oliveira, 2013).

O apoio do vigamento na parede resistente poderia ser auxiliado através do uso de ferrolhos. Um ferrolho é uma peça metálica formada por barras achatadas de ferro, com configurações variadas e furos para pregar ou aparafusar as vigas. A fixação à parede era através de um olhal no qual se fixava uma chaveta, ou vergalhão, na extremidade exterior da parede. Estes elementos degradavam-se com relativa facilidade devido aos agentes atmosféricos. Como alternativa começou-se a usar os ferrolhos de esquadro que ao contrario dos anteriores eram retos estes faziam um angulo reto com o seu desenvolvimento ficando assim embutidos na parede (Oliveira, 2013) (Dias, 2008).

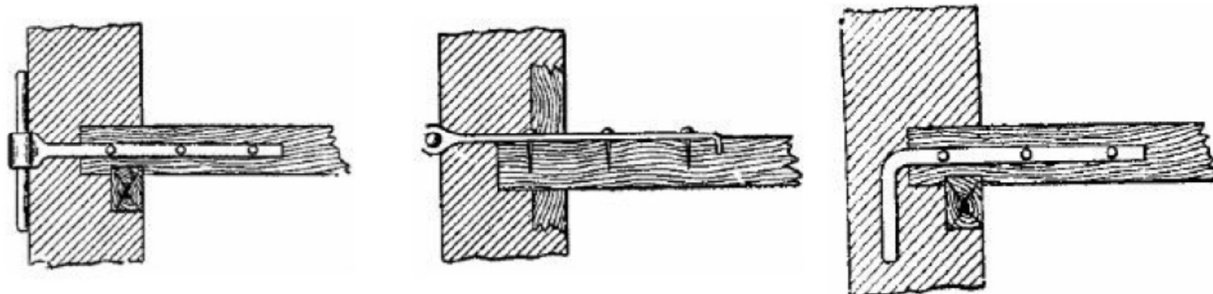


Figura 2.24 – Ferrolhos de ligação (Oliveira, 2013)

Podem, também, ser usado um frechal, método que ainda é usado atualmente. Um frechal é uma viga de madeira, com secção quadrada com cerca de 0.10 metros de lado, corridas na extensão da parede e onde o vigamento apoiava. Os frechais eram apoiados nas paredes resistentes de três formas: através de cachorros ou mísulas de pedra salientes embutidos na parede resistente, através do frechal embutido na parede ou preso através de cavilhas a esta. O uso de um frechal ou do vigamento apoiado no cachorro de pedra tem a vantagem de que as vigas ficariam menos expostas à humidade (Oliveira, 2013) (Dias, 2008).

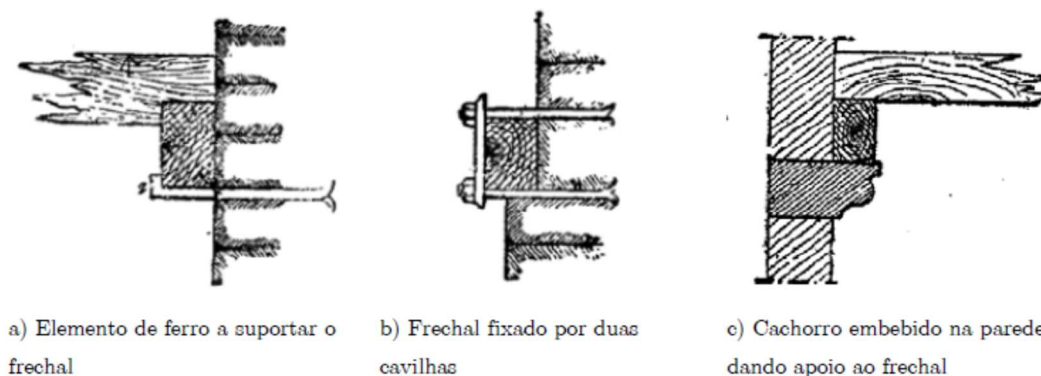


Figura 2.25 –Tipos de suporte de frechais (Oliveira, 2013)

### 2.2.2.5 Tarugos

Os tarugos são elementos perpendiculares ao vigamento, espaçados entre si 1,5 a 2,0 metros e geralmente de menor secção. Têm como objetivo travar o vigamento principal de se descolar lateralmente e aumentar a resistência da estrutura a ações horizontais. Para que o seu funcionamento seja eficaz os tarugos devem formar uma linha contínua transversal ao vigamento (Oliveira, 2013) (Dias, 2008).

O uso de tarugamento permite reduzir a secção das vigas já que permite que o vigamento trabalhe em malha. Por outro lado, se os tarugos introduzidos forem mais largos na face superior e introduzidos à força fazem com que o vigamento suba um pouco, reforçando-o e reduzindo a sua flecha. No entanto, este tipo de colocação pode danificar as paredes resistentes (Oliveira, 2013).

É possível então aplicar 3 tipos de tarugamentos, simples, de cruzeta e entalonado, descritos em baixo:

- Tarugamento simples é um sistema caracterizado por tarugos que têm a mesma secção que o vigamento e a dimensão do espaço entre vigas. Os tarugos são colocados de baixo para cima, obrigando o vigamento a subir e assim favorecendo o seu nivelamento quando forem aplicadas as restantes cargas. A ligação entre o vigamento e os tarugos é feita através de pregos numa e outra face em direção à viga. É importante o controlo do teor de água das vigas para o comportamento dos tarugos pois se estas forem colocados com um teor em água muito elevado encolherão e assim afastar-se-ão dos tarugos (Dias, 2008).



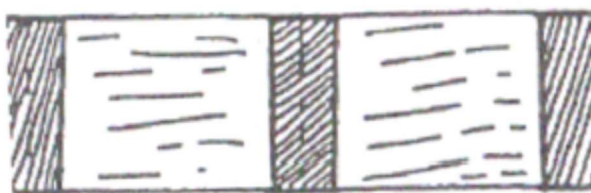


Figura 2.26 – Tarugamento Simples (Oliveira, 2013)

- Tarugamento de cruzeta ou à americana, um sistema muito utilizado na América do Norte e em Inglaterra. Neste sistema são usadas umas ripas de madeira de pequena dimensão,  $0,05 \times 0,05 \text{ m}^2$  que são colocados em forma de cruz no espaço entre as vigas. Estes tarugos são colocados, inicialmente, na reentrância superior de uma das vigas, sendo posteriormente colocados na reentrância inferior da viga adjacente. Nesta ultima viga realiza-se o processo contrário, primeiro na face superior e de seguida na face inferior da viga adjacente, formando-se uma cruzeta que estabelece o equilíbrio entre as vigas. As ripas são fixadas através de um prego em cada uma das suas extremidades (Dias, 2008).



Figura 2.27 – Tarugamento de cruzeta (Oliveira, 2013)

- Tarugamento entalonado é um sistema que obedece a um tipo de samblagem complexo e é necessário que os tarugos tenham as mesmas dimensões que o vigamento. Começa-se por abrir um entalhe com 0.015 a 0.020 m na viga a  $1/3$  da altura desta, a contar da face superior. De seguida realiza-se outro entalhe com  $2/3$  da altura da viga a contar da face superior com 0.010m. Ao mesmo tempo deixam-se, nos topos de tarugos as orelhas e talões para entrarem nos entalhes das vigas. Os tarugos são colocados comprimidos para dar ao vigamento uma maior coesão e a sua fixação à viga é feita com pregos

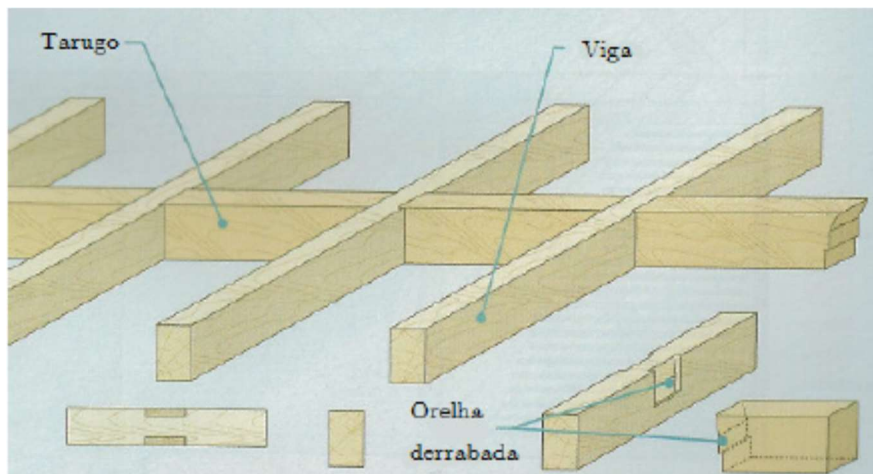


Figura 2.28 – Tarugamento entalonado (Oliveira, 2013)

### 2.2.3 Pavimentos de Madeira

#### 2.2.3.1 Pré-dimensionamento de pavimentos de Madeira

É possível dimensionar estruturas de madeira (neste caso em particular pavimentos), através do Eurocódigo 5, contudo esta não vai ser a abordagem utilizada neste documento. Em vez disso serão apresentadas, à semelhança do capítulo *Light Steel Frame*, tabelas de pré-dimensionamento de forma a ser possível comparar várias soluções de pavimentos, relativamente ao peso, espaçamento e custo final.

##### 2.2.3.1.1 Madeira maciça

Iremos considerar como madeira maciça, um vigamento de Pinho Bravo de classe C16, com base na EN338 e que apresenta as seguintes características:

Classe da Madeira	Propriedades de Resistência (MPa)						Propriedades de Rigidez (GPa)				Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )	Densidade (Kg/m <sup>3</sup> )
	Flexão	Tração Paralela	Tração Perpendicular	Compressão Paralela	Compressão Perpendicular	Corte	Modulo de elasticidade paralelo	5% modulo de elasticidade paralelo	Modulo de elasticidade perpendicular	Modulo de Corte		
	F <sub>m,k</sub>	F <sub>t,0,k</sub>	F <sub>t,90,k</sub>	F <sub>c,0,k</sub>	F <sub>c,90,k</sub>	F <sub>v,k</sub>	E <sub>0,mean</sub>	E <sub>0,05</sub>	E <sub>90,mean</sub>	G <sub>mean</sub>		
C16	16	8	0,40	16	2	3	8	5,4	0,27	0,44	310	370

Tabela 2.8 – Valores característicos da madeira de classe C16 (BS EN 338:2009 Structural timber - Strength classes, 2009)

Os valores da tabela seguinte são valores meramente indicativos que não dispensam a verificação da segurança das vigas, contudo é possível através da tabela seguinte ter uma noção dos valores máximos possíveis com diferentes secções.

Madeiras de Classe C16 e Sobrecarga de 1,50 KN/m <sup>2</sup>								
Vãos Máximos em mm para pisos com peso entre 0.25KN e 0.50 KN/m <sup>2</sup> (pavimentos de separação de pisos, sem exigências acústicas)					Vãos máximos em mm para pisos com peso entre 0.75 e 1,25 KN/m <sup>2</sup> (pavimentos de separação de fogos, com exigências acústicas)			
Espaçamento entre vigas em mm					Espaçamento entre vigas em mm			
Secção	400	450	480	600	400	450	480	600
45x95	1833	1734	1650	1363	1572	1439	1371	1152
45x120	2479	2382	2312	1974	2153	1983	1894	1609
45x170	3500	3364	3279	2937	3066	2892	2801	2505
45x220	4514	4300	4167	3734	3898	3678	3563	3188
72x120	2900	2789	2731	2534	2609	2508	2454	2252
72x170	4087	3933	3852	3577	3682	3541	3465	3167
72x220	5100	4957	4880	4612	4721	4566	4487	4025

Tabela 2.9 – Vãos máximos de um pavimento composto por madeira de classe C16 (Adaptado de (BSW Timber Group, n.d.)

#### 2.2.3.1.2 Viga Composta de Madeira - *BCI Joints*

Como alternativa, é importante referir as vigas de madeira compostas, que são obtidas através de madeiras onde foram aplicados processos químicos e mecânicos e que têm como objetivo colmatar as limitações deste material.

Anteriormente foi apresentada a placa OSB, além da qual existem os laminados colados e os compensados laminados, ambos obtidos através da colagem, com o uso de resinas e aditivos, de pranchas ou lâminas

de madeira até formarem uma peça de maiores dimensões. No caso dos laminados as peças têm todas a mesma orientação, no caso dos compensados são coladas formando entre si um ângulo de 90°.

*BCI Joints* é uma viga de madeira projetada pela “Boise Cascade Engineered Wood Products”, empresa inglesa líder mundial em madeira composta, com o formato em I, semelhante ao das vigas metálicas. Neste caso os banzos são fabricados por madeira lamelar ligados por uma alma de OSB. Esta disposição permite obter características para vencer grandes vãos com um baixo peso. Como vantagem, é possível furar a alma para fazer as restantes instalações, como elétricas ou de águas.

É possível encomendar diferentes banzos, que fazem variar o tipo de viga e com diferentes alturas conforme ilustrado na figura seguinte:

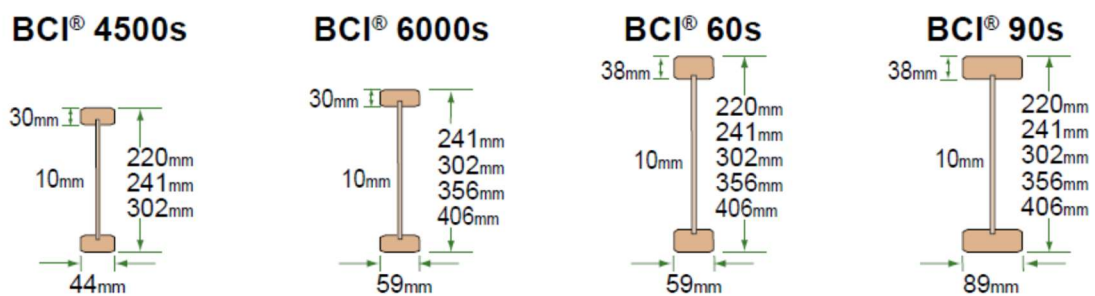


Figura 2.29 – BCI Joints (AA.VV., 2013)

Em condições semi-húmidas, classe de serviço 2, estas vigas apresentam as seguintes características:

H viga (mm)	Tipo de viga	Momento fletor Máximo (kNm)		Modulo de flexibilidade (GPa)	Esforço transverso Máximo (kN)		Modulo de elasticidade (Gpa)
		Em malha	Normal		Em malha	Normal	
220	4500s 2.0	3,18	3,06	322	3,62	3,48	1,37
	60s 2.0	5,12	4,92	396	3,73	3,59	1,54
	90s 2.0	7,86	7,56	759	3,73	3,59	1,60
241	4500s 2.0	3,52	3,38	397	3,92	3,77	1,48
	6000s 1.8	3,70	3,56	461	5,23	5,03	1,49
	60s 2.0	5,14	4,94	591	5,39	5,39	1,45
	90s 2.0	7,86	7,56	936	4,77	4,59	1,49
302	4500s 2.0	4,51	4,34	664	3,92	3,77	1,82
	6000s 1.8	4,73	4,55	770	6,13	5,89	1,87
	60s 2.0	6,68	6,43	1010	6,55	6,55	1,94
	90s 2.0	10,25	9,86	1580	5,90	5,67	1,87
356	6000s 1.8	5,63	5,41	1110	6,87	6,61	2,20
	60s 2.0	8,04	7,73	1480	6,85	6,85	2,37
	90s 2.0	12,32	11,85	2300	6,88	6,62	2,20
406	6000s 1.8	6,44	6,19	1490	7,57	7,28	2,51
	60s 2.0	9,27	8,91	2000	8,34	8,34	2,77
	90s 2.0	14,21	13,66	3090	6,58	6,33	2,51

Tabela 2.10 – Valores características de resistência e rigidez para vigas compostas de madeira, BCI  
Joints (AA.VV., 2013)

Para efeitos comparativos, uma viga IPE 80 com aço S235 resiste a 5,42 kNm de momento fletor máximo e a um esforço transversal máximo de 48,57 kN. Apesar de a viga composta não ter a capacidade de suporte um esforço transversal como a viga de aço, possui uma resistência à flexão bastante aceitável.

