

PEDRO JOSÉ CONDE MEIRINHO

**VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SOLUÇÕES
DE REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA**

Orientador: Professor João Leite Garcia

Co-Orientador: Professor António Cabaço

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2016

PEDRO JOSÉ CONDE MEIRINHO

VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÓMICA DE SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO DE PAVIMENTOS DE MADEIRA

Dissertação defendida em provas públicas na
Universidade Lusófona de Humanidades e
Tecnologias no dia 02 de Novembro de 2016,
perante o júri, nomeado pelo Despacho de
Nomeação n.º: 294/2016, 14 de Julho, com a
seguinte composição:

Presidente: Prof. Doutor Fernando Baltazar Moreira Duarte (ULHT)

Orientador: Prof. Eng.º (Especialista) João Costa Azevedo Leite Garcia (ULHT)

Vogal: Prof. Doutor Luis Manuel Coelho Guerreiro (IST) - Arguente

Universidade Lusófona de Humanidades e Tecnologias

Faculdade de Engenharia

Lisboa

2016

“Knowledge speaks, but wisdom listens”

Jimi Hendrix

Agradecimentos

Ao meu orientador, Eng.º João Leite Garcia: por toda a partilha de conhecimentos; pela vontade que demonstrou desde início em orientar esta dissertação, sempre com a intenção que fosse um trabalho que realmente trouxesse algo de novo e não fosse tratado apenas como um trabalho que apenas servisse para atingir mais uma etapa académica; por toda a disponibilidade e vontade que sempre demonstrou sempre que precisei de ajuda.

Ao meu co-orientador, Eng.º António Cabaço: por toda a partilha de conhecimentos a nível de métodos de trabalho; no papel importantíssimo que teve nas várias fases do trabalho em definir e clarificar ideias que permitiram chegar ao resultado pretendido; à constante motivação que sempre me deu para conseguir finalizar o trabalho; por toda a disponibilidade e vontade que demonstrou sempre que precisei de ajuda.

À Eng.ª Helena Cruz do núcleo de estruturas de madeira do Laboratório Nacional de Engenharia Civil: pela simpatia e disponibilidade demonstrada quando foi solicitada a sua ajuda nas fases iniciais do trabalho; pelos conhecimentos e material facultado que foram de extrema importância para várias partes da dissertação.

À minha família: aos meus pais que me deram condições durante todos estes anos para seguir e finalizar o meu percurso académico; ao meu irmão pelo seu interesse demonstrado no trabalho e pela sua constante acção motivadora; aos meus avós que tanto se preocuparam em que acabasse o meu curso e que me deram vontade para fazer mais e melhor.

À minha namorada: por ter sido a principal motivadora para a realização desta dissertação mesmo nos momentos mais difíceis em que o trabalho parecia que não se iria realizar; pela compreensão absoluta devido à minha ausência em alguns momentos.

Por último, mas não menos importantes, aos meus amigos de sempre e aos meus amigos de curso, por terem acreditado sempre em mim.

Resumo

Esta dissertação analisa técnica e economicamente soluções de reabilitação estrutural de pavimentos de madeira de edifícios habitacionais antigos. Tipicamente estes pavimentos têm vigas com entregas deterioradas por agentes biológicos, tendo portanto a sua capacidade resistente reduzida, e apresentam problemas funcionais devido à excessiva deformabilidade das vigas.

Nos três capítulos iniciais faz-se uma caracterização dos pavimentos de madeira correntes em edifícios antigos, identificam-se as patologias mais frequentes nestes elementos estruturais, e definem-se soluções de reabilitação para fazer face ao problema de entregas de vigas deterioradas por agentes biológicos.

Posteriormente é realizada uma análise técnico-económica de soluções de reabilitação aplicadas a um caso de estudo, sendo analisadas soluções de intervenção de empalmes com ligadores metálicos, empalmes com varões colados e substituição integral de vigas deterioradas. Deste modo será possível, em situações equiparáveis à analisada, escolher a melhor alternativa em termos técnicos e económicos.

Além deste apoio na decisão de soluções para o problema em questão, o trabalho foca e descreve os aspetos de dimensionamento e orçamentação das soluções de reabilitação analisadas.

Palavras-Chave: Pavimentos de Madeira, Análise Técnico-Económica, Soluções de Reabilitação, Entregas Deterioradas, Empalmes de Vigas

Abstract

The main purpose of this work is to analyze, technically and economically, structural rehabilitation systems for structural wood floors of residential old buildings. Typically, these floors have beams ends damaged by biological agents, consequently restringing the wood floors load capacity, as well as functional problems due to the beams over deflection.

The three initial chapters characterize the current structural wood floors in residential old buildings, the most common problems that occur in these structural elements, and the structural rehabilitation systems usually used for facing the problem of beams ends damaged by biological agents.

It is carried out then a technically-economically analysis of rehabilitation systems applied to a specific study case. It is studied the rehabilitation system of spliced beams with metal fasteners, glued in rods solution, and the total replacement of the damaged beams solution. In this way it will be possible, for equivalent situations, to choose the technical and economical best solution.

Beyond this decision helping, this work focuses and describes the design approach and the economic valuation of these rehabilitation systems.

Key Words: Structural Wood Floorings, Technical Economic Analysis, Rehabilitation Systems, Damaged Beams Ends, Spliced Beams

Índice

Introdução	1
CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DOS PAVIMENTOS DE MADEIRA.....	4
1.1.Considerações iniciais	4
1.2. Caracterização dos elementos constituintes	4
1.2.1. Vigas	5
1.2.2. Soalho	6
1.2.3. Tectos	7
1.2.4. Elementos secundários	8
1.3. Exigências funcionais aplicadas à reabilitação de pavimentos de madeira....	10
1.3.1. Acústica	10
1.3.2. Térmica	13
1.3.3. Segurança ao fogo	14
1.3.3.1. Importância das ligações.....	15
1.3.4. Durabilidade	16
1.3.5. Resistência mecânica e estabilidade	17
CAPÍTULO 2 - PATOLOGIAS EM PAVIMENTOS DE MADEIRA.....	18
2.1. Considerações iniciais	18
2.2. As Patologias mais comuns.....	19
2.2.1. Patologias nas vigas.....	19
2.2.2. Patologias nos soalhos.....	24
2.2.3. Patologias nos tectos	27
2.2.4. Patologias nas ligações	28
2.3.Conservação e protecção dos elementos.....	29
2.4. Técnicas de inspecção e ensaio	30
2.4.1. Aplicabilidade dos ensaios não-destrutivos	30
2.4.2. Inspeção visual e ensaios tradicionais	32
CAPÍTULO 3 - SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO	35
3.1. Considerações iniciais	35
3.2. Soluções sem reforço e com reforço estrutural	36
3.3.Caracterização de soluções sem reforço estrutural.....	37
3.4. Dimensionamento de ligações.....	38
3.5. Empalmes com ligadores metálicos	40
3.5.1. Materiais utilizados	42
3.5.1.1. Ligadores	42

3.5.1.2. Elementos adicionais.....	42
3.5.2. Processo construtivo	45
3.5.3. Dificuldades de aplicação.....	47
3.5.4. Critérios de dimensionamento.....	48
3.6. Empalmes com varões colados	50
3.6.1. Materiais utilizados	51
3.6.1.1. Colas e varões.....	51
3.6.2. Processo construtivo	52
3.6.3. Controlo de qualidade e execução.....	54
3.6.4. Dificuldades de aplicação.....	55
3.6.5. Critérios de Dimensionamento	55
3.7. Substituição integral	57
CAPÍTULO 4 - ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES	
DE REABILITAÇÃO	58
4.1. Considerações iniciais	58
4.2. Aplicabilidade da análise.....	58
4.3. Metodologia da análise.....	59
4.4. Caso de estudo	60
4.4.1. Geometria e materiais constituintes do pavimento	60
4.4.2. Tipo e extensão da patologia	61
4.4.3. Objectivos da intervenção	61
4.4.4. Soluções de reabilitação	61
4.5. Dimensionamento das soluções de reabilitação.....	63
4.5.1. Determinação dos esforços internos.....	63
4.5.2. Verificação do estado limite último do pavimento de madeira.....	64
4.5.3. Dimensionamento dos empalmes com ligadores metálicos	65
4.5.3.1. Definição da geometria da ligação.....	65
4.5.3.2. Cálculo das forças actuantes nos ligadores	67
4.5.3.3. Cálculo das tensões de corte actuantes	69
4.5.3.4. Força resistente dos ligadores.....	70
4.5.3.5. Verificação da capacidade resistente da ligação.....	71
4.5.3.6. Verificação de disposições regulamentares	72
4.5.4. Dimensionamento do empalme com varões colados	72
4.6. Análise e comparação técnica das soluções.....	75
4.6.1. Momento resistente da ligação	76
4.6.2. Força resistente do ligador	77
4.6.3. Força total actuante no ligador mais solicitado	79
4.6.4. Tensão de corte actuante.....	80
4.6.5. Dimensões da solução	81

4.6.6. Deformabilidade	81
4.6.7. Outras comparações de aspecto técnico	82
4.7. Orçamentação de obras de reabilitação	86
4.8. Orçamentação das soluções de reabilitação	86
4.8.1. Mapas de quantidade de trabalho	87
4.8.2. Fichas de rendimento	88
4.8.2.1. Especificação dos recursos utilizados	89
4.8.2.2. Medição de quantidades	90
4.8.2.2.1. Materiais	90
4.8.2.2.2. Mão-de-obra e equipamento	91
4.8.2.2.3. Área de soalho a remover/repôr	93
4.8.2.3. Cálculo do custo total da operação de cada ficha	95
4.9. Análise e comparação económica das soluções	95
4.9.1. Discussão de resultados	97
4.9.2. Análise de outras formas de intervenção	98
4.9.2.1. Intervenção superior com manutenção do tecto	98
4.9.2.2. Intervenção inferior sem manutenção do tecto	99
4.9.3. Análise das soluções mais caras	99
4.9.3.1. Substituição integral da viga	99
4.9.3.2. Empalmes com chapa de aço e com varões colados	101
4.10. Análise técnico-económica	
de decisões de dimensionamento	103
4.10.1. Distribuição dos ligadores	103
4.10.2. Pré-furação das soluções pregadas	105
4.10.3. Verificação das tensões de corte na madeira	106
CAPÍTULO 5-CONCLUSÕES	108
5.1. Considerações iniciais	97
5.2. Conclusões	108
5.3. Desenvolvimentos Futuros	111
Bibliografia	103
Apêndice I- Dimensionamentos das soluções de reabilitação	117
Apêndice II-Mapas de quantidades de trabalho	
das soluções de reabilitação	149
Apêndice III-Fichas de rendimento das actividades	158

Índice de figuras

Fig.1.1.	Pavimento de madeira de um edifício pombalino-vigas e soalho	5
Fig.1.2.	Os vários tipos de soalho.....	6
Fig.1.3.	Tecto estucado	7
Fig.1.4.	Tectos estucados trabalhados	8
Fig.1.5.	Tecto em forro de madeira.....	8
Fig.1.6.	Tarugo	9
Fig.1.7.	Ferrolho metálico	9
Fig.1.8.	Solução de isolamento acústico A	12
Fig.1.9.	Solução de isolamento acústico B	12
Fig.1.10.	Solução de isolamento acústico C	13
Fig.1.11.	Solução de isolamento acústico D	13
Fig.1.12.	Protecção ao fogo de ligador metálico	16
Fig.2.1.	Rotura local de viga de madeira.....	19
Fig.2.2.	Entrega de viga atacada por fungos de podridão.....	21
Fig.2.3.	Consequência da deformação excessiva das vigas-Fendilhação da parede.....	21
Fig.2.4.	Consequência da deformação excessiva das vigas-Desnível da porta	21
Fig.2.5.	Secção residual considerada resultante de ataque de caruncho.....	23
Fig.2.6.	Soalho desgastado pelo uso.....	25
Fig.2.7.	Acrescento de novo soalho.....	26
Fig.2.8.	Camada de betonilha adicionada sob o pavimento	27
Fig.2.9.	Tecto fissurado com destacamento do estuque	27
Fig.2.10.	Queda de tecto estucado por infiltração de água.....	28
Fig.3.1.	Empalmes realizados em duas vigas de um pavimento.....	36
Fig.3.2.	Ligação entalhada tipo perna-linha de asna.....	39
Fig.3.3.	Empalme de madeira pregado (corte).....	41
Fig.3.4.	Em cima: Empalme aparafusado (corte e alçado); Em baixo: Empalme aparafusado (planta)	41
Fig.3.5.	Pregos de vários tipos e tamanhos	43
Fig.3.6.	Ligadores ao corte simples (esq.); Ligadores ao corte duplo (dir.)	43
Fig.3.7.	Parafusos de enroscar de vários tipos e tamanhos.....	44
Fig.3.8.	Parafusos de porca.....	45

Fig.3.9.	Cavilhas de vários tamanhos e materiais	49
Fig.3.10.	Tensões na madeira e no ligador em ligação tipo cavilha	48
Fig.3.11.	Esq: Empalme com varões colados (corte)	
	Dir: Empalme com varões colados (alçado)	51
Fig.3.12.	Cola epoxídica	52
Fig.3.13.	Furação de elemento de madeira	53
Fig.3.14.	Injecção de cola	53
Fig.3.15.	Introdução dos varões	54
Fig.3.16.	Grandezas do dimensionamento de ligações com varões colados	56
Fig.4.1.	Extensão da patologia	61
Fig.4.2.	Carregamento das vigas do pavimento	63
Fig.4.3.	Diagrama de esforço transversal	64
Fig.4.4.	Diagrama de momento flector	64
Fig.4.5.	Secção das vigas	65
Fig.4.6.	Geometria do empalme	66
Fig.4.7.	Ângulo da força actuante no ligador, resultante do momento flector, com o fio	67
Fig.4.8.	Forças actuantes nos ligadores resultantes do momento e do esforço transversal	67
Fig.4.9.	Ângulo da força total no ligador com o fio, resultante da acção combinada de esforços	69
Fig.4.10.	Forças a considerar na verificação das tensões de corte	69
Fig.4.11.	Modelo de cálculo considerado para os modos de rotura da ligação	71
Fig.4.12.	Geometria da solução de empalme com varões colados	73
Fig.4.13.	Acções na secção de cálculo	73
Fig.4.14.	Exemplo de mapa de quantidades de trabalho utilizado	88
Fig.4.15.	Dimensões das tábuas de soalho utilizadas	93
Fig.4.16.	Estimativa da área de soalho necessária a remover/repor	94
Fig.4.17.	Estimativa do número de vigas à vista após remoção de tábua de soalho	100

Índice de Quadros

Quadro 2.1. Parâmetros avaliados de ensaios não-destrutivos.....	31
Quadro 4.1. Materiais de empalmes com ligadores metálicos.....	62
Quadro 4.2. Materiais de empalmes com varões colados	62
Quadro 4.3. Propriedades físicas e mecânicas do pinho bravo português	64
Quadro 4.4. Espaçamentos mínimos de em ligações resistentes a momentos	66
Quadro 4.5. Resultados dos dimensionamentos das soluções de reabilitação	76
Quadro 4.6. Comparações técnicas das soluções	85
Quadro 4.7. Especificação dos materiais utilizados	88
Quadro 4.8. Definição das equipas	90
Quadro 4.9. Unidades de medição dos materiais.....	91
Quadro 4.10.Equipamento utilizado	93
Quadro 4.11.Área de soalho necessária a remover/repor das soluções de reabilitação	94
Quadro 4.12.Orçamentação das soluções de reabilitação	96
Quadro 4.13.Comparação de preço entre empalmes de madeira pregado e substituição integral de vigas deterioradas adjacentes	100
Quadro 4.14.Comparação de preço entre empalmes de madeira aparafusados e substituição integral de vigas deterioradas adjacentes	101
Quadro 4.15.Comparação de soluções com tábuas de madeira e com chapas para secções e vãos maiores	102
Quadro 4.16.Comparação de soluções com diferentes número de fiadas de ligadores	104
Quadro 4.17.Comparação de soluções com e sem pré-furação	105
Quadro 4.18.Comparação de dois modos diferentes de verificar a segurança	106

Símbolos

- f_{mk} - Resistência característica à flexão na direcção do fio
- f_{vk} - Resistência característica ao corte
- f_{vd} - Resistência de cálculo ao corte
- $f_{t,o,k}$ - Resistência característica à tração na direcção do fio
- $f_{y,k}$ - Resistência característica à tração
- $f_{h,o,k}$ - Resistência ao esmagamento característica na direcção do fio
- f_{h1} - Resistência ao esmagamento do elemento 1
- f_{h2} - Resistência ao esmagamento do elemento 2
- f_{ax} - Resistência ao arranque característica da ponta
- f_{head} - Resistência característica ao punçoamento sob a cabeça
- $f_{c,90,k}$ - Resistência à compressão perpendicular ao fio
- σ_d - Tensão normal actuante de cálculo
- y - Distância da linha neutra à fibra mais afastada da secção
- σ_r - Tensão normal de rotura
- τ_d - Tensão de corte actuante de cálculo
- k_{mod} - Factor de modificação da resistência
- k_{def} - Factor de avaliação da fluência
- k_h - Factor de efeito de volume
- k_{cr} - Factor redutor da largura da secção
- K_{ser} - Valor médio do módulo de deslizamento
- K_u - Valor médio da rigidez para estados limite últimos
- K_r - Rigidez de rotação
- G_k - Valor característico das acções permanentes
- Q_k - Valor característico das acções permanentes
- ψ_2 - Coeficiente para o valor quase-permanente de acções

p_{sd} - Carga de vão pela combinação fundamental de acções
 M_{sd} - Momento flector actuante de cálculo
 $M_{máx}$ - Momento flector máximo actuante
 M_{yrK} - Momento de plastificação característico do ligador
 $M_{R,d}$ - Momento Resistente de cálculo
 $M(x)$ - Momento actuante na secção a x m do início da viga
 $M_{Rd,Máx}$ - Momento máximo resistente da ligação
 V_{sd} - Esforço transversal actuante de cálculo
 $V(x)$ - Esforço transversal actuante na secção a x m do início da viga
 V_M - Força de corte gerada pela força dos ligadores devido ao momento flector
 N_t - Esforço normal de tração
 z - Braço do binário do momento resistente da secção
 Y_m - Coeficiente de segurança da madeira/ligação
 Y_s - Coeficiente de segurança do aço
 ρ_k - Massa volúmica característica
 ρ_{mean} - Massa volúmica média
 ρ_m - Massa volúmica média
 I - Inércia da secção
 A_{ef} - Área efectiva
 A_{tr} - Área tracionada
 l - Comprimento
 l_{amin} - Comprimento de ancoragem mínimo
 l_a - Comprimento de ancoragem
 c - Penetração da parte lisa na peça que recebe a ponta
 h - Altura da secção
 b_{ef} - Largura efectiva da secção
 H_b - Recobrimento dos varões na direcção yy

H_{bmin} - Recobrimento mínimo dos varões na direcção yy

B_b - Recobrimento dos varões na direcção xx

B_{bmin} - Recobrimento mínimo dos varões na direcção xx

$e_{l.col}$ - Espessura da linha de cola

h_{corte} - Altura do corte

b_{corte} - Largura do corte

a_{1min} - Espaçamento mínimo entre ligadores na direcção do fio

a_{2min} - Espaçamento mínimo entre ligadores na direcção perpendicular ao fio

a_{3tmin} - Espaçamento mínimo dos ligadores ao topo da peça

a_{4tmin} - Espaçamento mínimo dos ligadores ao bordo da peça

$\emptyset$ - Diâmetro nominal do varão

d - Diâmetro do ligador

d_{eq} - Diâmetro equivalente do varão

d_h - Diâmetro da cabeça do ligador

d_{ef} - Diâmetro efectivo do varão

d_{cr} - Diâmetro da parte roscada do ligador

d_{furo} - Diâmetro do furo

t_1 - Espessura do elemento 1

t_2 - Espessura do elemento 2

t_{pen} - Comprimento de penetração do ligador

$F_{Md,i}$ - Força actuante de cálculo do ligador devido ao momento flector

$F_{Md,Máx}$ - Força máxima actuante de cálculo do ligador devido ao momento flector

$F_{t,d}$ - Força total actuante de cálculo do efeito combinado de momento flector e esforço transversal

$F_{Vs,d}$ - Força de corte de cálculo em cada ligador devido ao esforço transversal

$F_{vt,d}$ - Força vertical de corte total pela acção combinada de esforço transversal e momento flector

$F_{R,d}$ - Força Resistente de cálculo do ligador

$F_{v,d}$ - Força de corte total exercida pelos varões na madeira

e - Distância da linha de acção da força de corte exercida pelos varões ao topo da peça de madeira

F - Força de ancoragem

F_{ax} - Força resistente de tracção do ligador

$F_{v,R1,A}$ - Força resistente característica do modo de rotura 1 A

$F_{v,R1,B}$ - Força resistente característica do modo de rotura 1 B

$F_{v,R2,A}$ - Força resistente característica do modo de rotura 2 A

$F_{v,R2,B}$ - Força resistente característica do modo de rotura 2 B

$F_{v,R3}$ - Força resistente característica do modo de rotura 3

$R_{ax,Rd,1}$ - Força resistente de arrancamento de cálculo do modo de rotura 1

$R_{ax,Rd,2}$ - Força resistente de arrancamento de cálculo do modo de rotura 2

$R_{ax,Rd,3}$ - Força resistente de arrancamento de cálculo do modo de rotura 3

Introdução

Justificação e interesse

Neste trabalho são estudadas, do ponto de vista técnico e económico, soluções de reabilitação de pavimentos de madeira de edifícios antigos, afectados por patologias estruturais comuns. Particularizando, são analisadas soluções de reabilitação para pavimentos de madeira de edifícios habitacionais, afectados por ataques biológicos nas entregas das vigas nas paredes de apoio.

Na temática das soluções de reabilitação de pavimentos de madeira, existem alguns trabalhos realizados ([8], [9] e [11]), nos quais que são tipificadas várias soluções de intervenção estrutural, abrangendo um leque muito variado de patologias e de soluções de reabilitação. Sendo esta tipificação geral, os aspectos económicos das soluções são pouco aprofundados e analisados.

Esta dissertação pretende ser específica na caracterização, na análise e no dimensionamento de um conjunto de soluções de reabilitação previamente escolhidas, de utilização comum no mercado, para fazer face a patologias localizadas nas entregas das vigas do pavimento. Com este aspecto técnico específico, aliado à análise económica de cada uma das soluções, pretende-se com esta dissertação contribuir para o apoio na tomada de decisão dos projectistas sobre qual a melhor alternativa de reabilitação em termos económicos, fundamentalmente de preço, e em termos técnicos, para o problema da degradação das entregas das vigas do pavimento.

O interesse desta dissertação fundamenta-se em três razões fundamentais:

- Necessidade de reabilitação de edifícios antigos no país;
- Representatividade dos pavimentos de madeira nos edifícios degradados;
- Necessidade de dotar o meio técnico de material de apoio em decisões sobre soluções de reabilitação aplicáveis a situações comuns.

Apesar de Portugal ainda apresentar valores de produtividade do sector da reabilitação de edifícios (26,1%) inferiores à média europeia, que, em 2011, se situava em 34,9% [1], o meio técnico e as empresas tomaram consciência da potencialidade que esta actividade tem na economia do país, daí que nos últimos anos se tenha assistido a um aumento do número de obras de reabilitação. A sua potencialidade percebe-se pelo estado de conservação do parque habitacional, no qual existia, em 2011, cerca de 1 milhão de edifícios a necessitar de intervenção [1].

Dado ser uma tecnologia de pavimentos antiga, e de ser a mais comum em edifícios antigos até à generalização da utilização do betão armado, os pavimentos estruturais de

madeira estão presentes em grande parte do edificado degradado. Mais de metade (58,1%) dos edifícios a necessitarem de intervenções pertenciam em 2011 a épocas construtivas anteriores a 1945 [1].

Os intervenientes numa obra de reabilitação são os mesmos que numa obra de construção nova. No entanto, devido à maior complexidade das obras de reabilitação, existem particularidades na função de cada interveniente bem como a exigência de uma maior formação e conhecimento nesta área. No caso dos projectistas, há a necessidade de actualizar conhecimentos – nomeadamente ao nível das técnicas usadas, dimensionamento de estruturas antigas e conhecimento das patologias mais frequentes nos edifícios antigos – e de adquirir competências no dimensionamento de soluções de reabilitação.

Pelo facto de a reabilitação ser ainda uma actividade em desenvolvimento e com pouca expressão no país, e pela maior diversidade de soluções construtivas, surgem por vezes carências de informação no meio técnico. Da informação fornecida por projectistas experientes na área da reabilitação estrutural, estes factos resultam nas seguintes carências para os projectistas estruturais:

- Falta de modelos de apoio à decisão de soluções de reabilitação a adoptar para fazer face a determinadas patologias;
- Para um mesmo problema estrutural não saber, por vezes, quais as opções mais económicas;
- Dificuldades e particularidades de dimensionamento de algumas soluções estruturais de reabilitação.

Objectivos

A presente dissertação pretende atingir os seguintes objectivos:

- Identificar e tipificar as anomalias mais comuns em pavimentos de madeira e as que normalmente prejudicam a segurança estrutural;
- Caracterizar e definir os critérios de dimensionamento de soluções de reabilitação para determinado caso de estudo, com aplicação do Eurocódigo 5 e de outras regras e práticas adequadas;
- Comparar do ponto de vista técnico-económico cada uma das soluções de intervenção estudadas;
- Contribuir para a tomada de decisão dos projectistas relativamente à solução de reabilitação mais vantajosa em termos técnicos e económicos.

Metodologia

Para as bases teóricas do trabalho foi utilizada sobretudo a bibliografia existente e a experiência de projectistas na área de reabilitação, nomeadamente em termos de patologias, de caracterização de pavimentos, de soluções de reabilitação e respectivos critérios de dimensionamento.

Para atingir os objectivos propostos, a dissertação seguiu a seguinte metodologia investigação:

1. Recolha bibliográfica e caracterização do estado da arte, nomeadamente de anomalias estruturais, soluções de reabilitação e critérios de dimensionamento aplicáveis aos pavimentos de madeira;
2. Escolha das soluções mais comuns de reabilitação de pavimentos de madeira para determinadas patologias, tendo por base a recolha bibliográfica e a consulta do meio técnico. É feita a caracterização técnica das soluções, dos critérios de dimensionamento e das anomalias em pavimentos de madeira.
3. Aplicação a caso de estudo das soluções de reabilitação;
4. Análise técnico-económica das soluções de reabilitação.

Organização da dissertação

O trabalho realizado encontra-se dividido em 4 capítulos principais:

1. Caracterização funcional dos pavimentos de madeira, onde é feita a caracterização destes pavimentos, das geometrias e materiais mais comuns, bem como análise resumida relativamente às exigências funcionais actuais;
2. Patologias nos Pavimentos, onde são tipificadas as anomalias mais comuns a nível das vigas, soalho e tectos constituintes, analisando como se relacionam e como podem afectar o comportamento estrutural e funcional do edifício;
3. Soluções de Reabilitação, onde são tipificadas as soluções de reabilitação mais comuns para patologias localizadas nas entregas das vigas dos pavimentos, identificando os critérios de dimensionamento, os materiais e geometrias mais comuns, e os processos construtivos.
4. Análise técnico-económica de um caso de estudo, onde as soluções tipificadas anteriormente são dimensionadas e orçamentadas para depois serem analisadas e extrair daí conclusões em termos técnicos e económicos.

Para a referenciação bibliográfica desta dissertação, foram utilizadas as normas portuguesas NP405-1, NP405-3 e NP405-4.

CAPÍTULO 1- CARACTERIZAÇÃO FUNCIONAL DOS PAVIMENTOS DE MADEIRA

1.1. Considerações iniciais

Neste capítulo faz-se uma descrição genérica da constituição e função dos elementos existentes num pavimento de madeira. A descrição exaustiva deste tema não é feita uma vez já foi realizada noutros trabalhos [8], [9].

Neste capítulo é analisada ainda a capacidade de os pavimentos de madeira cumprirem as exigências funcionais actuais num contexto de obras de reabilitação. São analisadas as exigências funcionais que se consideram de maior relevância neste tipo de elementos nomeadamente exigências: acústicas, térmicas, de segurança ao fogo, resistência mecânica e durabilidade.

1.2. Caracterização dos elementos constituintes

Como elemento estrutural, os pavimentos de madeira foram a solução mais usada na construção dos pavimentos dos edifícios antigos até à vulgarização do Betão Armado.

Das várias vantagens dos pavimentos de madeira, em relação aos seus homólogos fabricados noutros materiais, destaca-se o seu peso. Comparativamente, um pavimento de madeira é muito mais leve que uma laje maciça de betão, de vigotas e mais leve que uma laje com perfis de aço.

A nível da constituição, um pavimento de madeira é composto essencialmente por três elementos: as vigas, o soalho e o tecto. Além destes constituintes principais, um pavimento de madeira pode conter outros elementos secundários: vigas auxiliares, cadeias, tarugos e elementos metálicos de ligação.

Na figura 1.1. encontra-se um pavimento de madeira de um edifício pombalino com dois dos seus elementos principais, vigas e soalho. Chama-se a atenção para o facto de serem visíveis as marcas do fasquiado do tecto, que foi retirado, e que criava a envolvente inferior do pavimento.

De seguida é feita uma breve descrição de cada constituinte, bem como a sua função e as geometrias comuns em edifícios de habitação.

A nível das madeiras mais usadas em pavimentos, podem enunciar-se o Pinho Bravo, o Carvalho, o Castanho, a Casquinha, o Eucalipto e o Pinho Manso.



Fig.1.1- Pavimento de Madeira de um Edifício Pombalino - Vigas e soalho

1.2.1. Vigas

As vigas de madeira são o principal elemento resistente às acções impostas no pavimento. Têm de resistir ao seu peso próprio, às acções provenientes da área de soalho e ao peso do tecto.

Podem ter secções circulares ou rectangulares. No entanto, em edifícios antigos é muito comum as secções estarem numa geometria intermédia. Os troncos eram colocados em obra na sua forma original, sendo depois falqueados nas faces superior e inferior para receber respectivamente o soalho e o tecto.

Através de informação fornecida por projectistas experientes na área da reabilitação estrutural, as secções das vigas, em edifícios de habitação, são geralmente pequenas, variando sensivelmente entre secções de $0,12 \times 0,08 m^2$ e no máximo $0,20 \times 0,20 m^2$. As secções podem variar consoante a localização dos pavimentos no edifício, por exemplo nas lajes de esteira é comum as secções serem mais pequenas.

Pode haver variações das dimensões consoante o tipo de edifício, por exemplo em edifícios pombalinos é comum encontrarem-se secções quadradas. No entanto, as secções mais comuns são de $0,16 \times 0,08 m^2$ sendo esta a secção mínima exigida pelo RGEU [46].

Os vãos variam até aos 6 metros, já que com dimensões superiores o pavimento tem problemas de deformabilidade com flechas a meio vão que não são admissíveis, além de que possivelmente também não verificará a segurança estrutural.

As vigas apoiam nas paredes dos edifícios, assentando directamente nas mesmas ou em frechais pertencentes à parede. Em ambos os casos as vigas devem ter uma entrega na parede de pelo menos 0,20 m até 0,25 m segundo recomendação de alguns autores [5].

Outro tipo de solução é as vigas apoiarem em cachorros de pedra encastrados nas paredes, não sendo esta uma solução tão frequente [5].

Os afastamentos das vigas variam entre 0,30 m e 0,50 m, sendo 0,30 m o afastamento preferencial em muitos edifícios antigos, uma vez que é uma medida útil para a construção dos tectos, em particular para a pregagem dos fasquiados de madeira. [5].

O RGEU limita este afastamento a 0,40m para vigas com a secção mínima de 0,16x0,08 m²[46].

1.2.2. Soalho

O soalho é o elemento que cria a superfície horizontal do pavimento, destinada à circulação de pessoas e colocação de mobiliário e equipamento. É constituído normalmente por tábuas pregadas perpendicularmente às vigas. O soalho pode ser de vários tipos (fig.1.2.) [5]:

- Soalho “de junta”;
- Soalho “de chanfro”;
- Soalho “à portuguesa”;
- Soalho “de meio fio recontado”;
- Soalho “à inglesa”;

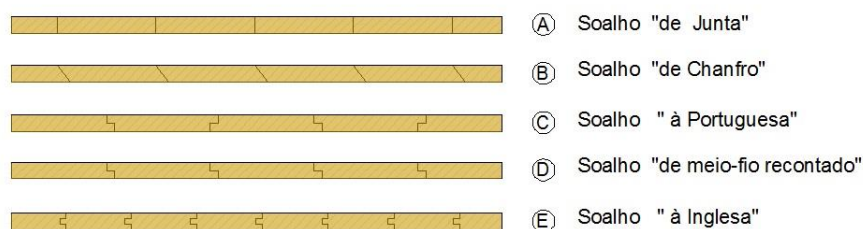


Fig.1.2.- Os vários tipos de Soalho (Adaptado de: [5])

Por razões de desempenho funcional e estéticas, os soalhos mais utilizados em edifícios de habitação são o soalho “à portuguesa” e o soalho “à inglesa”, tendo este último as melhores características. Em termos de dimensões, no soalho “à portuguesa” de pinho bravo, a largura das tábuas varia sensivelmente entre 0,17 m e os 0,25 m, e no soalho “à inglesa” entre os 0,07 m a 0,10 m.

O comprimento das tábuas varia sensivelmente entre 2,60 m e 3,5 m no soalho “à portuguesa” e entre 2,60 m e 3,9 m no soalho “à inglesa” [5]. Noutros tipos de madeira de

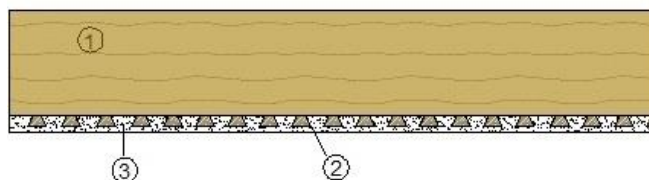
soalho, a largura varia sensivelmente na mesma ordem de grandeza, já o comprimento pode ir até aos 7m [5]. Em termos de espessura é comum variar entre 2 e 5 cm.

Sendo o soalho um elemento descontínuo, para não comprometer o comportamento térmico e acústico, os seus componentes devem garantir um bom encaixe, sendo estes dois modos de pregar soalho os que melhor satisfazem essa característica [16]. Note-se que apenas com esta recomendação não se consegue que um pavimento de madeira tenha um comportamento térmico e acústico satisfatório como é analisado posteriormente.

1.2.3. Tecto

Os tectos mais correntes são: em estuque (fig.1.3.) ou em forro de madeira (fig.1.5.).

Nos tectos em estuque é pregado um fasquiado de madeira com secção trapezoidal, perpendicular às vigas, que depois é preenchido com argamassa e estuque como acabamento.



- 1- Viga;
- 2- Fasquiado de Madeira;
- 3- Argamassa de cal revestida com estuque

Fig.1.3.- Tecto Estucado (Adaptado de: [5])

O fasquiado é constituído por fasquias com espessuras geralmente de 1,5 a 1,8 cm, e com uma largura máxima de 2 cm com afastamento entre 1,0 a 1,5 cm [37].

O preenchimento das fasquias pode ter características e um número de camadas variável, no entanto este é tradicionalmente executado em três camadas [37]:

- Camada de reboco, constituída por uma argamassa de cal aérea, que preenche o espaço entre fasquias;
- Camada de esboço, constituída por uma pasta de cal e areia de esboço com espessura de 3 a 5 mm;
- Camada final de estuque, constituída por uma argamassa de gesso e cal aérea com cerca de 3 mm de espessura, onde podem existir trabalhos de ornamentação com interesse patrimonial e cultural, podendo ser necessário que as intervenções nos pavimentos preservem esses revestimentos.



Fig.1.4.- Tecto estucado trabalhado

Os tectos em forro de madeira são formados por tábuas aplainadas na face visível e pregadas perpendicularmente às vigas (fig.1.5.). A disposição das tábuas é em caso geral semelhante à do soalho à portuguesa [5].



1- Forro de madeira pregado “à Portuguesa”

2- Viga

Fig.1.5.- Tecto em forro de madeira (Adaptado de: [5])

Em construções mais nobres os tectos podem ser independentes dos pavimentos, sendo ligados a uma estrutura auxiliar de madeira evitando assim a propagação de vibrações do pavimento para o tecto.