Considerando um peso próprio de 0,75 kN/m<sup>2</sup> de carga permanente e 1,5 kN/m<sup>2</sup> de sobrecarga obtemos os seguintes vãos máximos para cada um dos tipos de viga:


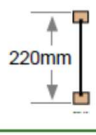



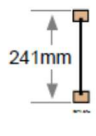




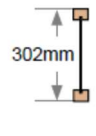




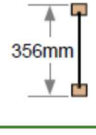



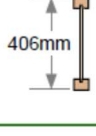



Joist Depth (mm)	BCI® Joist Type	Single Span 	Maximum spans (m) for domestic construction <sup>1,2</sup>			
			BS5268-2:2002 NHBC Recommended (12mm max instantaneous deflection)			
			600c/c	480c/c	400c/c	300c/c
	4500s 2.0	Single Span 	3.731	4.033	4.232	4.563
	60s 2.0	Single Span 	4.220	4.479	4.700	5.071
	90s 2.0	Single Span 	4.661	4.950	5.199	5.612
	4500s 2.0	Single Span 	4.001	4.246	4.455	4.805
	6000s 1.8	Single Span 	4.143	4.398	4.616	4.979
	60s 2.0	Single Span 	4.391	4.664	4.897	5.287
	90s 2.0	Single Span 	4.871	5.178	5.441	5.879
	4500s 2.0	Single Span 	4.543	4.821	5.060	5.458
	6000s 1.8	Single Span 	4.705	4.994	5.242	5.656
	60s 2.0	Single Span 	5.023	5.335	5.601	6.046
	90s 2.0	Single Span 	5.545	5.896	6.196	6.697
	6000s 1.8	Single Span 	5.153	5.470	5.742	6.196
	60s 2.0	Single Span 	5.528	5.870	6.163	6.652
	90s 2.0	Single Span 	6.084	6.470	6.800	7.350
	6000s 1.8	Single Span 	5.542	5.884	6.177	6.665
	60s 2.0	Single Span 	5.964	6.333	6.649	7.177
	90s 2.0	Single Span 	6.541	6.957	7.312	7.905

Tabela 2.11 – Vãos máximos para vigas compostas de madeira, *BCI Joists* (AA.VV., 2013)

Relativamente à ligação com os restantes elementos, esta é feita com o auxílio de chapas metálicas, ou até mesmo placas OSB aparafusadas diretamente. É importante salientar que estas vigas têm que ser travadas transversalmente, função que normalmente é feita através das placas OSB, tal como as vigas perimetrais no LSF.

### 2.2.3.2 Exemplos de Soluções de Pavimentos de Madeira

De forma semelhante ao que foi feito para os pavimentos LSF irão ser apresentadas algumas soluções de pavimento cujo vigamento seja de madeira. Estes pavimentos estão presentes na publicação *Wood Frame Construction – Fire Resistance and Sound Transmission* (AA.VV., 2002).

O primeiro pavimento, é um pavimento composto apenas por uma camada de gesso cartonado com 12,7mm em cada face do vigamento. Entre as vigas de madeira com 38x89mm espaçadas de 400 em 400 mm coloca-se lã mineral em toda a sua altura.

Este pavimento apresenta uma resistência ao fogo de 30 minutos, devido à placa de gesso cartonado e um isolamento a sons aéreos de 32 dB

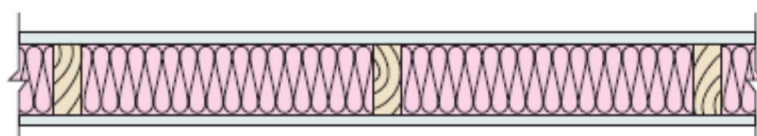


Figura 2.30 – Pavimento de Madeira (PM1) (AA.VV., 2002)

Este pavimento apenas está habilitado a dividir pisos do mesmo fogo, pois não cumpre nem o regulamento acústico nem o de resistência ao fogo.

O segundo pavimento é composto por uma placa com 15 mm de OSB e a placa de gesso acartonado colocado na face inferior, que em vez de ser de 12,7 mm é de 15,9mm. O vigamento pode ser de madeira maciça com secção de 38x241 mm ou uma viga composta de madeira também com 241 mm de altura. Ambas as soluções têm um espaçamento entre vigas de 400 mm e têm um preenchimento de 89mm de lã mineral.

Relativamente ao isolamento acústico, este piso confere um isolamento a sons aéreos de 34 dB e aos sons de percussão de 30 dB. Em relação à resistência ao fogo é de 30 a 45 minutos.

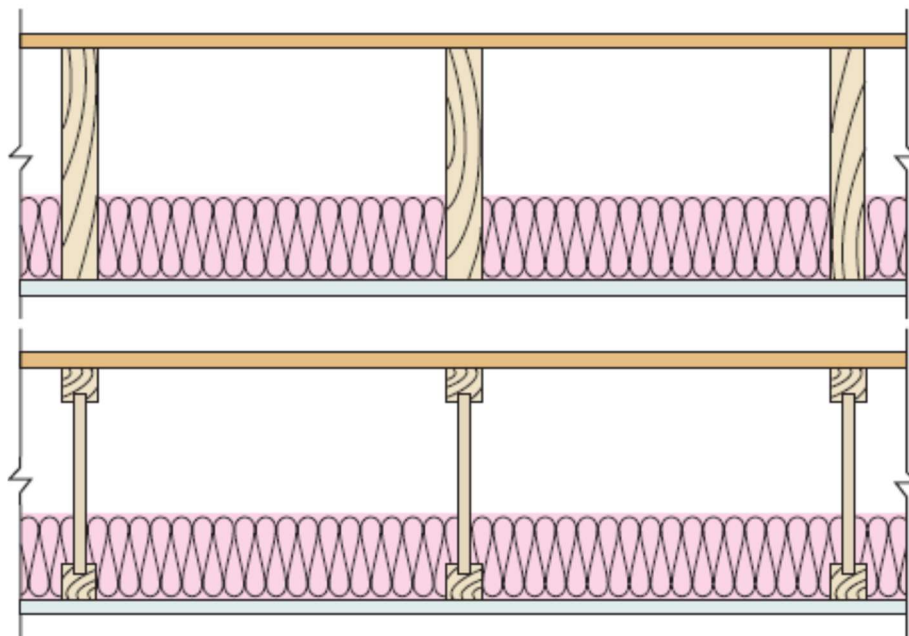


Figura 2.31 – Pavimento de Madeira (PM2) (AA.VV., 2002).

Devido aos seus valores de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão apenas está habilitado a separação de pisos do mesmo fogo.

O segundo exemplo foi escolhido com o propósito de ser possível analisar a diferença que existe nos índices de redução sonora quando são colocados os perfis resilientes entre o vigamento e as placas de gesso ou quando as placas são presas diretamente ao vigamento. Esta diferença é na ordem dos 14dB. Conclui-se então que o uso destes perfis representa uma grande vantagem no isolamento acústico.

Comparando à solução apresentada anteriormente no pavimento seguinte é adicionada mais uma placa de gesso cartonado com 15,9 mm de espessura na face inferior. Além de em vez de as placas estarem aparafusadas diretamente ao vigamento, foi colocada um perfil ómega, fixado ao vigamento, onde as placas são depois fixadas, garantindo-lhe assim mais uma caixa de ar, e funcionando as placas como uma membrana.

Esta solução já apresenta um valor de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão muito superiores às soluções apresentadas anteriormente, de 54 e 48 dB, respetivamente. Relativamente à resistência ao fogo continua a ser de 60 minutos.



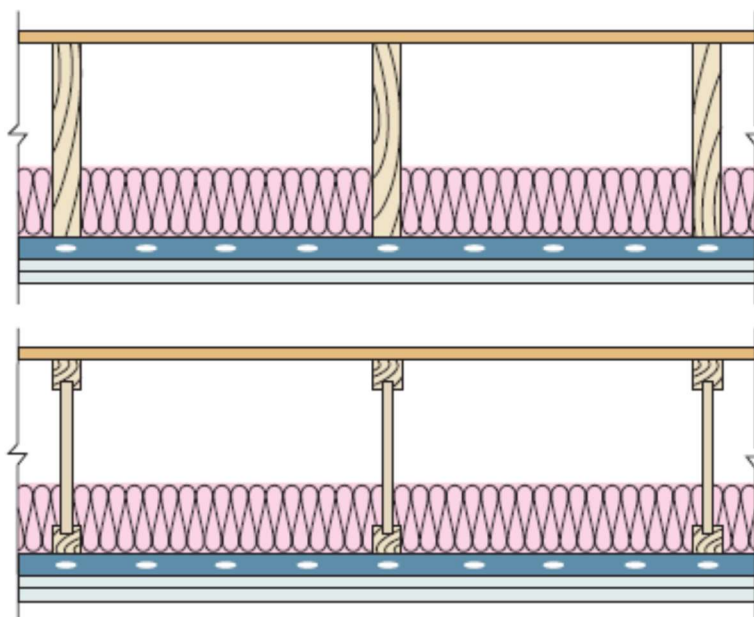


Figura 2.32 – Pavimento de Madeira (PM3) (AA.VV., 2002).

Apesar da solução PM3 possuir uma resistência ao fogo de 60 minutos e um isolamento sonoro a sons aéreos maior que 48 dB não está habilitada a dividir pavimentos de fogos diferentes, pois o seu isolamento a sons de percussão é menor que 50 dB.

Caso esta solução fosse composta por apenas uma placa de gesso cartonado o seu índice de redução sonora a sons aéreos seria de 48 dB (solução proposta em (AA.VV., 2002)).

O quarto pavimento, PM4, é composto pelos mesmos elementos que o anterior, e ao qual foi adicionado o piso húmido, composto por 4 cm de betonilha, conferindo-lhe assim um isolamento sonoro a sons aéreos de 69 dB e a sons de percussão de 44 dB. A resistência ao fogo não se altera.

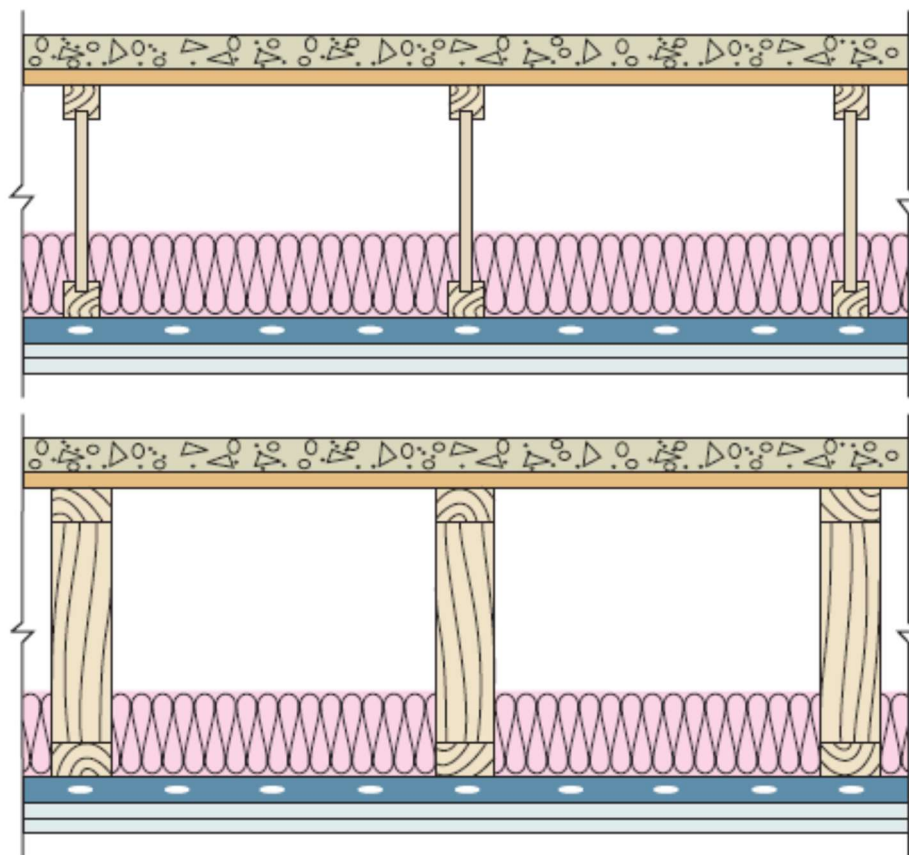


Figura 2.33 – Pavimento de Madeira (PM4) (AA.VV., 2002).

Por fim, apresenta-se a opção com piso húmido para mostrar as diferenças existentes, entre o piso húmido e o piso seco, sendo estas na ordem dos 15 dB. Se em vez de o piso húmido a opção fosse composta por outra placa de OSB o índice de redução sonora seria 57 dB aumentando apenas 3 dB relativamente à opção só com uma placa de OSB, mas em contrapartida o seu isolamento sonoro a sons de percussão seria de 50 dB, um aumento de 6 dB.

## 2.3 ACÚSTICA DE PAVIMENTOS

Embora um projeto acústico apenas se proponha a estudar o isolamento oferecido pelos elementos de compartimentação, tem uma forte relação com a acústica de salas. Quando o som é emitido por uma determinada fonte sonora e esta intersecta um elemento construtivo, uma parte do som é refletida (área abrangida pela acústica de salas), outra parte do som é dissipada sobre a forma de calor e a restante atravessa o elemento de compartimentação e é depois radiado pelo elemento (é essencialmente este fenómeno que acústica dos edifícios abrange). Assim sendo, não é possível desassociar o isolamento acústico de um elemento, do desempenho acústico do espaço onde este está inserido.

### 2.3.1 Acústica de espaços

O valor que quantifica a qualidade acústica de salas é o tempo de reverberação, “intervalo de tempo necessário para que o nível de pressão sonora diminua 60dB, após interrompida a emissão”. Este valor depende da frequência, do coeficiente de absorção sonora (relação entre a energia absorvida e a energia incidente), a área dos materiais da envolvente e do volume do espaço (Domingues, 2007).

De acordo com os princípios de Sabine o tempo de reverberação, T, é dado pelas seguintes formulas:

$$T = \frac{0,16 V}{A} \text{ sendo que } A = \sum \alpha_i \cdot S_i \quad (2.1)$$

Em que:

V – Volume do Espaço, em m<sup>3</sup>

S<sub>i</sub> – Área do material, em m<sup>2</sup>

A<sub>i</sub> – Coeficiente de absorção sonora

O coeficiente de absorção sonora é a razão entre E<sub>a</sub> (energia absorvida) e E<sub>i</sub> (energia incidente) variando com o material e a frequência do som emitido.

Considerando que o coeficiente de absorção dos materiais varia conforme a frequência é de extrema importância categorizar os materiais absorventes de acordo com a sua capacidade de absorver o som sendo que existindo três grandes categorias:

- Os materiais texturados, mais eficazes em altas frequências (f>1000 Hz);
- As membranas ressonantes, destinadas a baixas frequências (f<400 Hz);
- Os ressoadores de cavidade, eficazes em frequências médias (entre 400 e 1000 Hz).

Como na generalidade dos casos as frequências que se pretendem isolar não se restringem a uma só gama de frequências, a solução mais adequada passa por uma solução mista que garanta a absorção sonora de uma gama relativamente elevada e equilibrada (Domingues, 2007).

#### 2.3.1.1 Materiais texturados

Materiais texturados são aqueles que apresentam uma superfície cuja textura potencia a absorção de energia sonora. A superfície destes materiais, apresentam pequenas fendas que asseguram a permeabilidade e a propagação das ondas sonoras de alta frequência entre as mesmas. O ar contido nestas fendas é sujeito a um movimento oscilatório e é devido ao atrito sobre as paredes da fenda que

parte da energia sonora é transformada em energia térmica. Neste processo ocorre maior absorção nas frequências altas do que nas baixas, pois enquanto que a absorção das frequências baixas varia com a espessura a das frequências altas é independente desta (Domingues, 2007)

Fazem parte desta categoria de absorventes (Domingues, 2007):

- As lãs minerais

Constituídas por lã de vidro, de rocha ou de escória de alto forno, são comercializadas em mantas, elementos flexíveis com massa volúmica inferior a 55 kg/m<sup>3</sup>, e placas, semirrígidas, com massa volúmica inferior a 55kg/m<sup>3</sup>, ou rígidas, com massa volúmica superior às primeiras. Relativamente ao acabamento este pode ser liso, perfurado, fissurado ou estriado, e poderão também apresentar uma das faces protegidas por um tecido de lã mineral para evitar a desagregação das fibras;

- Aglomerados de cortiça

Diferente dos vários produtos derivados de cortiça usado como revestimento de paredes e tetos apenas os aglomerados puros expandidos ou aglomerados negros de cortiça são considerados bons absorventes sonoros. São comercializados em placas com dimensões parametrizadas (mas podem apresentar medidas diferentes) e apresentam uma massa volúmica bastante variável;

- Massas Porosas

Quando têm na sua constituição fibra mineral ou granulados minerais e aglutinantes apropriados são consideradas bons absorventes sonoros, são sendo aplicadas normalmente por projeção sobre o tosco de paredes e tetos e apresentam uma massa volúmica entre 130 e 165 kg/m<sup>3</sup>. São aconselhadas em superfícies irregulares ou em locais sujeitos a grandes variações de humidade relativa do ar ou a condensações de vapor de água.