1.2.4. Elementos Secundários

Os tarugos (fig.1.6.) são troços de viga ou barrotes transversais às vigas principais.

Destinam-se principalmente a evitar os empenos das vigas principais. Também contribuem para evitar o risco de bambeamento, reduzir as flechas e permitem uma melhor distribuição de cargas.



Fig.1.6.- Tarugo

As cadeias são vigas transversais que interrompem a continuidade das vigas principais de modo a permitir a passagem por exemplo de uma caixa de escadas ou uma chaminé.



Fig.1.7.- Ferrolho Metálico

Os elementos metálicos, por exemplo ferrolhos (fig. 1.7.), têm o objectivo de fazer a ligação dos pavimentos às paredes de modo a solidarizar o edifício e consequentemente melhorar o seu comportamento estrutural a acções verticais e horizontais.

1.3. Exigências funcionais aplicadas à reabilitação de pavimentos de madeira

Em geral, existem dificuldades de aplicar às obras de reabilitação os requisitos regulamentares que são aplicáveis à construção nova. Assim, de maneira a que as obras de reabilitação cumpram de uma forma técnica e economicamente viável os requisitos regulamentares e exigências funcionais actuais, é possível efectuar algumas dispensas nas verificações regulamentares através do Regime Excepcional para Reabilitação Urbana (RERU) [14].

Na insuficiência da legislação de obras em edifícios antigos foi criado este documento de forma a facilitar as obras de reabilitação, por incompatibilidades com os documentos legais que estão direccionados apenas para construção nova. No entanto, é de salientar que o RERU é um documento provisório com a validade de 7 anos.

De seguida são analisadas as exigências funcionais que se consideraram mais importantes analisar num contexto de reabilitação de pavimentos de madeira, tais como:

- Acústicas;
- Térmicas;
- De segurança ao fogo;
- De durabilidade;
- De resistência mecânica e estabilidade.

1.3.1. Acústica

Em termos legais, o documento de referência a respeitar em termos de exigências acústicas em edifícios é o Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) [43].

Segundo este documento regulamentar, os edifícios e as suas fracções devem cumprir um índice de isolamento sonoro a sons aéreos e de percussão nas seguintes envolventes [14]:

- Entre o exterior dos edifícios e quartos ou zonas de estar;
- Entre compartimentos de um fogo e quartos ou zonas de estar de outro fogo;
- Entre locais de circulação comum do edifício e quartos ou zonas de estar;
- Entre locais de edifícios destinados a comércio, indústria, serviços, diversão e quartos ou zonas de estar de outro fogo;
- No interior dos quartos ou zonas de estar relativamente a sons de percussão provenientes de pavimentos de outros fogos ou locais de circulação comum.

. Acusticamente os pavimentos de madeira - sem qualquer elemento adicional além das vigas, soalho e tecto - apresentam um comportamento a sons aéreos e a sons de percussão que não é aceitável perante os regulamentos existentes.

Este comportamento é explicado pelo próprio material madeira, que não tem as características de um bom isolante, bem como pela constituição dos pavimentos que se caracteriza por ser um sistema estrutural com uma massa pequena e com elementos descontínuos [26].

Na verificação dos requisitos acústicos em obras de reabilitação de edifícios antigos, o RERU [14] diz o seguinte: “O RERU dispensa as operações urbanísticas nelas previstas da aplicação do Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE), salvo quando se trate de operações urbanísticas cujo objecto sejam as partes do edifício ou fracções autónomas destinadas a usos não habitacionais”. Sendo referido como nota que esta isenção não é aplicada com a mesma amplitude a obras de construção e ampliação.

O cálculo acústico pode assim ser dispensado em muitas situações. No entanto, um pavimento de madeira sem qualquer isolamento acústico oferece pouco conforto aos utilizadores, sendo por isso necessário adoptar algumas soluções construtivas que melhorem o comportamento a sons aéreos e de percussão. Saliente-se que os pavimentos de madeira são o principal elemento pelo qual os edifícios antigos têm um mau comportamento acústico, nomeadamente no ruído interior que é gerado nos edifícios [24].

Em edifícios antigos é ainda comum existirem no pavimento térreo actividades comerciais e de lazer. Nestes casos o ruído no edifício está principalmente dependente do isolamento dos pavimentos do primeiro andar, uma vez que as paredes de alvenaria em geral apresentam um bom comportamento acústico devido à sua elevada espessura [24].

Também por esta razão o ruído entre fogos sobrejacentes é mais gravoso do que em fogos situados no mesmo piso [24]. É por isso aconselhado que o isolamento acústico dos pavimentos tenha uma especial atenção nestas envolventes.

Em intervenções de reabilitação é possível aumentar significativamente o isolamento acústico, existindo para tal várias formas de o fazer. A mais simples consiste apenas na colocação de tapetes, melhorando principalmente o isolamento a sons de percussão [26]. É possível também criar um novo soalho, o que se for convenientemente pregado melhora o comportamento tanto a nível acústico como a nível mecânico como se poderá verificar em capítulo posterior.

Como já foi referido, os pavimentos de madeira, sem qualquer tipo de medida correctiva não cumprem os requisitos regulamentares aplicáveis. No RRAE o isolamento a sons aéreos entre fracções de fogos diferentes em edifícios de habitação, tem de respeitar a seguinte condição [43]: $D_{nw} \geq 50 \text{ dB}$. Para um pavimento de madeira comum, com vigas de

0,20 x 0,10 m, soalho com 2,5 cm de espessura e um tecto estucado, estima-se que o índice de redução sonora varie aproximadamente entre $30 \text{ dB} < R_w < 40 \text{ dB}$. Refira-se que a grandeza R_w não tem em conta as transmissões marginais.

Em relação ao isolamento a ruídos de precursão o RRAE impõe, para a mesma envolvente, a seguinte condição [43]: $L_{nTw} \leq 60 \text{ dB}$. Para o pavimento anteriormente descrito, estima-se que o índice de isolamento a sons de precursão varie aproximadamente entre $80 \text{ dB} < L_{nTw} < 90 \text{ dB}$.

Face a esta limitação dos pavimentos de madeira é possível criar soluções construtivas que introduzam novos materiais isolantes para melhorar o comportamento acústico.

Estas soluções consistem essencialmente na combinação de camadas de lã de rocha, placas de gesso cartonado e materiais resilientes. De seguida são ilustradas algumas destas soluções, da fig. 1.8. à fig. 1.11, sendo indicado para cada solução os valores dos índices de redução sonora a sons aéreos (R_w) e de isolamento a sons percussão (L_{nTw}).

Com estas ilustrações é demonstrado que podem ser introduzidas melhorias significativas no isolamento acústico dos pavimentos adoptando este género de soluções construtivas.

Note-se que, não sendo atribuídas secções para as vigas, estes resultados são apresentados em intervalos de valores.

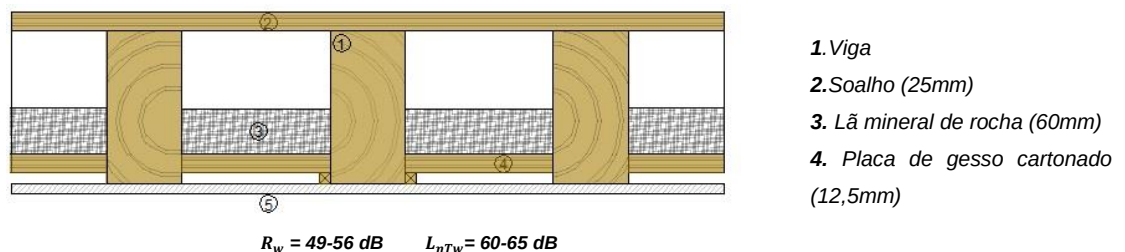


Fig.1.8.- Solução de Isolamento Acústico A (Adaptado de: [14])

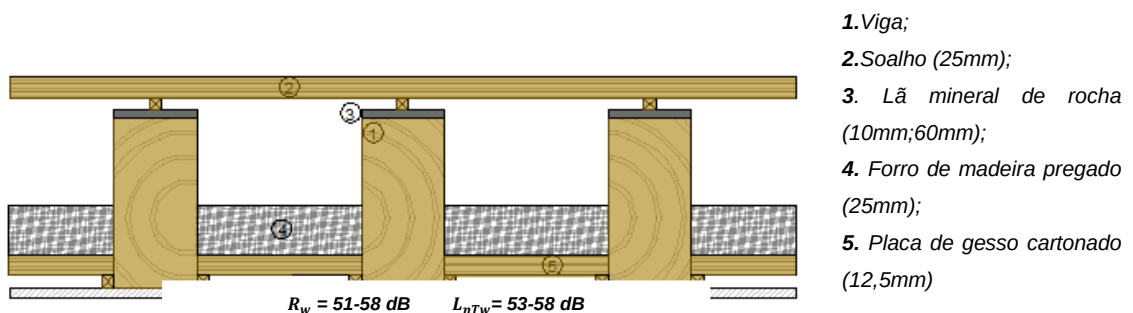


Fig.1.9.- Solução de Isolamento Acústico B (Adaptado de: [14])

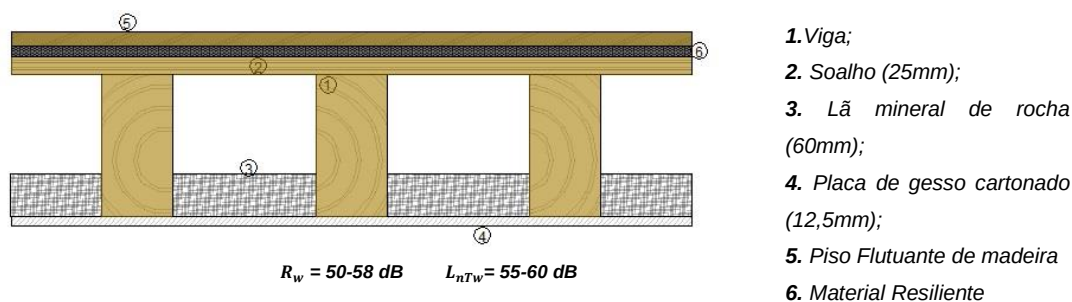


Fig.1.10.- Solução de Isolamento Acústico **C** (Adaptado de: [14])

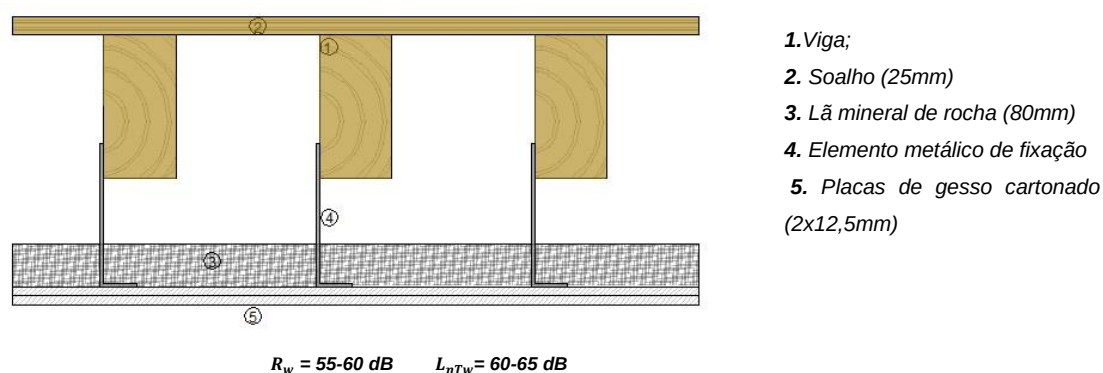


Fig.1.11.- Solução de Isolamento Acústico **D** (Adaptado de: [14])

1.3. Térmica

Possuindo uma baixa inércia térmica e um baixo índice de condutibilidade térmica, a madeira oferece um bom comportamento a este nível [16]. Aliado a estas características, o carácter higroscópico da madeira dota os edifícios de uma boa eficiência energética [17].

Apesar do bom comportamento térmico da madeira, os pavimentos feitos com este material, sem medidas correctivas de isolamento, apresentam um desempenho térmico com fraca qualidade. Trata-se de elementos com pouca espessura e com descontinuidades entre os mesmos. Tratando-se de um pavimento em tosco, o espaço entre vigas, soalho e o tecto é apenas preenchido pelo ar, além de que o próprio soalho é um elemento descontínuo.

O RERU dispensa também a aplicação dos requisitos mínimos de eficiência energética e qualidade térmica sempre que se verifiquem incompatibilidades de ordem técnica, funcional ou de valor arquitectónico. O mesmo documento salienta que estas dispensas devem ser confirmadas e verificadas pelo autor de projecto.

No entanto, devido ao comportamento térmico insatisfatório é recomendável adoptar soluções construtivas que melhorem o isolamento e conforto térmico.

No caso dos pavimentos de madeira podem ser usadas soluções semelhantes às que foram apresentadas anteriormente para o isolamento acústico. Não se mostram aqui os índices de condutibilidade térmica destas soluções uma vez que não há exigências regulamentares entre envolventes de dois espaços interiores dos edifícios que possam servir de referência para a sua comparação.

O isolamento térmico deve ter especial atenção nos edifícios que possuam pavimentos de andares de ressalto e nos pavimentos de esteira, uma vez que são elementos em contacto com o ambiente exterior.

1.3.3. Segurança ao fogo

A resistência ao fogo de uma estrutura é quantificada pelo intervalo de tempo, durante um incêndio, em que a estrutura é capaz de assegurar as suas funções de resistência, de isolamento e de estanquidade [17].

Apesar de ser um material combustível, a madeira oferece um bom comportamento ao fogo. Quando em combustão, a madeira não sofre deformações significativas nem são alteradas as características de resistência mecânica. A rotura poderá ocorrer se a secção se tornar insuficiente devido à redução geométrica provocada pela combustão. No entanto, é uma combustão que se dá de forma lenta, uma vez que a madeira carbonizada é cerca de três vezes mais isolante que a madeira normal. Além desta característica a madeira apresenta uma temperatura de ignição elevada [17].

Apesar do bom comportamento do material, os pavimentos de madeira devido à sua reduzida espessura não cumprem, em geral os requisitos definidos no Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE) [45]. Neste regulamento, a título de exemplo, um edifício habitacional com altura compreendida entre 9 e 28 m, tem de ser dotado de elementos estruturais - destinados a suporte e compartimentação - com uma resistência ao fogo padrão mínima de REI60. Significa este valor que durante um mínimo de 60 minutos, o elemento estrutural tem de resistir ao fogo, ser estanque às chamas e gases, e ter a capacidade de ser isolante térmico.

No RERU não há indicações sobre o cumprimento dos requisitos regulamentares aplicáveis de segurança ao fogo em edifícios antigos. No entanto, o RT-SCIE é aplicável tanto a obras de construção nova como a obras de reabilitação, sejam estas de reconstrução, ampliação ou obras em que é alterado do tipo de uso dado ao edifício.

Da consulta do mesmo regulamento, podem ser dispensadas algumas disposições quando se intervém em edifícios históricos em quais as intervenções a realizar possam trazer inconvenientes para a preservação patrimonial da construção. Implicam no entanto, estas dispensas, que sejam adoptadas medidas adicionais que melhorem o comportamento ao fogo.

De modo a melhorar a segurança ao fogo é possível adoptar soluções construtivas que incluam a incorporação de placas de gesso cartonado funcionando também como tectos falsos. A título de exemplo, pela consulta de fabricantes da área, é possível dotar um pavimento de madeira com uma resistência ao fogo de REI60 através de uma solução construtiva semelhante à da fig.1.11. Com este tipo de solução obtém-se uma resistência ao fogo de 60 min considerando apenas a contribuição das placas de gesso, ou seja, sem ter em conta a contribuição da resistência ao fogo da lã de rocha e das próprias vigas de madeira.

Esta solução é indicada para obras onde não se pretenda conservar os tectos antigos que não possuam qualquer valor patrimonial. Caso se pretenda manter os tectos, é possível de utilizar outro tipo solução que consiste na aplicação de materiais resistentes ao fogo, no espaço livre entre as vigas e soalho, como por exemplo o uso de espumas de inertes de perlite expandida [26].

1.3.3.1. Importância das ligações

Nas estruturas de madeira já intervencionadas, incluindo os pavimentos, podem existir ligações entre elementos feitas por elementos metálicos, como é o caso dos empalmes com ligadores metálicos.

Como o aço tem um comportamento ao fogo diferente do comportamento da madeira, as ligações com elementos metálicos vão ter influência no comportamento global da estrutura de madeira em caso de incêndio.

De facto, o comportamento ao fogo das estruturas é fortemente influenciado pelo comportamento das ligações existentes [6]. Pode-se dar, por exemplo, uma rotura local na zona de uma ligação de uma viga de um pavimento muito antes da sua rotura global devido ao mau comportamento ao fogo do aço.

Em caso de incêndio as ligações de aço são pontos fracos na estrutura de madeira.

Já as ligações coladas oferecem à partida um melhor comportamento ao fogo já que existem colas que são próprias para o efeito [15].

Para melhorar o comportamento ao fogo das estruturas de madeira, na zona de ligações com elementos metálicos, é possível utilizar dois métodos.

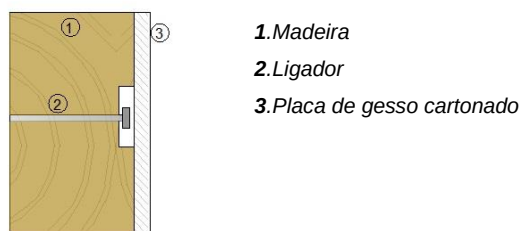


Fig.1.12.- Protecção ao fogo de ligador metálico (Adaptado de: [15])

Pode-se por um lado aumentar a secção dos elementos resistentes de madeira, aumentar os espaçamentos entre ligadores e os afastamentos aos bordos, ou então optar-se por adicionar painéis de protecção de outro material com melhores capacidades de resistência ao fogo [6], como é o caso da fig.1.12. em que se oculta a cabeça de um parafuso de porca através da introdução de uma placa de gesso cartonado. Esta protecção pode ser conseguida também através da aplicação de tintas intumescentes [15].

O outro método consiste em sobredimensionar as ligações a uma temperatura normal. Este método apresenta o inconveniente de resultar em zonas com uma maior secção [6], o que pode não ser estético nem funcional, por exemplo na instalação de um tecto falso. Para amenizar este inconveniente têm vindo a ser estudadas soluções de reforço com parafusos auto-roscantes.

No caso dos pavimentos de madeira, em situações correntes, a protecção ao fogo pode ser assegurada pelos painéis de gesso que formam os tetos como exemplificado das figuras 1.8. a 1.11. Desta maneira a resistência das vigas e das respectivas ligações metálicas é assegurada uma vez que se encontram protegidas pelas placas de gesso.

Caso haja manutenção dos tetos originais, a protecção das ligações pode ser feita pelos métodos já descritos.

1.3.4. Durabilidade

O conceito de durabilidade numa obra de reabilitação tem o mesmo significado que numa obra de construção nova, apesar de este poder ser um conceito com carácter subjectivo [18]. A definição da importância do edifício pode variar de projectista para projectista e definirem-se tempos de vida útil diferentes para uma mesma intervenção estrutural. No entanto, em edifícios antigos com valor histórico e cultural, as necessidades de durabilidade são mais rigorosas do que em edifícios novos [24].

Os edifícios antigos já deram prova da sua durabilidade ao longo de centenas de anos. Por esta razão, aplicar soluções de reabilitação com tempos de vida útil inferior pode

ser uma decisão discutível. Se por qualquer razão se optar por soluções menos duráveis que as originais, é recomendado que esteja prevista uma substituição periódica dos elementos a intervir [18].

De modo a ser atingida uma durabilidade adequada da solução de reabilitação escolhida, é conveniente utilizar materiais e tecnologias que ofereçam garantias de qualidade, sendo por isso preferível utilizar o que está já suficientemente estudado, documentado e testado em obra.

É também preferível o uso de técnicas de construção antigas, uma vez que muitas técnicas de construção nova não são compatíveis para coexistirem com as técnicas que foram usadas na construção original dos edifícios [24].

1.3.5. Resistência mecânica e estabilidade

A resistência mecânica e estabilidade de uma estrutura, em obras de reabilitação, não pode ser alvo de dispensas regulamentares por envolver a segurança das construções e dos utilizadores [14].

Para o caso dos pavimentos de madeira, devem ser verificados os Estados Limites Últimos de acordo com o EC5 [41] uma vez que não existe outro documento normativo nacional para o dimensionamento de estruturas de madeira.

Caso não se verifique a existência de deformações e vibrações importantes ou inadmissíveis, poderá ser possível não verificar os Estados Limite de Utilização no EC5.

Da consulta de projectistas experientes na área da reabilitação, percebeu-se que é comum que os mesmos se deparem com situações em que não se torna viável, técnica e economicamente, que um pavimento de madeira respeite os limites máximos de deformação. O bom senso de cada um e a experiência devem ser factores a ter em conta neste tipo de decisões.

CAPITULO 2 – PATOLOGIAS DE PAVIMENTOS DE MADEIRA

2.1. Considerações iniciais

Na primeira parte deste capítulo descrevem-se as anomalias mais comuns, e as respectivas causas, em pavimentos de madeira pertencentes à estrutura de edifícios antigos de habitação. É realizada uma apresentação prática e resumida das patologias e agentes degradadores, não sendo esta uma descrição exaustiva uma vez que já foi realizada noutros trabalhos [8], [9], [19].

Nestes trabalhos, a tipificação das patologias é feita de uma forma mais generalizada no âmbito de estruturas de madeira. Neste capítulo, identificam-se os problemas mais comuns particulares dos pavimentos de madeira, como estes se manifestam e identificam-se os pontos críticos onde se localizam.

Nos trabalhos referenciados, a descrição das anomalias é direccionada apenas para as de carácter estrutural, ou seja, as que ocorrem principalmente nas vigas. No entanto, existem patologias que se manifestam nos restantes elementos do pavimento que podem originar problemas estruturais graves, uma vez que os elementos do pavimento estão interligados e por isso funcionam como um sistema estrutural único.

Por esta razão, neste capítulo identificam-se e descrevem-se as patologias que ocorrem nos restantes elementos, de forma a identificar as suas causas e as consequências que poderão ter no comportamento geral da estrutura de um pavimento de madeira.

Noutros trabalhos realizados sobre reabilitação de edifícios é referida a importância, no sucesso das intervenções, da fase de inspecções e ensaios na realização do diagnóstico do estado de conservação dos edifícios. Neste sentido, surgem nestes trabalhos o estudo de ensaios não-destrutivos como complemento às inspecções e ensaios tradicionais feitos *in situ* [7], [8], [9].

Apesar destes novos métodos e tecnologias de ensaios não destrutivos estarem bastante estudados e poderem ser úteis nas fases de diagnóstico, a sua aplicabilidade nos pavimentos de madeira não é discutida nos trabalhos referidos.

Na segunda parte deste capítulo, essa aplicabilidade é discutida bem como é salientada a importância da inspecção visual e dos ensaios tradicionais feitos em obra para o correcto diagnóstico de patologias estruturais nos pavimentos de madeira.

A análise exaustiva sobre as fases de inspecção não é realizada uma vez que estão já amplamente analisadas pelos trabalhos referenciados. No entanto, pela sua importância

nas obras de reabilitação, considerou-se desejável fazer algumas referências e apresentar uma metodologia, com uma abordagem prática, de inspecção de um pavimento de madeira com recurso a ensaios tradicionais.

2.2. As patologias mais comuns

Propõe-se dividir as patologias dos pavimentos de madeira da seguinte forma:

- Patologias nas vigas;
- Patologias no soalho;
- Patologias no tecto;
- Patologias nas ligações.

De seguida, cada uma destas patologias é identificada e descrita. Salienta-se que é da maior importância que, antes de se intervir numa estrutura, se faça uma eliminação das causas que originarão os problemas para que estes não se tornem recorrentes.

2.2.1. Patologias nas vigas

Nas vigas, as patologias manifestam-se na maior parte das vezes por grandes deformações [21], [24], sendo também comum as roturas locais destes elementos.

Na fig.2.1. é possível identificar a rotura local de uma viga de um pavimento. Sendo visíveis manchas de humidade, é possível que a rotura se tenha dado por ataque biológico de fungos de podridão, que progrediram desde a entrega na parede até à zona do vão.



Fig.2.1. - Rotura local de viga de pavimento de madeira

As roturas globais dos pavimentos de madeira são raras. Alguns autores explicam esta razão pelo facto de muitas vezes os pavimentos de madeira estarem sobredimensionados para as acções a que são sujeitos. Esta afirmação pode ser válida em alguns tipos de edifícios como os pombalinos, onde são comuns secções quadradas de por exemplo $0,20 \times 0,20 m^2$.

Considera-se que os pavimentos de madeira sofrem poucas roturas globais porque normalmente existem sinais - como os aumentos da deformação e da vibração - que alertam os utilizadores para a propagação da degradação e o perigo eminente de rotura.

O facto dos pavimentos de madeira sofrerem poucas roturas globais também pode ser explicado pelas acções a que as estruturas estão sujeitas durante a sua utilização. As acções que actuam diariamente nas estruturas têm uma pequena probabilidade de atingirem os valores elevados que causem a rotura. A própria filosofia dos regulamentos estruturais tem este aspecto em conta, onde as acções que se consideram para verificar a segurança são muito maiores que as acções das verificações de estados limite de utilização. Em termos práticos, no dimensionamento de um pavimento de madeira, é o estado limite de utilização de deformabilidade que costuma ser condicionante.

Mesmo que haja roturas locais de vigas causadas por degradação, o soalho é capaz de transmitir os esforços dessas vigas para outras na sua vizinhança. Sendo assim, em princípio, não haverá rotura global dependendo obviamente esta situação do número de vigas afectadas pela degradação. As deformações e roturas locais nas vigas dos pavimentos podem ter duas causas principais:

- Causas Naturais;
- Causas Humanas.

A nível de causas naturais, as deformações e roturas podem ser devidas à fluência da madeira e ao ataque de agentes biológicos, sendo esta a causa mais frequente de patologias nos elementos dos pavimentos de madeira [8], [19], [24].

A madeira por si só não se degrada com o tempo, a principal fonte de problemas e patologias nas estruturas de madeira são os ataques biológicos como por exemplo: térmitas, carunchos e fungos de podridão [19].

Em ambos os casos, fluência e ataque biológico, há um factor que é determinante para a ocorrência de patologias: a humidade. As térmitas e os fungos só atacam madeiras com elevado teor de humidade (superiores a 20%). Já os efeitos da fluência aumentam significativamente com a presença de humidade [19]. Os carunchos, embora tenham alguma tolerância à humidade, é mais comum atacarem madeiras secas.

A humidade diminui também a resistência mecânica e aumenta a probabilidade de empenos resultantes de ciclos molhagem/secagem, salientando-se no entanto que estes dois efeitos são reversíveis quando a madeira perde água [19].

As consequências dos ataques biológicos resultam na diminuição ou na eliminação da secção resistente de uma viga. Na maior parte dos casos, o ataque de fungos de podridão e de térmitas, dá-se perto de zonas de humedificação, nomeadamente na zona das entregas nas paredes ou perto de zonas onde houve roturas de canalizações. Na fig.2.2 é possível identificar um pavimento de madeira com a viga (situada à esquerda), deteriorada por fungos de podridão na zona da entrega.



Fig.2.2.- Entrega de viga atacada por fungos de podridão

Estes ataques, além das deformações excessivas, podem em casos limite resultar na rotura local ou global do pavimento, consoante o número de vigas afectadas pela patologia e a resistência da madeira em questão. Na figura seguinte está presente uma situação de grande deformação de uma viga de um pavimento de madeira. Verifica-se que a flecha a meio vão, originou grandes fissurações e deformações na parede.



Fig.2.3.- Consequência da deformação excessiva das vigas - Fendilhação da parede

Na fig.2.4. presencia-se outro exemplo do efeito da grande deformabilidade da viga, inferior à parede divisória, causando um desnível entre a porta e o degrau de acesso ao compartimento.



Fig.2.4.- Consequência da deformação excessiva das vigas - Desnível de porta

Os ataques de caruncho podem verificar-se em toda a extensão das vigas. Os seus efeitos negativos resultam também numa diminuição ou eliminação de secção. Os carunchos atacam apenas a parte do borne das peças e por isso o ataque é por vezes mais superficial que os ataques por fungos ou térmitas.

No entanto, este ataque pode ser tanto mais extenso quanto maior for a percentagem de borne na secção de madeira, existindo peças de madeira que são constituídas apenas pelo borne. Nestes casos este ataque pode ser mais gravoso e com consequências idênticas às anteriormente descritas para outros tipos de ataques biológicos.

Caso o ataque seja superficial, a secção residual será em princípio, suficiente para fazer face às acções existentes. Na fig.2.5. está representado um ataque de caruncho onde é identificada a recção residual correspondente.



Fig.2.5.- Secção residual considerada resultante de ataque de caruncho

Nas causas humanas, as deformações excessivas ou roturas locais das vigas, são normalmente originadas por:

- Decisões de projecto incorrectas na sua fase inicial, em termos das secções e do vão das vigas;
- Alterações do tipo de uso do edifício;
- Introdução/remoção de paredes interiores.

No passado, a construção de edifícios, e neste caso de pavimentos de madeira, era baseada na experiência adquirida dos construtores e em práticas correntes da época. Não se faziam cálculos de dimensionamento das secções resistentes, sendo estas definidas com base na experiência ou mais tarde em tabelas e regulamentos como é o caso do RGEU. A escolha das secções para os pavimentos em função do vão nem sempre era feita da melhor maneira, o que resultou nos problemas estruturais já descritos.

Por vezes, as alterações no tipo de uso do edifício são realizadas sem a consideração de que a estrutura pode não estar preparada para o aumento das acções. É necessário nestes casos fazer uma avaliação da situação, e se necessário proceder ao reforço estrutural das vigas, ou então realizar mudanças no funcionamento estrutural.

As paredes divisórias, em concreto as de tabique, são frequentemente consideradas como elementos não estruturais, sendo comum a sua remoção de modo a ganhar espaço livre de compartimentação. No entanto, esta acção pode ter consequências graves na estrutura dos pavimentos de madeira causando grandes deformações ou mesmo a sua rotura, como é explicado de seguida.

Se num edifício de 5 andares for retirado uma parede de tabique do primeiro piso, essa parede deixa de ter continuidade vertical e o peso dos tabiques superiores não tem onde descarregar a não ser nas vigas do pavimento acima do piso onde foi retirado o tabique. Este pavimento vai ter de suportar o peso dos 4 tabiques dos pisos superiores,

sobrecarregando as vigas do pavimento e podendo causar a sua rotura ou deformações inaceitáveis em termos funcionais do pavimento. É necessário nestes casos dispor de medidas correctivas para encaminhar as acções dos tabiques superiores, sendo disto exemplo a execução de uma viga de aço e respectivos apoio no vão em que foi retirada a parede.

A introdução de paredes divisórias é também comum, causando o sobrecarregamento das vigas e as mesmas consequência atrás descritas.

Devido à deformabilidade das vigas dos pavimentos, verificam-se algumas situações em que os pavimentos transmitem aos utilizadores uma vibração excessiva causando desconforto. Esta vibração pode ser resultado de uma insuficiente secção ou entrega nas paredes de apoio do pavimento.

Existem outras patologias relacionadas com os defeitos de origem da madeira, como por exemplo os nós, o fio inclinado e o descaio. No entanto, além de ser uma temática bem explorada [8], [9], [23], são defeitos que se consideram não ter grande influência no comportamento estrutural dos pavimentos de madeira e que por isso não serão descritos.

Sendo o pavimento de madeira um sistema estrutural que é constituído por vários elementos, é pouco provável que na existência de nós estes existam numa grande quantidade de vigas e numa extensão elevada não visível a olho nu. Mesmo que existam nós com um tamanho significativo, em uma ou em duas vigas, as restantes terão capacidade para suportar os esforços internos existentes.

Estes defeitos de origem na madeira merecem especial atenção em estruturas com menos elementos estruturais e com secções maiores, onde a existência de um elemento com uma grande perda de resistência, devido à existência de um defeito, pode resultar no colapso total da estrutura. São disto exemplo as asnas de madeira que compõem muitas das coberturas de edifícios antigos.

2.2.2. Patologias nos soalhos

Os ataques biológicos também se manifestam da mesma forma no soalho. São elementos que estão em contacto com as vigas estruturais e caso estas estejam já atacadas é possível que o ataque se transmita ao soalho, ou vice-versa, resultando nas consequências anteriormente descritas.

Além dos ataques biológicos, a patologia mais comum nos soalhos, segundo projectistas experientes na área, é o seu envelhecimento natural causado pelo uso. Este envelhecimento resulta essencialmente na degradação das características estéticas, devido ao punçoamento e abrasão da circulação dos utilizadores, mas também degradações a nível da utilização devido a juntas partidas ou destacadas. Estas juntas partidas/destacadas

devem-se sobretudo ao facto de serem zonas de maior fragilidade no contacto com o soalho.

Na fig. 2.6. encontra-se um exemplo de uma porção de soalho de madeira com elementos partidos e de aspecto desgastado, devido ao envelhecimento causado pelo uso.

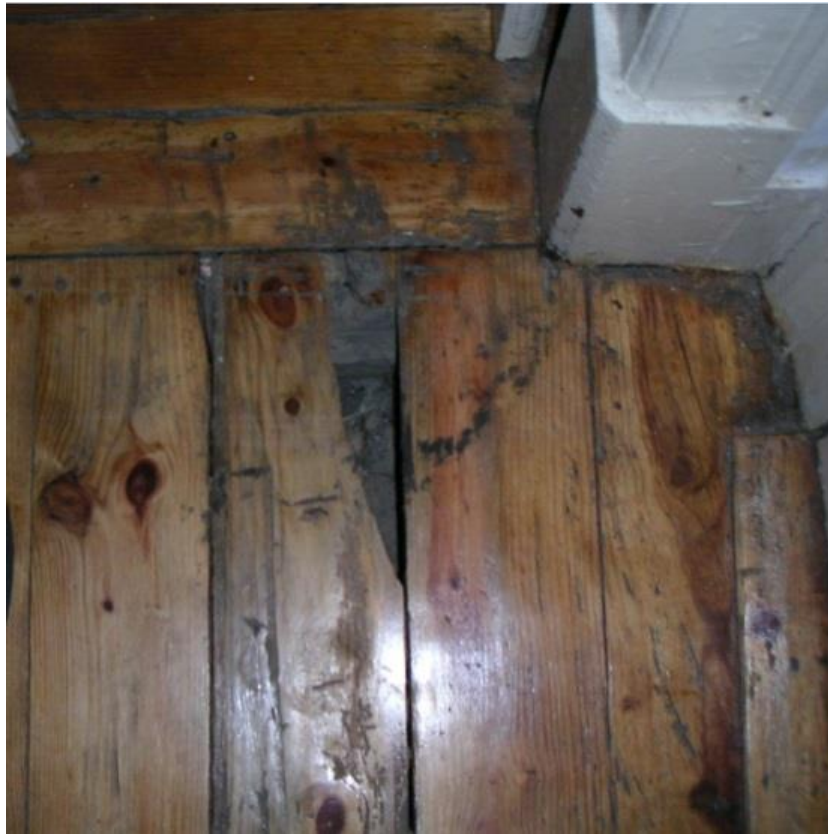


Fig.2.6.- Soalho desgastado pelo uso

Em edifícios em que já tenham sido feitas intervenções estruturais, é comum que se verifique o acrescento de uma camada de soalho adicional devido ao envelhecimento do soalho original. Na fig.2.7. pode-se observar esta situação.

Caso o novo soalho seja pregado convenientemente ao pavimento, este aumenta significativamente a rigidez já que agora os elementos passam a trabalhar em conjunto formando uma secção em “T”. Pode por isso ser também uma solução interessante caso se pretenda diminuir a deformabilidade dos pavimentos.



Fig.2.7.- Acrescento de novo soalho

Outro problema comum em edifícios antigos em que já foram realizadas intervenções, é a existência de enchimentos com betonilhas nas zonas das cozinhas e casas de banho. Em muitas destas intervenções não foram previstos reforços estruturais ou alterações de funcionamento estrutural, podendo este tipo de soluções resultar em consequências gravosas para a estrutura dos edifícios.

Por um lado, estes enchimentos aumentam bastante as acções a suportar pelo pavimento causando problemas de deformabilidade ou em último caso roturas.