- Alcatifas ou tecidos

As características e absorção sonora destes materiais varia conforme a espessura do pelo e a textura, e quando estas são constituídas na parte inferior por um forro dependem igualmente da espessura e massa volúmica deste material de suporte.

### **2.3.1.2 Membrana Ressonante**

As membranas ressoantes funcionam como sistemas absorventes sonoros através de mecanismos em que intervêm a ressonância destes sistemas e as características de porosidade do material.

Esta membrana só é possível existir se houver uma caixa de ar entre esta e o elemento de separação, aí as ondas sonoras transmitem um movimento vibratório à membrana, transformando a energia sonora em energia mecânica, que vai se dispersando devido ao atrito interno da deformação da placa (Domingues, 2007).

A frequência para qual a membrana tem um coeficiente de absorção máximo, chamada frequência de ressonância é dada pela seguinte expressão:

$$f = \frac{c}{2\pi} \times \frac{\rho}{m \cdot c \cdot d} \quad (2.2)$$

Em que:

c – Velocidade de propagação do som no ar, em m/s

$\rho$  – Massa volúmica do ar, em kg/m<sup>3</sup>

m – Massa volúmica do painel em kg/m<sup>2</sup>

d – Espessura da caixa de ar, em m

### 2.3.1.3 Ressonadores de cavidade

Tal como as membranas ressonantes, o ressoador de cavidade absorve a energia sonora através da vibração causada pela mesma, que depois é transformada em energia mecânica, dispersando-se devido ao atrito do ar. A absorção pode ainda ser feita através da transformação direta de energia sonora em energia calorífica (Domingues, 2007).

Se um painel apresentar aberturas de diferentes dimensões funcionará como um conjunto de ressoadores de cavidade, trabalhando com frequências diferentes.

Tal como nas membranas ressonantes o coeficiente de absorção é máximo quando a frequência é a seguinte:

$$f = \frac{c}{2\pi} \times \frac{S}{(V_c \cdot V_a)^{0,5}} \quad (2.3)$$

Em que:

$c$  – Velocidade de propagação do som no ar, em m/s

$V_c$  – Volume da cavidade, em  $m^3$

$V_a$  – Volume da abertura da passagem, em  $m^3$

$S$  – Secção da abertura da passagem

### 2.3.2 Sons Aéreos

Os sons aéreos derivam da excitação direta do ar, por uma fonte sonora que nos edifícios pode materializar-se no ruído proveniente do tráfego rodoviário, ferroviário ou aéreo, no funcionamento dos equipamentos, de carácter coletivo ou individual ou da própria interação quotidiana

Os campos sonoros que se podem estabelecer dentro de um edifício têm origem em ruído produzido por fontes de energia sonora que se enquadram em dois grandes grupos, ruídos externos e ruídos internos. Tal como o nome indica os ruídos externos provêm do exterior do edifício e estão normalmente associados ao tráfego rodoviário e ferroviário, e não irão ser considerados ao longo deste documento, devido ao facto de não serem considerados no cálculo do isolamento de um pavimento. Os ruídos internos por sua vez são devido à utilização do próprio edifício.

É importante salientar que os sons aéreos se transmitem através dos sons diretos e dos sons marginais. Os sons diretos transmitem-se através dos elementos de separação e ocorre através da vibração destes ou de fendas e descontinuidades do elemento. Por sua vez os sons marginais propagam-se através de elementos ligados ao elemento de separação, como é o caso das paredes resistentes.

#### 2.3.2.1 Método Experimental – ISO/CEN

De forma a caracterizar o isolamento sonoro a sons de aéreos de um determinado elemento pode usar-se o método ISO/CEN, descrito nas Normas EN 20140-36, para ensaios em laboratório, Normas EN ISO 140-4 e EN ISO 140-5, para ensaios *in situ* para elementos adjacentes ou fachadas e elementos de fachada, respetivamente.

Estes ensaios são realizados por bandas de frequência com a largura de terços de oitava ( $f_s=2^{(1/3)}x f_i$ ) entre 100 Hz e 3150 Hz, apesar de em ensaios *in situ* poderem ser usados filtros de bandas de frequência com largura de uma oitava ( $f_s=2x f_i$ ) entre 125Hz a 2000 Hz.

Os valores de índice de redução sonora obtidos em laboratório,  $R_w$ , ou *in situ*,  $R'_w$ , calculam-se pela expressão:

$$R = L_{\text{emissão}} - L_{\text{recepção}} + 10 \log(S/A) \quad (2.4)$$

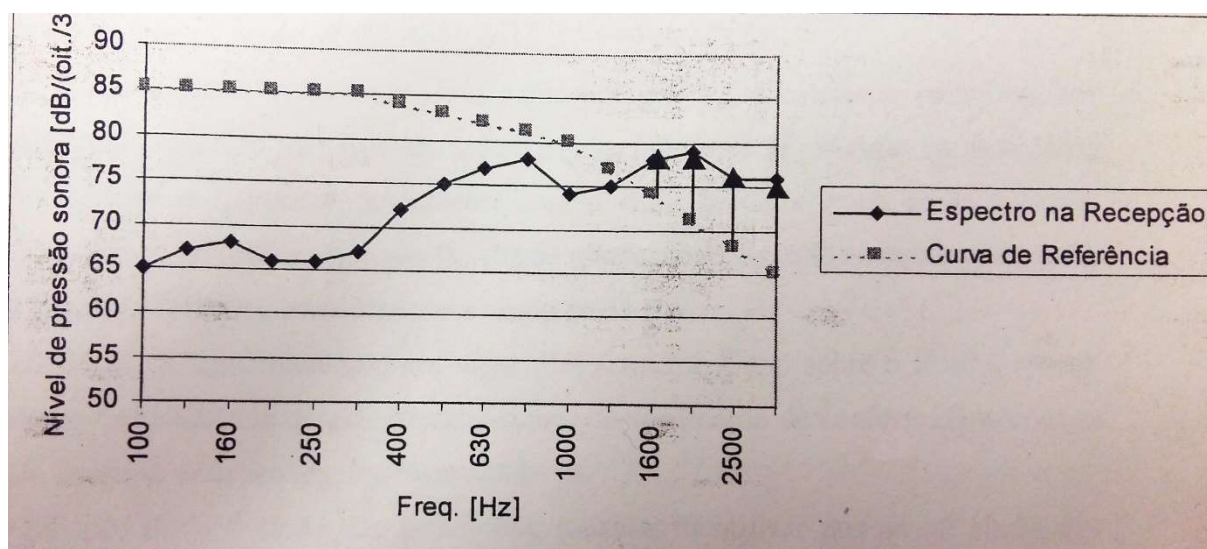
Em que:

S – Superfície do elemento de compartimentação;

A – Área de absorção sonora equivalente do espaço de recepção.

Relativamente ao índice de isolamento sonoro,  $D_n$ , este pode ser normalizado, quando depende da área do elemento, ou padronizado, quando depende do tempo de reverberação do elemento. Geralmente, para pavimentos apenas se contabilizam os valores *in situ*, pois apenas nestes ensaios as transmissões marginais são contabilizadas. Os ensaios em laboratórios, normalmente, são usados para obter valores de tetos falsos ou pequenos elementos (Patricio, 2002).

A última versão da norma ISO 717-1 propõe um termo de adaptação que deve ser considerado no índice de isolamento sonoro. Estas correções são normalmente adicionadas a índices obtidos em laboratório devido ao facto de que, nessas condições é usado o ruído branco (caracterizado pelo valor constante de pressão sonora no domínio da frequência) para ser possível comparar com as medições *in situ*. Considera-se então dois tipos de espectros que dependem dos tipos de fonte sonora, o ruído rosa e ruído de tráfego urbano, apresentados na tabela seguinte (Patricio, 2002):



Tipo de fonte sonora	Espectro indicado	Termo de adaptação
Atividades humanas	Espectro de ruído rosa	C
Brincadeiras de criança		
Tráfego rodoviário urbano	Espectro de ruído de tráfego urbano	C <sub>tr</sub>
Tráfego ferroviário a velocidade reduzida		

Tabela 2.12 -Espectro de ruído rosa vs espectro de ruído de tráfego urbano (Patricio, 2002)

Através da análise da tabela acima é possível identificar que no caso dos pavimentos apenas iremos tratar o espectro de ruído rosa.

É comum encontrar este termo de adaptação em folhetos comerciais, apresentados da seguinte forma:  $R_w (C;C_{tr})$ . Ou seja, a título exemplificativo, no género:

$$R_w (C;C_{tr}) = 45 (-1;-5) \text{ dB}$$

Obtendo-se, então de forma mais explícita:

$$R_w = 45 - 1 = 44 \text{ DB(A)} \text{ – Para ruído rosa;}$$

$$R_w = 45 - 5 = 40 \text{ DB(A)} \text{ – Para ruído de tráfego rodoviário.}$$

O método apresentado tem uma aplicação generalizada na maior parte dos países europeus, na medida que possibilita a comparação de resultados obtidos em processos de medição elaborados nesses países, Em Portugal a regulamentação em vigor, (Patricio, 2002), remete para a sua utilização quando há necessidade de verificação de conformidade com as exigências de conforto acústico legalmente estipuladas.

### 2.3.2.2 Métodos de Estimativa

Existem alguns métodos de estimativa de comportamento acústico a sons aéreos, a conhecida Lei da Massa, que é o mais utilizado e defendido por Patricio, e os métodos de Meisser e Sharp.

Importante referir que cada um dos métodos de estimativa apresentam valores que terão que ser corrigidos, devido ao facto de não contabilizarem as transmissões marginais. Para isso existir um valor



corretivo chamado TM (transmissão marginal) que se soma ao valor de redução sonora, valor este que varia conforme o próprio índice. Podendo ser os seguintes:

$R_w$ – Índice de redução sonora (dB)	TM – Transmissão Marginal (dB)
$R_w \leq 45$ dB	0
$45 \leq R_w \leq 50$ dB	3
$R_w \geq 50$ dB	5

Tabela 2.13 – Valores corretivos devido às transmissões marginais (Patricio, 2002).

#### 2.3.2.2.1 Lei da Massa – Método elasto-dinâmico

Este método de estimação de comportamento acústico tem origem conceptual num modelo inercial, integrando o efeito de rigidez (fundamentalmente de flexão) e amortecimento interno, (Patricio, 2002).

Considerando um elemento hipotético, o seu nível de isolamento sonoro para uma determinada frequência estará diretamente relacionado com a sua massa. Esta relação é designada por Lei da Massa. Esta relação evidencia que, em condições ideais, quando se duplica a massa do elemento de compartimentação a transmissão sonora é reduzida em 6dB por oitava (Patricio, 2002).

Este método tem uma abrangência bastante diminuta pois não se aplica a elementos leves ou heterogéneos. Para os resultados estimados serem próximos dos experimentais é necessário realizar algumas correções, devido aos fenómenos de ressonância e de coincidência responsáveis por quebras na redução sonora (Patricio, 2002).

Numa primeira análise podemos relacionar a redução de transmissão sonora com a frequência relativa. Aqui teremos que ter em consideração o efeito de coincidência, fenómeno que ocorre quando a frequência de determinada onda sonora é igual à frequência de coincidência (Patricio, 2002).

$$f_c = \frac{c^2}{2 \pi h} \sqrt{\frac{12 \rho (1 - \nu)^2}{E}} \quad (2.5)$$

Em que:

$\nu$  – Coeficiente de Poisson de material constituinte do elemento;

$E$  – Modulo de elasticidade do mesmo material;

$h$  – Espessura do elemento de compartimentação;

$c$  – Velocidade de propagação do som no ar.

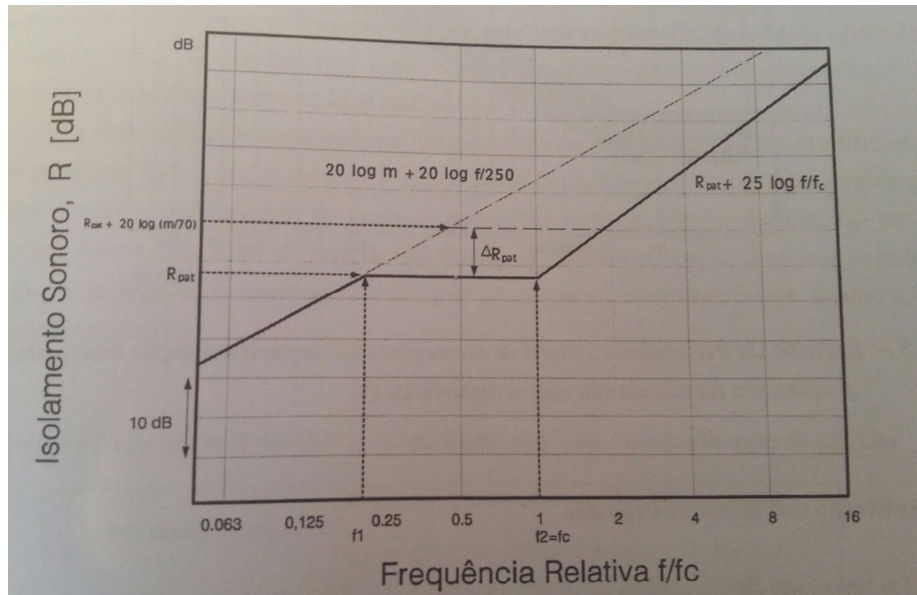


Figura 2.34 – Redução sonora em função da frequência relativa, (Patricio, 2002)

Nos materiais correntes de construção e considerando apenas elementos simples e homogêneos pode adotar-se o valor medio da relação  $f_2/f_1$  é 5. O valor de  $R_{PAT}$  obtém-se a partir do valor de  $f_1$ .

Numa segunda análise, considerando novamente apenas elementos simples e homogêneos podemos usar o método gráfico, que relaciona a redução de transmissão sonora ponderado com a sua massa superficial, não sendo válido para envidraçados.

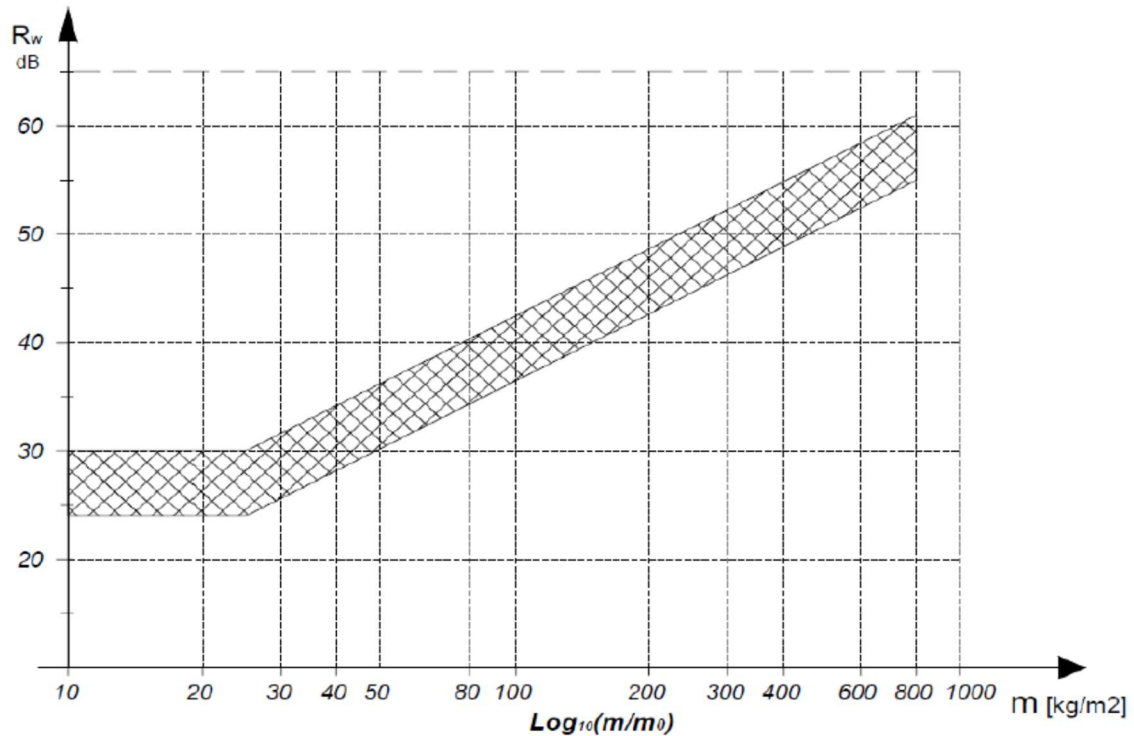


Figura 2.35 – Redução de transmissão sonora em função da massa superficial (Patricio, 2002).

O valor da redução sonora ponderado obtém-se relacionando a massa superficial do elemento e o ponto médio da área sombreada. A área sombreada pretende representar a dispersão normal de comportamento para diferentes divisórias.

O gráfico pode ser traduzido em expressões analíticas sendo elas:

$$R_W = 27 \pm 3,15 \text{ se } m < 25 \text{ kg/m}^2 \quad (2.6)$$

$$R_W = 20,4 \times \log(m) - 1,5 \pm 3,15 \text{ se } m \geq 25 \text{ kg/m}^2 \quad (2.7)$$

No caso de estarmos a considerar um novo elemento de compartimentação pode-se utilizar o abaco da figura seguinte que relaciona o acréscimo de redução com sonora com a massa do primeiro e segundo elemento. É de salientar que quando se duplica a massa do elemento, o acréscimo em questão é na ordem de 6 dB.

A Lei da Massa como o nome indica estima o índice de redução acústica em função da sua massa. Este método considera que quanto maior for a massa do elemento a frequência do som menor será a vibração do elemento, logo menor probabilidade terá de propagar o som, e portanto maior índice de redução

acústica. O método considera que quando se dobra a massa do elemento o acréscimo de redução acústica será de 6dB.

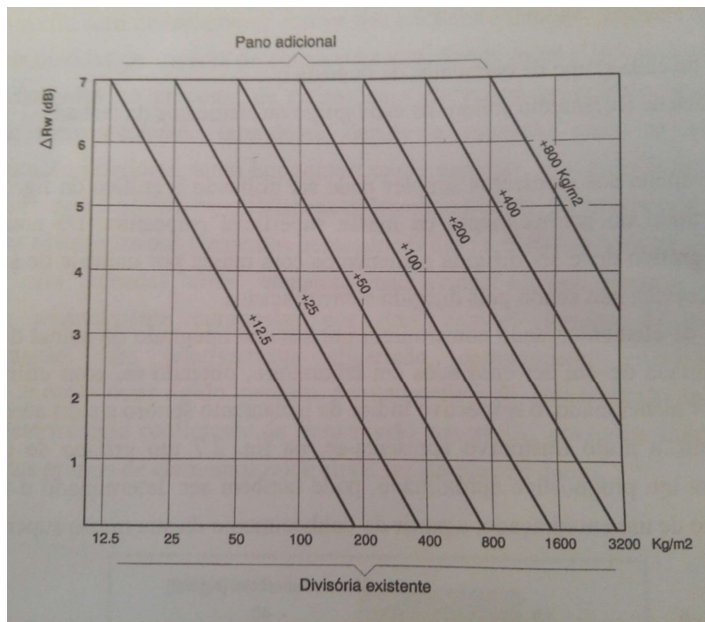


Figura 2.36 – Ábaco para determinar acréscimo de isolamento sonoro em elementos duplos (Patricio, 2002).

Ao analisar o método conclui-se que a abrangência dele, em que se obtém valores próximos dos experimentais, apenas se refere aos elementos simples e homogêneos, pois apenas são contabilizados três valores neste método: a frequência do som, a massa do elemento e, numa análise mais complexa, o ângulo de incidência.

#### 2.3.2.2.2 Método de Sharp

O método desenvolvido por Bem H. Sharp intitulado método de Sharp, foi publicado em 1973 e apresenta-se como uma ferramenta gráfica para se obter o valor do índice de redução sonora de um elemento, simples ou duplos.

##### 2.3.2.2.2.1 Aplicabilidade em elementos simples:

No cálculo da redução sonora em elementos simples Sharp considera dois pontos notáveis e duas retas com declive 6 e 9 dB por oitava. Ambos pontos notáveis dependem da frequência crítica dada pela seguinte equação:

$$f_c = \frac{c^2 \times 0.55}{C_L \times h} \quad (2.8)$$

Em que:

h – Altura do pavimento;

$C_L$  – Corresponde à velocidade de propagação no material.

Meio	Velocidade [m/s]
Ar	344
Água Doce	1460
Madeira	1000 a 4900
Cimento	4000
Aço	4700 a 5150
Vidro	5000 a 6000

Tabela 2.14 – Velocidade de propagação do som em vários materiais/elementos (Sampaio, 2016)

Os pontos notáveis têm as abcissas  $f_A$  e  $f_B$  dados pelas expressões:

$$f_A = \frac{f_c}{2} \quad (2.9)$$

$$f_B = f_c \quad (2.10)$$

Com a frequência crítica é possível calcular a ordenada destes pontos, a redução acústica.

$$R_A = 20 \log(m f_c) - 54 \quad (2.11)$$

$$R_B = 20 \log(m f_c) + 10 \log(\eta) - 45 \quad (2.12)$$

Em que  $\eta$  pode tomar valores como:

$\eta$  – Factor de perdas internas que nas seguintes matérias toma os seguintes valores:

- Tijolo cerâmico – 0,01
- Betão – 0,02
- Aço – 0,005

- Vidro – 0,005
- Madeira – 0.02, valor usado nos estudos acústicos consultados.

Calculados os pontos notáveis traça-se duas retas com declive 6 e 9 dB por oitava. A primeira reta intercepta o ponto A e a segunda o ponto B. Na interceção das duas retas, a que prevalece é a de 6 dB/oitava (Sampaio, 2016). O gráfico final deve ser igual ao da figura seguinte:

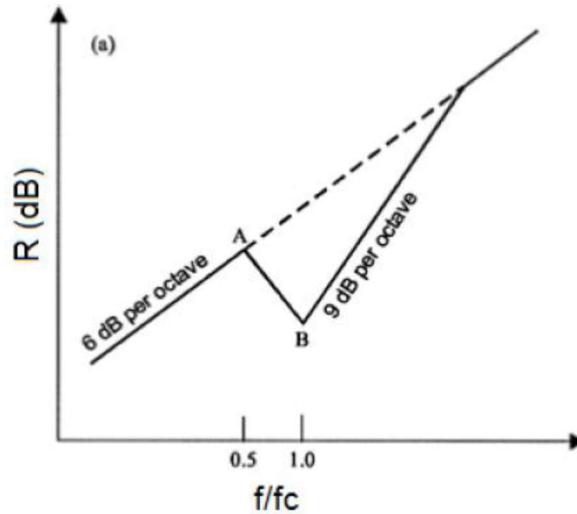


Figura 2.37 – Método de Sharp para elementos Simples (Sampaio, 2016)

É importante referir que em elementos grossos, Sharp defende que a o índice de redução sonora é menor que o estimado, com uma redução de 6dB/oitava, conforme ilustrado na figura seguinte, confirmando que na interceção das duas retas a que deve prevalecer é a de menor declive.

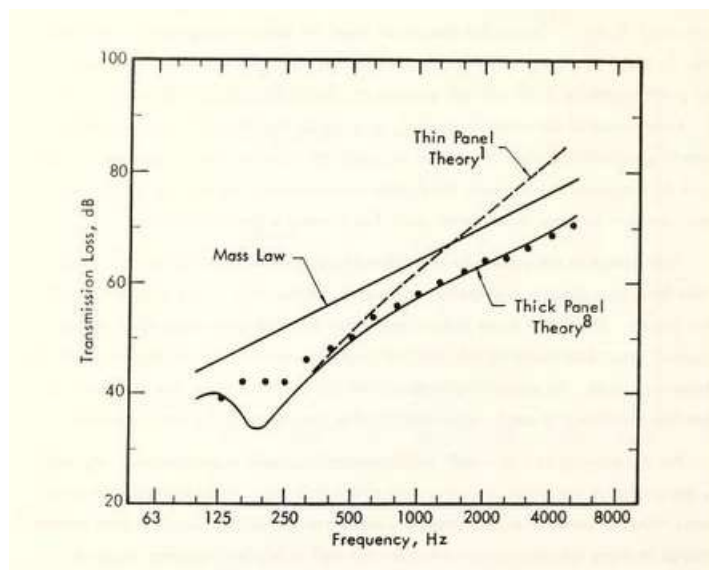


Figura 2.38 – Comparação de valores entre Lei da Massa, método de Sharp em elementos finos e grossos (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980)

É possível ainda usar um método analítico publicado por Sharp em que consiste:

Podemos então considerar que quando a  $f < f_c$  a redução sonora do elemento apenas vai ser devido à sua massa:

$$\text{Se } f < f_c \quad R_W = 20 \log(m f) - 48 \quad (2.13)$$

$$\text{Se } f > f_c \quad R_W = 20 \log(m f) + 10 \log\left(\eta \frac{f}{f_c}\right) + 10 \log\left(1 - \frac{f_c}{f}\right) - 44,5 \quad (2.14)$$

#### 2.3.2.2.2 Aplicabilidade em elementos Duplos

Relativamente aos elementos duplos a forma como se obtêm o índice de redução sonora é diferente, dependendo também da frequência da onda sonora, irá se obter então 4 valores limites de frequência:  $f_0$ , frequência de ressonância massa-ar-massa,  $f_i$ , frequência da caixa de ar  $f_{c1}$ , frequência crítica do 1º elemento e  $f_{c2}$ , frequência crítica do 2º elemento, calculadas através das formulas apresentadas anteriormente.

$$f_0 = \frac{113}{\sqrt{m_e d}} \quad (2.15)$$

$$f_i = \frac{55}{d} \quad (2.16)$$

Em que:

$d$  – Espessura da caixa de ar;

$m_e$  – massa equivalente é igual a  $\frac{2 m_1 m_2}{(m_1 + m_2)}$

A redução sonora é então calculada através das seguintes formas:

$$R_W = \begin{cases} 20 \log(M f) - 48, & \text{se } f < f_0 \\ R_{w,m_1} + R_{w,m_2} + 20 \log(f d) - 29, & \text{se } f_0 < f < f_i \\ R_{w,m_1} + R_{w,m_2} + 6, & \text{se } f > f_i \end{cases} \quad (2.17)$$

Em que:

M – Massa total do elemento de compartimentação = m1+m2

$$R_{w,m_1} = 20 \log(m_1 f) - 48$$

$$R_{w,m_2} = 20 \log(m_2 f) - 48$$

É necessário realçar o acréscimo de redução sonora que os ligadores entre elementos duplos têm, apesar de só interessar nos elementos de compartimentação verticais. Aqui pode-se distinguir em duas categorias, os planos de conexão, por exemplo as vigas, e os pontos de conexão, geralmente os conectores (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980).

Para o plano de conexão temos a seguinte formula:

$$\Delta R_w = 10 \log(b f_c) - 24 \quad (2.18)$$

Em que:

b – Distância de ligação.

Para o ponto de conexão a formula é diferente, sendo a seguinte:

$$\Delta R_w = 20 \log(e f_c) - 51 \quad (2.19)$$

Em que:

e – Comprimento do conector.

Sharp assume que os ligadores entre elementos de compartimentação duplos devam ser pontuais e não num plano, sendo que o incremento de redução sonora de um para o outro seja de 5 a 10 dB favorecendo o pontual.

Apesar de o método de Sharp não contabilizar o material de absorção térmica, este na sua obra refere a importância deste, afirmando que a sua aplicação incrementa a redução sonora na ordem de 3 a 8 dB dependendo da espessura e tipo do material (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980). Na figura seguinte mostra o exemplo desse incremento.



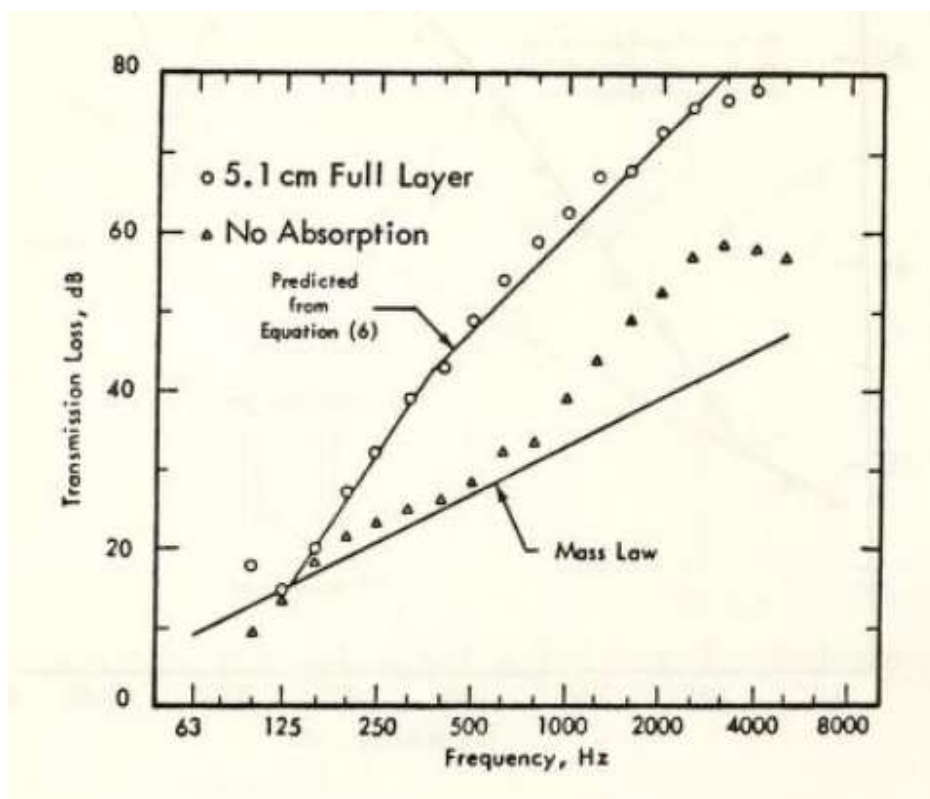


Figura 2.39 – Comparação de uma parede dupla com material absorvente ou não. Os elementos de construção são MDF com 0,64 e 0,32 com um espaçamento de 16cm (Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, 1980)

### 2.3.2.2.3 Método de Meisser

O método de Meisser, publicado no livro de sua autoria intitulado “*Acústica de os edificios*” em 1973, é semelhante aos restantes apresentados, mas com a exceção de que este apenas é utilizado em elementos duplos e contabiliza o efeito da caixa de ar e do material absorvente.

Tal como a metodologia defendida por Sharp, Meisser assume que nas frequências inferiores à frequência de ressonância o sistema duplo comporta-se como um elemento simples com a massa igual ao total dos dois elementos.

A redução acústica a um som com frequência de 500 Hz, frequência de referência, é dada pela seguinte fórmula:

$$R_{500\text{Hz}}^* = 13,3 \log m + 13,4 + K \quad (2.20)$$

Em que:

m – Massa total do Pavimento dos elementos construtivos sob e sobre o material absorvente;

K – Contributo da caixa de ar e do material absorvente que se encontra na cavidade, cujo valor não pode exceder 9dB e resulta da soma dos seguintes valores:

Altura da caixa de ar	Acréscimo de redução sonora
Até 1 cm	2 dB
De 2 a 4 cm	2 a 4 dB
Maior que 4 cm	5 dB
Espessura do material absorvente	
Não existe	0 dB
Até 1 cm	1 dB
De 2 a 4 cm	2 dB
Maior que 4 cm	3 a 4 dB

Tabela 2.15 – Valores de K para o método de Meisser (Sampaio, 2016)

Em seguida é necessário calcular a frequência de ressonância massa-ar-massa,  $f_0$ , a frequência de ressonância massa-ar-massa,  $f_n$ , e a frequência crítica dos dois panos, obtida pela mesma formula que em Sharp (Sampaio, 2016).

$$f_0 = 84 \times \sqrt{\frac{m_1 + m_2}{d \times m_1 \times m_2}} \quad (2.21)$$

$$f_n = \frac{c \times n}{2 \times d}, n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.22)$$

Em que:

$m_1$  – Massa do primeiro pano;

$m_2$  – Massa do segundo pano;

c – Velocidade do som no ar;

d – Espessura da caixa de ar.

O traçado do gráfico, com escala logarítmica nas abscissas e linear nas ordenadas, começa-se pela representação do ponto ( $f=500$  Hz,  $R_w$ ), a partir deste ponto nasce uma reta com declive 6dB/oitava. De seguida representa-se as frequências críticas dos dois panos, a frequência de ressonância massa-ar-massa e a frequência de ressonância da caixa de ar (Carvalho, 2012)

No caso da frequência de ressonância massa-ar-massa subtrai-se 4 dB ao valor da ordenada dado pela reta com 6 dB de declive traçada anteriormente. Procede-se da mesma maneira para as frequências críticas de cada um dos panos, mas aqui subtrai-se 5 dB quando são panos diferentes e 9 dB caso sejam panos iguais. Por fim em cada frequência de ressonância subtrai-se 1 dB na ordenada da reta auxiliar, igual aos descrito anteriormente (Carvalho, 2012). O gráfico irá ficar com a seguinte representação.