Noutra perspectiva, a realização destes enchimentos pode potenciar os ataques biológicos já descritos. A colocação de uma camada espessa de outro material, resulta numa redução da ventilação da parte superior do pavimento, podendo assim originar humidades por condensação do vapor de água das zonas húmidas e propiciando deformações e condições necessários para ataques por agentes biológicos

Para além desta humidade originária de condensações, o teor de humidade nos elementos pode também aumentar devido à água que é libertada nos processos de cura das betonilhas. Na fig.2.8. está representado um destes exemplos, onde na parte onde já foi removido parte da área da betonilha, se verifica uma espessura considerável sob o pavimento de madeira de uma casa de banho.



Fig.2.8.- Camada de betonilha adicionada sob o pavimento

2.2.3. Patologias nos tectos

É corrente os tectos em estuque encontrarem-se fissurados. Esta fissuração pode estar relacionada com deformações e vibrações transmitidas pelas vigas. Na fig.2.9. observa-se um tecto estucado que além de fissurado possui o estuque parcialmente destacado.

Como já foi referido, em alguns edifícios esta situação é atenuada através da introdução de vigas auxiliares independentes do pavimento. Nesta solução, o fasquiado ou as tábuas de madeira, são pregados a um sarrafado paralelo e independente das vigas, que além de atenuar as vibrações e deformações resultantes, permite uma ventilação e arejamento do elemento evitando assim que ocorram condensações.



Fig.2.9.- Tecto fissurado com destacamento do estuque

Um outro problema, que é comum nos tectos dos pavimentos, são as infiltrações, sendo as suas consequências mais graves no caso de tectos estucados. A água acumulada no reboco e no fasquiado do tecto resulta num aumento significativo das acções, existindo a possibilidade de originarem a queda do tecto por arrancamento dos elementos de ligação do fasquiado às vigas. Na fig. 2.10. é ilustrada a rotura de um tecto causada por infiltrações, como é verificável pelos vários sinais da presença de água.



Fig.2.10.- Queda de tecto estucado por infiltração de água

Nos tectos em forro de madeira, esta situação não se verifica uma vez que normalmente as tábuas do forro têm pouca espessura. Mesmo que haja infiltrações que provoquem aumento de acções no tecto, estas não são significativas de forma a poder causar a sua queda.

Por outro lado, a presença contínua de água nos tectos provoca o apodrecimento dos elementos de madeira e o colapso dos mesmos.

2.2.4. Patologias em ligações

Como é analisado em capítulo posterior, a forma de resolver alguns dos problemas das vigas dos pavimentos, consistem na execução de empalmes entre elementos antigos e novos (ou isentos de problemas).

Em edifícios que já tenham sido alvo de intervenções através deste tipo de soluções, é comum que se verifiquem problemas nas zonas de intervenção das vigas. Estes problemas são essencialmente devidos aos dimensionamentos e pormenorizações incorrectos, falta de material e erros de execução.

Destes problemas enumeram-se os seguintes [19]:

- Geometrias incorrectas;
- Corrosão acentuada ou rotura dos elementos metálicos de ligação;
- Ligações frouxas;
- Esmagamento ou fendas da madeira na zona afectada pelos ligadores;
- Chapas metálicas ou parafusos em falta;
- Insuficiente espaçamento e/ou afastamentos dos ligadores aos topos e bordos do elemento de madeira;
- Anilhas demasiado pequenas;
- Afastamento entre elementos que deveriam estar em contacto;
- Contacto entre elementos que deviam estar afastados.

2.3. Conservação e protecção dos elementos

Em casos de humidade elevada nos pavimentos de madeira, alvos de possível ataque biológico, é necessário por um lado tomar acções curativas de modo que o ataque não evolua mais, e acções preventivas de modo a evitar que a situação não se repita no futuro.

As acções curativas podem ser as seguintes [19]:

- Secagem da madeira (baixando o teor em água pelo menos para valores abaixo de 20%);
- Limpeza (da madeira podre ou seriamente atacada por insectos - pulverulenta ou facilmente desagregável).

De acções preventivas destacam-se [19]:

- Tratamento preservador insecticida e/ou fungicida da madeira que permanece no local;
- Tratamento preservador da madeira susceptível de ataque que venha a ser introduzida na obra.

Realizada a análise das opções de reabilitação, se alguma consistir em adicionar por exemplo novas vigas, é necessário dotar a madeira a aplicar de medidas preventivas, além das já referidas, de modo a evitar patologias futuras [19].

Esta prevenção pode ser feita de dois modos:

- Proteger as entregas das vigas na parede de modo a torna-las impermeáveis à água, tendo o cuidado de tornar a entrega permeável ao vapor de água

devido ao carácter higroscópico da madeira. Esta protecção é possível fazer-se por meio de materiais betuminosos ou então usando mantas plásticas entre o contacto das vigas ou os frechais ou paredes de alvenaria.

- Não apoiar a viga directamente na parede usando elementos metálicos para realizar a entrega da viga.

De salientar também a importância de colocar a madeira em obra com um teor de humidade adequado às condições higrométricas de serviço da estrutura, de modo que sejam evitadas grandes variações no teor de humidade, evitando desta maneira: empenos, aumentos de deformabilidade e diminuição da resistência.

As paredes exteriores e o reboco constituinte, com o envelhecimento dos materiais ou o aumento das ações, podem fendilhar e tornar-se permeáveis à água de precipitação e consequentemente tornar os pavimentos de madeira susceptíveis a ataque biológico nas entregas das vigas.

Considera-se por isso necessário eliminar as causas que podem possivelmente ter causado as patologias existentes, em particular as entradas de água nas paredes estruturais ou as roturas/fugas de canalizações existentes nas imediações dos pavimentos.

No caso de pavimentos térreos a sua ventilação também deve ser garantida de modo a evitar condensações e ascensões de água do terreno por capilaridade.

2.4.Técnicas de inspecção e ensaio

2.4.1. Aplicabilidade dos ensaios não destrutivos

Hoje em dia, devido ao avanço tecnológico, o meio técnico dispõe de novos e vários instrumentos e técnicas de ensaio não-destrutivos, que permitem avaliar o estado de conservação de estruturas e de conhecer, a partir dos resultados dos ensaios, algumas características físicas e mecânicas dos materiais de construção usados. Dos ensaios não-destrutivos destacam-se os seguintes: Resistógrafo, Ultra-sons, Pylodin, Georadar, Métodos de Vibrações induzidas, Higrómetro, Raios x e Raios Gama, e Ensaios de carga.

Utilizar isoladamente estes ensaios para o diagnóstico estrutural não faz sentido, uma vez que estes servem de complemento às inspecções visuais e aos ensaios tradicionais [20].

De seguida são apresentados três quadros-resumo com a identificação do que é que cada um destes ensaios permite estimar.

Ensaio Não-Destrutivo	Resultados obtidos
Resistógrafo	→ Densidade da madeira → Módulo de Elasticidade → Identificar existência de anomalias e defeitos → Dureza
Ultra-sons	→ Módulo de Elasticidade Dinâmico → Identificar existência de anomalias e defeitos
Pylodin	→ Identificar anomalias superficiais → Densidade → Dureza → Resistência
Georadar	→ Focos de Humidade → Identificar zonas com defeitos e anomalias → Identificar existência de ataques biológicos e defeitos
Vibrações Induzidas	→ Módulo de Elasticidade Dinâmico → Módulo de Elasticidade Elástico
Higrómetro	→ Teor de Água

Quadro 2.1.- Parâmetros avaliados de Ensaio Não-Destrutivo (Adaptado de: [8])

Da análise do quadro percebe-se que se podem obter fundamentalmente as seguintes características dos elementos construtivos: a densidade, a existência de anomalias, o módulo de elasticidade e a existência de humidade. A partir destas há correlações, para alguns dos ensaios, que permitem saber outras características como por exemplo a resistência mecânica e o módulo de elasticidade.

De facto estes dados obtidos podem ser úteis, por exemplo, na determinação da existência de defeitos nos elementos de madeira de uma estrutura. No entanto, em pavimentos de madeira estes resultados podem ser contraproducentes como a seguir se explica.

Num pavimento de madeira com uma área de $5 \times 5 \text{ m}^2$, com vigas de secção $0,20 \times 0,10 \text{ m}^2$, afastadas de $0,30 \text{ m}$, há sensivelmente 17 vigas. Ou seja, se for ensaiada uma viga do pavimento e se forem detectados defeitos com grande extensão, este resultado é inconclusivo no sentido de se decidir substituir/intervir na totalidade do pavimento, ou de realizar apenas uma intervenção local nessa viga, uma vez que não se sabe o estado actual das outras vigas do pavimento.

Por outro lado, se forem ensaiadas todas as vigas para verificar a existência de anomalias, o processo deixa de ser viável em termos práticos e económicos. Ensaia todas

as vigas ou mesmo metade, significaria ter que retirar toda a área de soalho do pavimento, e outros elementos que este contenha, ensaiar todas as vigas, interpretar os resultados de todos os ensaios o que resultaria num processo moroso e caro, não sendo viável na realização de uma obra.

Este tipo de ensaios pode ter maior utilidade em sistemas estruturais com menos elementos e com secções maiores, como por exemplo uma asna de madeira. Neste caso, o processo seria mais prático e o resultado de um ou dois elementos seria mais representativo das condições de conservação da estrutura.

Além deste facto, normalmente as anomalias existentes nas vigas, com secções típicas de edifícios de habitação, podem ser facilmente verificadas visualmente por sinais já anteriormente descritos e com recurso a técnicas tradicionais de inspecção e ensaios tradicionais relativamente práticos, como por exemplo a penetração com formão ou lâmina, e a percussão com um martelo.

Sendo as vigas de secção relativamente pequena, é pouco provável também que haja defeitos e anomalias de grandes dimensões que não sejam visíveis durante a inspecção visual como já foi referido. Além disso, caso alguma viga esteja deteriorada nas entregas por térmitas ou fungos de podridão, é sensato não considerar secções residuais uma vez que as secções são pequenas.

Destes ensaios referidos, destaca-se pela sua utilidade, o higrómetro, pois estando as vigas apoiadas na mesma parede, o resultado do teor de humidade numa delas pode ser representativo do teor de humidade da generalidade do pavimento.

2.4.2. Inspeção visual e ensaios tradicionais

Antes de se realizar a inspecção da estrutura de um edifício, é possível perceber pelo seu aspecto exterior se há a possibilidade de existirem patologias de origem biológica, nomeadamente patologias que resultem na secção insuficiente das entregas das vigas nas paredes. No caso dos pavimentos de madeira estes indícios exteriores de patologias podem-se manifestar das seguintes maneiras [19]:

- Manchas de humidade;
- Paredes fendilhadas;
- Rebocos desagregados ou fissurados;
- Aberturas de ventilação obstruídas.

Realizada esta primeira análise, é necessário fazer uma inspecção preliminar nos pavimentos do interior do edifício, onde são procurados indícios de má conservação.

Devem ser procuradas deformações e vibrações acentuadas, sintomas de presença de humidade, como por exemplo cheiro a mofo e manchas de humidade [20]. Além destas

observações é necessário também analisar possíveis erros e alterações estruturais, como por exemplo a descontinuidade de paredes interiores ou a colocação de paredes de compartimentação na área de pavimento.

A partir da inspecção preliminar procede-se à realização de uma inspecção detalhada de forma a avaliar a segurança estrutural. Neste domínio é particularmente importante perceber o funcionamento estrutural e identificar as zonas críticas cuja qualidade e estado de conservação devem ter especial atenção.

No caso dos pavimentos estas zonas críticas são:

- As entregas e topos das vigas;
- As secções a meio-vão;
- As zonas de ligações.

De forma a avaliar a resistência do pavimento é necessário identificar a espécie lenhosa presente, identificar as anomalias e a sua extensão, bem como avaliar a importância das patologias para segurança estrutural. A partir daí são atribuídos valores de parâmetros resistentes de modo a avaliar a segurança.

A atribuição de valores de resistência mecânica e a quantificação da extensão das anomalias são os aspectos que oferecem mais dificuldade [20]. A resistência pode ser estimada pela classificação visual da madeira e respectiva atribuição de classe de resistência, no entanto para este processo é necessário conhecer a espécie lenhosa.

A identificação da espécie de madeira, é frequentemente uma tarefa difícil de se fazer visualmente, apenas baseada na experiência do avaliador, uma vez que existe uma grande variedade entre espécies e mesmo variações dentro de uma mesma espécie [25].

Para uma identificação mais rigorosa é possível recorrer a laboratórios que dispõe de técnicas fiáveis na identificação da espécie lenhosa.

As extensões das anomalias podem ser verificadas de uma forma prática no local pelo recurso a técnicas tradicionais, como por exemplo com recurso a um formão e percussão com um martelo.

Comparando o som resultante da percussão do martelo numa peça de madeira sem anomalias e noutra com defeito, é possível perceber se existem problemas, como por exemplo vazios resultantes de ataques biológicos e fendas [9]. Utilizando um formão ou uma lâmina metálica para penetrar nas vigas de madeira, é avaliada a dureza superficial permitindo a partir daí perceber a integridade da peça [9] e estimar a profundidade de um ataque por exemplo de fungos de podridão.

Apesar de poderem dar a ideia da extensão da anomalia, estes ensaios requerem alguma experiência por parte dos avaliadores [20].

Para avaliar a secção útil de uma viga de madeira atacada por agentes biológicos, a sua contabilização difere consoante o agente degradador. Caso se identifique podridão causada por fungos, é prudente não contabilizar nada da secção atacada uma vez que a extensão do ataque é difícil de contabilizar [20]. Além disso, as secções dos pavimentos são relativamente pequenas comparadas por exemplo com as dimensões dos elementos de uma asna.

Em relação a carunchos, a redução da secção útil localiza-se geralmente numa camada superficial do borne, sendo um ataque muitas vezes de pequena espessura de extensão [20], significando que poderá ser possível contabilizar parte da secção. No entanto, a gravidade do ataque depende, como já discutido, da percentagem de borne da peça de madeira em questão.

A extensão de um ataque de térmitas é mais difícil de contabilizar [20], é sensato nestes casos em pavimentos de madeira não contabilizar qualquer secção residual pelas razões já apontadas na determinação da secção residual causada por ataque de fungos.

Os sinais de cada um destes agentes degradadores também se manifestam de forma diferente. Os fungos de podridão manifestam-se por alterações de textura, cor, cheiro a mofo, sendo uma patologia facilmente identificada [20].

Uma infestação de térmitas não se identifica com facilidade, sendo apenas identificada numa fase avançada do ataque tornando-a numa situação potencialmente perigosa para os utilizadores [20]. O principal sinal de ataque é a existência de canais de terra nos quais as térmitas se movimentam.

CAPÍTULO 3 - SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

3.1. Considerações iniciais

Pela variedade de soluções existentes, a escolha da melhor opção para reabilitar uma estrutura pode ser uma tarefa difícil. Em particular para as soluções de reabilitação de pavimentos de madeira, há trabalhos onde essas várias soluções estão tipificadas e organizadas [7], [8], [9].

Nos trabalhos referenciados, as soluções de reabilitação estão tipificadas de modo a fazer face aos vários tipos de patologias existentes, descrevendo em que consistem e quais são as suas vantagens e desvantagens de aplicação. Apesar de bastante completos, estes trabalhos resultam em tipificações extensas que não se concentram num só problema, não permitindo assim um maior apoio à decisão dos projectistas em problemas particulares.

Neste capítulo, a tipificação de soluções é realizada de uma forma mais concreta e é centrada num só problema. São por isso tipificadas e descritas as soluções de reabilitação para fazer face a uma determinada patologia, de modo a que em capítulo posterior se faça uma análise técnico-económica dessas mesmas soluções. Desta maneira é possível apoiar a decisão, por parte dos projectistas, sobre qual a solução de reabilitação a escolher numa situação equiparável à analisada.

Sendo o ataque biológico a causa mais frequente de patologias nos elementos dos pavimentos de madeira [8], [19], [24], as soluções de reabilitações seleccionadas, são as mais adequadas e comuns na resolução deste tipo problema. De uma forma mais concreta, as soluções de reabilitação a apresentar, resolvem o problema da secção insuficiente das entregas das vigas do pavimento deterioradas por agentes biológicos.

A nível da concepção, a generalidade destas soluções, consiste no dimensionamento de ligações. Por esta razão são feitas algumas considerações sobre o seu dimensionamento e sobre a sua importância no funcionamento global das estruturas.

De modo a serem informações úteis na análise técnico-económica, são identificadas as regras de dimensionamento, os processos construtivos, os materiais utilizados, e as dificuldades de aplicação em obra de cada uma das soluções de reabilitação seleccionadas.

3.2. Soluções sem reforço e com reforço estrutural

As soluções de reabilitação podem ser divididas em dois tipos consoante o objectivo pretendido: soluções sem reforço estrutural e soluções com reforço estrutural.

Nas soluções sem reforço estrutural, a capacidade resistente é mantida restaurando as condições de segurança e utilização originais, ou anteriores, da estrutura. São aplicáveis quando uma estrutura, pelo seu estado de degradação, não cumpre os requisitos de segurança regulamentares aplicáveis e quando não há uma alteração no tipo de uso do edifício.

As soluções com reforço estrutural são geralmente utilizadas quando há uma modificação no tipo de uso do edifício, ou quando o tipo de uso é mantido mas os pavimentos não cumprem os requisitos de segurança regulamentares, mesmo que nestes não se verifique degradações relevantes que comprometam a segurança estrutural.

Um exemplo corrente de solução sem reforço estrutural é a aplicação de empalmes nas vigas com ligadores metálicos e tábuas de madeira (fig.3.1.).



Fig.3.1.- Empalmes realizados em duas vigas de um pavimento

Na análise técnico-económica apenas constam soluções sem reforço estrutural para resolver o problema em questão.

As soluções apresentadas partem do pressuposto que se mantenham os pavimentos de madeira, e que não se opte por soluções com outros materiais e tecnologias, como lajes de betão armado, lajes mistas de betão e madeira ou lajes com perfis metálicos.

A opção por manter os pavimentos de madeira é aliás defendida por várias razões, que não são aqui discutidas, como por exemplo a autenticidade defendida nas cartas de reabilitação e pela ICOMOS, a sustentabilidade [27] e o funcionamento estrutural [4].

Em termos do funcionamento estrutural, salienta-se a importância que a manutenção/remoção dos pavimentos de madeira pode ter tanto a nível do comportamento a acções verticais como a nível das acções horizontais.

Já foi aqui referida a diferença de peso entre pavimentos de madeira e outras soluções homólogas de betão armado e com perfis de aço. Ao serem adoptadas soluções desta natureza, mais pesadas, os elementos verticais de suporte dos pavimentos, neste caso as paredes estruturais de alvenaria, vão sofrer um acréscimo significativo em termos de acções. Devido a este aumento das acções, é por vezes necessário proceder à criação de soluções adicionais de reforço estrutural nas paredes.

A nível do comportamento a acções horizontais, nomeadamente à acção sísmica, a substituição dos pavimentos de madeira também vai ter um impacto negativo.

Aumentando a massa e a rigidez, as forças de inércia aumentam, e consequentemente a acção sísmica é mais gravosa, em particular nas paredes de alvenaria que são mais solicitadas. A agravar este facto junta-se a quase nula resistência a tensões de tracção das paredes de alvenaria que se geram na ocorrência de um sismo.

3.3. Caracterização de soluções sem reforço estrutural

Face a uma secção insuficiente, devida a ataque biológico nas entregas das vigas do pavimento, é possível de resolver o problema de três formas distintas:

- Criação de novos apoios;
- Reconstrução com resinas epoxídicas;
- Criação de empalmes.

A criação de novos apoios pode ser conseguida através da introdução de frechais de betão ou cantoneiras metálicas, onde é apoiada a parte sã das vigas. No entanto, estas soluções são pouco utilizadas uma vez que são muito intrusivas na estrutura.

Esta intrusividade resulta na fragilização da resistência das paredes de apoio, por diminuição da sua secção, nomeadamente com a introdução do frechal de betão. O uso de cantoneiras metálicas não é uma solução tão intrusiva, mas assim como a introdução de frechais de betão, a sua aplicação resulta em acções excêntricas na parede uma vez que as acções transmitidas às vigas do pavimento são feitas fora do plano da parede.

Além destes inconvenientes estruturais são soluções pouco apelativas esteticamente e que não cumprem o requisito de autenticidade das obras de reabilitação.

Por estas razões estas soluções não são analisadas.

A reconstrução com resinas epoxídicas consiste basicamente na injeção de resinas na zona degradada da entrega de forma a preencher os vazios da secção degradada. Assim é restaurada, ou mesmo melhorada, a resistência nas secções afectadas. No entanto, além de ser uma solução pouco comum, esta pode ter efeitos negativos durante a sua execução.

Como a injeção de resina se faz por pressão, esta operação pode destruir a zona localizada da viga que se encontra fragilizada.

É possível também reconstruir as secções degradadas com próteses de argamassa epoxídica, mas estas são soluções que podem ser pouco económicas dado o elevado custo do material, para as situações que são aqui analisadas, e que por isso não são tidas em conta. São, no entanto, soluções mais indicadas para reforços estruturais.

A criação de empalmes é uma solução prática e comum, podendo ser executados de várias formas. Caso se pretenda manter o tecto, de maneira a não correr riscos de o danificar, é possível manter a parte podre da madeira. Na maioria dos casos retira-se a madeira podre, mesmo que se mantenha o tecto, colocando-se uma peça de madeira nova no seu lugar.

É possível também de utilizar madeira antiga, proveniente de outro local da construção ou proveniente de demolições de outros edifícios [9], com a condição de não apresentar problemas e defeitos relevantes.

São possíveis várias variantes de empalme, com diversos materiais e tecnologias, sendo este assunto desenvolvido nos seguintes subcapítulos.

O dimensionamento de empalmes consiste no dimensionamento de ligações em madeira, assumindo este uma importância relevante para o sucesso da intervenção estrutural.

3.4. Dimensionamento de ligações

O dimensionamento de ligações é a componente mais complexa e difícil no dimensionamento de uma estrutura de madeira [3]. Este facto é explicado essencialmente pela anisotropia da madeira, mas também pela impossibilidade de criar elementos monolíticos, como é o caso dos empalmes realizados nas vigas, criando assim uma descontinuidade entre elementos [3].

Esta falta de continuidade é também uma característica de elementos de estrutura de aço, a diferença é que nestas existe a soldadura que é um processo fiável onde se podem obter ligações rígidas quando bem executadas.

À excepção de processos de colagem usados em laminados colados, como por exemplo os *“glued-in rods”* e *“finger-joint”*, não existe ainda uma técnica somente de

colagem que garanta bons resultados [3]. Por esta razão são comumente usados ligadores metálicos que se dividem em duas categorias:

- Ligadores de tipo cavilha;
- Ligadores planos.

Os ligadores planos são indicados para elementos de grande secção, enquanto os de cavilha são indicados para secções mais pequenas, embora no caso de parafusos de porca estes possam ligar secções consideráveis.

Os ligadores de tipo cavilha são indicados para secções mais pequenas, incluindo secções que esta dissertação analisa em pavimentos de madeira. Nestes ligadores podem-se incluir os pregos, os parafusos de enroscar, os parafusos de porca e as próprias cavilhas.

É possível ainda de se realizar ligações entalhadas. Estas ligações são usadas há muitos anos, sendo este o método de ligar peças de madeira mais antigo que existe. O seu funcionamento consiste na transmissão directa de forças de contacto entre as peças a unir, sem que se use outro elemento que garanta a ligação, ou seja são executadas na sua totalidade em madeira dando formas específicas às juntas dos elementos que se pretendem unir.

No entanto, são soluções que actualmente são pouco utilizadas uma vez que exigem mão-de-obra especializada e o seu dimensionamento é complexo. São ligações que são usadas maioritariamente em asnas de madeira e paredes de frontal (fig.3.2.).

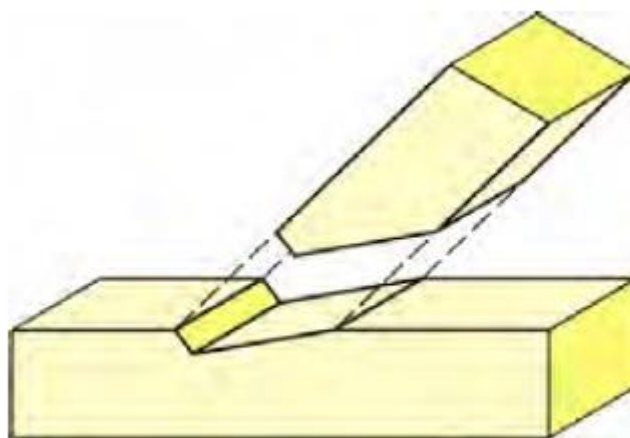


Fig.3.2- Ligação entalhada tipo perna-linha de asna

Actualmente existem soluções que conjugam colas e compósitos, ou colas e aço, que têm vindo a ganhar visibilidade e têm demonstrado bons resultados a nível de comportamento mecânico e de facilidade de execução em obra. Neste tipo de soluções destacam-se as soluções, já referidas, utilizando colas e varões, os chamados *glued-in rods*, sendo esta outra variante de empalmes a analisar posteriormente.

Uma característica importante a ter em conta nas ligações de madeira é a rigidez de rotação a momentos flectores. Não é possível saber com precisão se uma ligação é completamente rígida ou articulada. As ligações vão transmitir momentos, no entanto existem sempre algumas rotações, não sendo por isso totalmente rígidas, o que significa que o uso de modelos contínuos não será perfeitamente representativo do comportamento real da ligação [3].

Nas ligações analisadas, onde os esforços e secções são relativamente pequenos, os dimensionamentos foram baseados em modelos contínuos.

Salienta-se que para garantir um bom comportamento é importante que se dimensione ligações simples e num menor número possível, para que se adoptem modelos realistas de comportamento que permitam ao projectista entender como irá ser o comportamento estrutural das ligações, e entender como será a sua influência no comportamento global da estrutura [3].

Como qualquer outra estrutura, será necessário fazer a verificação a estados limite últimos de resistência e de utilização, bem como à sua concretização a um custo razoável.

No caso de edifícios históricos, há que ter em conta ainda o princípio, já referido, da autenticidade de modo a que as intervenções seleccionadas não descaracterizem o edifício.

3.5. Empalmes com ligadores metálicos

Uma das formas comuns de se criarem empalmes consiste em colocar madeira nova no lugar da madeira degradada unindo os topos dos elementos da viga, antigo e novo, através de ligadores metálicos em conjunto com elementos adicionais de madeira ou aço.

Ao unir os topos dos elementos da viga, tornando-se um elemento descontínuo, é necessário criar uma ligação que transmita os esforços de um lado ao outro na zona de junção dos elementos. São colocados ligadores que em conjunto com elementos adicionais, como por exemplo tábuas de madeira e chapas metálicas, vão resistir aos esforços de corte e flexão nessa secção.

Para realizar este tipo de solução, são feitas algumas recomendações, referenciadas em [9], por parte de alguns autores, nomeadamente:

- A utilização de madeira da mesma espécie e da mesma classe de resistência que a madeira já existente nas vigas do pavimento;
- Os elementos adicionais da emenda possuírem a mesma altura da viga a intervir;
- Aplicar a madeira nova com o mesmo teor de humidade da madeira antiga;
- Utilizar um comprimento de sobreposição mínimo, medido da junção das peças ao topo da parte nova, de 0,20m.

Para realizar os empalmes não há uma única solução, nomeadamente a nível dos materiais utilizados. Para os ligadores é possível utilizar pregos lisos ou nervurados, parafusos de enroscar, parafusos de porca ou cavilhas.

Na fig.3.3 é representado a secção de um empalme utilizando pregos e tábuas de madeira.

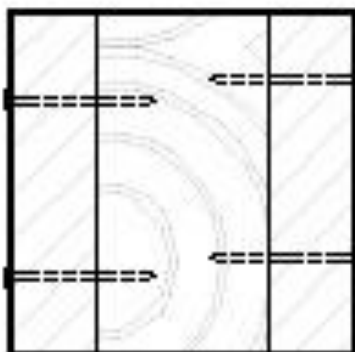


Fig.3.3- Empalme de Madeira Pregado (Corte)

Os elementos adicionais do empalme, que vão absorver os esforços na secção de contacto entre os topos dos elementos da viga, podem ser em tábuas de madeira, tábuas de LVL ou chapas metálicas.

No fig.3.4 é representado um empalme em corte e alçado, utilizando parafusos de porca e chapas de aço.

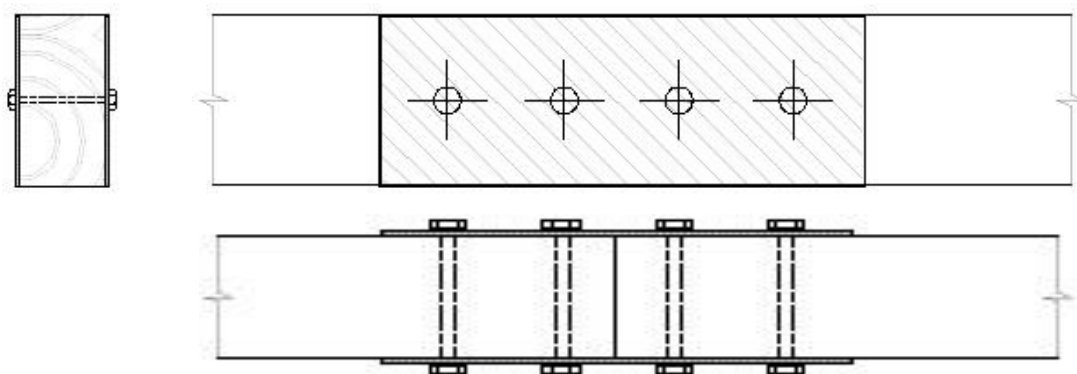


Fig.3.4- Em Cima: Empalme Aparafusado (corte e alçado); Baixo: Empalme Aparafusado (planta)

A partir daqui, é possível criar algumas variantes de empalmes, sendo o objectivo principal da dissertação analisar técnico-economicamente cada uma destas variantes.

As variantes com micro lamelado-colado (LVL) não são tidas em conta, uma vez que se considera ser um material caro, pelo facto de existir uma única fábrica europeia, tornando soluções com este material pouco competitivas com as restantes.

Sendo assim, definiram-se as seguintes variantes de empalme com ligações do tipo cavilha:

- Empalme de madeira pregada;
- Empalme com chapa de aço pregada;
- Empalme de madeira com parafuso de porca;
- Empalme com chapa de aço com parafuso de porca;
- Empalme de madeira com parafuso de enroscar;
- Empalme com chapa de aço e parafuso de enroscar.

Como já foi referido, há a possibilidade de criar empalmes mantendo a parte degradada e juntando apenas os elementos adicionais (tábuas ou chapas). A grande diferença desta variante de empalmes é que a madeira nova e os elementos adicionais do empalme vão estar em contacto com a parte degradada da madeira sendo por isso necessário aplicar produtos protectores avançados que evitem a sua contaminação [9]. Por esta razão podem ser soluções que não se demonstrem tão eficazes e por isso ficam assim descartadas para serem analisadas.

3.5.1. Materiais utilizados

3.5.1.1. Ligadores

Nas ligações tipo cavilha, é possível utilizar os seguintes ligadores metálicos:

- Pregos;
- Parafusos de Enroscar;
- Parafusos de Porca;
- Cavilhas.

Os pregos (fig.3.5.) são o ligador metálico mais antigo usado em ligações de madeira. As gamas de fabrico e as características técnicas estão definidas na EN10230-1-“Steel wire nails”. Podem ser de cabeça redonda ou quadrada, lisos ou nervurados, sendo os lisos de cabeça redonda os mais comuns.

Os seus diâmetros variam entre 1 a 9 *mm* e os seus comprimentos entre 10 a 300 *mm*. São produzidos em aço macio com uma tensão de rotura em tracção mínima de 600 MPa, sendo que o EC5 apenas é aplicável em ligações com pregos que possuam esta resistência mínima à tracção.



Fig.3.5- Pregos de vários tipos e tamanhos (Fonte: [35])

Podem funcionar em corte simples, e em situações excepcionais ao corte duplo, consoante as superfícies perfuradas e consequentemente o número de planos de corte (fig.3.6.). Não é aconselhável o uso de pregos ao arranque, uma vez que o atrito lateral gerado no fuste é pequeno [3].

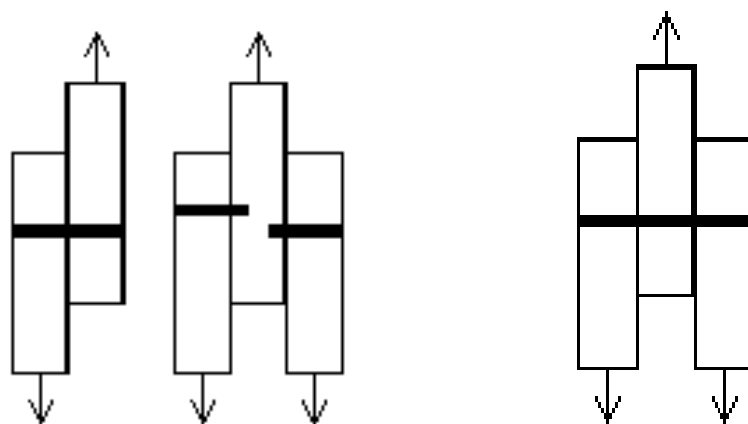


Fig.3.6- Ligadores em corte simples (esq.); Ligadores em corte duplo (dir.) (Adaptado de: [3])

Em muitas situações o EC5 despreza totalmente a resistência ao arranque dos pregos. No entanto, na aplicação de pregos em empalmes, o dimensionamento tem em conta uma parcela relacionada com a resistência ao arranque do prego que é favorável para a segurança da ligação o chamado “Rope Effect”. Por outras palavras, esta força resistente consiste numa força de ancoragem que se gera na madeira pelo prego quando se dá a plastificação do ligador por flexão.

Em relação aos parafusos de enroscar (fig.3.7.), existem no mercado de vários tipos e dimensões, sendo os mais comuns os de cabeça sextavada com anilha, e os de cabeça de embeber ou redonda. Os diâmetros variam entre 3 *mm* a 30 *mm*, e os seus comprimentos entre 20 a 300 *mm*.



Fig.3.7- Parafusos de enroscar de vários tipos e tamanhos (Fonte: [35])

A principal diferença em relação aos pregos consiste na sua maior resistência lateral devido ao atrito conferido pela rosca, e no seu modo de aplicação, que nestes é de rotação e nos pregos por percussão.

De referir também que, a comparar com um prego de igual diâmetro, o momento de plastificação do parafuso pode ser menor, uma vez que há uma diminuição da quantidade de material na parte roscada.

Os parafusos de porca (fig.3.8.) são produzidos em aço comum ou inoxidável, com diâmetro de 6 a 30 *mm*, e possuem as mesmas classes de resistência dos parafusos de enroscar.

Os parafusos de porca podem atingir valores de grande resistência, sendo possível utilizá-los em grandes secções funcionando geralmente em corte duplo.

É de salientar uma evidência experimental que mostra que a variação da resistência em relação à inclinação do fio da madeira é tanto maior quanto maior forem os diâmetros aplicados. Esta situação é particularmente visível nas madeiras de árvores resinosas [3].



Fig.3.8- Parafusos de Porca (Fonte: [35])

As cavilhas (fig.3.9.) além de poderem ser de aço podem também ser fabricadas em madeira ou plástico. As suas dimensões são as mesmas que as dos parafusos de porca.

Destacam-se por não resistirem a acções na direcção do seu eixo, não podendo ser aplicadas em todas as situações.



Fig.3.9- Cavilhas de vários tamanhos e materiais (Fonte: [35])

3.5.1.2. Elementos adicionais

As tábuas e as chapas metálicas são os elementos do empalme que vão receber os esforços da secção de contacto das partes ligadas. Como tal, é aconselhável que, além de que altura seja igual à da viga, a soma da largura dos dois elementos seja no mínimo igual à da viga a intervir, no caso de se usar uma madeira com classe de resistência igual.

De modo a evitar torções e fenómenos de instabilidade, é aconselhável também que se utilizem tábuas de ambos os lados do empalme. Assim cada uma das tábuas terá, como

defendido anteriormente, metade da largura da viga, perfazendo no total das duas, uma secção igual à da viga intervencionada.

Com estas medidas é garantido um melhor comportamento na zona da ligação, evitando que a resistência e deformabilidade da secção em causa, sejam muito diferentes de uma viga maciça da mesma espécie e com a mesma geometria.

Nos elementos adicionais dos empalmes também é possível utilizar chapas de aço.

Com esta variante aumenta a resistência da ligação devido à maior resistência do aço, sendo por isso possível utilizar espessuras menores de chapa quando comparadas com as espessuras obtidas nas tábuas de madeira dos empalmes.

Pelas razões já explicadas, é aconselhável também utilizar uma chapa de cada lado da emenda. As mesmas são realizadas em aço macio e têm uma resistência mínima de rotura de 600 MPa.

Para facilitar a instalação podem ser adquiridas chapas previamente furadas, sendo esta uma característica adequada para madeiras de grande densidade e de difícil furação.

No caso de se aplicarem pregos apenas são perfuráveis as chapas com espessura entre 1 e 2 mm.

É possível utilizar chapa fina ou chapa espessa, influenciando esta escolha no comportamento da ligação. As chapas espessas servem de encastramento ao prego não permitindo rotações na envolvente do furo, já nas chapas finas esta rotação é permitida havendo por isso uma maior deformabilidade da ligação.

3.5.2. Processo construtivo

Para a realização de empalmes com ligações do tipo cavilha, o acesso pode ser feito pela parte superior ou inferior do pavimento, dependendo esta opção dos objectivos da intervenção que o projectista pretende.

Se o pavimento possuir tectos estucados e trabalhados, que possuam algum valor arquitectónico e patrimonial e tenha por isso interesse a sua preservação, será conveniente realizar a intervenção pela parte superior do pavimento para que não se danifique o tecto.

Pode por outras razões pretender-se realizar a intervenção pela parte superior não se mantendo o tecto original.

Por outro lado, caso se pretenda aplicar soluções de tecto falso e não se pretenda manter o tecto, a intervenção poderá ser feita pela parte inferior do pavimento.

De seguida é sugerido um processo construtivo de criação de empalmes com ligação tipo cavilha, onde a intervenção é feita pela parte superior sem a manutenção do tecto.

Processo Construtivo pela parte superior:

1. Remoção da área de soalho necessária, na zona da viga/vigas a intervir;

2. Escoramento da viga/vigas a intervir, nas secções antes da parte a remover;
3. Corte e remoção da extensão de viga degradada a partir da entrega na parede até à parte afectada do vão;
4. Colocação da parte nova/sã da viga, realizando a entrega na parede;
5. Realização de pré-furações nos elementos a unir (caso existam);
6. Colocação dos elementos adicionais dos empalmes (tábuas ou chapas);
7. Aparafusamento/Pregagem dos ligadores escolhidos;
8. Protecção da ligação ao fogo com placas de gesso ou produtos ignífugos (se necessário);
9. Recolocação do soalho;
10. Remoção do escoramento.

Chama-se a atenção que no corte e remoção da viga degradada é possível que se danifique o tecto pois este está pregado às vigas. Nestes casos em que se pretende manter o tecto existente, esta tarefa pode ser mais trabalhosa e não ser por vezes exequível podendo também decidir-se pela via de manter a parte podre da viga, como já anteriormente discutido. Além de ser necessário uma maior carga de trabalho em intervenções que se mantem o tecto, é necessário também aplicar um escoramento por uma área maior do tecto.

Caso a intervenção seja feita pela parte inferior, a diferença do processo construtivo reside essencialmente em não ser necessário, em princípio, remover o soalho existente.

As decisões de manter o tecto existente e a forma como se intervém no pavimento, têm consequências em termos económicos como se verificará posteriormente.

3.5.3. Dificuldades de aplicação

Na aplicação dos empalmes em obra, podem ocorrer algumas dificuldades de aplicação dos ligadores e dos elementos adicionais que devem ter tidas em conta na fase de projecto, a fim de que as mesmas sejam evitadas e se consiga uma intervenção rápida e eficiente. Nas ligações do tipo cavilha é possível surgir as seguintes dificuldades aquando da sua execução:

- Dificuldade ou impossibilidade de pregagem;
- Dificuldade ou impossibilidade de aparafusamento;
- Falta de espaço para colocar os elementos adicionais do empalme;
- Falta de espaço para colocar os parafusos de porca em comprimento.

Estas dificuldades estão dependentes do espaçamento das vigas do pavimento e do modo de aplicação dos ligadores, devendo por isso ser um parâmetro a ter em conta na fase de escolha e dimensionamento da ligação.

De modo a evitar faltas de espaço é necessário adoptar espessuras de tábuas ou chapas que sejam menores que o espaçamento existente entre vigas. Por outro lado, é necessário ainda ter em atenção os comprimentos escolhidos para os ligadores de maneira que haja espaço suficiente para inserir os mesmos nos furos correspondentes.

As dificuldades e impossibilidades de pregagem e aparafusamento estão dependentes do espaço necessário para a utilização do equipamento de cravação ou aparafusamento. As dimensões do equipamento devem ser por isso tidas em conta na definição da geometria da ligação.

3.5.4. Critérios de dimensionamento

A rotura nas ligações tipo cavilha pode dar-se pelo esmagamento da madeira na proximidade dos ligadores, ou então pela plastificação dos ligadores metálicos por flexão [3].

A distribuição de tensões da ligação é uma distribuição complexa. No entanto, a ligação trabalha ao corte e a distribuição pode ser, de uma forma simplificada, a representada na fig.3.10. onde se verifica a existência tensões de esmagamento da madeira e um plano de tensões de corte a meio do ligador

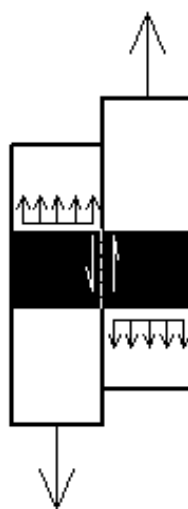


Fig.3.10.- Tensões na madeira e no ligador em ligação tipo cavilha (Adaptado de: [3])

Para verificação da resistência da ligação é utilizado o EC5, onde está preconizado o método da teoria de Johanssen. Este método consiste no cálculo da resistência de vários modos de rotura possíveis, que conjugam esmagamentos da madeira e a plastificação dos ligadores.

Não sendo *à priori* possível conhecer o modo de rotura condicionante da ligação, é necessário no cálculo da sua capacidade resistente estimar as resistências de todos os modos de rotura possíveis.

Antes dos cálculos dos modos de rotura, é necessário determinar dois parâmetros mecânicos da ligação: a resistência ao esmagamento localizado, e o momento plástico do ligador metálico, que dependem essencialmente da densidade da madeira usada e do diâmetro do ligador.

Como se referiu, os ligadores do tipo cavilha podem funcionar ao corte simples, duplo ou múltiplo, dependendo do número de elementos ligados e do número de planos de corte existentes. O número de planos de corte influencia o comportamento da ligação bem como os modos de rotura a considerar no dimensionamento.

Em termos de pormenores construtivos, o EC5 impõe algumas disposições regulamentares a nível:

- Da necessidade de pré-furação;
- Do espaçamento dos ligadores;
- Da penetração mínima dos ligadores nos elementos a unir;
- Do comprimento de sobreposição entre ligadores em corte simples;
- Do efeito de grupo dos ligadores.

A descrição extensiva destas disposições não é realizada uma vez que não é um objectivo da dissertação. No entanto, considerou-se importante referir esta informação já que são disposições regulamentares que foram usadas no dimensionamento das soluções no capítulo da análise técnico-económica. Para uma consulta mais pormenorizada do dimensionamento e das disposições regulamentares do EC5, sugere-se a consulta do próprio Eurocódigo e de [3], [31].

Para a verificação da segurança destas ligações, é necessário comparar a força actuante nos ligadores com a força resistente calculada. A obtenção das forças actuantes nos ligadores é geralmente simples em situações de esforço axial puro. Em situações de esforços de flexão, esta determinação das forças actuantes nos ligadores tem um carácter mais complexo, além de que são necessárias verificações de segurança adicionais neste tipo de ligações, que posteriormente são explicadas de forma mais aprofundada no capítulo de análise técnico-económica.

No EC5 não estão incluídas disposições relativas a ligações resistentes a momentos.

Para o seu dimensionamento podem ser utilizadas as regras e recomendações presentes na publicação “STEP- Moment Resisting Joints, Lecture C16”[36].

Uma vez que estas ligações são, na sua generalidade, consideradas semi-rígidas, é necessário ter em conta a rigidez da ligação e dos ligadores para determinar as forças actuantes, causadas pelos momentos flectores, e dessa forma compara-las com os valores resistentes dos ligadores obtidos pela teoria de Johanssen.

Além da comparação da resistência e força actuante no ligador devido aos esforços existentes na zona de união, é necessário também fazer verificações de tensões de corte nos elementos da ligação resultantes destas forças actuantes.

As recomendações desta publicação estão mais direccionadas para ligações resistentes a momentos de elementos estruturais de madeira lamelada colada de grande vão, enquanto as soluções de reabilitação analisadas nesta dissertação são de carácter mais simples e com ações muito menores. Sendo assim, em capítulo posterior, a aplicação destes critérios de dimensionamento nas soluções de reabilitação em estudo são descritas e explicadas de forma a clarificar e justificar as opções tomadas.

Na verificação do estado limite de utilização da ligação, o EC5 dispõe de um método simplificado que consiste no cálculo da rigidez de rotação, obtendo-se um valor aproximado da deformação em graus e do deslocamento em *mm*, a curto e longo prazo.

3.6. Empalmes com varões colados

As soluções conhecidas como “*glued in rods*”, ou em português como soluções com varões colados, têm vindo a ganhar popularidade e têm sido cada vez mais usadas. Para a patologia aqui tratada, de secção insuficiente nas entregas das vigas por ataque biológico, é possível utilizar soluções de reabilitação desta natureza, sendo esta uma das principais utilizações de soluções com varões colados [32].

Estas soluções podem ser consideradas competitivas, com as que foram descritas anteriormente, graças a algumas vantagens da sua aplicação como por exemplo [32]:

- Possível criar ligações rígidas;
- Grande capacidade de carga;
- Boa resistência ao fogo;
- Estética final indicada para obras de reabilitação;
- Rapidez de Execução.

Apesar de serem soluções usadas há cerca de 25 anos na construção [32], existem algumas condicionantes que dificultam uma utilização mais frequente em comparação com as soluções utilizando ligações do tipo cavilha.

Uma das razões, para este menor uso, é a inexistência actual de regras de dimensionamento unificadas no EC5, além de que ainda existe pouca informação relativamente à rigidez destas ligações, durabilidade e pormenorização das secções.

Outra das razões pela qual as soluções com varões colados não serem tão utilizadas pelo meio técnico, deve-se a inseguranças decorrentes da sua utilização e que estão relacionadas com a incerteza na sua produção e controlo de qualidade. Apesar de terem a

grande vantagem de serem soluções esteticamente apelativas e respeitarem com facilidade o critério de autenticidade, são difíceis de inspecionar depois de executadas o que torna o controlo de qualidade muitas vezes difícil.

Contudo, são soluções que pelas vantagens já enunciadas interessam analisar e comparar com as restantes.

As soluções de intervenção com esta tecnologia, para reabilitar as entregas das vigas do pavimento, consistem essencialmente na remoção da extensão de madeira deteriorada e colocação no seu lugar madeira nova ou sã, sendo esta ligada à respectiva viga através da utilização conjunta de varões e de colas.

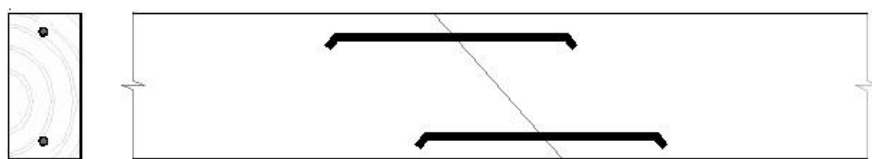


Fig.3.11.- Esq: Empalme com varões colados (corte); Dir: Empalme com varões colados (alçado)

Na fig.3.11. é ilustrada a solução de empalme com varões colados a ser analisada, onde se pode verificar a existência de dois varões colados à madeira. No perfil longitudinal da solução é possível observar a existência de um corte oblíquo entre os dois topos ligados, sendo no entanto possível realizar um corte simplesmente vertical. Em vez de furos nas peças de madeira há a alternativa também de realizar cortes longitudinais nos limites da secção.

3.6.1. Materiais utilizados

3.6.1.1. Colas e varões

Existem dois grandes tipos de colas: as termoplásticas e as termoendurecíveis. As mais indicadas para aplicações estruturais são as termoendurecíveis, mais concretamente as do tipo poliéster, viniléster e epoxídica [29].

Destes três tipos de colas, as mais usadas em aplicações estruturais, inclusivamente nas soluções de varões colados, são as epoxídicas (fig.3.12.).

O uso mais generalizado deste tipo de adesivo em aplicações estruturais, prende-se com o facto de as colas epoxídicas serem consideradas as melhores para aplicações “in situ”, mas também por estas possuírem algumas características físicas e mecânicas que são desejáveis para estas aplicações [29].

Destas características destacam-se, em comparação com as restantes colas, as seguintes [29]:

- Maior resistência mecânica;

- Maior durabilidade à agressividade ambiental;
- Cura à temperatura ambiente;
- Baixa retracção durante a cura;
- Elevada adesão;
- Estabilidade dimensional após o endurecimento;
- Impermeabilidade;
- Variadas gamas de produtos com diferentes características para diferentes situações.



Fig.3.12- Cola Epoxídica (Fonte: [34])

Além destas características as colas a aplicar deverão ser tixotrópicas e possuir uma baixa tensão superficial de modo a garantir um bom espalhamento [30].

A espessura máxima da linha de cola utilizada em aplicações deste tipo é de 2mm, sendo este o valor recomendado por aprovações técnicas realizadas nesta área [32].

Os varões utilizados podem ser de aço, de compósitos de fibras de vidro, de carbono ou de kevlar. Os varões de aço devem ser protegidos contra a corrosão [30]. Nesta dissertação apenas se utilizará varões de aço inoxidável ou galvanizado, por questões económicas e por ser o material mais comum dos que foram enunciados.

3.6.2. Processo construtivo

Para a solução de empalme com varões colados, sugere-se o processo construtivo utilizado num caso de estudo da aplicação de uma solução idêntica à analisada, realizando a intervenção pela parte inferior do pavimento [30]:

1. Remoção do tecto;
2. Escoramento da viga/vigas a intervir, nas secções antes da parte a remover;
3. Corte e remoção da extensão de viga degradada a partir da entrega na parede até à parte afectada do vão;
4. Execução de furos/cortes horizontais na madeira sã remanescente e na prótese a colocar para instalação de varões (fig.3.13.);
5. Limpeza da madeira;
6. Injecção de cola nos furos (fig.3.13.);
7. Colocação dos varões (fig.3.13.);
8. Preparação da madeira nova, incluindo limpeza
9. Colocação e alinhamento da nova parte de madeira, realizando a entrega na parede;
10. Injecção de calda nos entalhes da madeira nova;
11. Remoção do escoramento.



Fig.3.13.- Furação de elemento de madeira (Fonte: [34])



Fig.3.14.- Injecção da Cola (dir.) (Fonte: [34])



Fig.3.15- Introdução dos Varões (Fonte: [34])

3.6.3. Controlo de qualidade e execução

A execução desta solução de reabilitação exige mão-de-obra especializada e uma selecção adequada dos materiais, de modo a garantir um bom desempenho em serviço.

Sendo um tipo de solução que fica “oculta” é necessário adoptar alguns cuidados a ter antes e durante a execução. É possível também adoptar, caso necessário, procedimentos de controlo de qualidade.

Em termos de cuidados a ter na execução, é importante garantir um corte regular das peças de madeira de modo a que a junta entre as peças a unir tenha a maior superfície de contacto possível. A limpeza com ar sob pressão dos furos das peças de madeira é essencial de maneira a garantir que não existam partículas soltas que possam dificultar a colagem. No mesmo sentido de evitar partículas soltas, é importante que a aplicação das colas não se dê mais de 24 horas depois da limpeza dos furos [30].

A operação de mistura dos componentes da cola deve obedecer em rigor ao que é especificado nas fichas técnicas correspondentes. Os varões devem ser inseridos nos furos imediatamente após a cola ter sido injectada. Além disso os prumos ou outro elemento de suporte provisório usado durante a intervenção, só podem ser retirados após se ter dado a polimerização completa dos produtos [30].

Se a intervenção for feita em poucas vigas do mesmo pavimento, não se justificará por razões económicas, proceder à realização de ensaios para aferir as características da solução executada. No entanto, pode achar-se viável proceder a estas acções caso o número de vigas intervencionadas com esta tecnologia seja considerável ou caso se tratem

de elementos estruturais de asnas de madeira ou outros em que a falha desta ligação possa resultar na rotura global da estrutura.

3.6.4. Dificuldades de aplicação

Nesta tecnologia construtiva, durante a fase de execução, também se pode verificar algumas dificuldades relacionadas com o espaço disponível. Na introdução dos varões ou na instalação da prótese de madeira, pode não haver espaço suficiente entre o topo da viga e a parede. Esta dificuldade pode justificar que se utilizem outras alternativas ou outras variantes no sistema construtivo, como por exemplo a utilização de uma prótese de madeira com cortes longitudinais, a repor na entrega, com os varões já inseridos em furos na viga remanescente. Por outro lado é também possível realizar os cortes na viga remanescente e instalar a prótese já com os varões aplicados previamente.

3.6.5. Critérios de dimensionamento

Apesar de existirem inúmeras regras e propostas de regra em trabalhos científicos um pouco por toda a europa e pelo mundo, um dos principais entraves à utilização de soluções com varões colados é, como já referido, a inexistência de regras de dimensionamento unificadas no EC5. Neste regulamento já existiram propostas de regras de dimensionamento numa pré-versão de 1997, sendo posteriormente alteradas e resultando numa versão final de 2003. No entanto, nesse mesmo ano estas propostas foram descartadas pela comissão técnica [32].

A falta de existência de regras gerais deve-se essencialmente à falta de consenso do meio técnico acerca do comportamento destas ligações. Por serem secções com distribuições de tensões complexas, constituídas por 3 materiais com comportamento diferente, existem algumas contradições significativas nos modelos de dimensionamento propostos e nos estudos experimentais já realizados.

Fundamentalmente não há consenso sobre qual o tipo de análise a aplicar (análise linear ou não-linear), nem nos parâmetros mais influentes a considerar no cálculo da resistência. Não há consenso se é o diâmetro, o comprimento de ancoragem ou por exemplo a constituição da cola utilizada [32] que mais influenciam a sua resistência. Não estavam preconizadas também as situações de esforços combinados de corte e flexão.

Nas ligações com varões colados sujeitos a cargas axiais podem ocorrer os seguintes modos de rotura [32]:

- Rotura dos varões por tracção;
- Rotura da madeira na zona envolvente da cola por tracção;

- Rotura por corte ao longo do comprimento do varão (geralmente pela interface madeira-cola);
- Rotura por separação das fibras;
- Rotura em bloco (em ligações com múltiplos varões).

Nas ligações com varões colados carregados lateralmente podem ainda ocorrer os seguintes modos de rotura por corte [48]:

- Rotura por corte devido à força exercida pelos varões na madeira;
- Rotura em bloco devido ao efeito de grupo dos varões.

O dimensionamento desta solução para vigas sujeitas à flexão por carregamento transversal, de uma forma simplificada, consiste no cálculo da força de arrancamento dos varões e em limitar a força de corte actuante.

Para os modos de rotura devido a cargas axiais foram utilizadas as expressões que já foram propostas para as pré-versões do EC5. Devido à sua inexistência no EC5, para as expressões dos modos de rotura por corte foram utilizadas as definidas em [47].

O modo de rotura da ligação, no caso de carregamento axial, depende essencialmente do diâmetro e do comprimento dos varões usados [32].

As regras e propostas de dimensionamento fornecem a equação para o cálculo da força de arrancamento presente no modo de rotura referente à rotura por corte ao longo do comprimento do varão. A maior parte das regras existentes pode ser simplificada resumida na seguinte equação [32]:

$$R_{ax,k} = \pi \times d \times l_a \times f_{v,k}$$

Onde $R_{ax,k}$ representa a força de arrancamento, d o diâmetro, l_a o comprimento de ancoragem e $f_{v,k}$ a componente de resistência ao corte.

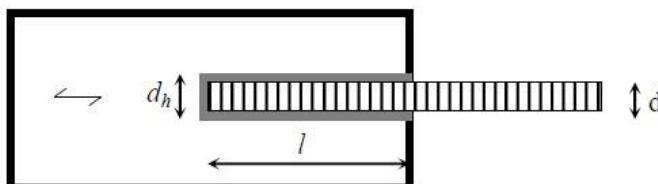


Fig.3.16- Grandezas do dimensionamento de ligações com varões colados (Fonte: [33])

As principais diferenças entre as várias regras e propostas de dimensionamento são devidas: à utilização de diferentes diâmetros (fig.3.15.) (diâmetro do varão, diâmetro equivalente, diâmetro do furo, etc.); à forma como o comprimento de ancoragem é medido; à

diferente escolha dos parâmetros que caracterizam a parcela referente à resistência ao corte entre os materiais constituintes (densidade da madeira, diâmetro dos varões ou características mecânicas das colas utilizadas).

Existe ainda também uma lacuna de informação no que toca ao comportamento destas soluções a longo prazo, à fadiga e influência do ambiente de serviço.

3.7. Substituição integral

Além das soluções já descritas, é possível resolver o problema em questão substituindo simplesmente as vigas degradadas por vigas novas, ou isentas de problemas.

Esta solução tem várias vantagens uma vez que exige um dimensionamento simples, e algumas das características funcionais do pavimento são mantidas como por exemplo a deformabilidade e a segurança ao fogo.

No entanto, esta é uma solução que pode aumentar bastante o tempo e o custo das intervenções, no caso de serem feitas pela parte superior do pavimento, já que exige o levantamento de todo ou parte do soalho, bem como a possível remoção do tecto.

Esta é uma solução que também será analisada no capítulo seguinte onde se perceberá melhor em que situação se deve aplicar.

CAPÍTULO 4 - ANÁLISE TÉCNICO-ECONÓMICA DAS SOLUÇÕES DE REABILITAÇÃO

4.1. Considerações iniciais

Este capítulo contém a parte essencial desta dissertação, a análise técnico-económica de soluções de reabilitação para as entregas de vigas de pavimentos de madeira em edifícios antigos deterioradas por fungos de podridão e térmitas.

Os primeiros subcapítulos destinam-se a enquadrar a aplicabilidade da análise e metodologia utilizada. Posteriormente, é caracterizado o caso de estudo que vai servir de ponto de partida para a análise, sendo descritos a geometria e materiais do pavimento em questão, o tipo e extensão de patologia verificadas, as soluções de reabilitação consideradas e as condicionantes em termos de espaço e geometria.

Tendo o dimensionamento das soluções um carácter particular, e de maneira a contribuir para uma melhor interpretação dos resultados, é elaborado um subcapítulo com a descrição do dimensionamento das soluções, o qual poderá servir de documento de apoio para o dimensionamento deste tipo de soluções.

São discutidos ainda os resultados dos dimensionamentos e são feitas as comparações técnicas das soluções.

Realizada a comparação técnica procede-se à orçamentação das soluções de reabilitação. Neste âmbito, é descrito o processo de orçamentação utilizado, sendo dado destaque aos mapas de quantidades de trabalho de cada solução e às fichas de rendimento criadas e utilizadas para os trabalhos em questão.

Na orçamentação das soluções são feitas as comparações económicas entre as mesmas. É também feita uma análise de variabilidade dos resultados dos orçamentos, mudando por exemplo a forma de intervir no pavimento ou a consideração de geometrias e ações diferentes.

No subcapítulo final é feita uma análise técnica e económica de opções tomadas no dimensionamento que importa analisar de maneira a conhecer se podem alterar os resultados técnicos e económicos obtidos.

4.2. Aplicabilidade da análise

A análise técnico-económica destina-se a ser aplicada em obras de reabilitação de edifícios habitacionais antigos de todas as tipologias, que tenham pavimentos de madeira como elemento estrutural.

A análise tem maior utilidade para projectistas da área da reabilitação de edifícios que se deparem com problemas de degradação nas entregas das vigas nas paredes de apoio. Esta degradação poderá ser fruto de ataques biológicos-fungos de podridão, térmitas ou carunchos, resultantes de teores de humidade elevados (no caso de fungos e térmitas).

O objectivo da análise é auxiliar o meio técnico na decisão da melhor solução de reabilitação, que nesta situação é baseada em empalmes ou substituição integral. Esta decisão é baseada em critérios técnicos e económicos. De entre os critérios técnicos, destacam-se a resistência mecânica, a dificuldade do dimensionamento, o espaço necessário da intervenção, a extensão da anomalia e a deformabilidade das soluções. Nos critérios económicos incluem-se o preço, o tempo de execução e a especialização da mão-de-obra.

4.3. Metodologia da análise

A metodologia seguida para a realização da análise técnico-económica compreende os seguintes passos:

1. Definição do “caso de estudo”, ponto de partida

Nesta primeira fase, é definida uma situação hipotética, com base em situações reais, de forma a criar a problemática que a análise pretende resolver. Aqui são definidas a geometria da estrutura, os materiais utilizados, as acções na estrutura, a patologia e respectiva extensão verificada, bem como as hipóteses de soluções de reabilitação.

2. Verificação da segurança do pavimento

Antes do dimensionamento das soluções, é necessário verificar a segurança do pavimento em estudo. Aqui são verificados os estados limite últimos de flexão e de esforço transversal do pavimento.

3. Dimensionamento das soluções de reabilitação

Com a extensão da anomalia definida em ponto anterior, são calculados os esforços de dimensionamento das ligações/soluções de reabilitação. Conhecidos os esforços, as soluções de reabilitação são dimensionadas de acordo com os critérios de dimensionamento aplicáveis.

4. Análise técnica das soluções dimensionadas

As soluções são analisadas e comparadas segundo vários critérios técnicos, tendo em conta os resultados dos dimensionamentos. São comparadas em termos de resistência

mecânica, dificuldade e particularidades do dimensionamento, espaço necessário da intervenção, deformabilidade e outras categorias consideradas menos relevantes.

5. Medição de quantidades e preços unitários

Os trabalhos necessários para executar cada uma das soluções de reabilitação são objecto de medição detalhada, determinando-se as quantidades e elaborando-se os respectivos mapas de quantidade de trabalho. São ainda elaboradas fichas de rendimento para a atribuição de preços unitários de cada trabalho, de forma a orçamentar as soluções de reabilitação, através da composição de custos.

6. Orçamentação das soluções de reabilitação

Com base no ponto anterior, as soluções são orçamentadas.

7. Análise económica das soluções

Com a informação recolhida das medições e da orçamentação, são identificadas as opções mais baratas. As soluções são então comparadas em critérios económicos de preço e tempo de execução. Por último, é feita uma análise de variabilidade dos resultados considerando por exemplo outras formas de intervenção no pavimento e outras geometrias.

São ainda realizadas análises a determinadas opções de dimensionamento das soluções de maneira a averiguar se influenciam de forma significativa os resultados técnicos e económicos.

4.4. Caso de estudo

4.4.1. Geometria e materiais constituintes do pavimento

Durante a fase de caracterização geométrica dos elementos estruturais de uma obra de reabilitação foram registadas as características de um dos pavimentos de madeira. O pavimento é constituído por vigas de pinho bravo de secção $0,16 \times 0,08 \text{ m}^2$ afastadas entre eixos a $0,40 \text{ m}$, com um vão de $4,0 \text{ m}$ e uma entrega, de cada lado, nas paredes de apoio de $0,25 \text{ m}$.

A envolvente superior do pavimento é constituída por um soalho “à inglesa” com tábuas de pinho bravo com dimensões de $2,64 \times 0,17 \text{ m}$ e uma espessura de $0,025 \text{ m}$.

A envolvente inferior do pavimento é constituída por um tecto estucado constituído por fasquias de secção trapezoidal revestido por uma camada de argamassa de cal com $0,02 \text{ m}$ de espessura e um acabamento em gesso de $0,01 \text{ m}$ de espessura.

4.2. Tipo e extensão da patologia

Durante a fase de inspecção e ensaio dos pavimentos, foram registados ataques de fungos de podridão na zona das entregas de algumas viga identificando-se deformações excessivas. Uma das vigas afectadas tem a zona deteriorada com uma extensão desde a entrega ao vão de 0,85 m. A causa do ataque foi identificada como sendo a excessiva permeabilidade à água da parede de apoio exterior do pavimento em questão. A intervenção no pavimento terá que ser precedida da reparação da parede.

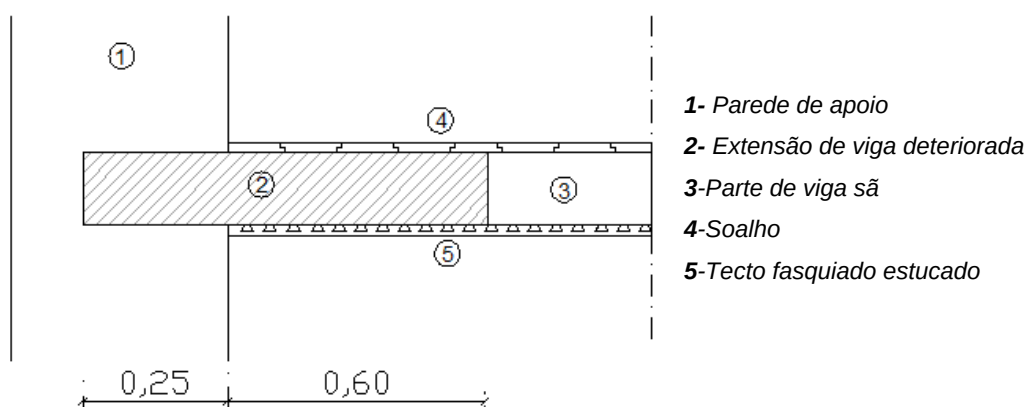


Fig.4.1. – Extensão da patologia [m]

4.4.3. Objectivos da intervenção

Caso o pavimento de madeira cumpra os requisitos regulamentares de segurança aplicáveis, é pretendido que se restaure as características resistentes das vigas afectadas para a sua capacidade original. A reparação das vigas é feita através da solução mais económica que melhor se adequa às condicionantes locais, entre um conjunto variado de soluções.

4.4.4. Soluções de reabilitação

As soluções de reabilitação a considerar dividem-se em soluções de substituição do troço de viga degradado por um novo (ou sem problemas), e pela substituição integral da viga afectada.

A substituição do troço de viga degradada é feita recorrendo à execução de empalmes de dois tipos:

- Empalmes com ligadores metálicos;
- Empalmes com varões colados.

Os empalmes com ligadores metálicos têm várias variantes, conjugando vários tipos de ligadores e de elementos adicionais do empalme.

Os empalmes analisados com ligadores metálicos são os seguintes:

- Empalme de madeira pregado;
- Empalme com chapa de aço pregado;
- Empalme de madeira com parafuso de porca;
- Empalme com chapa de aço e parafuso de porca;
- Empalme de madeira com parafuso de enroscar;
- Empalme com chapa de aço e parafuso de Enroscar.

Os materiais usados nestes empalmes são os especificados no quadro 4.1.

Elemento	Material
Troço de madeira novo/sã	Pinho Bravo classe de qualidade E
Tábuas de madeira	Pinho Bravo classe de qualidade E
Chapas	Aço macio
Pregos	Aço macio
Parafusos	Aço macio

Quadro 4.1. - Materiais de empalmes com ligadores metálicos

Apenas foi analisado o empalme com varões metálicos colados com corte recto, varões metálicos e junta aberta, ou seja sem linha de cola da interface de união das secções a unir. Os materiais utilizados neste empalme são os especificados no quadro 4.2.

Elemento	Material
Troço de madeira novo/sã	Pinho Bravo classe de qualidade E
Varões	Varões roscados em aço inoxidável
Cola	Cola epoxídica para aplicações estruturais

Quadro 4.2. - Materiais de empalmes com varões colados

Em termos de condicionantes de espaço foi necessário:

- Limitar o empalme a 0,16 m de altura, de forma a ser igual à altura da viga;
- Limitar o comprimento a 0,60 m, uma vez que foi este o comprimento considerado da extensão da patologia no vão.
- Garantir um comprimento de sobreposição mínimo do empalme de 0,20 m;

- Ter em conta o espaço disponível entre vigas, de forma a realizar as operações para evitar as dificuldades de aplicação já descritas em capítulo anterior.

4.5. Dimensionamento das soluções de reabilitação

Antes do dimensionamento das soluções é necessário, como já referido, verificar a segurança do pavimento e calcular os esforços de dimensionamento a que as ligações das soluções de intervenção vão estar sujeitas. Após esta primeira fase preliminar, passa-se ao dimensionamento das soluções segundo várias fases, que consistem neste caso, em dimensionamentos de ligações em madeira. De seguida é descrito o procedimento de dimensionamento geral realizado.

4.5.1. Determinação dos esforços internos

As vigas do pavimento são consideradas bi-apoiadas nas paredes de fachada e nas paredes de frontal, com um vão de $4,0\text{ m}$ e um afastamento de $0,40\text{ m}$.

Para as acções actuantes, foram determinados os seguintes valores:

- Nas acções permanentes, foi incluído o peso próprio das vigas, o peso do soalho e o peso do tecto estucado, sendo determinado o valor de $PP + RCP = 0,70\text{ kN/m}^2$;
- Para a sobrecarga foi atribuído o valor definido para edifícios de habitação no EC0 com o valor de $s_c = 2,0\text{ kN/m}^2$
- As acções no pavimento foram calculados para a combinação fundamental de acções: $p_{sd} = 1,35 \times 0,70 + 1,5 \times 2,0 = 4,0\text{ kN/m}^2$
- Para o cálculo das acções por viga bastou multiplicar o valor anterior pelo afastamento entre vigas: $p_{sd} = 4,0 \times 0,40 = 1,6\text{ kN/m}$

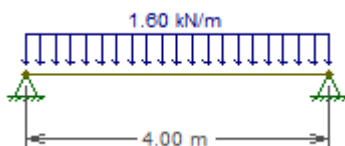


Fig.4.2.- Carregamento nas vigas do pavimento

Os esforços internos máximos de esforço transversal (fig.4.3.) e momento flector (fig.4.4.) ocorrem na zona dos apoios e a zona de meio vão respectivamente.



Fig.4.3.- Diagrama de Esforço Transverso (kN)

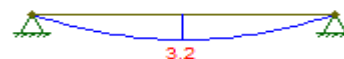


Fig.4.4.- Diagrama de Momentos (kN.m)

Como já referido, a parte de viga a substituir tem um comprimento total de $0,85\text{ m}$ sendo $0,25\text{ m}$ de entrega na parede de apoio o que significa que as ligações são dimensionadas para os esforços internos na secção a $3,4\text{ m}$ do início da viga.

4.5.2. Verificação ao estado limite último do pavimento de madeira

As vigas de madeira são de Pinho Bravo da classe de Qualidade E e da classe de resistência C18 segundo a EN338. No quadro 4.3. estão especificadas as propriedades físicas e mecânicas da madeira utilizada, necessárias para as verificações de segurança em questão, segundo a ficha LNEC "M2-Pinho Bravo para estruturas".

Decidiu-se utilizar estes valores de características físicas e mecânicas uma vez que estes reflectem melhor as características do pinho bravo português. Seria possível utilizar também os valores presentes na EN338, no entanto a diferença de valores da massa volúmica entre esta norma e a ficha do LNEC é bastante significativa.

Espaçamento	Valor mínimo
Tensão característica resistente de flexão	$f_{m,k} = 18\text{ MPa}$
Tensão característica resistente ao corte	$f_{v,k} = 2\text{ MPa}$
Peso volúmico característico	$\rho_k = 460\text{ kg/m}^3$
Peso volúmico médio	$\rho_{mean} = 580\text{ kg/m}^3$

Quadro 4.3. - Propriedades físicas e mecânicas do Pinho Bravo Português

Utilizando os valores de massa volúmica de uma madeira com classe de resistência C18 da norma EN338, os resultados obtidos seriam bastante díspares nas soluções dimensionadas, já que a massa volúmica tem uma influência significativa na resistência dos ligadores e consequentemente na geometria da ligação.

Os estados limites últimos a verificar nesta situação são o estado limite último de esforço transverso e de flexão, para as secções críticas da viga, a $x=0\text{ m}$ e a $x=2\text{ m}$, respectivamente.

Na fig.4.5. está representada a secção das vigas do pavimento.

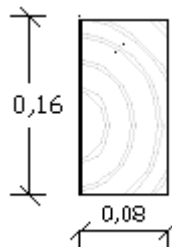


Fig.4.5. Secção das vigas (m)

Para o estado limite de flexão a condição $\sigma_d \leq f_{m,d}$ tem de ser verificada, na qual a tensão normal actuante de cálculo na fibra mais solicitada tem de ser inferior ou igual à tensão normal resistente de cálculo da madeira em questão.