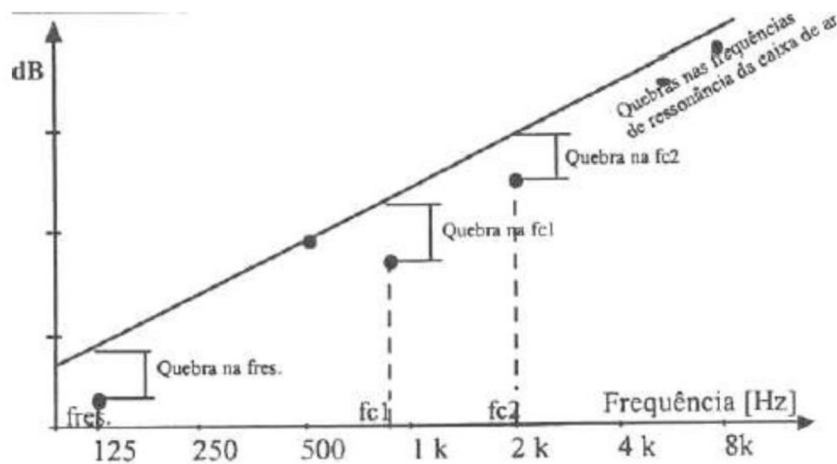


Figura 2.40 – Representação dos pontos para método de Meisser (Sampaio, 2016)

Com início nos pontos notáveis traçados anteriormente traça-se uns segmentos de reta com declive de 10 dB/oitava até à interceção da reta com a reta auxiliar (Carvalho, 2012).

A partir dos pontos de interceção entre as duas retas usadas anteriormente (com declive 6 e 10 dB) procede-se ao traçado de novas retas agora com declive de 8 dB/oitava (Carvalho, 2012).

Por fim, traça-se uma “curva” que deve passar pelos pontos notáveis marcados anteriormente, acompanhando as retas com declive de 10 e 8 dB/oitava (Sampaio, 2016) (Carvalho, 2012). Obtendo então um gráfico com a seguinte representação:

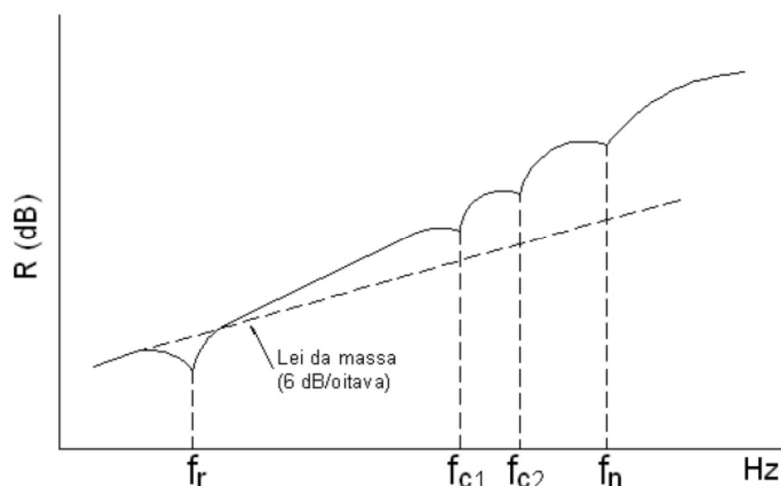


Figura 2.41 – Método de Meisser (Sampaio, 2016)

### 2.3.3 Sons de Percussão

Os sons de percussão tal como o seu nome indica, são devido à excitação direta de um elemento de compartimentação e podem, devido à rigidez das ligações existentes propagar-se com relativa facilidade através de toda a malha estrutural de um edifício.

Devido a este facto, os sons de percussão, podem ter um carácter mais incomodativo no comportamento acústico de um edifício pois estes podem ser sentidos em compartimentos bastantes distantes do local de origem.

Estes sons têm como origem em fontes tão variadas como deslocação das pessoas, quedas de objetos ou arrastar de moveis. De um modo geral, qualquer ação de choque exercida num ponto de um determinado elemento de compartimentação, transmitindo-se através de ondas elásticas por todo o elemento e conseqüentemente para os elementos adjacentes a que este se encontra ligado. Conclui-se que o a energia sonora radiada por um pavimento é fortemente influenciada pelas propriedades elásticas deste.

#### 2.3.3.1 Método Experimental – ISO/CEN

De forma a caracterizar o isolamento sonoro a sons de percussão de um determinado elemento pode-se usar o método ISO/CEN, descrito nas Normas EN ISO 140-6, para ensaios em laboratório, Normas EN ISO 140-7, para ensaios *in situ* (Patricio, 2002)

Estes ensaios são realizados por bandas de frequência com a largura de terços de oitava ( $f_s=2^{(1/3)}xf_i$ ) entre 100 Hz e 3150 Hz. Apesar de que em ensaios *in situ* podem ser usados filtros de bandas de frequência com largura de uma oitava ( $f_s=2xf_i$ ) entre 125Hz a 2000 Hz.

À semelhança dos métodos experimentais de caracterização de isolamento sonoro a sons aéreos pode-se obter diferentes valores únicos (índices) dependendo de onde foram feitas as medições. A grande diferença na apresentação do índice é o símbolo ', em ensaios em laboratório ele não está presente,  $L_{n,w}$ , e em ensaios *in situ* adiciona-se o ' após a letra L,  $L'_{n,w}$  e  $L'_{Nt,w}$ . A presença da letra T é quando é considerado o tempo de reverberação do elemento, enquanto que quando não está presente considera-se a área, (Patricio, 2002).

De igual forma como nos sons aéreos é necessário proceder à comparação com a curva de referência, mas agora proposta pela Norma ISO 717-2, que irá ser explicada no decorrer do presente documento.

### 2.3.3.2 Método de Estimativa

Para a determinação do isolamento a sons de percussão a norma EN 12354-2:2000 propõe dois métodos, o Método Simplificado e o Método detalhado, embora apenas irá ser estudado o método simplificado. Enquanto que o 1º método apenas permite calcular do isolamento sonoro por via direta, de cima para baixo, o método detalhado permite calcular por via direta e indireta, de baixo para cima (Sampaio, 2016). Irá ainda ser abordado o método proposto pelo LNEC, o método invariante. (Patricio, 2002))

#### 2.3.3.2.1 Método simplificado

O método simplificado apenas permite calcular o isolamento a sons de percussão por via direta (Silva, 2015), isto é, de cima para baixo, e consiste na seguinte expressão:

$$L'_{n,W} = L_{n,w,eq} - \Delta L_W + K \quad ( 2.23 )$$

Em que:

$L_{n,w,eq}$  – Representa o nível de pressão sonora equivalente do som de percussão;

$\Delta L_W$  – Nível de redução do som de percussão do revestimento do piso,

K – Correção para a transmissão do ruído de percussão ocorrido pelas transmissões marginais.

O valor de redução do som de percussão do revestimento do piso, tal como o nome indica, depende dos materiais e características do revestimento. A tabela seguinte apresenta alguns exemplos de revestimentos e seu valor de redução do som de percussão.

Designação		Características	$\Delta L_w$
Revestimento de piso flexível	Alcatifa	Com 3 mm de espessura	17 dB
		Com 5 mm de espessura	18 dB
		Com 8 mm de espessura	23 dB
		Com 8 mm de espessura sobre base de espuma	30 dB
	Vinílico de base flexível	Com 2 mm de camada de desgaste sobre membrana de polietileno reticulado com cerca de 1 mm.	15 dB
Cortiça	Aglomerado de cortiça com 5 mm de espessura	15 dB	
Pavimentos flutuantes	Madeira + Borracha	Pavimento de madeira colada a manta resiliente em aglomerado de borracha com 4,5 mm de espessura	21 dB
	Cerâmicos + Cortiça	Ladrilhos cerâmicos com 7 mm de espessura + aglomerado de cortiça com 6 mm de espessura	14 dB
	Mármore + Cortiça	Placas de mármore com 20 mm de espessura + aglomerado de cortiça com 6 mm	14 dB
	Parquet flutuante	Parquet de madeira + membrana de polietileno reticulado de 3mm	18 dB

Tabela 2.16 – Exemplos de valores de redução do som de percussão (Sampaio 2016)

É também possível através de o gráfico apresentado a seguir obter o valor de  $\Delta L_w$  representado pela letra A, em d, enquanto que a letra B representa a massa por área do elemento, em  $\text{Kg/m}^2$ , por fim, a letra C representa a rigidez dinâmica da camada resiliente, em  $\text{MN/m}^3$ , (Silva, 2015).

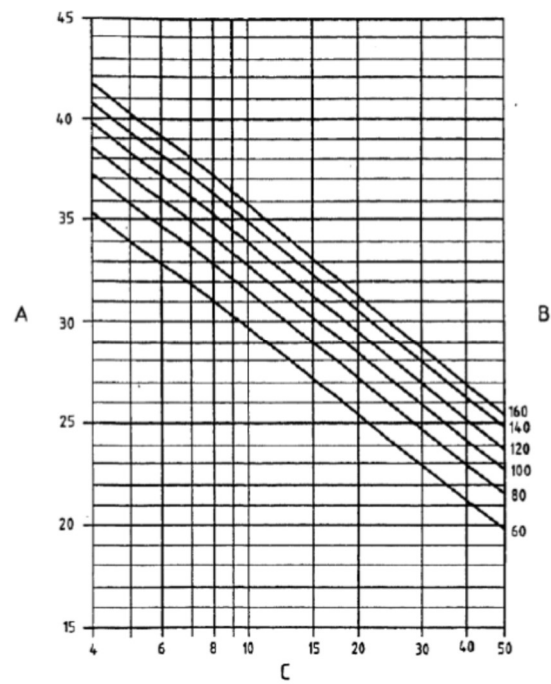


Figura 2.42 – Gráfico para cálculo de  $\Delta L_w$  (Silva, 2015)

O valor K é obtido através da seguinte tabela presente na Norma NP EN 12354-2. Esta relaciona o valor da massa superficial do pavimento com a massa superficial média das paredes não cobertas (Sampaio 2016).

Massa por unidade de área do elemento separador (pavimento) Kg/m <sup>2</sup>	Massa média por unidade de área dos elementos marginais homogêneos não cobertos por camadas adicionais Kg/m <sup>2</sup>								
	100	150	200	250	300	350	400	450	500
100	1	0	0	0	0	0	0	0	0
150	1	1	0	0	0	0	0	0	0
200	2	1	1	0	0	0	0	0	0
250	2	1	1	1	0	0	0	0	0
300	3	2	1	1	1	0	0	0	0
350	3	2	1	1	1	1	0	0	0
400	4	2	2	1	1	1	1	0	0
450	4	3	2	2	1	1	1	1	1
500	4	3	2	2	1	1	1	1	1
600	5	4	3	2	2	1	1	1	1
700	5	4	3	3	2	2	1	1	1
800	6	4	4	3	2	2	2	1	1
900	6	5	4	3	3	2	2	2	2

Tabela 2.17 – Determinação do valor de correção para as transmissões marginais (Silva, 2015)

Por fim, o nível de pressão sonora equivalente normalizado é obtido através da seguinte expressão:

$$L_{n,w,eq} = 164 - 35 \times \log m \quad ( 2.24 )$$

Em que

m – Massa superficial do elemento.

### 2.3.3.2.2 Método do Invariante Ia+Ip

O método da invariante Ia+Ip ou  $L_{n,w}+R_w$ , proposto pelo LNEC, é usado para a determinação do índice de isolamento sonoro a sons de percussão, Ip ou  $L_n$ , a partir do valor de índice de isolamento sonoro a sons aéreos, Ia ou  $R_w$ , obtido através da Lei da massa, método proposto pelo LNEC, ou pelos métodos defendidos anteriormente, Método de Sharp ou Método de Meisser.



O método proposto pela LNEC propõe então a seguinte expressão:

$$l_a + l_p = 84 + 10 \log \left[ \frac{S_f}{\sqrt{2}} \left( \frac{\rho_0}{2\pi\rho_s^2 c} + \frac{\rho_0 c \sigma}{2,3\rho_s^2 c_L \omega \eta h} \right) \right] \quad ( 2.25 )$$

Em que:

$\rho_s$  – Massa superficial do elemento de compartimentação;

$c_L$  – Velocidade de propagação das ondas longitudinais;

$\sigma$  – Fator de radiação;

$\rho_0$  – Massa específica do ar;

$\eta$  – Amortecimento interno;

$S_f$  – Densidade espectral da força média quadrática;

$c$  – Velocidade de propagação do som no ar;

$\omega$  – Frequência angular de vibração ( $\omega=2\pi f$ );

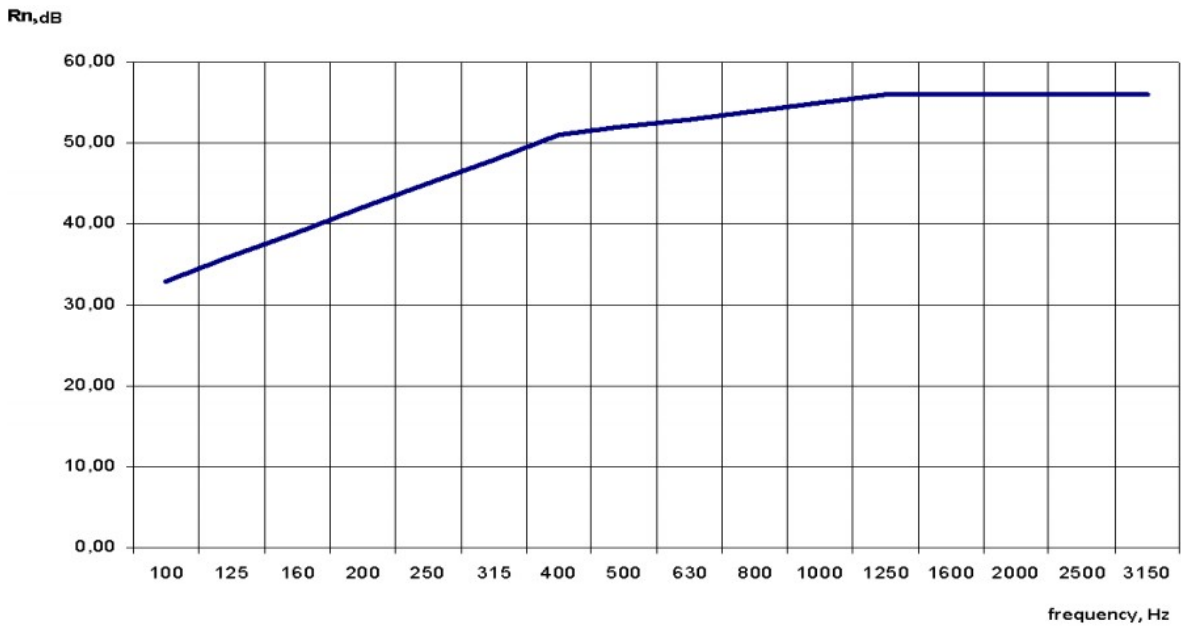
$h$  – Espessura do elemento.

Ao longo do presente documento não irá ser aplicado este método, devido ao fato de que ele depende do índice de redução sonora.

#### 2.3.4 Curvas de Referência

Qualquer dos métodos experimentais ou de estimativa apresentados anteriormente neste documento requerem a consideração dos desvios desfavoráveis quando comparadas com a curva de referência constante na Norma EN ISO 717-1. Os desvios desfavoráveis só devem ser considerados aceitáveis quando for satisfeita a seguinte condição:

“O valor médio do desvio em sentido desfavorável, ..., calculado por divisão da soma dos desvios nesse mesmo sentido (desfavorável) pelo número total de bandas de frequências consideradas no processo de medição (diagrama), deve ser o mais elevado possível, todavia sem ultrapassar o valor de 2 dB” (Patricio, 2002)).



Frequência (Hz)	1/3 Oitava	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250-1600	2000	2500-3150
Valores de Referência, dB	1/3 oitava	33	36	39	42	45	48	51	52	53	54	55	56	56	56
	Oitava		36			45			52			55		56	

Figura 2.43 – Curva de referência proposta por EN 717-1 para sons aéreos, adaptado de (Samoylenko & Didkovskiy, 2013)

Alguns autores defendem que a divisão deva ser o mais próximo de 2 dB, permitindo valores não inteiros. Caso a divisão dos desvios favoráveis pelo total de bandas de referência seja superior a 2, a curva de referência é mudada para a o numero inteiro imediatamente inferior com os valores por oitava de 35, 44 ,51, 54 e 55. Caso volte a ser superior, repete-se o processo, até que o resultado da divisão seja o mais próximo que 2 possível. (Samoylenko & Didkovskiy, 2013)

A abordagem acima apresentada é a da norma EN 717-1 e pode apresentar desvios do  $R_w$  calculado superiores a 8 dB, valor limite na antiga versão da presente norma, mas abolido na atual (Patricio, 2002).