A tensão resistente de cálculo é definida pela expressão:

$$f_{m,d} = k_h \times k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{Y_m}$$

Para o estado limite de esforço transversal a condição $\tau_d \leq f_{v,d}$ tem de ser verificada, na qual a tensão de corte actuante de cálculo na fibra mais solicitada tem de ser inferior ou igual à tensão resistente de corte. A tensão resistente de cálculo é definida pela expressão:

$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{Y_m}$$

4.5.3. Dimensionamento dos empalmes com ligação de ligadores metálicos

O dimensionamento destas ligações foi feito segundo as seguintes fases:

- Definição da geometria da ligação;
- Cálculo das forças actuantes nos ligadores;
- Cálculo das tensões de corte actuantes nos elementos da ligação;
- Cálculo da força resistentes dos ligadores;
- Verificação da capacidade resistente da ligação;
- Verificação de disposições regulamentares.

De seguida cada uma destas fases de dimensionamento é feita de uma forma genérica. Para a consulta pormenorizada dos cálculos de cada uma das soluções sugere-se a consulta do apêndice 1.

4.5.3.1. Definição da geometria da ligação

A fase de definição da geometria da ligação consistiu num pré dimensionamento da solução. Na fig.4.6. é ilustrada a forma como se definiu a geometria de cada solução de empalme com ligadores metálicos.

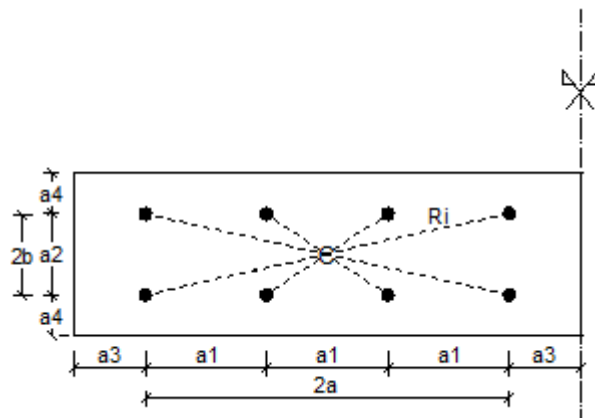


Fig.4.6.-Geometria do empalme

O dimensionamento é realizado para metade do empalme a partir da zona de união, sendo a restante geometria simétrica. Aqui são definidos o número e diâmetro de ligadores, a sua localização, o espaçamento entre estes e as dimensões da ligação.

Foi utilizado um número de ligadores tendo em conta os espaçamentos mínimos e o comprimento de sobreposição mínimo de 0,20 m dos elementos adicionais do empalme nos troços de viga unidos.

Os espaçamentos entre ligadores dependem do diâmetro dos ligadores, do ângulo que as forças destes fazem com o fio da madeira, da massa volúmica da madeira e se a madeira é ou não pré-furada.

Uma vez que o ângulo força-fio, nestas soluções de intervenção, varia consoante o ligador considerado, foram utilizados os espaçamentos mínimos que estão estabelecidos em [36], onde estão sugeridos espaçamentos modificados para ligações resistentes a momentos. Estes espaçamentos mínimos reproduzem-se no quadro 4.4.

Espaçamento	Valor mínimo
Na direcção do fio (a1)	6d
Na direcção perpendicular ao fio (a2)	5d
Ao topo solicitado da peça (a3)	7d
Ao bordo solicitado da peça (a3)	4d

Quadro 4.4. - Espaçamentos mínimos em ligações resistentes a momentos

Estes espaçamentos são os que estão definidos para parafusos de porca e cavilhas. Duas das soluções de reabilitação analisadas possuem parafusos de porca. No entanto, também há soluções com pregos e outras com parafusos de enroscar.

Optou-se, de maneira a que as soluções sejam comparáveis, pela utilização das mesmas regras de espaçamentos para todas as soluções. Dessa forma as soluções de

pregos e parafusos de enroscar, têm pré-furação na sua execução, já que quando os elementos da ligação não são pré-furados exigem maiores espaçamentos.

São também calculadas as distâncias dos ligadores ao centro de rotação da ligação, que corresponde ao braço das forças actuantes e resistentes, e os ângulos (β) que estas rectas fazem com o fio da madeira de forma a conhecer o ângulo (α) que as forças resultantes do momento em cada ligador fazem com o fio da madeira (fig.4.7.).

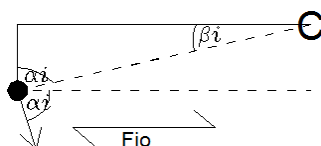


Fig. 4.7. - Ângulo da força actuante no ligador, resultante do momento flector, com o fio

Após este pré-dimensionamento, a geometria de cada solução foi revista com a evolução das fases de dimensionamento e tendo em conta o objectivo de optimização das soluções.

4.5.3.2. Cálculo das forças actuantes nos ligadores

Sendo estas ligações consideradas semi-rígidas, as forças actuantes nos ligadores resultantes do momento flector não se distribuem de maneira igual nos ligadores uma vez que há parafusos com distâncias ao centro da ligação diferentes (fig.4.8.), com braços diferentes pelo que há ligadores mais carregados que outros.

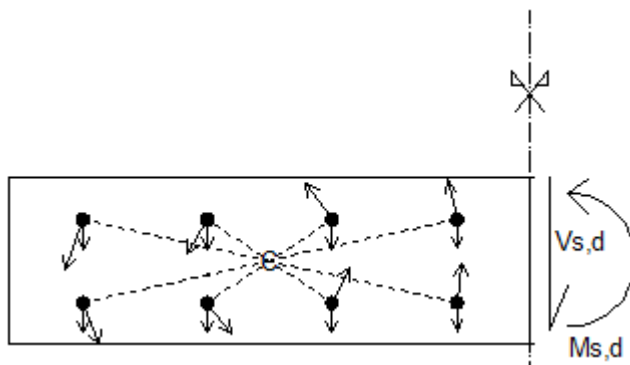


Fig. 4.8. - Forças actuantes nos ligadores resultantes do momento e esforço transversal

Na fig.4.8. as forças perpendiculares à distância ao centro dos ligadores, são as forças causadas pelo momento flector actuante e as forças verticais em cada ligador são as forças resultantes do esforço transversal actuante na zona de união das peças.

Para o cálculo da força actuante por flexão em cada ligador, é usada a expressão geral [36]:

$$F_{Md,i} = \frac{K_u}{Kr} \times b_i \times M_{sd}$$

As grandezas K_u e Kr representam o módulo de deslizamento para estados limite últimos e a rigidez rotacional da ligação respectivamente. São calculadas segundo as fórmulas sugeridas pelo EC5 para cada tipo de ligador utilizado. As grandezas b_i e M_{sd} correspondem ao braço da força em cada ligador e ao momento flector na zona de união, respectivamente.

Na publicação [36] são propostas fórmulas simplificadas para a determinação da força máxima actuante nos ligadores por flexão. Estas fórmulas foram desenvolvidas para ligações com um grande número de ligadores, onde seria muito trabalhoso aplicar apenas a expressão geral apresentada. No entanto, decidiu-se calcular as forças actuantes nos ligadores pela expressão geral apresentada, uma vez que as soluções aqui dimensionadas são soluções mais simples com um número de ligador reduzido.

Além das forças actuantes nos ligadores resultantes do momento flector, é necessário ter em conta as forças resultantes de outros esforços na zona de união como o esforço transversal e o esforço normal. Admite-se, no caso destes dois esforços, que as forças resultantes se distribuem em cada ligador de forma igual, daí que basta dividir o esforço total pelo número de ligadores [36]:

$$F_{Vs,d} = \frac{V_{s,d}}{(n^o \text{ de ligadores})}$$

A verificação da resistência da ligação é feita para o ligador mais solicitado. No caso de ligações com padrão circular, o ligador mais solicitado está perto do eixo das peças a unir. No caso de ligações com padrão rectangular, o ligador mais solicitado está localizado perto do eixo das peças a ligar e/ou no ligador mais afastado do centro de rotação [36].

No caso da fig.4.8. os ligadores mais solicitados são os dois do extremo esquerdo.

A força total resultante, do efeito combinado do momento flector e esforço transversal, é calculada pela soma vectorial de cada componente, podendo ser usada a fórmula sugerida em [36]:

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(F_{Vs,d} + F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 + \left(F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 \right]}$$

No caso dos parafusos de porca, é necessário saber o ângulo que a resultante no ligador mais solicitado faz com o fio da madeira (fig.4.9.) para o cálculo da tensão resistente de esmagamento da madeira da ligação.

Para isso é utilizada a fórmula [36]:

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{F_{Md,M\acute{a}x} \times a + \sqrt{a^2 + b^2} \times F_{Vs,d}}{F_{Md,M\acute{a}x} \times b} \right]$$

Nestas fórmulas não foram incluídas as parcelas do esforço normal, já que este não está presente em nenhuma das soluções de reabilitação.

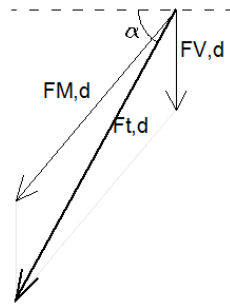


Fig. 4.9.- Ângulo força total com o fio da madeira, resultante da acção combinada de esforços

4.5.3.3. Cálculo das tensões de corte actuantes

Além do esforço transversal devido às acções de vão, na viga com ligações as forças geradas nos ligadores por momento flector têm componentes verticais perpendiculares ao eixo da peça que vão solicitar a madeira por corte.

Por haver um acréscimo de tensões de corte na secção de união dos troços de viga, em comparação com a viga sem ligação, é necessário fazer uma verificação de tensões considerando o esforço transversal resultante das ações e o esforço transversal resultante das forças provocadas pelos parafusos na direcção perpendicular ao eixo da viga.

Segundo recomendações das publicações STEP [36], a verificação das tensões de corte deve ser feita, nos elementos unidos, para o plano médio do conjunto de ligadores, considerando metade da ligação e considerando as componentes verticais das forças actuantes tangentes ao plano médio, resultantes do momento flector (fig.4.10.)

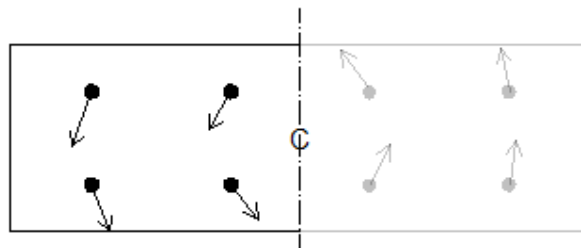


Fig. 4.10. - Forças a considerar na verificação das tensões de corte

Na fig.4.10. foi considerada a metade esquerda da ligação sendo verificável que há quatro forças, resultantes do momento flector, com componentes verticais sendo por isso estas as forças consideradas no cálculo da força de corte total.

A força de corte total a considerar é dada por [36]:

$$F_{t,d} = V_M - \frac{V_{s,d}}{2}$$

Onde V_M é a força de corte gerada no plano médio devido às forças nos ligadores geradas pelo momento flector sendo calculada através da expressão geral:

$$V_M = M_{s,d} \sum_{\alpha_i = -\pi/2}^{\pi/2} \frac{K_{u,\alpha_i}}{Kr} \times x_i$$

A grandeza K_{u,α_i} é a rigidez individual de cada ligador segundo a direcção que a força faz com o fio nesse ligador. O valor pode ser calculado de forma aproximada utilizando as expressões do EC5 para os módulos de deslizamento, que não tem directamente em conta o ângulo que a força faz com o fio.

A grandeza x_i corresponde à distância no eixo x, do ligador ao centro de rotação, após ter sofrido o deslocamento resultante das forças actuates na ligação

Neste caso são propostas também fórmulas simplificadas por [36] para a determinação da força de corte gerada no plano médio devido às forças nos ligadores. Por serem soluções com um reduzido número de ligadores, e pelo facto destas forças corresponderem à projecção vertical das forças actuates do momento flector, o cálculo da grandeza V_M consistiu na soma vectorial das componentes verticais das forças resultantes nos ligadores de momento flector. Para isso foi usada a seguinte:

$$V_M = \sum_{i=1}^i F_{Md,i} \times \sin \alpha_i$$

A grandeza α_i é o ângulo da força-fio que foi calculada anteriormente e i é o número de ligadores com componente vertical considerando metade da ligação.

4.5.3.4. Força resistente dos ligadores

Para a determinação da força resistente dos ligadores foram calculados os modos de rotura segundo a teoria de Johanssen aplicáveis à situação em questão. Neste caso foram considerados os modos de rotura referentes a ligações madeira-madeira em corte simples e corte duplo, e a ligações madeira-aço em corte simples e corte duplo.

Para o cálculo das forças, são definidos em primeiro lugar os parâmetros resistentes do sistema e são arbitradas as espessuras e dimensões a considerar.

São calculados a resistência ao esmagamento do conjunto ligador-madeira e o momento de plastificação do ligador. A geometria do ligador é arbitrada em termos do seu diâmetro e comprimento.

Após esta fase é escolhido o modelo de cálculo (fig.4.11.) no qual são identificadas as espessuras a considerar para o cálculo das forças resistentes em cada modo de rotura aplicável.

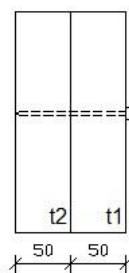


Fig.4.11. - Modelo de cálculo dos modos de rotura de uma ligação pregada [mm]

A força resistente de cada ligador, a considerar na verificação de resistência da ligação, é a menor força obtida entre todos os modos de rotura.

4.5.3.5. Verificação da capacidade resistente da ligação

Para fazer a verificação de segurança das ligações foi necessário fazer 4 verificações:

- $F_{t,d} \leq F_{R,d}$, em que a força total actuante, no ligador mais solicitado, devido à acção combinada do momento flector e esforço transversal, tem de ser menor que a força resistente de cálculo para o ligador em questão;
- $\tau_d \leq f_{v,d}$, em que a tensão actuante, devido ao esforço transversal solicitante e às componentes verticais das forças no ligador devidas ao momento flector, no elemento de madeira de menor espessura, tem de ser menor ou igual que a tensão de corte resistente de cálculo da madeira utilizada;
- $M_{Rd,M\acute{a}x} \geq M_{s,d}$, em que o momento máximo resistente da ligação tem de ser maior ou igual que o momento de cálculo actuante na ligação;
- $\sigma_d \leq f_{m,d}$, verificadas as tensões de corte, as tensões normais de flexão também têm de ser verificadas nos elementos de madeira de menor espessura, bem como nos elementos de chapa de aço, embora nestes não seja condicionante.

O momento resistente máximo, sendo a ligação semi-rígida, é calculado para a força resistente do ligador mais solicitado, através da expressão:

$$M_{Rd,Máx} = \frac{K_r}{K_u \times b_{máx}} \times F_{R,d}$$

No caso de ligações resistentes a momentos não é necessário ter em conta a expressão do EC5 da cláusula 8.3.1.1 (8) referente à redução dos esforços resistentes em função do número de ligadores, pois as forças em cada ligador formam ângulos diferentes relativamente ao fio da madeira. Genericamente, esta cláusula refere que a resistência resultante de um alinhamento de ligadores na direcção do fio é inferior à simples soma aritmética das resistências de cada ligador individual.

Nas ligações resistentes a momentos, a capacidade resistente de cada ligador não varia consoante o número de ligadores usado já que a direcção da força varia com a localização do ligador [36].

Na verificação das tensões actuates de corte e de flexão nos elementos estruturais, não foi tida em conta a redução da secção causada pelos furos dos ligadores uma vez que foram utilizados diâmetros pequenos (*de 4 a 6 mm*).

4.5.3.6. Verificação de disposições regulamentares

Além dos espaçamentos de ligadores, a disposição regulamentar em termos de pormenorização que foi condicionante no dimensionamento das ligações aqui estudadas, foi a relativa à sobreposição entre pregos.

Nestes casos, as disposições de penetração mínima da ponta e número mínimo de ligadores, não foram condicionantes.

4.5.4. Dimensionamento do empalme com ligação de varões colados

Como já referido, estas soluções não têm fórmulas previstas no Eurocódigo. No entanto estas já existiram em duas pré-versões do EC5 em 1997 e 2003, sendo estas as propostas de regra usadas no dimensionamento do empalme com varões colados.

Estes tipos de ligações são considerados rígidas e o dimensionamento consiste no cálculo da resistência ao arrancamento do varão e ao corte da madeira, para vários modos de rotura possíveis. Ou seja, neste caso considerando os esforços axiais resultantes da flexão e a força de corte exercida pelos varões na madeira na zona de união dos elementos.

O primeiro passo é o pré-dimensionamento (fig.4.12.) da solução onde são arbitrados o diâmetro e números de varões, os recobrimentos dos varões, o comprimento de ancoragem nas peças de madeira e a espessura da linha de cola utilizada.

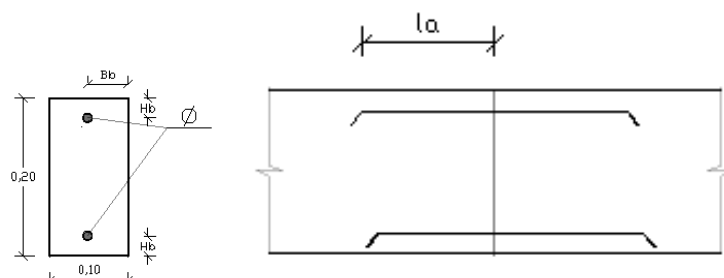


Fig.4.12. – Geometria da solução de empalme com varões colados

Considerou-se o diâmetro mínimo de 10 mm para o varão, no caso de se utilizar 4 varões, e um mínimo de 12 mm no caso de se utilizar 2 varões. O recobrimento dos varões e o comprimento mínimo de ancoragem foram escolhidos tendo em conta as regras de dimensionamento utilizadas. A espessura da linha de cola utilizada foi de 2,0 mm. Não se tendo encontrado bibliografia que contenha informações sobre a espessura de linha de cola a aplicar para determinada intervenção estrutural, decidiu-se usar a espessura de linha de cola máxima que é recomendada em algumas publicações [32].

Após este passo são calculadas as acções. O Dimensionamento é feito considerando o arranque dos varões, como tal a acção a considerar é a força axial nos varões resultantes do momento flector como exemplificado na fig.13.

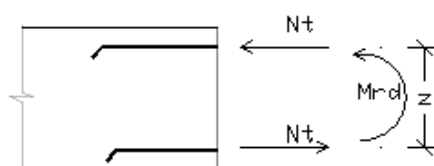


Fig.4.13. – Acções na secção de cálculo

Por fim são calculadas as forças resistentes para os modos de rotura considerados:

- Rotura por arrancamento por insuficiente capacidade resistente da interface cola-madeira, sendo este o modo de rotura mais comum neste tipo ligações

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times \pi \times l_a \times d_{eq} \times f_{v,k}}{Y_m} \text{ (EC5 – 1997: Anexo A)}$$

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times \pi \times l_a \times d_{eq} \times f_{ax,k}}{Y_m} \times \frac{\tan h(\omega)}{\omega} \text{ (EC5 – 2003: Anexo A)}$$

- Rotura por arrancamento devido à rotura da madeira por tracção, considerando a madeira solicitada a que se localiza numa envolvente do varão e da cola, sendo considerado por isso uma área de influência definida segundo as regras utilizadas:

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times f_{to,k} \times A_{ef}}{Y_m}$$

- Rotura por tracção do varão:

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{f_y \times A_{ef}}{Y_s}$$

No caso de flexão devido a uma carga transversal ao eixo da peça, os varões estão carregados lateralmente originando tensões normais de flexão e de corte.

Nas propostas de regra do EC5 não estavam contempladas fórmulas que tenham em conta a acção combinada destes dois esforços.

Neste dimensionamento, de maneira a contemplar essa insuficiência do EC5 foram usadas duas verificações ao corte adicionais, para soluções de varões colados, propostas na publicação “STEP Volume 1 Lecture C14” [47]. Para a consulta detalhada destas verificações sugere-se a consulta de [48].

Uma das verificações diz respeito ao modo de rotura da secção por corte, devido à força exercida pelos varões no elemento de madeira na zona de união entre os dois elementos de madeira unidos:

$$F_{v,d} \leq \left(\sqrt{e^2 + \frac{2M_{y,k}}{d_{ef} \times f_{h,k} \times k_{mod}}} - e \right) \times \frac{n \times d_{ef} \times f_{h,k} \times k_{mod}}{Y_m}$$

A segunda verificação é respeitante ao modo de rotura por corte na madeira devido ao efeito de grupo dos varões:

$$F_{v,d} \leq \frac{0,70 \times k_{mod} \times h_v \times l_v \times f_{v,90,k}}{Y_m}$$

4.6. Análise e comparação técnica das soluções

No quadro 4.5. são apresentados os resultados dos dimensionamentos de cada uma das soluções. Os parâmetros apresentados para cada solução são:

- Momento resistente da ligação ($M_{R,d}$);
- Força resistente do ligador ($F_{R,d}$);
- Força total actuante no ligador mais solicitado ($F_{t,d}$);
- Tensão de corte actuante (τ);
- Comprimento do empalme (c);
- Largura do empalme (l);
- Deformabilidade, pelo ângulo de rotação entre as barras (θ).

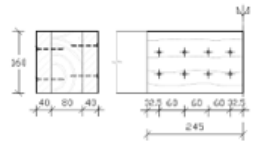
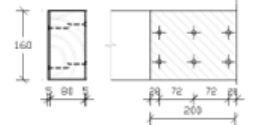
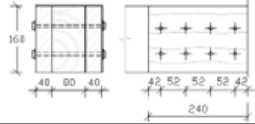
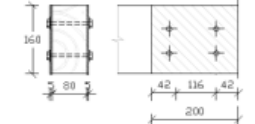
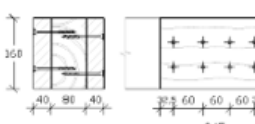
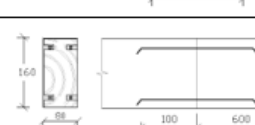
A tensão de corte actuante é calculada na secção dos elementos mais frágeis. Nos empalmes com tábuas são estes os elementos de menor espessura e por isso os mais frágeis. Nas soluções com chapas de aço esta tensão é calculada na viga de madeira. Na solução com varões colados não são feitas verificações ao corte.

A grandeza $f_{v,d}$ representa a resistência ao corte de cálculo da madeira utilizada e serve de referência para comparação com as tensões de corte actuantes causadas pelas forças perpendiculares ao eixo da peça.

O comprimento do empalme corresponde ao espaço necessário para realizar a intervenção na direcção horizontal em alçado. Nas soluções com ligadores metálicos corresponde ao comprimento total das tábuas/chapas do empalme. Na solução com varões colados corresponde ao comprimento dos cortes/furos necessários para a realização da intervenção.

A largura do empalme corresponde ao espaço necessário para realizar a intervenção na direcção horizontal em corte. Nas soluções com ligadores metálicos corresponde à largura total do conjunto da viga e tábuas/chapas. Nas soluções com varões colados corresponde à largura da viga intervencionada.

A deformabilidade das soluções é representada pelo ângulo entre as tábuas/chapas e os elementos de viga unidos.

Solução de Reabilitação		$M_{R,d}$ [kN.m]	$F_{R,d}$ [kN]	$F_{t,d}$ [kN]	τ [MPa]	$f_{v,d}$ [MPa]	c [m]	l [m]	θ [°]
Sol.1-Empalme pregado com tábuas de madeira (mm)		1,6	1,4	1,4	0,42	1,20	0,49	0,16	0,40
Sol.2-Empalme pregado com chapas de aço (mm)		1,7	1,7	1,7	0,78	1,20	0,47	0,12	0,30
Sol.3-Empalme com parafusos de porca e tábuas(mm)		1,8	2,9	3,3	0,92	1,20	0,48	0,16	0,36
Sol.4-Empalme com parafusos de porca e chapas de aço (mm)		1,7	5,0	5,0	1,10	1,20	0,40	0,14	0,36
Sol.5-Empalme com parafusos de enroscar e tábuas (mm)		1,6	1,4	1,4	0,48	1,20	0,49	0,16	0,40
Sol.6-Empalme com parafusos de enroscar e chapas de aço (mm)		1,7	1,7	1,7	0,78	1,20	0,47	0,12	0,30
Sol.7-Empalme com varões colados (mm)		1,6	-	-	-	1,20	-	0,08	0,00

Quadro.4.5. - Resultados dos Dimensionamentos

4.6.1. Momento resistente da ligação ($M_{R,d}$)

Com o intuito das soluções serem comparáveis, procurou-se que o momento resistente fosse semelhante em todas as soluções. As soluções foram optimizadas para que o momento resistente fosse próximo do momento actuante. Todas as soluções estão optimizadas e embora algumas tenham valores de momento resistente da ligação diferentes entre si, esta diferença não é significativa.

Caso se pretenda aumentar o momento resistente das soluções com ligadores metálicos partindo do pressuposto que não se altera a classe resistente da madeira, é possível fazê-lo de várias formas: aumentar o diâmetro dos ligadores e consequentemente a sua força resistente, aumentar o número de ligadores ou seja o número de forças na

ligação, aumentar a distância horizontal ou vertical entre ligadores o que significa aumentar o braço dos binários de força. Se o objectivo for reduzir a resistência da ligação pode-se actuar de forma inversa. Estas opções podem ter diferentes consequências.

O aumento do número de ligadores pode resultar em solicitações excessivas na madeira como se poderá confirmar em sub-capítulo seguinte.

Com aumento/diminuição da distância horizontal entre ligadores a quantidade de material dos elementos do empalme varia e por isso pode não ser viável por questões de condicionantes de espaço ou económicas. Por exemplo, o aumento de distância entre ligadores tem de ter em conta o espaço disponível em comprimento para realizar o empalme, nomeadamente do lado que fica junto à parede de apoio. Já a diminuição da distância entre ligadores pode resultar numa sobreposição entre elementos unidos abaixo do mínimo recomendável.

No caso das soluções com chapa de aço, de pregos e parafusos de enroscar, estas não foram mais optimizadas porque ao diminuir a distância entre ligadores e consequentemente o momento, o empalme não cumpriria a valor de sobreposição mínimo nas peças a unir ($0,20 m$). Já na solução de parafusos de porca com tábuas de madeira, não foi possível diminuir as distâncias de maneira a optimizar ainda mais a solução pois os espaçamentos usados são o mínimo regulamentar.

Outra alternativa para reduzir a resistência seria a de diminuir o número de ligadores, no entanto esta opção resulta em forças totais maiores por ligador, podendo não verificar a resistência nestes casos como se poderá confirmar nos capítulos seguintes.

Das duas propostas de regras usadas no dimensionamento do empalme com varões colados, verificou-se que a versão do EC5 de 2003 (usada no quadro acima) conduz a valores mais conservativos, obtendo-se resistências menores. Decidiu-se assim considerar os valores obtidos por esta proposta de regra já que esta opção está do lado da segurança estrutural. As diferenças devem-se sobretudo à não consideração, na resistência ao arrancamento do varão, directa da massa volúmica da madeira nas propostas de 2003, sendo a diferença tanto maior quanto maior for a massa volúmica da madeira utilizada.

4.6.2. Força resistente do ligador ($F_{R,d}$)

A força resistente de cada de cada tipo de ligador varia significativamente. Neste caso, os ligadores de maior resistência são os parafusos de porca nomeadamente os que são aplicados na ligação com chapas de aço.

A resistência mais elevada é justificada pelo diâmetro superior que foi utilizado nos parafusos de porca (6,0 mm) em comparação aos pregos, no facto dos parafusos de porca trabalharem em corte duplo, e se se tratam de ligações madeira-aço.

Nos parafusos de porca utilizou-se um diâmetro maior pois é este o diâmetro mínimo nas gamas de fabrico deste produto.

Os diâmetros dos pregos foram escolhidos tendo em conta as espessuras a unir pois, nas bitolas de pregos da norma utilizada, um diâmetro corresponde geralmente a um comprimento. Ao se optar por tábuas de madeira com metade da secção das vigas e por chapas de aço com espessura mínima de 5 mm, os comprimentos e geometrias dos diâmetros ficaram escolhidos de modo a se verificar a cláusula de sobreposição máxima entre pregos em faces opostas. Salienta-se que a opção de colocar pregos a trabalhar em corte duplo foi posta de parte por não ser uma solução corrente.

De maneira a comparar economicamente as soluções pregadas e com parafusos de enroscar, foi definida uma geometria para estes parafusos que garantam uma resistência da ligação igual à das soluções com pregos. Além disso, esta opção teve em vista avaliar se a maior resistência ao arranque dos parafusos mudava significativamente a diferença de valores de resistência ao corte em comparação com a ligação homóloga pregada, o que de facto não se verificou como se pode confirmar pelos resultados.

Caso se usassem diâmetros e comprimentos iguais nos ligadores, a resistência entre ligadores não iria diferir significativamente pois as regras usadas para o dimensionamento seriam as mesmas.

Caso se pretenda aumentar a força resistente dos ligadores, partindo do pressuposto que não se altera a classe resistente da madeira utilizada, é possível: aumentar o diâmetro do ligador, aumentar a espessura das peças de menor espessura, ou, ainda, substituir as tábuas de madeira por chapas metálicas.

No caso dos pregos, aumentar a espessura das peças é a opção mais eficiente para aumentar a capacidade resistente individual do ligador. No entanto, esta opção pode conduzir, em ligações ao corte simples, a um aumento do comprimento do ligador que pode condicionar a verificação da cláusula referente à sobreposição de ligadores. Além disso, o aumento de espessura dos elementos adicionais, e consequente aumento do comprimento do ligador, pode condicionar também o espaço necessário para a intervenção.

Sendo assim a opção de aumentar a espessura das peças, de maneira a cumprir as verificações de segurança nos dimensionamentos, não é recomendável numa primeira abordagem já que o espaço entre vigas, para realizar as intervenções, é geralmente reduzido.

A substituição de tábuas por chapas de aço pode resultar em forças solicitantes maiores no elemento de madeira bem como tornar a solução menos económica como estudado posteriormente nesta dissertação.

Aumentando o diâmetro as consequências técnicas diferem consoante o tipo de ligador utilizado. No caso dos pregos este aumento resulta geralmente no consequente aumento do comprimento.

Havendo condicionantes de espaço e a necessidade de geralmente cumprir a cláusula da sobreposição entre pregos não se consegue variar o diâmetro para mais que um ou dois diâmetros superiores ao escolhido inicialmente. No caso dos parafusos de enroscar, a gama de fabrico dos parafusos de enroscar tem uma maior variedade em termos de diâmetro e comprimento.

Em todos os ligadores esta opção tem a desvantagem ainda de exigir maiores espaçamentos entre ligadores, dos ligadores ao bordo e dos ligadores ao topo das peças, pelo que o comprimento do empalme aumenta, como se pode verificar por exemplo pelos resultados da solução 1 e da solução 3.

4.6.3. Força total actuante no ligador mais solicitado ($F_{t,d}$)

A força total no ligador metálico mais solicitado de cada solução é praticamente igual, em todas as soluções, à força resistente do ligador. Verifica-se assim mais uma vez a optimização das soluções.

A verificação de segurança, tendo em conta a acção combinada das forças nos ligadores resultantes do esforço transversal e momento, pode ser a condicionante no dimensionamento.

Constatou-se que nas ligações de maior resistência e rigidez, com ligadores de maior diâmetro, a madeira é mais solicitada como é o caso da solução 3 e 4.

Para diminuir a força total no ligador mais solicitado é possível: aumentar o número de ligadores ou aumentar a distância entre ligadores.

Aumentando o número de ligadores, a força actuante no ligador mais solicitado diminui devido ao menor valor da força em cada ligador resultante do esforço transversal na secção e o momento resistente da ligação aumenta.

Apesar desta medida ser eficaz nesta verificação pode ser contraproducente na verificação das tensões de corte. Um número maior de ligadores resulta em mais forças perpendiculares ao fio nos ligadores o que significa que a madeira é mais solicitada em termos de tensões de corte.

4.6.4. Tensão de corte actuante (τ)

A tensão de corte actuante nos elementos de madeira devido às forças exercidas pelos ligadores pode ser também uma verificação condicionante no dimensionamento, em particular no dimensionamento de ligações com parafusos de porca como foi o caso das soluções 3 e 4, onde a tensão actuante de corte nos elementos de madeira está muito próxima da tensão de corte resistente da madeira.

Verifica-se também que as tensões de corte são mais elevadas nas soluções com chapas de aço mesmo utilizando menos ligadores que nas soluções com tábuas de madeira.

Quando numa situação em que se pretenda aumentar o momento resistente, caso se decida aumentar o número de ligadores para este propósito a madeira é mais solicitada.

Nestes casos a ligação poderá não verificar a segurança ao corte, daí que seja uma medida que deva ser aplicada com alguma reserva.

As tensões actuantes mais elevadas foram registadas nos ligadores com maior resistência individual, ou seja nas soluções com aplicação de parafusos de porca.

Quando se pretende aumentar o número de ligadores para verificar a segurança da força no ligador mais solicitado, este aumento pode fazer com que os elementos de madeira não verifiquem as tensões de corte impostas. Uma solução eficiente para este problema é colocar parafusos numa linha vertical ao centro geométrico (ou exactamente no centro) como é o caso da solução 2 e da solução 5.

Colocando um parafuso extra no centro geométrico dos ligadores consegue-se que o esforço transversal resultante das ações de vão se distribua por mais um parafuso e estando o parafuso no centro geométrico de rotação não acrescenta esforços de corte à madeira devido ao momento actuante na ligação.

No caso dos ligadores colocados no eixo vertical do centro da ligação, o esforço transversal distribui-se por um maior número de ligadores e força causada pelo momento nesses ligadores apenas tem componente horizontal, não influenciando assim na verificação das tensões de corte.

Para diminuir as tensões de corte actuantes no plano médio do conjunto de ligadores é possível: aumentar o afastamento entre ligadores ou aumentar a espessura do elemento adicional do empalme (tábua ou chapa).

4.6.5. Dimensões da solução (c,l)

Pelas razões já discutidas nesta dissertação, o espaço disponível entre vigas tem de ser tido em conta na fase de dimensionamento para que seja possível realizar as intervenções escolhidas.

Para quase todas as soluções com ligadores metálicos foram conseguidos comprimentos de empalme óptimos, tendo sido garantida a sobreposição mínima entre peças unidas de 0,20m. Salienta-se que nas soluções com chapas de aço foram obtidos comprimentos de sobreposição menores que o mínimo.

Como as forças resistentes nos empalmes com chapas de aço são significativamente maiores, é possível utilizar distâncias entre ligadores menores e consequentemente os comprimentos dos empalmes são inferiores. A maior resistência da ligação resulta, também, na redução do número de ligadores utilizados em comparação com as soluções de tábuas de madeira.

Apesar da solução com parafusos de porca e tábuas de madeira possuir uma resistência maior obteve um comprimento de empalme semelhante às soluções de empalme de madeira pregado e com parafusos de enroscar. Isto deve-se ao diâmetro do parafuso de porca ser maior e consequentemente exigir espaçamentos superiores.

Caso os esforços de dimensionamento fossem mais elevados, é possível concluir, pelo número de ligadores utilizados e pelos momentos resistentes obtidos, que as soluções que exigem menos espaço em largura e comprimento, são as soluções com chapas de aço.

Estas são por isso as soluções, com ligadores metálicos, mais indicadas quando as condicionantes de espaço são mais exigentes.

Todavia, a solução que ocupa menos espaço é a solução de empalme com varões colados. Esta solução ocupa o mesmo espaço da viga original, tanto em largura como em comprimento.

As dimensões das soluções além de poderem ter influência nas condicionantes de espaço da obra podem também influenciar significativamente o preço das soluções como se verificará posteriormente.

4.6.6. Deformabilidade (θ)

Ao ser criada uma nova ligação, a rigidez da viga diminui pelo que podem aumentar as deformações. As flechas das vigas rehabilitadas não foram calculadas, no entanto estimou-se a deformação pelo método simplificado do eurocódigo em termos da rotação entre a tábua e os elementos unidos. Desta maneira é possível comparar genericamente a deformabilidade de cada solução de intervenção.

A solução teoricamente menos deformável é a solução de varões colados, uma vez que tem um comportamento muito próximo do rígido, não sendo encontrada na bibliografia utilizada expressões para o cálculo da deformação deste tipo de solução.