Para os sons de percussão o processo é exatamente igual, mas agora com a seguinte curva de referência:

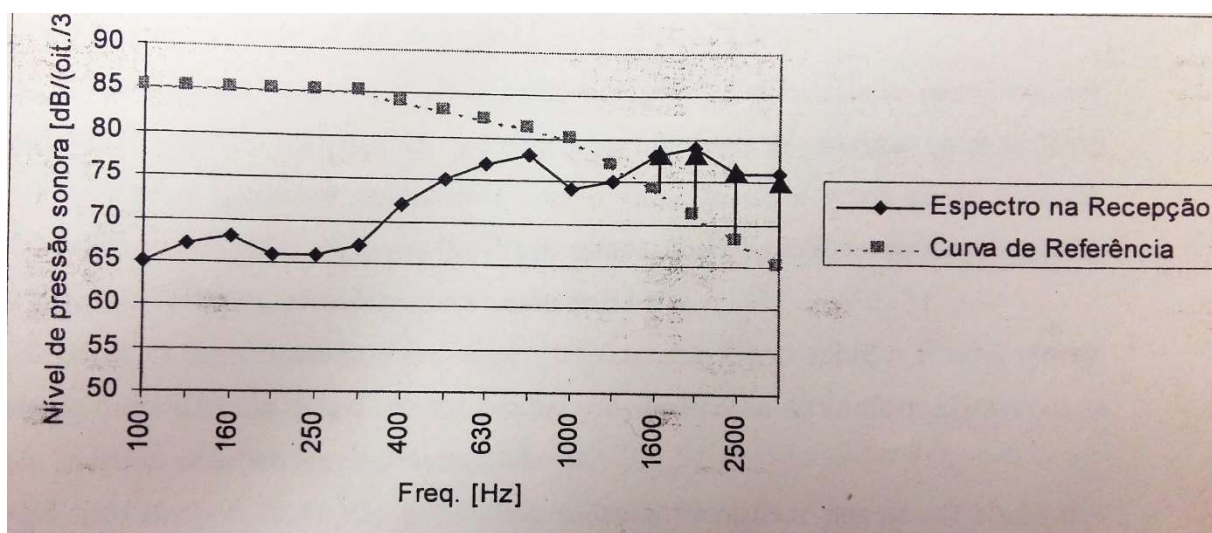


Figura 2.44 – Curva de referência proposta por EN 717-1 para sons de percussão (Patricio, 2002)

#### 2.3.4.1 ASTM-E90 - STC E IIC

Alguns dos valores de isolamento sonoro apresentados neste documento chamam-se STC ou IIC invés de  $D_{n,w}$  ou  $L_{n,w}$ , respetivamente. Deve se ao facto que foram obtidos em publicações canadianas, norte-americanas ou britânicas. Estes países, relativamente ao estudo acústico regem-se por uma norma intitulada ASTM E-90.

Relativamente ao STC têm uma abordagem muito semelhante à curva de referência defendida pelos europeus. Estudam numa banda de frequências de terços de oitavas semelhante à europeia com frequências entre 125 Hz a 4000 Hz, sendo esta a única diferença, (Desart, 2002).

Eles definem então um valor de STC, como a norma europeia define a curva de referência, sendo que quando comparados todos os valores de referência, são iguais, sendo a única exceção a frequência 100Hz, que eles não contabilizam, optando antes por analisar a frequência 4000 Hz.

Valores de Referência STC																	
1/3 Oitava, Hz		125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	4000
Valor de ref., dB		-16	-13	-10	-7	-4	-1	+0	+1	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	+4
Valores de Referência R <sub>w</sub>																	
1/3 Oitava, Hz	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000	2500	3150	
Valor de ref., dB	-19	-16	-13	-10	-7	-4	-1	+0	+1	+2	+3	+4	+4	+4	+4	+4	

Tabela 2.18 – Comparação STC com R<sub>w</sub>, (Desart, 2002)

De resto, as regras são as mesmas, as deficiências, diferenças, não podem ser superiores a 8, como a versão antiga da norma defendia, e a soma das deficiências não pode ser superior a 32, como a europeia,  $32/16=2$ .

### **3 CASO DE ESTUDO**

De forma a estudar os pavimentos leves acima referidos irão ser elaboradas duas análises:

- 1) Serão estudados quatro tipos de pavimentos, em LSF, em madeira, em betão armado e em vigotas pré-esforçadas quanto à exequibilidade, custo e tempo. Para isso serão aplicados num caso arbitrário, apresentado no capítulo 3.1.
- 2) Será estudado o comportamento acústico dos pavimentos apresentados no subcapítulo 3.2.1, através dos métodos da Lei da Massa, Sharp e Meisser para os sons aéreos e o método simplificado para os sons de percussão.

#### **3.1 PAVIMENTOS LEVES VS PAVIMENTOS PESADOS**

O caso de estudo é hipotético e é um edifício no centro histórico do porto que terá de ser alvo de uma reabilitação e após a sua análise é necessário reconstruir um piso por completo. Será então considerado que o piso tem 20m por 5m e que a caixa de escadas não está na área da laje de pavimento, mas sim no exterior do edifício.

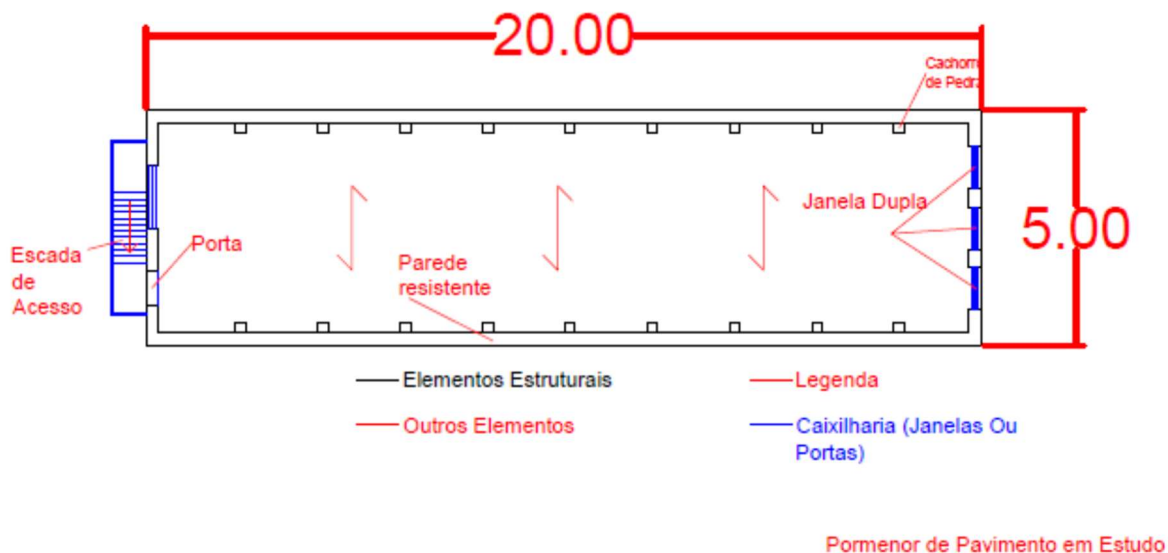


Figura 3.1 - Planta do pavimento a estudar

O antigo piso de madeira era apoiado através de cachorros de pedra, semelhantes ao da figura. Irá ser então ser considerado que o pavimento trabalha apoiado nas paredes exteriores laterais de forma simplesmente apoiada.



Figura 3.2 – Cachorro de Pedra ( Fonte: Wikipedia, Cachorro (Arquitetura))

Irá ser considerado que não há qualquer parede resistente sem serem as exteriores.

Para a elaboração da análise dos pavimentos irão ser consultadas as tabelas apresentadas nos capítulos 2.1.3.1 e 2.2.3.1 para os pavimentos leves e programas de calculo automático, para o caso dos pavimentos tradicionais.

No final irão ser levantados os custos totais, parcelares (materiais e de mão-de-obra), peso total do pavimento e tempo de construção. As únicas exceção são as placas OSB, no piso em LSF e madeira, pois aqui desempenham uma função estrutural.

## 3.2 COMPORTAMENTO ACÚSTICO DE PAVIMENTOS.

O terceiro objetivo deste documento é o estudo dos métodos de estimativa acústica, em que irão ser usados como elemento de estudo os métodos apresentados no capítulo 2.3.2 e 2.3.3, e os pavimentos apresentados no subcapítulo seguinte (3.2.1)

### 3.2.1 Soluções Estudadas

Com o objetivo de permitir uma melhor análise dos dados apresentados no capítulo 4.2 serão apresentados de seguida todos os pavimentos estudados.

#### 3.2.1.1 Light Steel Frame

Para realizar o estudo acústico dos pavimentos é necessário ter conhecimento da sua espessura e peso por metro quadrado. Apesar de que as obras estudadas proponham a espessura dos materiais não propõe o seu peso volúmico. Foi então arbitrado um valor para cada material que irá ser usado ao longo deste capítulo. Em relação ao vigamento, irá ser considerado o uso de um C com 200x40x2,46mm com um espaçamento entre vigas de 300 mm que resulta numa área de aço de 2586 cm<sup>2</sup>/m<sup>2</sup> e 20,3 kg/m<sup>2</sup>.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	550	0.022	12.1
LSF vigamento	785	0.200	20.3
Manta de lã mineral	30	0.100	3.0
Gesso cartonado	760	0.013	10.0
	Total	0.235	45.4

Tabela 3.1 – Constituição e Peso de PLSF1

### Caso de Estudo

Os perfis ômega considerados na opção PLSF2 e PLSF3 chamam-se “Ômega 66” referenciado pela empresa GYPTEC como o mais indicado para a situação pretendida. Tem um peso por metro linear de 0.52 kg e o seu espaçamento é de 400 em 400 mm, resultando num peso de 1,3 kg/m<sup>2</sup>.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Gesso cartonado	780	0.019	14.8
Camada Resistente de Lã mineral	200	0.030	6.0
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Manta de lã mineral	30	0.100	3.0
Perfis Omega	765	0.066	1.2
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Total		0.383	94.5

Tabela 3.2 – Constituição e Peso de PLSF2

As ripas de madeira consideradas na terceira solução são de pinho, têm a dimensão proposta e foi considerado um espaçamento de 250mm em 250mm.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Gesso cartonado	780	0.019	14.8
Ripas de madeira (pinho 50x25mm <sup>2</sup> )	600	0.025	3.0
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Manta de lã mineral	30	0.100	3.0
Perfis Omega	765	0.066	1.2
Gesso cartonado	780	0.016	12.5
Gesso cartonado	780	0.016	12.5
Total		0.378	91.9

Tabela 3.3 – Constituição e Peso de PLSF3

Por fim a ultima solução proposta de LSF possui uma caixa de ar que irá ser arbitrado com 1 cm de altura.



Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Gesso cartonado	780	0.019	14.8
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Manta de lã mineral	30	0.100	3.0
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Caixa de ar		0.100	
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.5
Gesso cartonado	780	0.016	12.5
Total		0.587	107.9

Tabela 3.4 – Constituição e Peso de PLSF4

Os pavimentos de LSF apresentados de seguida tiveram como objetivo despistar possíveis erros associados aos autores da publicação analisada inicialmente (SCI, 2003). Foram então estudados outros dois pavimentos presentes numa obra diferente (AA.VV., 2009b).

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
OSB	550	0.018	15.0
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Lã mineral	30	0.01	3.0
Perfil Omega	765	0.066	1.3
Gesso cartonado	780	0.013	10.0
Total		0.297	49.6

Tabela 3.5 – Constituição e Peso de PLSF-A

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
OSB	550	0.012	10.0
LSF vigamento 200x40x2,46 // 0,30	785	0.200	20.3
Gesso cartonado // às vigas	780	0.016	12.3
Gesso cartonado _ _ às vigas	780	0.016	12.3
Total		0.244	54.9

Tabela 3.6 – Constituição e Peso de PLSF-B

Em ambos os pavimentos (PLSF-A e PLSF-B) foram considerados os pesos volúmicos iguais aos do anterior levantamento, (PLSF1, PLSF2, PLSF3 e PLSF4).

### 3.2.1.2 Madeira

Como referido anteriormente os pavimentos de madeira foram propostos pela publicação WOOD FRAME CONSTRUCTION, documento que se encontra em anexo.

O 1º pavimento de madeira foi considerado com um vigamento de madeira, com peso de 650 kg/m<sup>3</sup>, e uma secção de 38x89mm<sup>2</sup> espaçada entre si 400 mm.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Gesso cartonado	780	0.013	10.0
Vigamento de Madeira 38x89mm//0.40	650	0.089	5.5
Lã mineral	30	0.089	2.7
Gesso cartonado	780	0.013	10.0
	Total	0.204	28.1

Tabela 3.7 – Constituição e Peso de PM1

Na segunda, terceira e quarta solução já foram propostas duas alternativas: com madeira maciça com secção 38x241mm<sup>2</sup> ou madeira composta, como a apresentada anteriormente, com a mesma altura. Para facilitar os cálculos e a comparação entre materiais irá apenas ser considerada a madeira maciça.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Vigamento de Madeira 38x241//0.40	650	0.245	14.9
Lã mineral	30	0.100	3.0
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
	Total	0.279	42.5

Tabela 3.8 – Constituição e Peso de PM2

A segunda e terceira solução já possui perfis ómega. Os perfis considerados serão os mesmos que nas soluções de *light Steel frame*.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Vigamento de Madeira 38x241//0.40	650	0.245	14.9
Lã mineral ~1	30	0.100	3.0
Perfil Omega	765	0.066	1.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Total		0.361	56.1

Tabela 3.9 – Constituição e Peso de PM3

Por fim, irá ser proposta uma solução com betonilha que foi considerado que tem um peso específico de 2500 kg/m<sup>3</sup>.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Betonilha	2500	0.038	95.0
Aglomerado de madeira (OSB)	680	0.018	12.2
Vigamento de Madeira 38x241//0.40	650	0.245	14.9
Lã mineral ~1	30	0.100	3.0
Perfil Omega	765	0.066	1.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Gesso cartonado	780	0.016	12.3
Total		0.399	1551.1

Tabela 3.10 – Constituição e Peso de PM4

De forma a limitar interpretações erradas, irá ser analisado outro pavimento de madeira recolhido de uma segunda obra. “Fire Resistance Design Manual”.

Material	Peso Volúmico (kg/m <sup>3</sup> )	e(m)	Peso/ Área (kg/m <sup>2</sup> )
Placa de gesso	600	0.019	11.4
OSB	550	0.015	13.5
Vigamento de Madeira 50.8x254mm2//400	650	0.254	19.4
Perfil Omega	765	0.066	1.3
Gesso cartonado	780	0.013	10.0
Total		0.367	55.6

Tabela 3.11 – Constituição e Peso de PM-A

Todos os valores considerados são semelhantes aos considerados para os outros pavimentos de madeira.

### 3.2.2 Regulamento Requisitos Acústicos de Edifícios

Considerando o “Regulamento Requisitos Acústicos de Edifícios” vamos analisar o caso em estudo como se este tiver destinado à habitação, situação onde a legislação é mais gravosa. Relativamente aos valores analisados vamos apenas considerar apenas os interiores do edifício, pois os sons exteriores devem ser isolados pela envolvente.

Relativamente aos sons aéreos iremos considerar o mais condicionante dos seguintes valores, transcritos do regulamento (“RRAE, Decreto-Lei nº96/2008 de 9 de Junho.,” 2008), artigo 5:

- “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,  $D_{nT, w}$ , entre compartimentos de um fogo, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar de outro fogo, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT, w} \geq 50 \text{ dB}”$$

- “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,  $D_{nT, w}$ , entre locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

i)  $D_{nT, w} \geq 48 \text{ dB};”$

- “O índice de isolamento sonoro a sons de condução aérea,  $D_{nT, w}$ , entre locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, e quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, deve satisfazer o seguinte:

$$D_{nT, w} \geq 58 \text{ dB}”$$

Irá ser feita a verificação para o valor limite de 48 dB, índice de isolamento a sons aéreos necessário para separar um fogo de um espaço de circulação comum.