As diferentes soluções com ligadores metálicos, têm valores de deformabilidade muito próximos, ou mesmo iguais entre si.

A deformabilidade da solução pregada com tábuas é ligeiramente maior que a deformabilidade da solução pregada com chapas de aço, mas a diferença é pouco significativa devido ao valor próximo da rigidez rotacional das duas soluções.

A solução de tábuas com parafusos de porca tem a mesma deformabilidade que a solução com chapas de aço equivalente (solução 4) já que a rigidez rotacional das soluções é igual. A solução 4 tem uma rigidez individual de ligador muito superior à rigidez do ligador da solução mas a solução 4 tenha metade dos ligadores.

Se as soluções com chapa e tábuas tivessem o mesmo número de ligadores, as soluções com chapa seriam menos deformáveis, mas por outro lado haveria um aumento das tensões de corte nos elementos de madeira o que poderia ser condicionante na verificação da resistência.

Pode-se concluir que entre uma solução com tábuas e outra com chapas de aço, na aplicação em vigas com dimensões da ordem de grandeza tratada e com o tipo de madeira aqui utilizada, não há diferenças significativas em termos de deformabilidade. O tipo de ligador, desde que com geometria semelhante, também não influencia significativamente a deformabilidade dos empalmes.

No entanto, esta análise da deformabilidade foi muito genérica, devendo os seus resultados serem considerados com alguma reserva.

4.6.7. Outras comparações de aspecto técnico

A solução de empalme com varões colados possui algumas vantagens e desvantagens em termos técnicos, além das já referidas anteriormente, em relação às soluções de empalme com ligadores metálicos. Destas vantagens destacam-se as seguintes:

- O dimensionamento é bastante simples;
- Os materiais estão mais protegidos contra a corrosão uma vez que se encontram embebidos na madeira;
- Necessidade de menos espaço para realizar a intervenção;
- Necessidade de remover menos área de soalho;

- Melhor comportamento ao fogo, pelo menos nas fases iniciais do incêndio, uma vez que os elementos metálicos estão protegidos pela madeira envolvente.

Como desvantagens enumeram-se as seguintes:

- Não há regras de dimensionamento regulamentares;
- A durabilidade e o comportamento a longo prazo são pouco conhecidos;
- Necessitam de um plano de controlo de qualidade;
- Dificuldade em inspecções posteriores;
- Exigem mão-de-obra especializada.

Por sua vez, as soluções de empalme com ligadores metálicos, possuem vantagens e desvantagens em relação à solução de empalme com varões colados. Das vantagens destacam-se as seguintes:

- Regras de dimensionamento bem definidas;
- Comportamento estrutural e durabilidade bem conhecidos;
- Inspeções fáceis de realizar;
- Não necessita de um controlo de qualidade especial.

Como desvantagens destacam-se as seguintes:

- Dimensionamento moroso e com maior complexidade;
- À partida são soluções com maior deformabilidade e com maior risco de incumprimento da verificação ao estado limite de utilização;
- São soluções mais susceptíveis à corrosão dos componentes metálicos.

Entre as variantes de empalmes com ligadores metálicos existem diferenças de carácter técnico que importa referir, como por exemplo:

- As soluções com tábuas de madeira têm, à partida, uma melhor resistência ao fogo pelas razões explicadas em capítulo anterior;
- Soluções com parafusos de porca e parafusos de enroscar (com cabeça sextavada) necessitam de menos espaço em termos do equipamento necessário para a sua realização;
- As soluções com chapa necessitam de remover menor área de soalho que as que possuem tábuas de madeira.

Em relação à solução de substituição integral da viga destacam-se as seguintes vantagens em relação às soluções de empalmes:

- Não é necessário dimensionar a solução, desde que tenha as mesmas dimensões que as vigas do pavimento e estas verifiquem a segurança nos termos actuais;
- A deformabilidade não aumenta em relação à solução original;
- Melhor resistência ao fogo.

Em termos de desvantagens da solução de substituição integral da viga, destaca-se a:

- Necessidade de remover uma maior área de soalho, o que pode ter consequências económicas e no tempo de realização da intervenção.

No quadro 4.6. encontram-se resumidas estas diferenças entre soluções. Decidiu-se não incluir a deformabilidade neste quadro uma vez que foi um parâmetro menos desenvolvido na dissertação.

	Solução1 Empalme Pregado com tábuas de Madeira	Solução2 Empalme Pregado com chapas de aço	Solução 3 Empalme com parafusos de porca e tábuas de madeira	Solução 4 Empalme com parafusos de porca e chapas de aço	Solução 5 Empalme aparafus ado com tábuas de Madeira	Solução 6 Empalme aparafus ado com chapas de aço	Solução7 Empalme com varões colados	Solução8 Substit. Por Viga Maciça
Regras de Dimensionamento nno EC5	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●●●
Complexidade/Morosidade do processo de cálculo	●	●	●	●	●	●	●●●	●●●
Comportamento estrutural	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●	●●●
Durabilidade	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●●●
Protecção contra a corrosão	●●	●	●●	●	●●	●	●●●	\
Comportamento ao fogo	●●	●	●●	●	●●	●	●●●	●●●
Espaço ocupado	●	●●	●	●●	●	●●	●●●	\
Remoção área de soalho	●●	●●●	●●	●●●	●●	●●●	●●●	●
Inspecção	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●●●
Controlo de Qualidade	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●●●	●	●●●

Legenda:

●●●	muito bem definidas/muito simples/muito bem conhecido/muito bom/pouco espaço/pouca área de soalho/fácil/pouco rigoroso
●●	bem definidas/simples/bem conhecido/bom/algum espaço/alguma área de soalho/difícil/rigoroso
●	mal definidas/complexo/pouco conhecido/mau/muito espaço/muita área de soalho/muito difícil/muito rigoroso
\	não aplicável

Quadro 4.6. – Comparações técnicas das soluções

4.7. Orçamentação de obras de reabilitação

A orçamentação de obras de reabilitação tem um grau de dificuldade e incerteza acrescido em comparação com a orçamentação de obras de construção nova.

Esta maior complexidade e incerteza devem-se sobretudo ao facto da reduzida expressão que a reabilitação ainda tem no mercado nacional e à maior orientação e informação do meio técnico para obras de construção nova. Destes factos resulta uma insuficiência de informação e de publicações técnicas que sejam úteis para a orçamentação de obras de reabilitação, ao contrário do que acontece com as obras de construção nova.

Devido à vasta experiência do meio técnico nas obras de construção nova e aos registos realizados ao longo dos anos da quantidade de recursos utilizados em vários tipos de obra, foram criados documentos que auxiliam, com fiabilidade, a orçamentação de obras. Citam-se, por exemplo, as regras de medição, os métodos de estimação de custos, os cálculos de quantidades de materiais, mão-de-obra e equipamento, específicos para os vários trabalhos da construção.

A acrescer à inexistência de documentação de apoio, a orçamentação de obras de reabilitação tem um grau de incerteza maior devido à maior variabilidade de soluções construtivas existentes e à maior especificidade das obras de reabilitação no geral.

4.8. Orçamentação das soluções de reabilitação

Para a orçamentação das soluções de reabilitação, foram criados dois tipos de documentos: os mapas de quantidades de trabalho e as fichas de rendimento.

Nos mapas de quantidades de trabalho, foram organizadas actividades de obra nos artigos que se pretendem orçar em cada solução, de modo a calcular o preço de venda de cada uma. As fichas de rendimento foram elaboradas tendo em vista a determinação dos preços unitários de cada um dos artigos dos mapas de quantidades de trabalho.

Nos subcapítulos seguintes é descrito todo o processo de organização e elaboração destes documentos usados para a orçamentação, justificando as opções tomadas em termos de unidades de medição, tarefas de obra consideradas, medições, recursos e preços unitários dos recursos. Em paralelo com a descrição deste processo de orçamentação, é feita uma análise da fiabilidade dos resultados finais tendo em conta a forma como o orçamento das soluções foi realizado.

Após esta descrição são apresentados os resultados dos orçamentos e comparados os seus resultados.

4.8.1. Mapas de quantidades de trabalho

Para a orçamentação das soluções, foi elaborado um mapa de quantidades de trabalho para cada uma das soluções, encontrando-se os mesmos no apêndice 2.

A primeira fase de elaboração dos mapas consistiu na definição da sua organização e conteúdo. As actividades a incluir nos artigos foram definidas tendo como base o processo construtivo utilizado que, neste caso, consiste no processo construtivo realizando a intervenção pela parte superior do pavimento, processo esse já explicado em capítulo anterior. Salienta-se que os mapas foram elaborados para se obter o preço por viga intervencionada.

Em termos de organização, os articulados dividiram-se em dois tipos:

- Artigos das operações auxiliares;
- Artigo da execução da solução de intervenção.

As operações auxiliares consistem nas tarefas que são necessárias realizar antes e após da execução das soluções de reabilitação propriamente ditas. Sendo as soluções de reabilitação estudadas similares entre si, todas partilham os mesmos artigos de operações de construção auxiliares, à excepção da solução de substituição integral de viga.

A divisão entre operações de construção e operações auxiliares foi efectuada de maneira a conhecer a influência de cada uma delas no preço total de cada solução. Nesta divisão tem particular interesse o preço do artigo "Remoção e reposição da área de soalho na zona a intervir do pavimento", uma vez que cada solução exige quantidades diferentes. Nos restantes artigos englobados nas operações auxiliares, a quantidade é igual em todas as soluções de empalmes, contudo é necessário para comparação destas soluções com a solução de substituição integral da viga.

O artigo que não pertence à categoria das operações auxiliares corresponde ao trabalho de construção associado à execução concreta da solução de reabilitação. Este artigo contém todas as actividades necessárias para a realização da solução construtiva, como se verificará mais em pormenor quando se descrever a elaboração das fichas de rendimento.

Nos artigos das operações auxiliares e da substituição integral da viga foram utilizadas as unidades correntes na indústria da construção. Para a medição dos artigos referentes à execução de cada empalme foi usada a unidade. Esta opção justifica-se pelo facto das quantidades de materiais estarem directamente dependentes dos esforços de dimensionamento presentes e não ser viável, por exemplo, medir as quantidades da solução ao metro por empalme ou ao metro por extensão da degradação.

Mapa de Quantidades deTrabalho						
Solução de Reabilitação 1-Empalme Pregado com tábuas de madeira(sem manutenção do tecto)						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço parcial	Preço da Solução
1	Operações Auxiliares					
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²				
1.2	Escoramento da viga a intervir	un				
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un				
Total Operações auxiliares						
2	Solução de Reabilitação					
2.1	Execução do empalme com prótese de madeira sã, tábuas de madeira e pregos(24) em aço lisos de cabeça com redonda, com d=5,0 mm e L=100mm	un				

Fig.4.14. – Exemplo de mapa de quantidades de trabalho utilizado

A medição das quantidades dos artigos é descrita no subcapítulo seguinte onde se refere como se obtiveram as quantidades de cada uma das tarefas das fichas de rendimento.

Por último refere-se que se optou por definir designações do artigo de forma simplificada, havendo uma maior pormenorização da actividade da elaboração das fichas de rendimento.

4.8.2. Fichas de rendimento

A elaboração de fichas de rendimento teve em vista a obtenção dos preços unitários dos artigos dos mapas de quantidades de trabalho. Nesta secção, são apresentadas algumas destas fichas. No apêndice 3, inclui-se a totalidade das fichas de rendimentos elaboradas para o efeito.

Nos principais documentos de referência nacionais sobre fichas de rendimento, não existe nenhum exemplo que contemple tarefas semelhantes às soluções de reabilitação, à

excepção de uma minoria, que pudesse servir de referência. Por essa razão foi necessário elaborar fichas de rendimento para cada artigo dos mapas de quantidades de cada solução de reabilitação. As fichas que foram elaboradas com base noutras semelhantes, que são correntemente utilizadas, foram as fichas dos artigos das operações auxiliares, nomeadamente as relativas à remoção/reposição do soalho, escoramento e corte e remoção do troço de viga deteriorado.

As fichas que serviram de referência, pela estrutura e pelo conteúdo, foram as contidas na publicação LNEC “Informação sobre custos na construção” [39].

A maioria dos preços unitários dos recursos utilizados, foram obtidos por consulta de publicações do LNEC. Os restantes foram obtidos mediante a consulta de fornecedores de materiais.

A elaboração das fichas foi realizada de acordo com as seguintes fases:

- Especificação dos recursos utilizados;
- Medição das quantidades dos recursos;
- Cálculo do custo total da operação de cada ficha.

De seguida, cada uma destas fases é descrita sendo apresentadas algumas das fichas de rendimento criadas.

4.8.2.1. Especificação dos recursos utilizados

Em termos de materiais, foram escolhidos os mais recomendados para cada tipo de solução construtiva, sendo a sua designação feita de forma detalhada e com a indicação da norma de fabrico, quando existente. No quadro 4.7. são apresentadas as especificações dos materiais utilizados em cada uma das soluções.

Materiais	Especificação
Prótese do troço a substituir	qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338
Tábuas do empalme	Madeira serrada de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a
Chapas do empalme	Chapas de aço para aplicações estruturais com classe de resistência S235 segundo EN10025-2
Pregos	Pregos lisos, em aço, de cabeça redonda, segundo a NP280
Parafusos de Porca	Parafusos com porca e anilha, segundo a EN 1993-1-1:2004
Parafusos de enroscar	Parafusos de enroscar lisos, em aço, de cabeça de embeber, segundo ISO 261:1998
Varões roscados	Varão roscado em aço inoxidável
Cola	Resina epóxídica, de dois componentes para ancoragens verticais e horizontais
Viga maciça	Madeira serrada de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338

Quadro 4.7. – Especificação dos materiais utilizados

Junto com estes detalhes, a designação inclui também as dimensões geométricas de cada elemento.

Em termos de mão-de-obra foram definidas, praticamente para todas as actividades, uma equipa de dois elementos, com um servente e um carpinteiro. Exceptuam-se o caso do escoramento da viga em que foi seleccionado um montador de estruturas metálicas, e o caso da solução de empalme com varões colados em que foi definido uma equipa de dois elementos, com um servente e um técnico especializado.

No quadro 4.8. estão identificadas as equipas de cada actividade de obra, sendo as actividades referentes às soluções de empalmes com ligadores metálicos agrupadas num só grupo.

Actividade	Equipa
Remoção e reposição de soalho	1xServente 1xCarpinteiro
Montagem e desmontagem do escoramento metálico	1xMontador de Estruturas Metálicas
Corte e remoção de elemento de madeira	1xServente
Remoção da viga deteriorada	1xServente 1xCarpinteiro
Colocação de viga maciça	1xServente 1xCarpinteiro
Execução de empalmes com ligadores metálicos	1xServente 1xCarpinteiro
Execução de empalmes com varões colados	1xServente 1xTécnico Especializado

Quadro 4.8. – Definição das equipas

4.8.2.2. Medição de quantidades

4.8.2.2.1. Materiais

Na medição de quantidades não foram adoptados cuidados e regras específicas, uma vez que não existem regras de medição para estas soluções e, além disso, o carácter simples das soluções aqui estudadas também não o justifica.

As unidades utilizadas para cada elemento medido têm como base as regras de medição do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) [49] e as utilizadas pelos fabricantes de cada elemento das soluções de intervenção. No quadro 4.9. identificam-se as unidades de medição utilizadas em cada elemento que compõe as soluções de reabilitação.

Materiais	Unidades
Prótese do troço a substituir	m ³
Tábuas do empalme	m ³
Chapas do empalme	kg
Pregos	kg
Parafusos de Porca	un
Parafusos de enroscar	un
Varões roscados	un
Cola	kg
Viga maciça	m ³

Quadro 4.9. – Unidades de medição dos materiais

Foi calculado o peso dos pregos em cada solução, tendo em conta tipo e as dimensões segundo as normas de fabrico, não se tendo recorrido a tabelas de conversão de fabricantes.

O cálculo do volume de cola consistiu na diferença de volume entre os furos/cortes e os varões, contabilizando a espessura de linha de cola, o diâmetro e o comprimento dos varões roscados utilizados. Foram ainda considerados desperdícios (em cada varão colado) na ordem dos 40% de volume de cola utilizado.

4.8.2.2.2. Mão-de-obra e equipamento

Parte das quantidades de mão-de-obra e do equipamento foram estimadas com base nas tabelas da publicação “Rendimentos de mão-de-obra, materiais e equipamento em edificação e obras públicas” da autoria de J.Paz Branco [38]. As tabelas utilizadas desta publicação são as referentes a trabalhos de carpintaria de estaleiro, nomeadamente as fichas referentes a tempos de actividades de pregagem, aparafusamento, corte, perfuração e colocação de soalho.

Parte das quantidades de mão-de-obra e equipamento, das restantes actividades, foram estimadas com base no *software* de gerador de preços “CYPE”, nomeadamente o escoramento da viga. As quantidades de mão-de-obra das restantes actividades foram estimadas com base em fichas existentes com trabalhos semelhantes.

Antes de se calcularem as quantidades de mão-de-obra, foram definidas equipas para cada actividade.

Para as soluções de empalmes com ligadores metálicos e de substituição integral da viga, foi definida uma equipa de um carpinteiro e um servente, sendo esta a equipa mais utilizada. Na solução de empalme com varões colados, foi definido uma equipa de um servente e um técnico de mão-de-obra especializada. Foi considerada uma quantidade igual de mão-de-obra para cada elemento da equipa.

No cálculo das quantidades de mão-de-obra, além dos tempos obtidos das tabelas da publicação, já referida, foram adicionados a este tempos adicionais para operações auxiliares e de preparação da actividade. Por exemplo, na pregagem de pregos, foi tido em conta um tempo adicional referente ao tempo de preparação e organização dos materiais e equipamento, o tempo para aceder ao local de intervenção e o tempo utilizado para realizar medições e marcações da geometria da pregagem.

Para a realização das operações auxiliares e de execução das soluções, foram identificados alguns tipos de equipamentos necessários para as seguintes operações:

- Corte transversal dos elementos de madeira deteriorados;
- Perfuração transversal das tábuas e da viga para inserção dos parafusos de porca;
- Perfuração transversal das chapas de aço e da viga para inserção dos parafusos de porca;
- Perfuração transversal das chapas de aço para pregagem e aparafusamento;
- Perfuração longitudinal dos elementos de viga a unir, na solução de empalme com varões colados;
- Limpeza dos furos sob pressão, na solução de empalme com varões colados.

Tendo em conta estas actividades foram escolhidos alguns equipamentos adequados para o efeito, que existem actualmente no mercado. Estes equipamentos podem ser consultados no quadro 4.10.

Operação	Equipamento
Corte transversal de elemento de madeira	Serra de Sabre com potência de 700 Watt
Perfuração transversal de elemento de madeira e aço	Berberquim de 1000 Watt e brocas de madeira e aço com as dimensões necessárias
Perfuração longitudinal de elemento de madeira	Berberquim de 1000 Watt e brocas de madeira com as dimensões necessárias
Limpeza sob pressão	Soprador de ar de 1000 Watt

Quadro 4.10. – Equipamento utilizado

As quantidades das operações de corte e perfuração foram obtidas com base nas tabelas já referidas. A limpeza do ar sob pressão foi estimada. O desvio possível deste tempo pode ser considerado de pouca importância uma vez que é uma operação com um tempo curto já que só existem 4 furos para limpar.

4.8.2.2.3. Área de soalho a remover/repor

A área de soalho a remover/repor em cada solução de intervenção pode influenciar significativamente o preço das soluções daí que é oportuno descrever a maneira como se mediu estas quantidades.

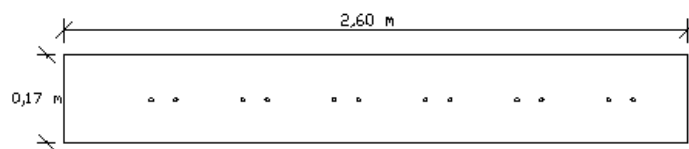


Fig.4.15.- Dimensão das tábuas de soalho utilizadas

Para medir a quantidade necessária de soalho a remover/repor, foi necessário ter em conta a dimensão das tábuas (fig.4.15.), a área de cada tábua de soalho, o comprimento da zona a substituir, o comprimento do empalme e as folgas necessárias para a execução de cada solução.

Para medir a área de soalho necessária a remover/repor de cada solução foi utilizado um método baseado na fig.4.16.

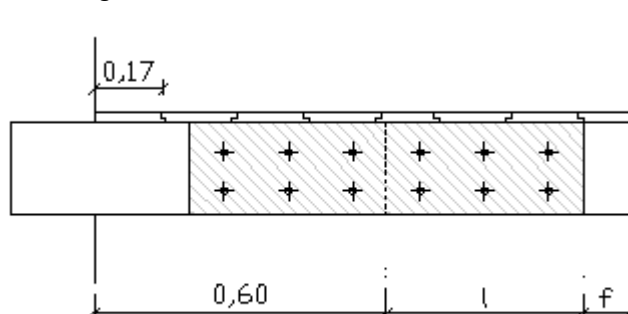


Fig.4.16.- Estimativa da área de soalho necessária a remover/repor

A medição consistiu em determinar quantas tábuas existem no comprimento total da zona a substituir, no comprimento de metade do empalme (l na fig.4.16.) e numa folga (f na fig.4.16.) considerada para a execução dos trabalhos de reabilitação.

Na fig.4.16. por exemplo, num comprimento de $0,60\text{ m}$, correspondente ao troço de viga a substituir, existem sensivelmente quatro tábuas.

Conhecendo o número de tábuas que cada solução necessita remover/repor, é possível calcular a área de soalho através da área de cada tábua.

Soluções de Reabilitação	Comprimento necessário da intervenção (m)	nº de tábuas a remover/repor	Área de soalho a remover/repor (m^2)
Sol.1-Empalme pregado com tábuas	0,90	6	2,64
Sol.2-Empalme pregado com chapas de aço			
Sol.3-Empalme com parafusos de porca e tábuas			
Sol.4-Empalme com parafusos de porca e chapas de aço			
Sol.5-Empalme com parafusos de enroscar e tábuas			
Sol.6-Empalme com parafusos de enroscar e chapas de aço			
Sol.7-Empalme com varões de aço colados	0,70	5	2,20
Sol.8-Substituição integral da viga	4,50	27	11,88

Quadro 4.11. - Área de soalho a remover/repor das soluções de reabilitação

Considerando que todas as tábuas são iguais, e o comprimento de cada uma das soluções calculado anteriormente, obtiveram-se os resultados do quadro 4.11. para a área de soalho a remover/repor de cada intervenção.

4.8.2.3. Cálculo do custo total da operação de cada ficha

Sendo todos os trabalhos de fácil execução, adoptou-se um coeficiente de eficiência de 1,0 para ao cálculo do custo directo de cada ficha, sendo consideradas condições de obra e mão-de-obra óptimas.

Para os custos indirectos e para a percentagem de lucro, foram admitidos valores de 10% e 8 %, respectivamente. Uma vez que as actividades de obra aqui estudadas são da mesma tipologia, e que será o mesmo empreiteiro a executar todas as soluções de intervenção, são valores que não alteram a fiabilidade da análise económica das soluções.

4.9. Análise e comparação económica das soluções

No quadro 4.13. são detalhados os resultados dos orçamentos das soluções de reabilitação. Neste quadro estão presentes os seguintes parâmetros que serão alvo de análise:

- Tempo de execução, que é estimado de cada uma das soluções, incluindo as operações auxiliares, baseado nas quantidades de mão-de-obra e equipamento das fichas de rendimento elaboradas;
- Incidência no custo directo das soluções, que representa a incidência do custo directo dos recursos (materiais, equipamento e mão-de-obra) no custo directo total da solução;
- Preço da solução, que representa o preço da execução da solução propriamente dito, ou seja o preço da execução dos empalmes e o preço da substituição integral da viga;
- Preço das operações auxiliares, que inclui consoante a solução considerada, o preço do corte e remoção do troço de viga deteriorado, o escoramento da viga intervencionada e a remoção e reposição do soalho;
- Preço total da solução, que representa o preço da solução incluindo a execução da solução de reabilitação e o preço das operações auxiliares;

Para a consulta pormenorizada dos orçamentos, nomeadamente dos mapas de quantidades de trabalho e das fichas de rendimento, sugere-se a consulta do apêndice 3.

Solução de Reabilitação		Tempo de execução	Solução(%)			Preço Operações Auxiliares	Preço da Solução	Preço Total
			MAT.	EQ.	M.O.			
Sol.1-Empalme pregado com tábuas(mm)		1h30 min	49%	2%	49%	23,52 €	18,36 €	41,88 €
Sol.2-Empalme pregado com chapas de aço(mm)		1h30 min	74%	1%	25%	23,52 €	30,23 €	53,75 €
Sol.3-Empalme com parafusos de porca e tábuas(mm)		1h30 min	67%	1%	32%	23,52 €	24,96 €	48,48 €
Sol.4-Empalme com parafusos de porca e chapas de aço(mm)		1h20 min	81%	0%	19%	23,52 €	29,68 €	53,20 €
Sol.5-Empalme com parafusos de enroscar e tábuas (mm)		1h30 min	44%	2%	55%	23,52 €	19,43 €	42,95 €
Sol.6-Empalme com parafusos de enroscar e chapas de aço (mm)		1h20 min	75%	1%	24%	23,52 €	31,37 €	54,89 €
Sol.7-Empalme com varões de aço colados(mm)		1h	81%	2%	17%	20,21 €	24,36 €	44,57 €
Sol.8-Substituição integral da viga(mm)		4h	80%	1%	20%	91,26 €	19,52 €	110,78 €

Quadro 4.12. - Orçamentação das soluções de reabilitação

4.9.1. Discussão de resultados

Das soluções analisadas, a solução mais barata é a solução de empalme pregado com tábuas de madeira, embora as soluções de tábuas aparafusadas (parafusos de enroscar) tenham um valor próximo. Esta ligeira diferença de preço entre estas duas soluções deve-se sobretudo à diferença de preço dos pregos e parafusos de enroscar.

A solução com tábuas e parafusos de porca (solução 3) é ligeiramente mais cara que as restantes com tábuas de madeira (solução 1 e solução 5). A diferença de preço deve-se sobretudo ao preço unitário mais elevado dos parafusos de porca mas também aos espaçamentos entre ligadores e ao topo da peça superiores, devido ao maior diâmetro do ligador, e consequentemente maior quantidade de madeira.

As soluções com chapas de aço são mais caras que as soluções com tábuas de madeira devido fundamentalmente ao preço unitário mais elevado das chapas de aço relativamente às tábuas de madeira.

A solução com varões colados revelou-se bastante competitiva uma vez que o preço é próximo da solução mais barata, sendo esta a solução que necessita de remover menor área de soalho e que por isso tem o valor mais baixo em termos de preço das operações auxiliares. Utilizando uma geometria com dois varões de 12 *mm*, esta solução chega mesmo a ser ligeiramente mais barata que o empalme de madeira pregado.

A substituição integral da viga revelou-se a solução mais cara, representado mais do dobro do valor da solução mais barata (solução 1). Apesar do preço individual da solução ser dos mais baixos, o preço da remoção e respectiva reposição do soalho acabou por ter grande influência no preço da solução, representando 82% do preço total.

Nas outras soluções, a influência do preço das operações auxiliares no preço total, também tem um peso significativo, na ordem dos 50% no caso das soluções com tábuas de madeira. Nas soluções com chapas de aço, as operações auxiliares têm um peso no preço total na ordem dos 35%.

São os materiais que têm mais influência no custo directo das soluções, à excepção das soluções que têm um maior número de ligadores e que por isso exigem mais tempo de execução e consequentemente mais mão-de-obra. É o caso da solução 1 e da solução 5, ambas com tábuas de madeira e pregos e parafusos (de enroscar).

Os equipamentos não têm praticamente nenhuma influência no custo directo das soluções, já que os tempos de utilização e o equipamento necessário são muito reduzidos.

Em relação ao tempo estimado de execução das soluções, a mais demorada é a substituição integral da viga. Nas restantes o tempo é semelhante à excepção do empalme com varões colados (solução 7) que é cerca de 30 minutos mais rápida que as restantes com ligadores metálicos.

4.9.2. Análise de outras formas de intervenção

Nas soluções de reabilitação analisadas foi definido que a execução de cada uma fosse feita superiormente ao pavimento e sem a manutenção do tecto estucado. No entanto é possível decidir que as intervenções sejam feitas de outra forma, podendo alterar esta análise económica. Sendo assim, são analisadas aqui as diferenças técnicas de execução entre outras formas de conduzir as intervenções e como estas podem alterar a análise económica nas soluções.

Estas soluções de reabilitação podem ser realizadas de mais duas formas distintas:

- Intervenção superior com manutenção do tecto;
- Intervenção inferior sem manutenção do tecto.

4.9.2.1. Intervenção superior com manutenção do teto

Nesta forma de intervir no pavimento, havendo a necessidade de manter o tecto é necessário realizar um escoramento por uma área envolvente da viga a intervir. Daí que a operação auxiliar de escoramento da viga vai sofrer um acréscimo de preço.

O facto de se manter o tecto implica que cada solução seja feita de uma forma mais cuidada e mais lenta, de forma a não danificar o tecto estucado, o que implica um acréscimo de tempo de execução da solução e consequentemente mais tempo de mão-de-obra e um acréscimo do preço individual (sem operações auxiliares) de cada solução.

Pode-se concluir que as soluções de intervenção são inflacionadas de acordo com o tempo de intervenção daí que as opções mais demoradas são as que sofrem uma maior inflação no preço.

Nesta linha de raciocínio há a possibilidade da solução mais barata, nesta situação, ser o empalme com varões colados ou as soluções com chapas de aço, tratando-se de uma possibilidade pois não se estimou nesta análise técnico-económica o aumento do tempo das intervenções devido à exigência de manter o tecto.

Apesar desta falta de informação, esta possibilidade pode mesmo confirmar-se através do seguinte raciocínio: o acréscimo de tempo da intervenção incide sobretudo nas operações auxiliares de corte e remoção dos troços deteriorados da viga, o que significa que todas as soluções teriam o mesmo acréscimo de tempo de intervenção já que esta é uma operação auxiliar comum em todas as soluções.

Nesta forma de intervir, a opção por substituir integralmente a viga torna-se muito difícil de realizar, daí que se recomenda não ser a opção a escolher para intervenções superiores com manutenção do tecto.

4.9.2.2. Intervenção inferior sem manutenção do tecto

Neste caso, a grande diferença é que não é necessário remover nem repor qualquer área de soalho. Como se viu anteriormente, a área necessária de remoção/reposição de soalho tem uma grande influência no preço das operações auxiliares e no preço total de cada solução, o que significa que esta maneira de intervir nos pavimentos vai modificar significativamente a análise económica realizada.

Por outro lado, a possível remoção ou demolição do tecto vai inflacionar o preço das operações auxiliares de cada solução da mesma maneira.

Daqui pode-se concluir que a melhor solução, neste tipo de intervenção, é a solução de substituição integral da viga dado ter o valor mais baixo, a par com os empalmes de madeira pregados e aparafusados, em termos de preço de solução (sem operações auxiliares). Além disso esta é a solução mais rápida, pois não é necessário remover/repor o soalho que representa mais de 90% do tempo total na intervenção feita superiormente, e a com a sua escolha são garantidas várias vantagens técnicas anteriormente enunciadas.

As soluções com chapas e varões colados tornam-se menos competitivas que as restantes dado terem um preço de solução superior.

4.9.3. Análise das soluções mais caras

4.9.3.1. Substituição integral da viga

Do cálculo da área de soalho necessária a remover/repor em cada solução, constatou-se que além da viga intervencionada existe um número de vigas ao lado que ficam à vista e com o mesmo espaço para realizar exactamente as mesmas intervenções.

Esta análise técnico-económica foi feita apenas para a intervenção de uma viga de um pavimento, no entanto em outras situações é possível que haja mais vigas deterioradas e que estas estejam relativamente próximas.

O facto do preço de remoção/reposição do soalho representar cerca de 82% do preço total da solução de substituição integral da viga, significa que esta solução pode ser mais económica que as restantes para o caso de um maior número de vigas deterioradas e próximas entre si.

Sendo assim interessa conhecer o número de vigas que ficam à vista em consequência da remoção do soalho de cada intervenção, e com isso analisar se a substituição integral é uma opção economicamente viável quando há um maior número de vigas deterioradas próximas entre si.

O número de vigas que ficam à vista em cada solução, decorrente da remoção do soalho, depende do comprimento das tábuas do soalho e da largura e afastamento entre vigas.

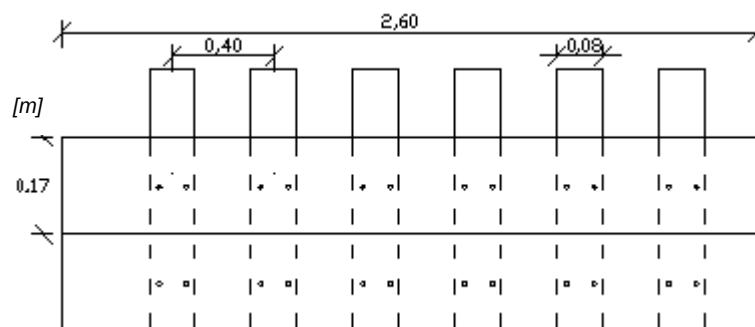


Fig. 4.17. – Estimativa do número de vigas à vista após remoção de tábua de soalho

Neste caso, verificou-se que com as tábuas utilizadas no soalho e as vigas e espaçamento do pavimento, ficam à vista cerca de seis vigas em cada solução de reabilitação após a remoção do soalho como se pode verificar pela fig.4.17.

A partir daqui, a solução de substituição integral da viga foi comparada em função do número de vigas afectadas e próximas entre si, em termos de preço total com soluções de empalmes. Decidiu-se comparar a substituição integral com o empalme pregado de tábuas de madeira (solução 1), e com o empalme com parafusos de porca e chapa de aço (solução 4).

O cálculo dos preços das soluções para mais que uma viga deteriorada na mesma área, consistiu na soma aos preços totais das soluções do preço da solução individual e do preço das operações auxiliares sem a parcela correspondente à remoção/reposição do soalho.

No quadro 4.13. são apresentados os resultados dos preços da substituição integral e do empalme pregado de madeira, para mais que uma viga afectada.

nº de vigas deterioradas	Preço-Empalmes Pregados com tábuas de madeira	Preço-Substituição integral das vigas
2	60,24 €	130,30 €
4	96,96 €	169,34 €
6	133,68 €	208,38 €

Quadro 4.13. - Comparação de preço entre empalmes de madeira pregado e substituição integral de vigas deterioradas próximas

Do quadro 4.13. verifica-se que para estas tábuas de soalho, a substituição integral das vigas não é a opção mais económica para a reabilitação dos pavimentos quando existe mais que uma viga deteriorada na mesma área removida de soalho.

No quadro 4.14. são apresentados os resultados dos preços da substituição integral e do empalme com parafusos de porca e chapa de aço, para mais que uma viga afectada.

nº de vigas deterioradas	Preço-Empalmes com parafusos de porca e chapa de aço	Preço-Substituição integral das vigas
2	82,88 €	130,30 €
4	142,24 €	169,34 €
6	201,60 €	208,38 €

Quadro 4.14. – Comparação de preço entre empalmes com parafusos de porca e chapa de aço e substituição integral de vigas deterioradas próximas

Do quadro 4.14. verifica-se que para estas tábuas de soalho, a substituição integral das vigas não é a opção mais económica quando existe no mínimo vigas deterioradas na mesma área removida de soalho.

4.9.3.2. Empalmes com chapas de aço e com varões colados

Como já foi referido anteriormente, utilizando empalmes com chapas de aço é possível obter comprimentos de empalme e número de ligadores menores do que utilizando empalmes com tábuas de madeira. Estas soluções necessitam de menor quantidade de material, de menor quantidade mão-de-obra e de remover uma menor área de soalho. É assim possível que esta diferença de recursos torne as soluções com chapas de aço mais competitivas economicamente para situações de acções superiores, em comparação com as soluções com tábuas de madeira.

Para as vigas e soluções analisadas não houve diferenças significativas nas soluções com tábuas e chapas em termos de comprimentos de empalme e número de ligadores utilizados pois os esforços são reduzidos. No entanto, para esforços superiores e consequentemente secções e vãos maiores, estas diferenças serão mais acentuadas.

Para analisar e quantificar estas diferenças, decidiu-se dimensionar e orçamentar empalmes pregados com tábuas de madeira e chapas de aço numa viga de secção 0,20x0,20 m com afastamento do 0,60 m e um vão de 5,5 m, deteriorada pelo mesmo tipo e extensão de anomalia detectada na viga anteriormente analisada.