Relativamente aos sons de percussão terão que ser verificados os seguintes valores (“RRAE, Decreto-Lei nº96/2008 de 9 de Junho.,” 2008), artigo 5:

- “No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão,  $L'_{nT, w}$ , proveniente de uma percussão normalizada sobre pavimentos dos outros fogos ou de locais de circulação comum do edifício, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:

$$L'_{nT, w} \leq 60 \text{ dB}”$$

- “No interior dos quartos ou zonas de estar dos fogos, como locais receptores, o índice de isolamento sonoro a sons de percussão,  $L'_{nT, w}$ , proveniente de uma percussão normalizada

sobre pavimentos de locais do edifício destinados a comércio, indústria, serviços ou diversão, como locais emissores, deve satisfazer o seguinte:

$$L'_{nT, w} \leq 50 \text{ dB}''$$

Na análise dos sons de percussão apenas será analisada a primeira situação, valor necessário satisfazer para pavimentos que separem fogos de outros fogos ou de locais de circulação comum. O valor de isolamento sonora a sons de percussão tem que ser inferior a 60 dB.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 PAVIMENTOS LEVES Vs PESADOS

#### 4.1.1 Solução em LSF

A solução em LSF será de piso seco e irá ser dimensionada com base nas tabelas apresentadas anteriormente (Tabela 2.5). Irá ser optado por um vigamento simplesmente apoiado, apoiado nas paredes da fachada, composto por um perfil Ue 200x40x2.25 espaçado de 500 em 500mm, com reforço, através de fitas metálicas.

Como no caso em estudo não estarão apoiadas paredes na viga perimetral não é necessário o enrigecedor de alma. Caso existissem é aconselhado o uso do mesmo

O LSF, como na generalidade do metal, é comprado ao kg, podendo oscilar com o tempo e zona. Irá ser considerado o valor de 0.90 €/kg.

A solução optada irá ter as seguintes quantidades:

- Relativamente ao vigamento e considerando o espaçamento definido anteriormente temos as seguintes quantidades:

$$20\text{m}/0,500\text{m}=40 \text{ vigas de } 5\text{m}$$

$$40 \text{ vigas} \times \text{vão } (5\text{m}) =200\text{m}$$

- As vigas perimetrais, serão duas, uma em aço galvanizado que liga todo o vigamento e outra em madeira, que liga a viga perimetral ao cachorro de madeira, de forma a reduzir as vibrações transmitidas às paredes resistentes.

$$\text{Viga perimetral :}20+20+5+5=50\text{m}$$

Frechal de madeira:  $20 \times 20 = 40\text{m}$ , com um preço de 61,02€ para uma viga de madeira com medidas 100x80 com 13,5ml.

- Os perfis de reforço a meio vão é meramente conservador, tanto que não é exercido pela legislação americana, mas sim aconselhado, para garantir o travamento da estrutura. Irá ser optado pela aplicação de duas fitas de aço galvanizado a meio vão do piso.

“Tarefa”	Perfil/Secção	Peso por metro (kg/ml)	Metros lineares (ml)	Peso total (kg)	Custo total (€)
Vigamento	C 200x40x2.25	5,4754	200	1095.08	985.57
Perimetral	U 200x40x2.25	5,4754	50	273.77	246.39
Frechal de madeira	100x80	3,15	40	126,00	244,08
Fita de aço	50x1	0.02	40	0,90	0,72
União	L 200x200x3	9,600	16	153.60	138.24
União Frechal-perimetral	200x160x3	0,256	80	20,48	18,34

Tabela 4.1 – Materiais usados no pavimento de LSF

Somando todos os componentes do piso em LSF obtém-se o valor de 2168,52€ €, em que 1924,78€ é em componentes galvanizados. O peso dos perfis de aço enformado a frio num é de 2575,84kg. Após analisar o desenho estrutural da solução escolhida percebemos que esta apesar de ter 20 cm de altura tem um peso por m2 de meramente 25,76, aproximadamente 0,26 kN. Apesar de ainda faltar os restantes revestimentos conseguimos perceber a diferença para uma laje de betão armado que com a mesma espessura pesaria 5kN ou 510kg por m2.

Considerando agora o OSB, irá ser aplicado uma placa de OSB/3 com 18mm de espessura com um peso específico de 0,18 kN/m2 e é necessário aproximadamente 100m2. Esta placa tem um preço de 12,75€/m2 fazendo um total de 1275€.

Em relação às ligações serão considerados os tipos de ligações presentes no subcapítulo 2.1.1.4. Em cada ligação vigamento-reforço terem que ser usados 2 parafusos em cada aba desta (2x40) = 80 un). Relativamente à ligação Vigamento-Perimetral está já tem que ser mais reforçada, para isso a norma americana defende o uso de um perfil de apoio, uma cantoneira ou perfil em C e o uso de 4 parafusos na ligação ao vigamento e de 2 na ligação à perimetral (6x40x2=480 un). É ainda necessário somar os parafusos necessários à ligação frechal – viga perimetral, aqui usa-se uma chapa galvanizada espaçada de

## Resultados

100 em 100 mm, fixa ao perfil através de 4 parafusos e ao frechal através de 4 parafusos ou pregos, fazendo um total de  $((40 / 0,100) \times 8 = 3200\text{un})$ .

Somando todos os parafusos teremos que usar 3760 parafusos, todos eles com bitola #8, diâmetro 4,2mm e profundidade 16 mm, com um preço à centena de 2,90€ que isso resulta aproximadamente em 109.40€ um valor residual.

A mão de obra, considerando as tabelas fornecidas pela empresa de projeto de LSF, Futureng (anexo 1, 2, 3 e 4) tem, em pisos comuns, um peso aproximado de 30% do peso total do pavimento, sendo os restantes 70% o material. Considera-se que o valor da mão de obra para este pavimento será de 1418,22€

O preço total do pavimento já com o OSB terá um valor de 4727,49€, 47,24€/m<sup>2</sup>, com um peso, sem o vigamento perimetral, de 29,24 kg/m<sup>2</sup>.

Relativamente a prazos, nas tabelas de rendimento fornecidas pela Futureng (em anexo) é considerado que por m<sup>2</sup> serão precisas 0,5 horas, 30 minutos, podemos então considerar que o piso em estudo estará concluído ao fim de 50 horas, 6,25 dias.

### 4.1.2 Solução em Madeira

Relativamente à opção de madeira, serão consideradas as tabelas presentes no subcapítulo 2.2.3.1.1. Será considerado um vigamento em madeira de classe c16 com secção 72x220 espaçadas 400mmm, com um preço desta tratada de 650€/m<sup>3</sup>.

- $20/0.4=50$  vigas de madeira
- $0.72 \times 0.220 \times 5 = 0.0792\text{m}^3$  por viga

Conforme foi defendido anteriormente no capítulo 2.2.2 irá ser considerado um tarugamento a meio vão, uma viga perimetral em cada extremidade, ambos elementos com a mesma secção que o vigamento e um frechal com secção 150x50mm<sup>2</sup>.

- $0.072 \times 0.220 \times 20 = 0.3168\text{m}^3$  relativamente ao tarugo
- $0.150 \times 0.050 \times 20 \times 2 = 0.30\text{m}^3$  de frechais
- $0.072 \times 0.220 \times 20 \times 2 = 0.6336\text{m}^3$  relativamente às vigas perimetrais



“Tarefa”	Secção (mm <sup>2</sup> )	Peso por metro (kg/ml)	Volume por elemento (m <sup>3</sup> )	Volume total (m <sup>3</sup> )	Peso Total	Custo total (€)
Vigamento	72x220	5,86	0,0792	3,96	1465,00	2574
Tarugos	72x220	5,86	-	0.3168	117,20	205,92
Perimetral	72x220	5,86	0,3168	0,6336	234,40	411,84
Frechal	150x50	2.775	0.15	0,30	111,00	195,00

Tabela 4.2 – Materiais usados no pavimento de madeira maciça classe C16

Considerando agora o OSB irá ser aplicado uma placa de OSB/3 com 18mm de espessura com um peso específico de 0,18 kN/m<sup>2</sup>, e é necessário aproximadamente 100m<sup>2</sup>. Esta placa tem um preço de 12,75€/m<sup>2</sup> fazendo um total de 1275€.

A fixação de os elementos de madeira será através de pregos, e o seu preço é residual e por isso não irá ser considerado.

O preço total do pavimento de madeira, sem revestimentos é de 4661,76€, 46,61€/m<sup>2</sup> e um peso, do vigamento, tarugos e OSB de 4579,93 kg, 45,79kg/m<sup>2</sup>.

Relativamente à mão-de-obra iremos considerar que terá de mão-de-obra os mesmos 30% que defendidos no LSF, resultando em 1997,9€.

Concluindo, o valor total do pavimento é de 6659,66€, 66,60 €/m<sup>2</sup>.

#### 4.1.3 Solução em Betão Armado

Relativamente a uma solução em betão armado considerando as tabelas de rendimento presente no website <http://orcamentos.eu/ficha-de-rendimento-lajes-macicas-em-betao-armado-com-30cm/>, considerou-se um laje de betão armado com 0.30m de altura, que tem um valor de 247.054 €/m<sup>3</sup>, e um valor por metro quadrado de pavimento de 74,12€, ligeiramente mais caro que o pavimento de madeira, com o inconveniente de que esta laje pesa 7.50 kN/m<sup>2</sup>(25 kN/m<sup>3</sup>), mais concretamente 735 kg/m<sup>2</sup>, muito superior aos pavimentos apresentados anteriormente.

Os custos parciais e totais do pavimento de betão armado estão apresentados na tabela seguinte (Tabela 4.3)

	Custo/m <sup>3</sup> (€)	Custo/m <sup>2</sup> (€)	Custo Total (€)
Mão de Obra	56,97	17,09	1709,1
Materiais	184,57	55,37	5537,10

Tabela 4.3 – Valores parciais do pavimento de betão armado

#### 4.1.4 Solução em Vigotas Pré-esforçadas

Com o objetivo de comparar os valores de peso e custo obtidos anteriormente é necessário estudar uma solução de vigotas pré-esforçadas. A solução proposta foi obtida através do programa de cálculo automático da empresa Presdouro, empresa especializada em soluções pré-fabricadas (<http://www.presdouro.pt/lajes>). A solução proposta, chamada P2-BL23x21-24 (Figura 4.1), foi equacionada tendo em conta que a sua altura não fosse muito superior ao apresentado anteriormente foi proposta então uma solução com uma altura total de 0,24m e um peso por m<sup>2</sup> de 2,97 kN ou 284,20 kg.

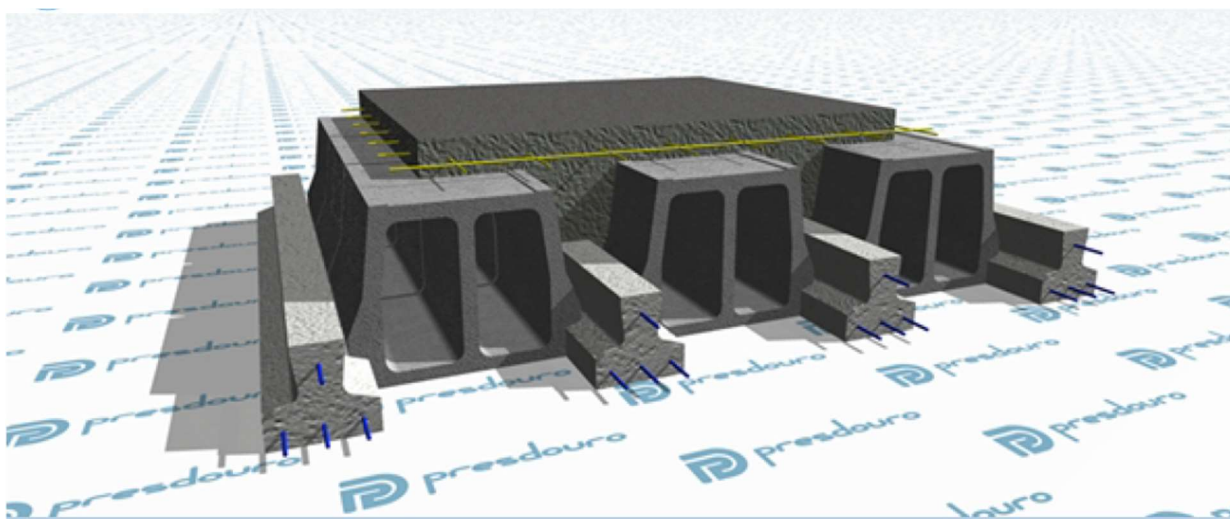


Figura 4.1 - Pavimento P2-BL23x21-24, proposto por Presdouro (anexo 5)

Possuindo as seguintes características:

Altura total	240mm	
Acima da abobadilha	30mm	
Quantidade de Vigotas	2,92 metros / m <sup>2</sup>	282 metros
Quantidade de Abobadilhas	11,70 Unidades/m <sup>2</sup>	1170 unidades
Betão enchimento	74,6 Litros /m <sup>2</sup>	7460 Litros
Armadura de Distribuição (Transversal às vigotas)	122 mm <sup>2</sup> /m para S400	20 m x φ6//200
Armadura de Distribuição (Alinhamento das vigotas)	61 mm <sup>2</sup> /m para S400	5 x φ6//350

Tabela 4.4 – Características do Piso P2-BL23x21-24 proposto pela Presdouro (anexo 5)

Elemento		Quantidade Total	Preço	Preço Total
Vigota	P2	282 m	1,32 €/m	372,24 €
Abobadilha	BL23x21	1170 un	0,40 €/un	468 €
Betão de enchimento	Betão C30/37	7,46 m <sup>3</sup>	60 €/m <sup>3</sup>	447,60
Aço	Varão de 6mm em S400	114,28 ml	0,80	91,42

Tabela 4.5 – Quantidades totais para pavimentos em vigotas

É importante referir que conforme demonstrado acima é de 2,97 kN/m<sup>2</sup>, 10 vezes superior ao peso de LSF o que transmite aos frechais 34,0 kN/m, 3332 kg. O que provavelmente implicaria um reforço nas paredes resistentes que iria aumentar substancialmente o preço total da obra.

Os valores de mão-de obra e materiais foram recolhidos através da folha de orçamentação presente no site <http://orcamentos.eu/ficha-de-rendimento-laje-aligeirada-p2-22x12-15/> . Onde se obtém um valor de 8,465 €/m<sup>2</sup> de mão-de-obra e de 17,07 €/m<sup>2</sup> de materiais.

#### 4.1.5 Comparação entre Pavimentos

Na Tabela 4.6 apresenta-se o peso, custo total e parcelar (mão de obra e de material) de cada pavimento.

## Resultados

Os valores do peso foram calculados na análise de cada um dos pavimentos. No caso dos pavimentos leves através da soma dos diferentes materiais, do betão armado, multiplicando o peso específico pela sua espessura, e no caso das vigotas através do programa de cálculo usado.

Os valores de custo, totais e parciais, também foram explicados anteriormente.

Pavimento	Custo Materiais (€)	Custo de Mão de Obra (€)	Custo Total (€)	Peso (kg/m <sup>2</sup> )
Light Steel Frame	3309,27	1418,22	4727,49	29,24
Madeira	4661,76	1997,90	6659,66	45,79
Betão Armado	5537,10	1709,10	7246,20	735,00
Vigotas	1707,00	846,50	2552,50	297,00

Tabela 4.6 – Comparação pavimentos leves com pavimentos pesados

Ao comparar as diferentes estruturas é possível identificar que a solução de vigotas pré-esforçadas é a solução mais leve. Apesar desta solução ser a mais leve, não é uma solução que se enquadre ao caso de estudo devido ao seu excessivo peso por metro quadrado. Pelos mesmos motivos a solução de betão armado também não se enquadra devido ao seu peso. Esta conclusão deve-se ao facto de que se tratando de uma reabilitação, o objetivo principal é manter o máximo de elementos originais possíveis, no caso em particular as paredes resistentes, e uma parede resistente preparada para receber um pavimento de madeira, esteja preparada para suportar aproximadamente 750 kg em cada metro de parede.

Por outro lado, ambos os pavimentos leves possuem um peso de no máximo de 20% dos pavimentos constituídos pelos materiais tradicionais. Algo que, conforme foi dito anteriormente, os coloca, instantaneamente, como a solução mais acertada. É interessante também salientar, que qualquer um destes pavimentos é mais barato que a opção de betão armado, algo que não era esperado.

Por fim, e apenas comparando os dois pavimentos leves, é notória a diferença de peso e de custo do pavimento em LSF, tornando-se a melhor solução para este tipo de construções.

## 4.2 COMPORTAMENTO ACÚSTICO DOS PAVIMENTOS

Inicialmente irão ser agrupados os dados por tipo de pavimento, *light Steel frame*, madeira, e os materiais tradicionais, mais concretamente, betão armado. De seguida irão ser comparados entre si.