Os resultados deste dimensionamento e orçamento, com as grandezas que se acharam relevantes comparar, são demonstrados no quadro 4.15.

Como esperado, obteve-se uma diferença maior nas quantidades de mão-de-obra das soluções, em comparação com a diferença registada nas duas soluções analisadas anteriormente. A diferença de comprimentos de empalme obtida é também superior. Além disso o número de tábuas a remover da solução com tábuas de madeira é maior neste caso

sendo por isso uma área significativamente maior, o que vai aumentar o preço desta solução.

Verifica-se assim que o preço da solução com chapa de aço é inferior ao preço da solução com tábuas de madeira.

A solução com varões colados acaba por ser mesmo a solução mais barata para esta geometria de viga, sendo ligeiramente mais barata que a solução com chapas de aço.

Isto explica-se devido ao seu menor preço de solução e à menor área de soalho necessária a remover.

Pode concluir-se que para vigas de secção e vão maior (que as analisadas nesta secção), há a tendência das soluções com chapas de aço e com varões colados serem mais económicas que as soluções com tábuas de madeira.

Solução de Reabilitação		$M_{R,d}$ [kN.m]	C [m]	Preço Total(€)	nº tábuas a remover
Sol.1 M Empalme pregado com tábuas para viga 0,20x0,20		5,48	0,76	77	7 un
Sol.3 M Empalme com parafusos e chapa de aço para viga 0,20x0,20		5,37	0,40	69	5 un
Sol.7 M Empalme com varões colados para viga 0,20x0,20		5,90	-	65	4 un

Quadro.4.15. - Comparação de soluções com tábuas de madeira e chapas de aço para secções e vãos maiores

4.10. Análise técnico-económica de decisões de dimensionamento

De forma a completar a análise, decidiu-se analisar algumas opções que foram tomadas na fase de dimensionamento dos empalmes com ligadores metálicos, que podem influenciar o preço, o tempo de execução, e o espaço ocupado em comprimento e largura.

As decisões tomadas que aqui são analisadas estão relacionadas com as seguintes partes do dimensionamento:

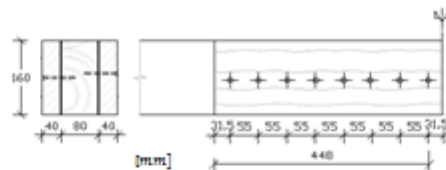
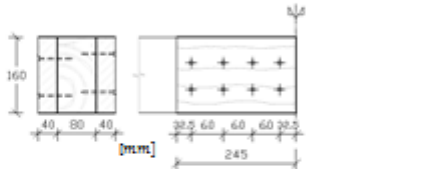
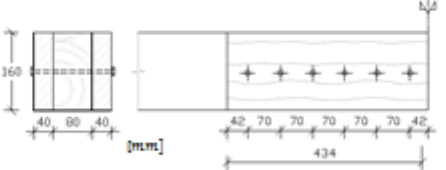
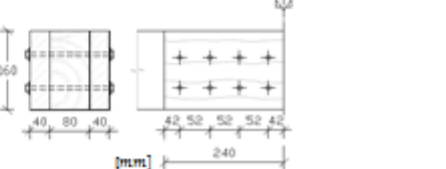
- Geometria da ligação, em termos da distribuição dos ligadores;
- Pré-furação das soluções pregadas;
- Verificação das tensões actuantes de corte.

4.10.1. Distribuição dos ligadores

Nos dimensionamentos realizados optou-se por colocar mais que uma fila de ligadores, nestes casos optou-se por duas filas. No entanto, há a possibilidade dos ligadores serem colocados apenas numa linha. Esta variante pode resultar em diferenças técnicas e económicas, já que por exemplo as forças dos parafusos na madeira actuam, neste caso, na direcção perpendicular ao fio influenciando por isso a geometria da ligação e consequentemente o seu preço.

Posto isto, foram dimensionadas e orçamentadas duas soluções de empalmes de madeira com pregos e parafusos de porca com os mesmos diâmetros e comprimentos utilizados no mesmo tipo de soluções dimensionadas anteriormente, dispondo desta vez os ligadores em cada solução apenas numa fiada.

Os resultados deste dimensionamento e orçamento, com as grandezas que se acharam relevantes comparar, são representados no quadro 4.16.

Solução de Reabilitação		τ [MPa]	C [m]	Tempo de execução	Preço Total(€)
Sol.1 A Empalme pregado com tábuas com lig. em linha		0,58	0,90	1h30 min	46 €
Sol.1 Empalme pregado com tábuas (2 fiadas de ligadores)		0,42	0,49	1h30 min	42 €
Sol.3 A Empalme com parafusos e chapa de aço com lig. em linha		0,84	0,87	1h30 min	49 €
Sol.3 Empalme com parafusos e chapa de aço (2 fiadas de ligadores)		0,92	0,48	1h30 min	48 €

Quadro 4.16. - Comparação de soluções com diferentes números de fiadas de ligadores

Numa primeira abordagem dos resultados verifica-se que o número de ligadores utilizados nas duas soluções é ligeiramente inferior (menos dois ligadores) que nas soluções com duas fiadas de ligadores. Na solução 1A as tensões de corte actuates são superiores às registadas anteriormente. Apesar do menor número total de ligadores, estes agora actuam na perpendicular ao fio da madeira e na direcção vertical, o que significa que as forças a contabilizar para esta verificação de resistência são superiores.

Na solução 3A verificou-se a situação inversa em que as tensões actuates são inferiores. Apesar das forças dos ligadores actuarem agora na vertical, o número de forças a contabilizar nesta verificação de resistência é menor que anteriormente.

Em termos de comprimento de empalme verificou-se que aumentou em ambas as soluções para sensivelmente o dobro.

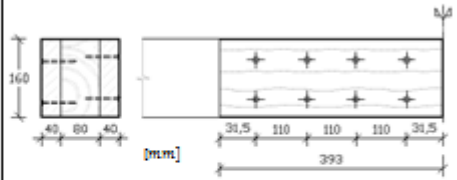
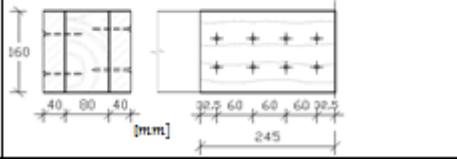
As soluções com uma fiada de ligadores são ambas mais caras que as suas homólogas com duas fiadas, embora esta seja uma diferença pouco significativa. O mesmo acontece com o tempo de intervenção sendo esta diferença também pouco significativa.

A principal desvantagem da opção por ligadores em linha revela-se no comprimento do empalme obtido, que além de aumentar a quantidade de material, pode condicionar as soluções em termos de espaço ocupado, nomeadamente no espaço entre a parede de apoio da viga e a zona de união do empalme.

4.10.2. Pré-furação das soluções pregadas

O facto de se perfurar ou não os elementos pregados, influência directamente tanto os parâmetros resistentes como os económicos. Em termos de parâmetros resistentes, diminui a força resistente individual dos pregos o que altera a geometria da solução e consequentemente a quantidade de material. Em termos económicos a quantidade de mão-de-obra diminui em termos de furação, no entanto pode aumentar em termos de quantidade necessária de soalho a remover.

Para quantificar estas diferenças foi dimensionada e orçamentada uma solução homóloga à solução pregada com tábuas de madeira, com as mesmas características mas sem ser pré-furada. No quadro 4.18. são apresentados os resultados.

Solução de Reabilitação		τ [MPa]	$F_{R,d}$ [kN]	c [m]	Preço Total(€)
Sol.1 sp Empalme pregado com tábuas sem pré- furação		0,10	1,10	0,77	49 €
Sol.1 Empalme pregado com tábuas (com pré- furação)		0,42	1,40	0,49	42 €

Quadro 4.17. - Comparação de soluções com e sem pré-furação

Na solução sem pré-furação verifica-se uma diminuição da força resistente em cerca de 20% e uma diminuição das tensões de corte actuates. O facto da força resistente ter diminuído significa que consequentemente, o comprimento da ligação aumenta e por isso as forças de corte em cada ligador diminuem, reduzindo assim as tensões de corte actuates causadas na madeira pelos pregos.

A solução mais cara é a solução sem pré-furação. Apesar de haver uma diminuição considerável do tempo de execução da solução (sem operações auxiliares), o aumento de quantidade de material e o aumento da necessidade de se remover uma maior área de soalho inflacionam as soluções pregadas sem pré-furação.

Com pré-furação há ainda a vantagem de se conseguir obter dimensões de empalmes menores facilitando a intervenção. A única desvantagem é que aumenta as tensões de corte actuantes devido ao momento flector.

4.10.3. Verificação das tensões de corte na madeira

Caso as soluções de empalme não verifiquem a segurança nas tensões de corte actuantes na madeira causadas pelos ligadores é possível proceder-se de duas formas:

- Aumentar o comprimento dos elementos do empalme
- Aumentar a espessura dos elementos do empalme.

Interessa então identificar qual a melhor opção em termos de condicionantes de espaço e de preço.

Para isso, reduziu-se o comprimento da solução de empalme de madeira com parafusos de porca (solução 3) calculada anteriormente, de maneira a não verificar a segurança às tensões de corte actuantes causadas pelos parafusos nos elementos de madeira. A partir daí fez-se esta verificação através das duas formas acima referidas.

No quadro 4.18. são apresentados os resultados do dimensionamento em termos de espaço ocupado e com referência em cada uma à máxima tensão de corte actuante.

Solução de Reabilitação		τ [MPa]	c [m]	l [m]
Sol.1v.a. Solução aumentando a espessura das tábuas		1,2	0,41	0,17
Sol.1v.b. Solução aumentando o comprimento das tábuas		1,2	0,44	0,16

Quadro 4.18. - Comparação de dois modos de verificar segurança.

Em termos económicos a diferença de quantidade de material é maior no caso de se optar pelo aumento de espessura. No entanto, esta diferença é insignificante não tendo qualquer influência no preço da solução. Em termos de espaço ocupado, a diferença de comprimento não é suficiente para ter influência na área de soalho a remover. O aumento de espessura na solução 1vb, é um aumento também insignificante em termos de espaço ocupado.

A principal vantagem de optar pelo aumento de espessura para verificar as tensões de corte, reside na facilidade de cálculo. Caso o modo de rotura condicionante da solução seja o modo 3, onde não há influência da espessura dos elementos do empalme, esta opção é muito mais prática já que exige apenas um cálculo simples das tensões actuantes de corte. Pela opção de aumentar o comprimento dos ligadores, é necessário refazer o dimensionamento de início.

5.CONCLUSÕES

5.1.Considerações iniciais

Com este trabalho, pretendeu-se contribuir para a tomada de decisão sobre escolha da melhor solução de reabilitação, em termos técnicos e económicos, para situações de entregas de vigas deterioradas por agentes biológicos, nomeadamente fungos de podridão e térmitas. Considera-se que este objectivo central foi alcançado.

Considera-se terem sido alcançados outros objectivos propostos de segunda ordem, como a caracterização das patologias e soluções de reabilitação mais comuns, nos vários elementos constituintes de um pavimento de madeira, bem como a discussão sobre a capacidade dos pavimentos de madeira cumprirem, no seu estado original, as exigências funcionais actuais.

De seguida, são apresentadas as principais conclusões em relação aos objectivos de segunda ordem e à análise técnico-económica efectuada sobre as diferentes soluções de reabilitação.

No final do capítulo, são apresentadas alguns temas possíveis de desenvolvimentos futuros na área da reabilitação, que possam utilizar a abordagem desenvolvida neste trabalho, com vista à escolha de soluções de reabilitação de pavimentos de madeira, ou outros elementos estruturais, de edifícios antigos.

5.2.Conclusões

Foi possível caracterizar as patologias comuns nos pavimentos de madeira, que compromete a sua segurança e funcionalidade, de uma forma específica e prática.

Foram enumeradas e descritas as patologias que afectam os tectos e o soalho e como estas se relacionam com os problemas estruturais nas vigas.

Foram identificadas as características correntes dos pavimentos de madeira dos edifícios de habitação. Foi compilada e analisada, de forma genérica, a capacidade de os pavimentos de madeira cumprirem as principais exigências e requisitos funcionais actuais das obras, identificando quais os requisitos em que a regulamentação actual permite alguma flexibilidade, em casos de obras de reabilitação.

Verificou-se que, apesar de os pavimentos de madeira correntes, em estado original, não cumprirem grande parte dos requisitos actuais, a sua capacidade pode ser substancialmente melhorada através da aplicação de correcções com determinadas soluções construtivas, principalmente no que diz respeito a verificações de requisitos regulamentares de acústica. Foi possível perceber que a regulamentação actual dá alguma

flexibilidade à verificação destes requisitos, nomeadamente em termos acústicos e térmicos, mas o desempenho a eles associado deve ser melhorado para que os pavimentos de madeira satisfaçam as necessidades dos utentes e sejam competitivos com as soluções homólogas de outros materiais.

Em termos de soluções de reabilitação, foram caracterizadas as soluções mais comuns para o problema em questão, com o objectivo de se manter a capacidade resistente do pavimento igual à original. Foi possível conhecer as opções mais utilizadas – nomeadamente as soluções de empalmes com ligadores metálicos e soluções de empalmes utilizando varões colados – em termos de materiais constituintes, de critérios de dimensionamento existentes, de processos construtivos e das condicionantes na execução de cada uma.

Verificou-se que podem ser utilizados vários materiais em cada um deste tipo de empalme, diferindo em termos de preço e resistência mecânica. Decidiu-se utilizar soluções com materiais mais comuns de maneira a que estas fossem o mais económicas possível, para serem comparadas com a substituição integral das vigas.

Em relação às conclusões relacionadas com a análise técnico-económica foi possível aprofundar conhecimentos e responder a várias questões que permitem auxiliar o meio técnico neste tipo de obras.

Comparando o dimensionamento, verificou-se uma grande diferença na morosidade e complexidade associada aos empalmes com ligadores metálicos e com varões colados, sendo o dimensionamento de varões colados mais simples. No entanto, o dimensionamento de soluções de varões colados é alvo de incertezas entre a comunidade científica, existindo várias fórmulas de cálculo que conduzem a valores de resistência substancialmente diferentes.

Verificou-se que os empalmes com ligadores metálicos, embora sejam relativamente simples de executar, requerem um dimensionamento com várias fases e verificações de segurança, devido ao facto de serem ligações resistentes a momentos, para a qual não é suficiente calcular apenas os modos de rotura da ligação. Constatou-se neste tipo de soluções que a verificação de segurança e o preço são fortemente influenciados pela geometria adoptada, nomeadamente a nível: do número de ligadores utilizados, da distância entre estes ao topo e ao bordo das peças, e dos diâmetros adoptados.

As verificações de segurança das soluções de empalmes com ligadores metálicos relacionam-se e têm influência entre si. Uma opção de dimensionamento pode ser favorável para determinada verificação e desfavorável para outra em simultâneo. Por exemplo, o aumento do número de ligadores é favorável para a verificação do momento resistente e da força em cada ligador, mas é desfavorável para a verificação das tensões de corte, nos

elementos mais frágeis, devido às forças verticais exercidas nos ligadores por momento flector.

Todas as verificações de segurança podem ser condicionantes, dependendo da geometria adoptada no pré-dimensionamento e das acções actuantes.

O espaço necessário para realizar as soluções de reabilitação é um factor fulcral no sucesso das intervenções em obra, daí que as dimensões obtidas de cada uma no dimensionamento sejam uma característica técnica importante. As soluções que ocupam o mesmo espaço da viga original são a solução de substituição integral de viga e o empalme de varões colados, sendo estas as melhores soluções para condições de obra em que o espaço para realizar as intervenções é muito reduzido. Em termos de empalmes com ligadores metálicos as soluções de chapas de aço são as que melhor preenchem este requisito. O espaço necessário para realizar a intervenção revela-se também importante - no caso de intervenções realizadas pela parte superior do pavimento - em termos económicos.

Embora a orçamentação das soluções tenha algum grau de incerteza associado, pelas razões anteriormente referidas, considera-se que se obtiveram resultados fiáveis, sendo possível encontrar as soluções mais económicas seguindo o tipo de abordagem adoptada nesta dissertação.

Verificou-se que a área de soalho a remover para a execução das soluções influencia de forma bastante significativa o preço total destas, e consequentemente a solução mais económica depende em primeiro lugar do modo de intervir no pavimento, ou seja se a intervenção é feita pela parte inferior ou superior do pavimento, exigindo ou não a remoção e reposição do soalho existente. No caso de intervenções a partir da parte superior do pavimento, a solução mais económica depende ainda da decisão de manter o tecto original.

No caso de intervenções pela parte superior do pavimento, sem a manutenção do tecto, verificou-se que as opções mais económicas são os empalmes com tábuas madeira pregadas, para o caso de secções pequenas correntes. A nível de ligadores utilizados isto verifica-se até diâmetros de 6,0 *mm*, sendo que a partir deste valor o preço entre soluções de pregos, parafusos de porca ou parafusos de enroscar, não difere muito.

A solução de substituição integral da viga revelou-se como sendo a solução mais cara e mais demorada nesta situação, representando mais do dobro do preço da solução mais barata, e demorando quatro vezes mais que a solução mais rápida. No entanto, caso existam várias vigas deterioradas adjacentes, mostra-se uma solução mais competitiva em termos de preço relativamente às soluções com chapa de aço, no caso de um número mínimo de 6 vigas deterioradas adjacentes, dependendo este valor das dimensões das tábuas de soalho.

Para situações de pavimentos com secções maiores e sujeitos a acções superiores, os empalmes com chapas de aço e com varões colados são tendencialmente as soluções mais baratas. Sensivelmente a partir de secções de viga com dimensões da ordem de grandeza de $0,20 \times 0,20 \text{ m}^2$, as soluções com chapas de aço e com varões colados são mesmo as melhores soluções a nível económico já que exigem menos quantidade de mão-de-obra devido ao menor número de ligadores (no caso dos empalmes com chapa) e à menor área de soalho que é necessário remover.

No caso de intervenções a partir da face superior com manutenção do tecto há uma maior incerteza, quanto às soluções mais económicas, uma vez que não se conhece em concreto a influência, no preço das soluções, da manutenção do tecto. No entanto, pela análise que foi realizada, pode-se considerar que a solução com varões colados é uma solução interessante nesta situação.

Relativamente a intervenções realizadas pela parte inferior do pavimento constatou-se que a melhor solução, a nível técnico-económico, é a substituição integral de viga. O preço da solução (sem operações auxiliares) é praticamente igual ao preço da solução mais barata. Além disso tem ainda várias vantagens nomeadamente a nível: da simplicidade do dimensionamento, da melhor segurança ao fogo, da melhor deformabilidade e a nível de tempo de execução que é significativamente inferior.

A solução de empalme com varões colados mostrou-se bastante competitiva a vários níveis, sendo uma das soluções mais económicas em intervenções feitas pela parte superior do pavimento, simples de dimensionar e mais rápida de executar que qualquer uma das soluções. A grande dúvida na validade destes resultados reside na falta de consenso entre técnicos acerca das regras de dimensionamento a usar e na insuficiente informação sobre a pormenorização destas soluções que pode alterar substancialmente a análise económica.

A nível de opções de dimensionamento, verificou-se que a distribuição dos ligadores por mais que uma fiada e a pré-furação das soluções, são opções bastante vantajosas a nível de condicionantes de espaço e de preço.

5.3.Desenvolvimentos futuros

Existindo uma grande número de soluções de reabilitação para as mais variadas situações de obra e os vários sistemas estruturais existentes, é de grande interesse a crescente publicação de documentação técnica que auxilie os intervenientes de obras de reabilitação, principalmente os projectistas, nas tomadas de decisão sobre as melhores soluções de intervenção em termos técnicos e económicos.

A análise aqui realizada foi desenvolvida num âmbito de obra de reabilitação em que a capacidade resistente de um pavimento de madeira é reposta. Seria interessante realizar

o mesmo tipo de análise para situações em que seja necessário adoptar soluções de reforço estrutural que aumentem a capacidade resistente dos pavimentos de madeira a acções verticais e horizontais.

Seria igualmente importante que esta análise fosse feita para soluções de reforço/reabilitação de outros sistemas estruturais correntes em edifícios antigos, como paredes de alvenaria/mistas estruturais, asnas de madeira, arcos e abóbodas.

As soluções de reabilitação estudadas foram analisadas relativamente à segurança estrutural, sem se ter em conta algumas exigências funcionais que os pavimentos de madeira correntes, no seu estado original, dificilmente verificam tendo em conta as exigências actuais, como já foi discutido nesta dissertação. É portanto uma oportunidade de desenvolvimento futuro analisar soluções de reabilitação que contemplem a verificação de requisitos acústicos, térmicos ou de segurança ao fogo. No caso de pavimentos de madeira, seria interessante realizar a análise técnica e económica de soluções de reabilitação que contemplem a verificação de exigências acústicas.

Como referido neste trabalho, a orçamentação em obras de reabilitação possui uma maior dificuldade e incerteza em relação às obras de construção nova. Isto deve-se em parte à ainda insuficiente bibliografia de apoio existente. Seria importante a realização de trabalhos que fizessem a recolha de dados e o respectivo tratamento estatístico a nível de tempos de trabalhos que são usualmente realizados em obras de reabilitação. Seria possível quantificar com maior rigor a quantidade de recursos, principalmente equipamento e mão-de-obra, de modo a que essa informação pudesse ser usada na elaboração de fichas de rendimento, permitindo obter uma maior fiabilidade na orçamentação de obras de reabilitação.

Bibliografia

- [1] INE e LNEC, “O Parque Habitacional e a Sua Reabilitação – Análise da Evolução entre 2001 e 2011”, Lisboa, 2013.
- [2] Oliveira, C.S., Cabrita, M.A.R., “1º Encontro Nacional Sobre Conservação e Reabilitação de Edifícios”, LNEC, Lisboa, 1982.
- [3] Negrão, J., Faria, A., “Projecto de Estruturas de Madeira”, Publindustria, Lisboa, 2009.
- [4] Córias, V., “Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos – Técnicas Pouco Intrusivas”, Argumentum, 2007.
- [5] Segurado, J.E., “Trabalhos de Carpintaria Civil”, Biblioteca de Instrução Profissional – 6ª Edição, 1942
- [6] Palma, P., Frangi, A., Hugi, E., Cachim, P., Cruz, H., “Fire Resistance Tests on Steel-to-Timber Dowelled Connections Reinforced with Self-Drilling Screws”, 2º Congresso Ibero-Americano de Engenharia de Segurança ao Fogo, Lisboa, 2013
- [7] Brites, R.J., “Avaliação e Segurança das Estruturas Antigas de Madeira”, Tese de Doutoramento, Universidade do Minho, 2011
- [8] Da Costa, L.F.S., “Tipificação de Soluções de Reabilitação de Pavimentos Estruturais em Madeira em Edifícios Antigos”, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009
- [9] Dias, T.I., “Pavimentos de Madeira em Edifícios Antigos - Diagnóstico e Intervenção Estrutural”, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2008
- [10] Guerreiro, L.C.V.M., “Reabilitação, Demolição com Reconstrução de Edifícios nos Bairros Históricos de Lisboa”, Dissertação de Mestrado, ISEL, 2010
- [11] Pimentel, F.M.N.F. “Descrição Técnico-Económica de Soluções de Reabilitação de Pavimentos em Edifícios Antigos”, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2012
- [12] Córias, V., “Reabilitação Urbana: O Sector da Construção não está preparado”, Comunicado de Imprensa, GECORPA, 2009

- [13] Córias, V., “Termos de Responsabilidade e Outras Simplificações na Reabilitação de Edifícios: Uma Bomba Relógio”, Comunicado de Imprensa, GECORPA, 2014
- [14] LNEC, INCI, IHRU, ANACOM, APA, “Regime Excepcional para a Reabilitação Urbana – Guia Prático”, Guia prático, 2014
- [15] Garcia, L., J., “Comportamento dos Materiais Estruturais-Madeira”, Apontamentos da Disciplina de Conservação e Reabilitação de Edifícios, ULHT, Lisboa, 2013
- [16] Mateus, R., “Novas Tecnologias Construtivas com Vista à Sustentabilidade na Construção”, Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2004
- [17] Branco, M., J., “Comportamento das ligações tipo cavilha em estruturas mistas madeira-betão” Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho, 2003
- [18] Marinho, P., M., S., Q., “Avaliação da Durabilidade de Soluções de Reabilitação”, Dissertação de Mestrado, FEUP, 2010
- [19] Cruz, H., “Patologia, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira”, Comunicação do II Curso Livre Internacional do Património, Santarém, 2011
- [20] Cruz, H., “Inspeção, Avaliação e Conservação de Estruturas de Madeira”, Comunicação das 1ª Jornadas de Materiais de Construção, 2011
- [21] Roseiro, J., R., F., “Causas, Anomalias e Soluções de Reabilitação Estrutural de Edifícios Antigos – Estudo de Caso”, Dissertação de Mestrado, Universidade Nova, Lisboa, 2012
- [22] Teixeira, M., J., F., “Reabilitação de Edifícios Pombalinos – Análise Experimental de Paredes de Frontal”, Dissertação de Mestrado, IST, 2010
- [23] Santos, H., M., O., “Validação de Segurança Estrutural de Pavimentos Existentes de Madeira” Dissertação de Mestrado, FEUP, 2009
- [24] LNEC, INH, “Guia Técnico de Reabilitação Habitacional”, Lisboa 2003
- [25] Machado, J., S., “Evolução Recente em Portugal do Mercado de Produtos Lenhosos para a Construção”, LNEC, Lisboa

- [26] Baião, M., Appleton, J., “Pavimentos de Madeira de Edifícios Antigos – Constituição, Patologia e Reabilitação”, Comunicação do 2º ENCORE, LNEC, Lisboa, 1994
- [27] LAURIOLA M.,” Esempi di calcolo secondo i criteri dell’Eurocodice 5 - i Il restauro delle strutture lignee”, Mapei, 2002
- [28] Cruz, J., D., “Deterioração, Reparação e Reforço de Estruturas de Madeira”, Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa, 1993
- [29] Da Rosa, A., F., B., “Caracterização das Ligações Coladas em Estruturas de Madeira”, Dissertação de Mestrado, IST, Lisboa, 2008
- [30] Paula., R., F., “Reabilitação Pouco Intrusiva de Vigas de Madeira - Um Caso de Estudo”, Comunicação PATORREB, 2006
- [31] Hilário, R., S., M., O., “ Dimensionamento de Estruturas de Madeira – Metodologia e Disposições Regulamentares Relativas a Ligações”, Dissertação de Mestrado, IST, 2013
- [32] Stepinac, M., Rajčić, V., Hunger, F.W., Tomasi, R., Serrano, E., “ Comparisson of Design Rules for Glued in Rods and Design Rule Proposal for Implementation in European Standards”, International COuncil for Research and Innovation in Building Construction – Working Comission w18, Timber Structures, Canada, 2013
- [33] Stepinac, M., Hunger, Frank., Rajčić, Vlatka., Van de Kuillen, J.,”Glued-in rods in beech-LVL timber frames”, COST FP1004, Lisboa, Abril 2015
- [34] Johansson, C.J.,”GIROD-Glued in Rods”, Apresentação, SP, Technical Research Institute of Sweden/Linnaeus University, Suécia
- [35] Temtis, “Handbook 1 –Timber Structures”, Leonardo da Vinci Pilot Project, Setembro de 2008
- [36] Racher, P., “Moment resisting joints”, ”, Lecture C14, STEP/Eurofortech, Almere 1995
- [37] Pereira, M., E., “Reabilitação de Tectos Estucados Antigos”, dissertação de mestrado, FEUP, Porto, 2010

- [38] Branco, A., P., "Rendimentos de Mão de obra, Materiais e Equipamento em Edificação e Obras Públicas", edição da Escola Gustave Eiffel, Lisboa 1993
- [39] Fonseca, M., Manso, A., C., Espada, J., C., "Informação sobre custos-Fichas de Rendimento", LNEC, Lisboa 2002
- [40] Cruz,H., Machado, J.,S., Rodrigues,M.," Madeira para Construção-M2:Pinho Bravo para Estruturas", LNEC, Lisboa 1997
- [41] EN1995:1-1. Eurocode 5: Design of timber structures. Part1-1-General common rules for buildings, CEN, 2009
- [42] BS EN338:2003 "Structural timber strenght classes"
- [43] Decreto-lei nº129/2002 "Regulamento dos Requisitos Acústicos dos Edifícios (RRAE) ", Diário da República, 1ª série
- [44] Decreto-lei nº80/2006 "Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE)", Diário da República
- [45] Portaria nº1532/2008 "Regulamento Técnico de Segurança contra Incêndio em Edifícios (RT-SCIE)"
- [46] Decreto-lei nº82/1951 "Regulamento Geral das Edificações Urbanas", Diário da República
- [47] Johanson, C., P., "Glued-in Bolts", Lecture C14, STEP/Eurofortech, Almere 1995
- [48] Trada, IStructE, "Manual for the design of timber building structures to Eurocode 5", United Kingdom 2007
- [49] Fonseca, M., S., "Regras de Medição na Construção", LNEC, Lisboa 1997

Apêndice I – Dimensionamentos das soluções de reabilitação

Dimensionamento de Ligações Resistentes a momentos flectores

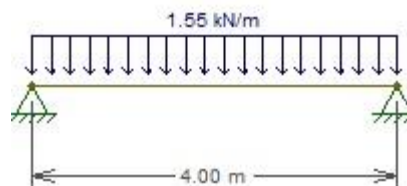
Empalmes para substituição de troço de madeira de viga deteriorada de pavimento de madeira

Acções

$$PP + RCP = 0,70 \text{ kN/m}^2$$

$$\text{Sobrecarga} = 2,0 \text{ kN/m}^2$$

$$p_{sd} = 1,35 \times 0,70 + 1,5 \times 2,0 = 4,0 \text{ kN/m}^2$$

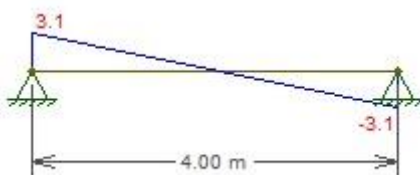


Acção linear nas vigas

$$\text{Vigas afastadas a } 0,4 \text{ m} \rightarrow p_{sd} = 4,0 \times 0,40 = 1,6 \text{ kN/m}$$

Esforços internos

Parte podre com 0,6 m de comprimento no vão $\rightarrow$ Dimensionar ligação para esforços a $x = 3,4 \text{ m}$



Ev[kN]

$$V_{\text{máx}} = \frac{pl}{2} = \frac{1,6 \times 4}{2} = 3,2 \text{ kN}$$

$$V(x) = 3,2 - 1,6x$$

$$V(3,4) = 3,2 - 1,6(3,4)$$

$$V(3,4) = 2,2 \text{ kN}$$



M[kN.m]

$$M_{\text{máx}} = \frac{pl^2}{8} = \frac{1,6 \times 4^2}{8} = 3,2 \text{ kN.m}$$

$$M(x) = 3,2x - 0,8x^2$$

$$M(3,4) = 3,2(3,4) - 0,8(3,4)^2$$

$$M(3,4) = 1,6 \text{ kN.m}$$

Características físicas e resistentes do material

Pinho Bravo Classe de Qualidade E

$$f_{m,k} = 18 \text{ MPa} \quad \rho_k = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{v,k} = 2 \text{ MPa} \quad \rho_{\text{mean}} = 580 \text{ kg/m}^3$$

Verificação ao Estado Limite Último do Pavimento de Madeira

Estado Limite Último de Flexão

$$\sigma_d \leq f_{m,d}$$

$$f_{m,d} = k_h \times k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{Y_m}$$
$$f_{m,d} = 0,8 \times \frac{18}{1,3} = 11 \text{ MPa}$$

$$f_{m,k} = 18 \text{ MPa}$$
$$k_h = 1,0 \rightarrow h = 0,16 \text{ m} > 0,15 \text{ m}$$
$$k_{mod} = 0,8 \rightarrow \text{Classe 1; acção}$$
$$\text{variável de média duração}$$
$$Y_m = 1,3 \rightarrow \text{Madeira Maciça}$$

$$\sigma_d = \frac{M_{sd} \times y}{I}$$
$$\sigma_d = \frac{3,2 \times 0,08}{2,73 \times 10^{-5}} \times 10^{-3}$$
$$\sigma_d = 9,3 \text{ MPa} \leq 11 \text{ MPa}$$

$$M_{sd} = 3,2 \text{ kN.m}$$
$$y = 0,08$$
$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$
$$I = \frac{0,08 \times 0,16^3}{12} = 2,73 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Estado Limite Último de Esforço Transverso

$$\tau_d \leq f_{v,d}$$

$$f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{v,k}}{Y_m}$$
$$f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2,0}{1,3} = 1,2 \text{ MPa}$$

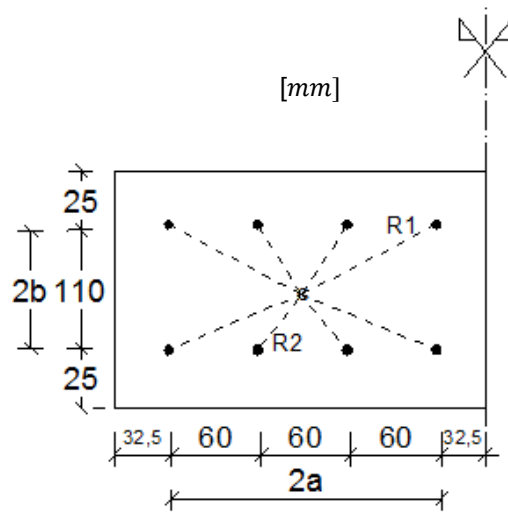
$$f_{v,k} = 2,0 \text{ MPa}$$
$$k_{mod} = 0,8$$
$$Y_m = 1,3$$

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{V_{sd}}{b_{ef} \times h}$$
$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{3,1}{0,054 \times 0,20} \times 10^{-3}$$
$$\tau_d = 0,56 \text{ MPa} \leq f_{v,d}$$

$$V_{sd} = 3,1 \text{ kN}$$
$$b_{ef} = k_{cr} \times b$$
$$k_{cr} = 0,67 \text{ (madeira maciça)}$$
$$b_{ef} = 0,054 \text{ m}$$

Solução 1 – Empalme de madeira pregado

Geometria da ligação



$$d = 4,5 \text{ mm}; l = 90 \text{ mm}$$

$$a_{1min} = 6d = 27 \text{ mm}$$

$$a = 0,090 \text{ m}$$

$$a_{2min} = 5d = 22,5 \text{ mm}$$

$$b = 0,055 \text{ m}$$

$$a_{3tmin} = 7d = 31,5 \text{ mm}$$

$$\sqrt{a^2 + b^2} = 0,11 \text{ m}$$

$$a_{4tmin} = 4d = 18 \text{ mm}$$

$$R_1 = \sqrt{0,090^2 + 0,055^2} = 0,11 \text{ m}$$

$$\text{sen}\beta_1 = \frac{0,090}{0,11} \leftrightarrow \beta_1 = 55^\circ$$

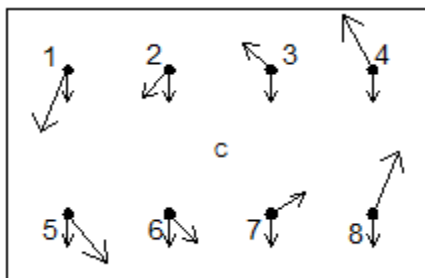
$$\alpha_1 = 90 - \beta_1 = 35^\circ$$

$$R_2 = \sqrt{0,060^2 + 0,055^2} = 0,063 \text{ m}$$

$$\text{sen}\beta_2 = \frac{0,055}{0,063} \leftrightarrow \beta_2 = 63^\circ$$

$$\alpha_2 = 90 - \beta_2 = 27^\circ$$

Força actuante nos ligadores



i) Força resultante do momento flector

$$F_{Md,i} = \frac{K_u}{K_r} \times b_i \times M_{sd}$$

Ligadores 1,4,5,8

$$F_{Md,M\acute{a}x} = \frac{1822}{116} \times 0,11 \times 0,8$$

$$F_{Md,M\acute{a}x} = 1,38 \text{ kN}$$

Nota: Considera-se metade do momento já que esta solução está em corte simples e é constituída por duas tábuas

Ligadores 2,3,6,7

$$F_{Md,1,4} = \frac{1822}{116} \times 0,063 \times 0,8$$

$$F_{Md,1,4} = 0,78 \text{ kN}$$

Cálculo auxiliar:

$$K_u = \frac{2}{3} \times K_{ser}$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \times d}{23}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \times \frac{580^{1,5} \times 4,5}{23} 10^{-3}$$

$$K_u = 1822 \text{ kN/m}$$

$$K_r = \sum_{i=1}^{10} K_{u,i} \times R_i^2$$

$$K_r = 1822 \times 0,11^2 \times 4 + 1822 \times 0,063^2 \times 4$$

$$K_r = 116 \text{ kN.m/rad}$$

Nota: A rigidez a considerar para cada ligador em estados limite último corresponde a dois terços do valor do cálculo do módulo de deslizamento K_{ser} .

ii) Força total máxima resultante da acção combinada de momento flector e de esforço transversal

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(F_{Vs,d} + F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 + \left(F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 \right]}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{V_{s,d}}{(n^{\circ} \text{ de ligadores})}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{2,2}{(10)} \times \frac{1}{2}$$

$$F_{Vs,d} = 0,11 \text{ kN}$$

Nota: Como a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas, o n° de ligadores a considerar é o de ligadores por tábua e considera-se metade do valor de esforço transversal para cada uma.