Nos sons aéreos as variáveis consideradas serão: a velocidade do som no meio,  $C_L$ , o fator de perda,  $\eta$ , para o método de Sharp, e o valor D, correspondente à caixa de ar e isolamento, em Meisser.

Relativamente aos sons de percussão, as variáveis que irão ser consideradas serão as do método simplificado: o valor K irá ser considerado 0, pois não temos conhecimento das condições de apoio, relativamente ao valor referente ao revestimento, iremos considerar 21 dB, pois irá sempre existir uma base de madeira, e é o único onde este material está presente. É importante lembrar que qualquer destes pavimentos irá ter um revestimento final, como por exemplo pavimento flutuante, aumentando o valor correspondente aos revestimentos.

Por fim, é importante salientar que nenhum destes valores foi comparado com a curva de referência, fator que, conforme descrito anteriormente, pode apresentar variações de isolamento à frequência de 500 Hz de até 8 dB.

Relativamente aos dados apresentados anteriormente foram considerados os seguintes valores:

- $C_L=5000$  m/s;
- $\eta=0.005$ ;
- O valor D foi considerado 6 para PLSF1 e 9 para PLSF2, PLSF3 e PLSF4.

Pavimento	Isolamento proposto a sons		Método de estimativa de isolamento a sons			
			Aéreos			Percussão
	Aéreos	Percussão	Lei da Massa	Sharp	Meisser	Simplificado
PLSF1	42	-	32.3	28.6	41.4	85.0
PLSF2	48	57	38.8	37.1	48.7	73.9
PLSF3	50	57	38.5	36.8	48.5	74.3
PLSF4	46	60	40	29.3	49.4	71.9

Tabela 4.7 – Comparação de resultados de isolamento acústico para pavimentos em LSF

Verificou-se a proximidade dos valores obtidos através do método de Meisser.

## Resultados

Em relação à lei-da-massa está mais que evidente que esta não está habilitada a estudar os pavimentos compostos por LSF, pois mesmo com a margem de +3.5, não se aproxima sequer dos valores tabelados.

Relativamente ao método de Sharp, as diferenças predem-se pelo valor de fator de perda considerado que é de 0.005, resultando numa estimativa muito baixo. Caso se considere o valor de 0.02, como no betão armado, obtemos valor de 34.6, 43.1, 42,8 e 39.3, respetivamente para cada pavimento. É preciso salientar ainda o fato de que o método de Sharp não considera o isolamento acústico. Mas se for acrescentado os 6 dB que este defende ser o acréscimo de redução acústica devido ao isolamento, obtemos valores muito próximos dos tabelados. ou

No isolamento acústico aos sons de percussão a situação já não é assim tão clara, obtemos valores nem sequer próximos dos tabelados e pode-se dever a duas considerações. Primeiro, o método simplificado pode não estar preparado para estudar soluções não-maciças, pois só considera o revestimento e a massa do pavimento. O *light Steel frame* tem pouca massa e as uniões entre elementos são feitas de forma diferente, estando na maior parte das vezes protegidas das vibrações. Segundo, como foi referido anteriormente não temos o piso completo, ele ainda iria necessitar de mais revestimentos que pode resultar num acréscimo de 10 dB o que aproxima os valores dos tabelados, mas mesmo assim não correspondem.

Em relação aos pavimentos de madeira, foi feito o estudo considerando o valor da velocidade do som na madeira como máximo. Para o fator de perda irá ser arbitrado o valor de 0,02, valor usado pela generalidade das empresas no estudo acústico. Os valores considerados foram os seguintes:

- $C_L=4000$  m/s;
- $\eta=0.02$ ;
- O valor D foi considerado 3 para PM1 ,8 para PM2, e 9 para PM3 e PM4

Pavimento	Isolamento proposto a sons		Método de estimativa de isolamento a sons			
			Aéreos			Percussão
	Aéreos	Percussão	Lei da Massa	Sharp	Meisser	Simplificado
PM1	32	-	28.1	28.9	35.7	92.0
PM2	34	-	31.7	33.8	39.1	86.0
PM3	54	-	34.2	37.4	45.7	81.9
PM4	69	-	43.0	46.4	51.5	66.7

Tabela 4.8 – Comparação de resultados de isolamento acústico para pavimentos em Madeira

Os valores encontrados em ambas as publicações, (AA.VV., 2002) (AA.VV., 2009b), não são próximos aos estimados. Enquanto que em PM1 ou PM2 os valores estimados são superiores quando se considera Meisser, devido ao valor D, pelo método de Sharp os valores aproximam-se mais do defendido pelo autor. Mas quando começamos a analisar PM3 e PM4 notámos que os resultados já não são tão semelhantes quanto estaríamos à espera, aliás se somássemos todos as possíveis variáveis, a curva de referência, +8, em Meisser, e a mesma curva, mais o valor de acréscimo de isolamento, + 6dB, continuaríamos novamente com valores muito longe do estimado.

Para despistar a hipótese de que a obra de onde foram retiradas as soluções poderia estar errada, foram recolhidas outras duas soluções.

## Resultados

Autor	Peso específico (kg/m <sup>2</sup> )	Isolamento proposto a sons		Método de estimativa de isolamento a sons			
				Aéreos			Percussão
		Aéreos	Percussão	Lei da Massa	Sharp	Meisser	Simplificado
Fire Resistance Design	55.57	55	-	34.1	37.4	41.6	92.0
Oliveira, 2013	101.86	54	46	39.5	44.3	49.1	86.0

Tabela 4.9 – Comparação de resultados de isolamento acústico para outros pavimentos em Madeira

É de realçar que o pavimento de Oliveira tem uma manta danosa que de acordo com a ficha técnica vai aumentar a redução acústica em 6 dB. Ao somar esse valor, os valores propostos e estimados são semelhantes.

Relativamente aos sons de percussão mais uma vez os valores tabelados não se aproximam minimamente dos valores obtidos, devido ao facto que o método simplificado apenas estar preparado para lidar com elementos maciços.

Com o objetivo de realizar uma ultima análise aos pavimentos de madeira, foram recolhidos do documento “*Fire Resistance Design Manual*”, pavimentos em LSF. O pavimento PM-A é o mesmo apresentado anteriormente.

Os valores considerados foram os mesmos que anteriormente, para PLSF-A e PLSF-B:

- $C_L=5000$  m/s;
- $PLSF-\eta=0.005$ ;
- O valor D foi considerado 5 para PLSF-A e 4 para PLSF-B

E para PM-A

- $C_L=4000$  m/s;
- $\eta=0.02$ ;
- O valor D foi considerado 5 para PM-A



Pavimento	Isolamento proposto a sons		Método de estimativa de isolamento a sons			
			Aéreos			Percussão
	Aéreos	Percussão	Lei da Massa	Sharp	Meisser	Simplificado
PLSF-A	45	-	33.1	30.4	41.9	83.7
PLSF-B	35	-	34.0	30.4	40.5	82.1
PM-A	55	-	34.1	37.4	41.6	72.7

Tabela 4.10 – Comparação de resultados de isolamento acústico para outros pavimentos

Ao analisar a tabela é possível perceber que os valores propostos pelo autor não são coerentes. Enquanto que em PLSF-A o valor estimado é semelhante ao tabelado, em PLSF-B, o valor tabelado é muito inferior ao estimado, embora seja compreensível que o seu desempenho seja próximo do estimado, afinal ele é composto por 2 placas de gesso cartonado. Na análise do pavimento de madeira, mais uma vez, não é possível obter sequer um valor próximo do estimado.

Esta análise permite-nos analisar de duas formas, será que os métodos tanto de Sharp como de Meisser não estão preparados para estimar a redução acústica no aço e na madeira? São 2 autores com valores completamente diferentes dos obtidos. Enquanto que nos pavimentos de Isf, Meisser aproxima-se dos valores tabelados, nos pavimentos de madeira eles nem sequer são próximos. Ao estudar através de Sharp, os valores nunca são semelhantes devido ao fator de perda, no caso do aço é de apenas 0.05. Nos pavimentos em madeira o fator de perda considerado é de 0.02, valor defendido pela generalidade dos autores, mas será este o valor mais correto?

Com esta questão foi elaborado um novo estudo em que se faz variar os valores característicos do material, com o propósito de perceber se as considerações iniciais serão as mais correctas.

Por fim, e para percebermos a importância de variar os valores de  $C_L$  e  $\eta$ , valores característicos dos materiais, irá ser apresentada uma tabela onde esses valores variam.

Na elaboração da tabela seguinte foram considerados os seguintes valores:

- Espessura do pavimento: 0.25m;
- Peso do pavimento: 75kg/m<sup>2</sup>;

## Resultados

- D=0 no método de Meisser.

$C_L$	$\eta$	Sharp	Lei da Massa	Meisser
5000	0.02	39.3	36.8	38.3
4000	0.04	41.3		
	0.02	38.3		
	0.01	35.3		
	0.005	32.3		
3000	0.02	37.1		
2000	0.04	38.3		
	0.02	35.3		
	0.01	32.3		
	0.005	29.3		
1000	0.02	32.4		

Tabela 4.11 – Comparação do isolamento acústico quando variam os valores de  $C_L$  e  $\eta$

Ao analisar a tabela anterior percebe-se que a que a variação dos valores quando se faz variar a velocidade do som no material é na ordem dos 7 dB. Considerando que a velocidade do som na madeira varia entre 1500 e 4150 m/s, poderia ser esta a fonte do erro, mas o valor considerado foi sempre de 4000m/s. Outra questão é o fator de perda do material, considera-se que no aço é de 0.005, o que é bastante prejudicial quando comparado com o do betão, que é de 0.02. Poderá ser esta a causa de o método de Sharp não apresentar valores semelhantes aos tabelados. Na madeira, o fator de perda considerado foi de 0.02, apesar de não ser consensual. Considerando que a madeira é um material mole, talvez se deva considerar um valor mais alto.

### 4.2.1 Considerações Finais sobre o Método de Sharp e o Método de Meisser

Apesar de o método de Meisser considerar o isolamento acústico, o valor máximo de 9 dB é um pouco curto. Numa solução com 4 cm de caixa de ar e outros 4 cm de isolamento é considerado o valor de 9 dB. Mas e se uma nova solução fosse composta por um vigeamento duplo com mais 2 cm de caixa de ar? O

valor para o isolamento acústico continuaria a ser 9 dB. Além de que este método não considera as características do material.

O método de Sharp, por sua vez, é o método que mais se enquadra no estudo destas soluções, pois considera as características do material, embora se deva considerar os 6 dB devido ao isolamento acústico, como Sharp defende. Quanto às características do material ainda existe um caminho a percorrer. Nem todos os autores consideram um fator de perda igual para a madeira e na generalidade das vezes, o estudo de um vigeamento de madeira é igual ao de um do betão, com o valor do fator de perda igual a 0.02. Talvez se for considerado um valor mais alto, os valores do isolamento acústico da madeira aproximem-se dos tabelados. O problema é semelhante no aço, ao considerar um fator de perda de apenas 0.005, a estimativa dada por Sharp nunca vai ser muito alta

## *Resultados*

## 5 CONCLUSÕES

Foram inventariadas oito soluções de pavimentos leves, quatro soluções de *light steel frame* e quatro de madeira. Para cada um dos materiais foram apresentadas tabelas de pré-dimensionamento que, possibilitam uma estimativa do dimensionamento estrutural.

Através da comparação do peso entre as diferentes soluções construtivas, que as soluções leves têm um peso de 20% das soluções construtivas tradicionais. A solução de aço enformado a frio e de madeira, não são as mais acessíveis embora sejam mais económicas que o betão armado. Contudo, um pavimento de vigotas pré-esforçadas apresenta no mínimo metade do custo. Com um custo de 42€ por metro quadrado, um pavimento de LSF é a solução que melhor se enquadra para uma reabilitação, uma vez que o seu peso por metro quadrado é bastante inferior ao das soluções construtivas tradicionais. O preço da solução construtiva em LSF não é muito superior ao das restantes alternativas.

Foi possível concluir que o método Lei da Massa não está apto a estimar o desempenho acústico dos pavimentos leves, uma vez que apenas considera a massa do elemento e menospreza qualquer tipo de isolamento. O mesmo se poderá dizer do Método de Invariante, que estuda os sons de percussão, visto que também apenas considera a massa. Embora existam alguns ajustes devido aos revestimentos, os resultados não são semelhantes aos tabelados pelas empresas fornecedoras.

Como métodos alternativos de estimativa do comportamento acústico a sons aéreos foram estudados o método de Sharp e o método de Meisser, métodos utilizados pela generalidade das empresas quando fazem um estudo do isolamento acústico. Os valores resultantes da aplicação dos métodos alternativos apenas foram semelhantes aos tabelados nas soluções em *light steel frame*. Nas soluções de madeira, apenas as mais simples, soluções sem o perfil resiliente a separar o vigamento do gesso cartonado, apresentaram valores próximos dos tabelados.



## 6 BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1997). *Prescriptive Method for Residential Cold-Formed Steel Framing*. Upper Marlboro, MD: NAHB (National Association of Home Builders) Research Center.
- AA.VV. (2002). *Wood-frame Construction, Fire Resistance and Sound Transmission*. Ontário: Canadian Wood Council.
- AA.VV. (2009a). *Especificações Técnicas do Sistema Construtivo Light Steel Frame, Edifícios com Estrutura em Aço Galvanizado*. Lisboa: Steel - Sociedade Técnica de Edificação de Estruturas Leves.
- AA.VV. (2009b). *Fire Resistance Design Manual*. Hyattsville, MD: Gypsum Association.
- AA.VV. (2013). *A Technical Guide for Floor & Roof Framing Construction*. Cirencester: Crown Timber plc.
- BS EN 12369-1:2001 - *Wood-based panels -Characteristic values for structural design -Part 1: OSB, particleboards and fibreboards*. (2001).
- BS EN 338:2009 *Structural timber - Strength classes*. (2009).
- BSW Timber Group. (n.d.). *Understanding Strength graded timber and span tables*. Londres: BSW Timber Group.
- Carvalho, J. (2012). *Comportamento Acustico - Projecto Acustico de Palacete da Boavista realizado por OMEGA*. Porto.
- Cruz, M. (2013). *Estados Limites de Utilização em Pavimentos de Madeira - Vibração e Conforto*. Instituto Superior Técnico.
- Desart, E. (2002). *Calculation of STC, MTC, OITC*.
- Dias, T. (2008). *Pavimentos de madeira em edifícios antigos . Diagnóstico e intervenção estrutural*. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
- Domingues, O. (2007). *A acustica nos Edifícios: Materiais e Sistemas Absorventes*. Lisboa: LNEC.
- Futureng. (2016). LSF e a Reabilitação. Retrieved from <http://www.futureng.pt/lsf-e-a-reabilitacao>
- Moreira, H. (2012). *Utilização de Perfis Enformados a Frio em Obras de Reabilitação. Técnico de Lisboa*.

## Bibliografia

Instituto Superior Técnico.

Oliveira, L. (2013). *Exigências Funcionais em Pavimentos de Madeira*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Patricio, J. (2002). *Isolamento Sonoro a Sons Aéreos e de Percussão - Metodologias de Caracterização*. LNEC. Lisboa: LNEC.

Pinho, M. (2005). *Madeira em Estruturas - Programas de cálculo e Normalização*. Braga.

Portaria 1532/08 de 29 de Dezembro. (2008). *Diário Da República, 1ª Série*.

Rego, D. J. M. (2012). *Estruturas de Edifícios em Light Steel Framing*. Instituto Superior Técnico.

Rodrigues, F. (2006). *Steel Framing: Engenharia*. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Siderurgia/Centro Brasileiro da Construção em Aço.

RRAE, Decreto-Lei nº96/2008 de 9 de Junho. (2008). *Diário Da República, 1ª Série*.

Samoylenko, N., & Didkovskiy, V. (2013). *The Evaluation of the Sound Insulation of Partition in Expanded Frequency Range*. Kiev: Faculty of Electronic/ National Technical University of Ukraine.

Sampaio, P. (2016). *Comportamento acústico de pavimentos em edifícios antigos*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

SCI. (2003). *Acoustic Performance of Light Steel Framed Systems*. London: The Steel Construction Institute.

Sharp, B.; Kasper, P.; Montroll, M. (1980). *Sound Transmission Through Building Structures - Review and Recommendations for Research*. Arlington, Virginia: Wyle Research. Retrieved from <https://archive.org/stream/soundtransmissio00shar#page/n1/mode/1up>

Silva, R. (2015). *Caracterização Acustica de Pavimentos da Casa Burguesa Portuense*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.