Os ligadores mais solicitados nesta situação são os ligadores 1 e 5.

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(0,11 + 1,38 \times \frac{0,090}{0,11} \right)^2 + \left(1,25 \times \frac{0,055}{0,092} \right)^2 \right]}$$

$$F_{t,d} = 1,4 \text{ kN}$$

Tensões actuantes de corte nos elementos de madeira

i) Força vertical de corte total

$$F_{vt,d} = V_M - \frac{V_{s,d}}{2}$$

$$F_{vt,d} = 2,30 - \frac{2,2}{2}$$

$$F_{vt,d} = 1,20 \text{ kN}$$

Cálculo auxiliar:

$$V_M = \sum_{i=1}^4 F_{Md,i,y}$$

$$V_M = F_{Md,1,5} \times \sin \alpha_1 \times 2 + F_{Md,2,6} \times \sin \alpha_2 \times 2$$

$$V_M = 1,38 \times \sin 35^{\circ} \times 2 + 0,78 \times \sin 27^{\circ} \times 2$$

$$V_M = 2,30 \text{ kN}$$

ii) Tensão de corte no elemento de madeira de menor espessura (tábua do empalme)

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{F_{vt,d}}{b_{ef} \times h}$$

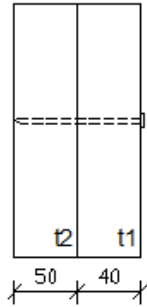
$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{1,20}{0,04 \times 0,67 \times 0,16} \times 10^{-3}$$

$$\tau = 0,42 \text{ MPa}$$

Nota: A tensão actuante é calculada para uma das tábuas já que a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas.

Força resistente dos ligadores

[mm]



$$\rho_k = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 4,5 \text{ mm}$$

$$l = 90 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = f_{ud} = 600 \text{ MPa}$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 36 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{ud} d^{2,6}$$

$$M_{y,Rk} = 8987 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

Modo 1A

$$F_{v,R1,A} = f_{h1} \times t_1 \times d$$

$$F_{v,R1,A} = 36 \times 40 \times 4,5 = 6120 \text{ N}$$

Modo 1B

$$F_{v,R1,B} = \frac{f_{h1} \times t_1 \times d}{1 + \beta} \left[\sqrt{\beta + 2\beta^2(1 + \alpha + \alpha^2) + \beta^3\alpha^2} - \beta(1 + \alpha) \right] + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$\beta = 1,0; \alpha = \frac{t_2}{t_1} = 1,25$$

$$F_{v,R1,B} = 3051 + 236 = 3287 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

$$F_{ax,R} = \min\{f_{ax,d} \times t_{pen} \times d; f_{ax,d} \times t_1 \times d + f_{head} \times d_h^2\}$$

$$d = 4,5 \text{ mm}; t_{pen} = 50 \text{ mm}; d_h = 10 \text{ mm}; t_1 = 40 \text{ mm}$$

$$F_{ax,R} = \min\{4,2 \times 4,5 \times 50; 2,0 \times 40 \times 4,5 + 14,8 \times 10^2\}$$

$$F_{ax,R} = 945 \text{ N}$$

$$F = \frac{F_{ax,R}}{4} = 236 \text{ N}$$

Contribuição máxima do efeito favorável de “Rope effect”: 15%(Pregos)

$$\frac{236}{1962} = 12\% < 15\%$$

$$f_{ax,d} = 20 \times 10^{-6} \times \rho_k^2$$

$$= 4,2 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{head} = 70 \times 10^{-6} \times \rho_k^2$$

$$= 14,8 \text{ N/mm}^2$$

Modo 2A

$$F_{v,R2,A} = 1,05 \frac{f_{h1} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h1} \times t_1^2 \times d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R2,A} = 2498 + 236 = 2734 \text{ N}$$

Modo 2B

$$F_{v,R2,B} = 1,05 \frac{f_{h1} \times t_2 \times d}{1 + 2\beta} \left[\sqrt{2\beta^2(1 + \beta) + \frac{4\beta(1 + 2\beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h1} \times t_2^2 \times d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R2,B} = 3020 + 236 = 3256 \text{ N}$$

Modo 3

$$F_{v,R3} = 1,15 \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h1} \times d \times \frac{2\beta}{1 + \beta}} + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R3} = 1962 + 236 = 2198 \text{ N}$$

Modo de rotura condicionante → Modo 3

Verificação da capacidade resistente da ligação

i) Verificação da segurança no ligador mais carregado

$$\begin{array}{l|l} F_{t,d} \leq F_{R,d} & \\ \hline F_{t,d} = 1,4 \text{ kN} & F_{R,d} = k_{mod} \frac{F_{v,R3}}{Y_m} \\ F_{t,d} = F_{R,d} & F_{R,d} = 0,80 \times \frac{2198}{1,3} \times 10^{-3} \\ & F_{R,d} = 1,4 \text{ kN} \end{array}$$

ii) Verificação da tensão actuante de corte na tábua

$$\begin{array}{l|l} \tau_{v,d} \leq f_{v,d} & \\ \hline \tau_{v,d} = 0,79 \text{ MPa} < f_{v,d} & f_{v,d} = k_{mod} \times \frac{f_{m,k}}{Y_m} \\ & f_{v,d} = 0,8 \times \frac{2,0}{1,3} = 1,2 \text{ MPa} \end{array}$$

iii) Verificação do momento resistente máximo da ligação

$$M_{R,d} \geq M_{S,d}$$

$$\begin{aligned} M_{Rd,Máx} &= \frac{K_r}{K_u \times b_{máx}} \times F_{R,d} \\ M_{Rd,Máx} &= \frac{116}{1822 \times 0,11} \times 1,4 \times 2 \\ M_{Rd,Máx} &= 1,6 \text{ kN.m} = M_{S,d} \end{aligned} \quad \left| \quad M_{S,d} = 1,6 \text{ kN.m} \right.$$

Nota: O momento é multiplicado por dois uma vez que a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas

iv) Verificação da resistência à flexão da tábua do empalme

Estado limite último de flexão

$$\sigma_d \leq f_{m,d}$$

$$\begin{aligned} \sigma_d &= \frac{M_{sd} \times y}{I} \\ \sigma_d &= \frac{0,8 \times 0,08}{1,36 \times 10^{-5}} \times 10^{-3} \\ \sigma_d &= 4,7 \text{ MPa} \leq 11 \text{ MPa} \end{aligned}$$

$$f_{m,d} = 11 \text{ MPa}$$

$$M_{S,d} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \text{ kN.m}$$

Nota: O momento actuante distribui-se pelas tábuas do empalme segundo a rigidez de cada uma. Tendo rigidez igual, cada tábua é solicitada para metade do momento actuante total

$$y = 0,08$$

$$I = \frac{b \times h^3}{12}$$

$$I = \frac{0,04 \times 0,16^3}{12} = 1,36 \times 10^{-5} \text{ m}^4$$

Verificação de disposições regulamentares

Sobreposição entre pregos

$$t - t_2 > 4d$$

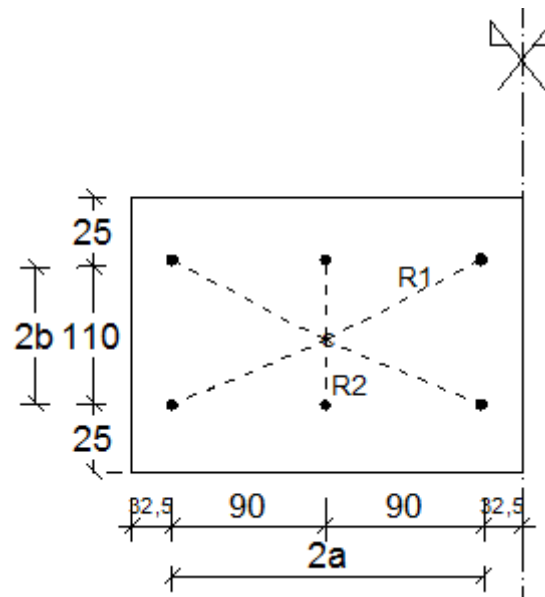
$$4d = 18 \text{ mm}$$

$$t - t_2 = 80 - 50 = 30 \text{ mm} > 4d$$

Nota: t_2 corresponde à espessura penetrada na viga e t à espessura da viga

Solução 2 – Ligação pregada com chapas metálicas

Geometria da ligação



$$d = 3,5 \text{ mm}; l = 65 \text{ mm}$$

$$a_{1min} = 0,7 \times 6d = 15 \text{ mm}$$

$$a_{2min} = 0,7 \times 5d = 12 \text{ mm}$$

$$a_{3tmin} = 7d = 25 \text{ mm}$$

$$a_{4tmin} = 4d = 14 \text{ mm}$$

$$a = 0,090 \text{ m}$$

$$b = 0,055 \text{ m}$$

$$\sqrt{a^2 + b^2} = 0,11 \text{ m}$$

$$R_1 = \sqrt{0,090^2 + 0,055^2} = 0,11 \text{ m}$$

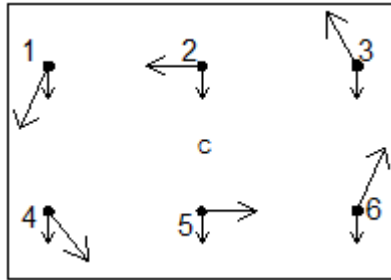
$$\text{sen} \beta_1 = \frac{0,055}{0,11} \leftrightarrow \beta_1 = 30^\circ$$

$$\alpha_1 = 90 - \beta_1 = 60^\circ$$

$$R_2 = 0,055 \text{ m}$$

$$\beta_2 = \alpha_2 = 0^\circ$$

Força actuante nos ligadores



i) Força resultante do momento flector

$$F_{Md,i} = \frac{K_u}{K_r} \times b_i \times M_{sd}$$

Ligadores 1,3,4,6:

$$F_{Md,M\acute{a}x} = \frac{2834}{154} \times 0,11 \times 0,8$$

$$F_{Md,M\acute{a}x} = 1,60 \text{ kN}$$

Nota: Considera-se metade do momento já que esta solução está em corte simples e é constituída por duas tábuas

Ligadores 2,5:

$$F_{Md,1,4} = \frac{2834}{154} \times 0,055 \times 0,8$$

$$F_{Md,1,4} = 0,81 \text{ kN}$$

Cálculo auxiliar:

$$K_u = \frac{2}{3} \times K_{ser}$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \times d}{23}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \times \frac{580^{1,5} \times 3,5}{23} 10^{-3}$$

$$K_u = 1417 \times 2 = 2834 \text{ kN/m}$$

Nota: Como é uma ligação madeira-aço, a rigidez é multiplicada por dois.

$$K_r = \sum_{i=1}^i K_{u,i} \times R_i^2$$

$$K_r = 2834 \times 0,11^2 \times 4 + 2834 \times 0,055^2 \times 2$$

$$K_r = 154 \text{ kN.m/rad}$$

ii) Força total máxima resultante da acção combinada de momento flector e de esforço transverso

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(F_{Vs,d} + F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 + \left(F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 \right]}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{V_{s,d}}{(n^{\circ} \text{ de ligadores})}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{2,2}{(6)} \times \frac{1}{2}$$

$$F_{Vs,d} = 0,19 \text{ kN}$$

Nota: Como a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas, o nº de ligadores a considerar é o de ligadores por tábua e considera-se metade do valor de esforço transverso para cada uma.

Os ligadores mais solicitados nesta situação são os ligadores 1 e 4.

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(0,19 + 1,60 \times \frac{0,090}{0,11} \right)^2 + \left(1,60 \times \frac{0,055}{0,11} \right)^2 \right]}$$

$$F_{t,d} = 1,7 \text{ kN}$$

Tensões actuantes de corte nos elementos de madeira

i) Força vertical de corte total

$$F_{vt,d} = V_M - \frac{V_{s,d}}{2}$$

$$F_{vt,d} = (2,97 \times 2) - \frac{2,2}{2}$$

$$F_{vt,d} = 4,48 \text{ kN}$$

Nota: Como a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas, a força de corte provocada pelos parafusos (devido ao momento) a considerar na viga é multiplicada por dois.

Cálculo auxiliar:

$$V_M = \sum_{i=1}^2 F_{Md,i,y}$$

$$V_M = F_{Md,3,6} \times \sin \alpha_1 \times 2$$

$$V_M = 1,60 \times \sin 60^\circ \times 2 \times 2$$

$$V_M = 2,79 \text{ kN}$$

Nota: Considerando a metade direita da ligação, há dois ligadores com componentes verticais. Os ligadores do meio não exercem forças de corte (devidas ao momento) nos elementos de madeira.

ii) Tensão de corte no elemento de madeira no elemento menos resistente (viga)

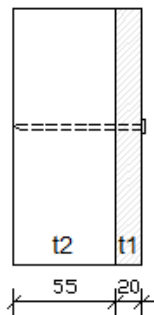
$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{F_{vt,d}}{b_{ef} \times h}$$

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{4,48}{0,08 \times 0,67 \times 0,16} \times 10^{-3}$$

$$\tau = 0,78 \text{ MPa}$$

Força resistente dos ligadores

[mm]



$$\rho_k = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 3,5 \text{ mm}$$

$$l = 65 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = f_{ud} = 600 \text{ MPa}$$

$$t_{chapa} = 5 \text{ mm}$$

$$t_{chapa} > 0,5d \rightarrow \text{chapa espessa}$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 36 \text{ N/m}^2$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{ud} d^{2,6}$$

$$M_{y,Rk} = 6617 \text{ N.mm}$$

Modo 1

$$F_{v,R1} = f_{h1} \times t_2 \times d$$

$$F_{v,R1} = 36 \times 60 \times 3,5 = 7560 \text{ N}$$

Modo 2

$$F_{v,R2} = f_{h1} \times t_1 \times d \left[\sqrt{2 + \frac{4M_{y,Rk}}{f_{h1} \times t_1^2 \times d}} - 1 \right] + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R2,A} = 3241 + 221 = 3462 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

$$F_{ax,R} = f_{ax,d} \times t_{pen} \times d$$

$$d = 3,5 \text{ mm}; t_{pen} = 60 \text{ mm}$$

$$F_{ax,R} = 4,2 \times 3,5 \times 60$$

$$F_{ax,R} = 882 \text{ N}$$

$$\frac{F_{ax,R}}{4} = 221 \text{ N}$$

Contribuição máxima do efeito favorável de “Rope effect”: 15%(Pregos)

$$\frac{221}{2718} = 8,1\% < 15\%$$

$$f_{ax,d} = 20 \times 10^{-6} \times \rho_k^2$$

$$= 4,2 \text{ N/mm}^2$$

Modo 3

$$F_{v,R3} = 2,3 \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h1} \times d} + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R3} = 2497 + 221 = 2718 \text{ N}$$

Modo de rotura condicionante → Modo 3

Verificação da capacidade resistente da ligação

i) Verificação da segurança no ligador mais carregado

$$F_{t,d} \leq F_{R,d}$$

$$F_{t,d} = 1,7 \text{ kN}$$

$$F_{t,d} = F_{R,d}$$

$$F_{R,d} = k_{mod} \frac{F_{v,R3}}{Y_m}$$

$$F_{R,d} = 0,80 \times \frac{2718}{1,25} \times 10^{-3}$$

$$F_{R,d} = 1,7 \text{ kN}$$

ii) Verificação da tensão actuante de corte na viga

$$\tau_{v,d} \leq f_{v,d}$$

$$\tau_{v,d} = 0,78 \text{ MPa} < f_{v,d}$$

$$f_{v,d} = 1,2 \text{ MPa}$$

iii) Verificação do momento resistente máximo da ligação

$$M_{R,d} \geq M_{s,d}$$

$$\begin{array}{l|l} M_{Rd,Máx} = \frac{K_r}{K_u \times b_{máx}} \times F_{R,d} & M_{s,d} = 1,6 \text{ kN.m} \\ M_{Rd,Máx} = \frac{127}{2834 \times 0,091} \times 1,7 \times 2 & \\ M_{Rd,Máx} = 1,7 \text{ kN.m} > M_{s,d} & \end{array}$$

Nota: O momento é multiplicado por dois uma vez que a ligação está ao corte simples e é constituída por duas chapas.

iv) Verificação da resistência à flexão da chapa de aço do empalme

Estado limite ultimo de flexão

$$\sigma_d \leq f_{y,d}$$

$$\begin{array}{l|l} \sigma_d = \frac{M_{sd} \times y}{I} & f_{y,d}(S235) = 204 \text{ MPa} \\ \sigma_d = \frac{0,8}{1,71 \times 10^{-6}} \times 0,08 \times 10^{-3} & M_{s,d} = \frac{1,6}{2} = 0,8 \text{ kN.m} \\ \sigma_d = 37 \text{ MPa} < 204 \text{ MPa} & y = 0,08 \text{ m} \\ & I = \frac{b \times h^3}{12} \\ & I = \frac{0,005 \times 0,16^3}{12} = 1,71 \times 10^{-6} \text{ m}^4 \end{array}$$

Verificação de disposições regulamentares

Sobreposição entre pregos

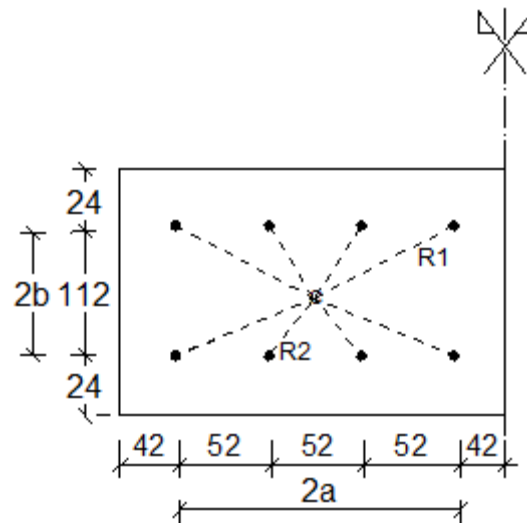
$$t - t_2 > 4d$$

$$4d = 14 \text{ mm}$$

$$t - t_2 = 80 - 60 = 20 \text{ mm} > 4d$$

Solução 3 – Empalme com parafusos de porca de tábuas de madeira

Geometria da ligação



$$d = 6,0 \text{ mm}$$

$$a_{1min} = 6d = 36 \text{ mm}$$

$$a_{2min} = 5d = 30 \text{ mm}$$

$$a_{3tmin} = 7d = 42 \text{ mm}$$

$$a_{4tmin} = 4d = 24 \text{ mm}$$

$$a = 0,078 \text{ m}$$

$$b = 0,056 \text{ m}$$

$$\sqrt{a^2 + b^2} = 0,096 \text{ m}$$

$$R_1 = \sqrt{0,078^2 + 0,056^2} = 0,096 \text{ m}$$

$$\text{sen}\beta_1 = \frac{0,056}{0,096} \leftrightarrow \beta_1 = 36^\circ$$

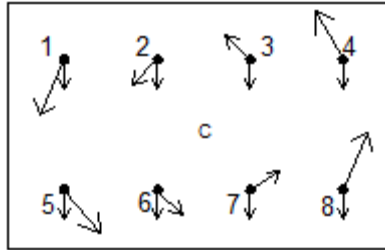
$$\alpha_1 = 90 - \beta_1 = 54^\circ$$

$$R_2 = \sqrt{0,026^2 + 0,056^2} = 0,062 \text{ m}$$

$$\text{sen}\beta_2 = \frac{0,056}{0,062} \leftrightarrow \beta_2 = 65^\circ$$

$$\alpha_2 = 90 - \beta_2 = 25^\circ$$

Força actuante nos ligadores



i) Força resultante do momento flector

$$F_{Md,i} = \frac{K_u}{K_r} \times b_i \times M_{sd}$$

Ligadores 1,4,5,8

$$F_{Md,M\acute{a}x} = \frac{4858}{255} \times 0,096 \times 1,6$$

$$F_{Md,M\acute{a}x} = 2,96 \text{ kN}$$

Nota: Considera-se a totalidade do momento já que esta solução está em corte duplo

Ligadores 2,3,6,7

$$F_{Md,2,3} = \frac{4858}{255} \times 0,062 \times 1,6$$

$$F_{Md,2,3} = 1,89 \text{ kN}$$

Cálculo auxiliar:

$$K_u = \frac{2}{3} \times K_{ser}$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \times d}{23}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \times \frac{580^{1,5} \times 6,0}{23} 10^{-3}$$

$$K_u = 2429 \times 2 = 4858 \text{ kN/m}$$

$$K_r = \sum_{i=1}^8 K_{u,i} \times R_i^2$$

$$K_r = 4858 \times 0,096^2 \times 4 + 4858 \times 0,062^2$$

$$K_r = 255 \text{ kN.m/rad}$$

Nota: como a ligação está ao corte duplo, a rigidez individual do ligador é multiplicada por dois.

ii) Força total máxima resultante da acção combinada de momento flector e de esforço transversal

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(F_{Vs,d} + F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 + \left(F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 \right]}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{V_{s,d}}{(n^{\circ} \text{ de ligadores})}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{2,2}{(8)}$$

$$F_{Vs,d} = 0,28 \text{ kN}$$

Nota: Como a ligação está ao duplo e é constituída por duas tábuas, o nº de ligadores a considerar é o nº total de ligadores

Os ligadores mais solicitados nesta situação são os ligadores 1 e 5.

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(0,28 + 2,96 \times \frac{0,078}{0,096} \right)^2 + \left(2,96 \times \frac{0,056}{0,100} \right)^2 \right]}$$

$$F_{t,d} = 3,20 \text{ kN}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{F_{Md,Máx} \times a + \sqrt{a^2 + b^2} \times F_{Vs,d}}{F_{Md,Máx} \times b} \right]$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{2,96 \times 0,078 + 0,096 \times 0,28}{2,96 \times 0,056} \right]$$

$$\alpha = 57^{\circ}$$

Tensões actuantes de corte nos elementos de madeira

i) Força vertical de corte total

$$F_{vt,d} = V_M - \frac{V_{s,d}}{2}$$

$$F_{vt,d} = 6,36 - \frac{2,2}{2}$$

$$F_{vt,d} = 5,26 \text{ kN}$$

Cálculo Auxiliar:

$$V_M = \sum_{i=1}^4 F_{Md,i,y}$$

$$V_M = F_{Md,1,5} \times \sin \alpha_1 \times 2 + F_{Md,2,6} \times \sin \alpha_2 \times 2$$

$$V_M = 2,96 \times \sin 54^{\circ} \times 2 + 1,86 \times \sin 25^{\circ} \times 2$$

$$V_M = 6,36 \text{ kN}$$

Nota: Considerando a metade direita da ligação, há quatro ligadores com componentes verticais. Os ligadores do meio não exercem forças de corte nos elementos de madeira.

ii) Tensão de corte no elemento de madeira de menor espessura

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{F_{vt,d}}{b_{ef} \times h}$$

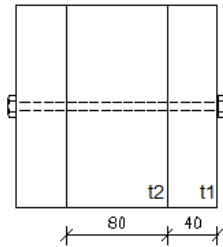
$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{5,26}{0,08 \times 0,67 \times 0,16} \times 10^{-3}$$

$$\tau = 0,92 \text{ MPa}$$

Nota: A tensão actuante é calculada para as duas tábuas já que a ligação está ao corte duplo.

Força resistente dos ligadores

[mm]



$$\rho_k = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 6,0 \text{ mm}$$

$$l = 120 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = f_{ud} = 400 \text{ MPa}$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k$$

$$f_{h,0,1} = f_{h,0,2} = 35 \text{ N/m}^2$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{ud} d^{2,6}$$

$$M_{y,Rk} = 12658 \text{ N.mm}$$

$$f_{h\alpha 1} = \frac{f_{h,0,1}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h\alpha 1} = \frac{35}{1,44 \sin^2 57^\circ + \cos^2 57^\circ}$$

$$f_{h\alpha 1} = 26 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 57^\circ$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \rightarrow \text{Resinosas}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015(6)$$

$$k_{90} = 1,44$$

Modo 1A

$$F_{v,R1\alpha 1,A} = f_{h\alpha 1} \times t_1 \times d$$

$$F_{v,R1\alpha 1,A} = 26 \times 40 \times 6 = 6240 \text{ N}$$

$$F_{v,R1\alpha 1,A} = 0,5 \times f_{h\alpha 1} \times t_2 \times d$$

$$F_{v,R1\alpha 1,A} = 0,5 \times 26 \times 80 \times 6 = 6240 \text{ N}$$

Modo 2

$$F_{v,R2\alpha 1} = 1,05 \frac{f_{\alpha 1} \times t_1 \times d}{2 + \beta} \left[\sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta) \times M_{y,Rk}}{f_{h1} \times t_1^2 \times d}} - \beta \right] + \frac{F_{ax,R}}{4}$$

$$F_{v,R2\alpha 1} = 2505 + 626 = 3131 \text{ N}$$

Modo 3

$$F_{v,R3} = 1,15 \sqrt{\frac{4\beta}{1+\beta} \times M_{y,Rk} \times f_{h1} \times d + \frac{F_{ax,R}}{4}}$$

$$F_{v,R3\alpha1} = 2285 + 571 = 2856 \text{ N}$$

Modo de rotura condicionante → Modo 3

Cálculo auxiliar:

$$F_{ax,R} = \min\{N_{Rt,k}; N_{Rc,90,k}\}$$

Resistência á tracção do parafuso:

$$N_{Rt,k} = f_{y,k} \times A_{tr}$$

$$N_{Rt,k} = 240 \times \pi \times 3,0^2 = 549.653 \text{ N}$$

Resistência ao esmagamento da madeira sobre a anilha:

$$N_{Rc,90,k} = \sigma_{c90,k} \times A_{anilha}$$

$$N_{Rc,90,k} = 3f_{c90,k} \times \pi \times (d_{anilha}^2 - d^2)$$

$$N_{Rc,90,k} = 3 \times 2,2\pi \times (24^2 - 6^2) = 11.197 \text{ N}$$

$$\frac{F_{ax,R}}{4} = 137413 \text{ N}$$

Contribuição máxima do efeito favorável de “Rope effect”: 25%(Parafusos de porca)

$$\frac{F_{ax,R}}{4} = 0,25 \times 2505 = 626 \text{ N}$$

$$\frac{F_{ax,R}}{4} = 0,25 \times 2285 = 571 \text{ N}$$

$$f_{y,k}(\text{classe 4.6}) = 240 \text{ MPa}$$

$$A_{tr} = \frac{A_{\text{parte lisa}} + A_{\text{parte rosca}}}{2}$$

$$A_{tr} = 27 \text{ mm}^2$$

Nota: Aqui foram admitidos valores de diâmetro da rosca de 5,6 mm.

$$f_{c90,k}(C18) = 2,2 \text{ MPa}$$

$$d = 6,0 \text{ mm}$$

$$d_{\min,anilha} = 3d = 18 \text{ mm}$$

$$d_{anilha} = 24 \text{ mm}$$

Verificação da capacidade resistente da ligação

i) Verificação da segurança no ligador mais carregado

$$\begin{array}{l|l} F_{t,d} \leq F_{R,d} & \\ \hline F_{t,d} = 3,20 \text{ kN} & F_{R,d} = k_{mod} \frac{F_{v,R3}}{Y_m} \\ F_{t,d} < F_{R,d} & F_{R,d} = 0,80 \times \frac{2856}{1,30} \times 2 \times 10^{-3} \\ & F_{R,d} = 3,5 \text{ kN} \end{array}$$

Nota: Estando esta ligação ao corte duplo, a força resistente é multiplicada por dois

ii) Verificação da tensão actuante de corte nas tábuas

$$\begin{array}{l|l} \tau_{,d} \leq f_{v,d} & \\ \hline \tau_{,d} = 1,0 \text{ MPa} < f_{v,d} & f_{v,d} = 1,2 \text{ MPa} \end{array}$$

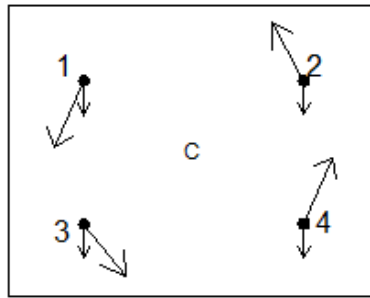
iii) Verificação do momento resistente máximo da ligação

$$\begin{array}{l|l} M_{R,d} \geq M_{s,d} & \\ \hline M_{Rd,M\acute{a}x} = \frac{K_r}{K_u \times b_{m\acute{a}x}} \times F_{R,d} & M_{s,d} = 1,6 \text{ kN.m} \\ M_{Rd,M\acute{a}x} = \frac{255}{4858 \times 0,096} \times 3,5 & \\ M_{Rd,M\acute{a}x} = 1,9 \text{ kN.m} > M_{s,d} & \end{array}$$

iv) Verificação da resistência à flexão das tábuas do empalme

Esta verificação é igual à verificação anteriormente feita na solução 1 uma vez que as tábuas têm as mesmas dimensões.

Força actuante nos ligadores



i) Força resultante do momento flector

$$F_{Md,i} = \frac{K_u}{K_r} \times b_i \times M_{sd}$$

Ligadores 1, 2, 3, 4,:

$$F_{Md,M\acute{a}x} = \frac{9717}{255} \times 0,081 \times 1,6$$

$$F_{Md,M\acute{a}x} = 4,94 \text{ kN}$$

Cálculo Auxiliar:

$$K_u = \frac{2}{3} \times K_{ser}$$

$$K_{ser} = \frac{\rho_m^{1,5} \times d}{23}$$

$$K_u = \frac{2}{3} \times \frac{580^{1,5} \times 6,0}{23} 10^{-3}$$

$$K_u = 2429 \times 2 \times 2 = 9717 \text{ kN/m}$$

Nota: Como é uma ligação madeira-aço e a trabalhar ao corte duplo, a rigidez é multiplicada por dois e pelo número de planos de corte.

$$K_r = \sum_{i=1}^i K_{u,i} \times R_i^2$$

$$K_r = 9717 \times 0,081^2 \times 4$$

$$K_r = 255 \text{ kN.m/rad}$$

ii) Força total máxima resultante da acção combinada de momento flector e de esforço transversal

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(F_{Vs,d} + F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 + \left(F_{Md,M\acute{a}x} \times \frac{b}{\sqrt{a^2 + b^2}} \right)^2 \right]}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{V_{s,d}}{(n^{\circ} \text{ de ligadores})}$$

$$F_{Vs,d} = \frac{2,2}{(4)}$$

$$F_{Vs,d} = 0,55 \text{ kN}$$

Nota: Como a ligação está ao corte simples e é constituída por duas tábuas, o nº de ligadores a considerar é o de ligadores por tábua.

Os ligadores mais solicitados nesta situação são os ligadores 1 e 3.

$$F_{t,d} = \sqrt{\left[\left(0,55 + 4,94 \times \frac{0,058}{0,081} \right)^2 + \left(4,94 \times \frac{0,056}{0,081} \right)^2 \right]}$$

$$F_{t,d} = 5,33 \text{ kN}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{F_{Md,Máx} \times a + \sqrt{a^2 + b^2} \times F_{Vs,d}}{F_{Md,Máx} \times b} \right]$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left[\frac{4,94 \times 0,058 + 0,081 \times 0,28}{4,94 \times 0,056} \right]$$

$$\alpha = 50^{\circ}$$

Tensões actuantes de corte nos elementos de madeira

i) Força vertical de corte total

$$F_{vt,d} = V_M - \frac{V_{s,d}}{2}$$

$$F_{vt,d} = 7,11 - \frac{2,2}{2}$$

$$F_{vt,d} = 6,01 \text{ kN}$$

Cálculo Auxiliar:

$$V_M = \sum_{i=1}^2 F_{Md,i,y}$$

$$V_M = F_{Md,1,3} \times \sin \alpha_1 \times 2$$

$$V_M = 4,94 \times \sin 46^{\circ} \times 2$$

$$V_M = 7,11 \text{ kN}$$

Nota: Considerando a metade direita da ligação, há dois ligadores com componentes verticais.

ii) Tensão de corte no elemento menos resistente

$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{F_{vt,d}}{b_{ef} \times h}$$

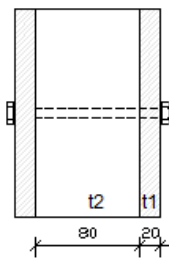
$$\tau_d = \frac{3}{2} \times \frac{6,01}{0,08 \times 0,67 \times 0,16} \times 10^{-3}$$

$$\tau_d = 1,1 \text{ MPa}$$

Nota: A tensão actuante é calculada para a viga de madeira, já que é este o elemento de madeira existente na ligação. A tensão de corte nas chapas de aço não é condicionante.

Força resistente dos ligadores

[mm]



$$\rho_k = 460 \text{ kg/m}^3$$

$$d = 6,0 \text{ mm}$$

$$l = 120 \text{ mm}$$

$$\sigma_r = f_{ud} = 400 \text{ MPa}$$

$$t_{chapa} = 5 \text{ mm}$$

$$t_{chapa} > 0,5d \rightarrow \text{chapa espessa}$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 0,082(1 - 0,01d) \rho_k$$

$$f_{h1} = f_{h2} = 35 \text{ N/mm}^2$$

$$M_{y,Rk} = 0,3 \times f_{ud} d^{2,6}$$

$$M_{y,Rk} = 12658 \text{ N}\cdot\text{mm}$$

$$f_{h\alpha 1} = \frac{f_{h,0,1}}{k_{90} \sin^2 \alpha + \cos^2 \alpha}$$

$$f_{h\alpha 1} = \frac{35}{1,44 \sin^2 50^\circ + \cos^2 50^\circ}$$

$$f_{h\alpha 1} = 28 \text{ N/mm}^2$$

$$\alpha = 50^\circ$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015d \rightarrow \text{Resinosas}$$

$$k_{90} = 1,35 + 0,015(6)$$

$$k_{90} = 1,44$$

Modo 1A

$$F_{v,R1\alpha 1,A} = 0,5 \times f_{h\alpha 1} \times t_2 \times d$$

$$F_{v,R\alpha 1} = 0,5 \times 28 \times 80 \times 6 = 6720 \text{ N}$$

Modo 3

$$F_{v,R3} = 2,3 \sqrt{2M_{y,Rk} \times f_{h2} d + \frac{F_{ax,R}^2}{4}}$$

$$F_{v,R3\alpha 1} = 3354 + 839 = 4193 \text{ N}$$

Cálculo auxiliar:

$$\frac{F_{ax,R}}{4} = 3354 \times 0,25 = 839 \text{ N}$$

Nota: A força favorável de “Rope Effect” é igual à calculada para a solução 3.

Modo de rotura condicionante → Modo 3

Verificação da capacidade resistente da ligação

i) Verificação da segurança no ligador mais carregado

$F_{t,d} \leq F_{R,d}$ $F_{t,d} = 5,33 \text{ kN}$ $F_{t,d} < F_{R,d}$	$F_{R,d} = k_{mod} \frac{F_{v,R3}}{Y_m}$ $F_{R,d} = 0,80 \times \frac{4193}{1,25} \times 2 \times 2 \times 10^{-3}$ $F_{R,d} = 5,4 \text{ kN}$ Nota: Estando esta ligação ao corte duplo, a força resistente é multiplicada por dois
---	--

ii) Verificação da tensão actuante de corte no elemento de madeira de menor espessura

$\tau \leq f_{v,d}$ $\tau = 1,0 \text{ MPa} < f_{v,d}$	$f_{v,d} = 1,2 \text{ MPa}$
---	-----------------------------

iii) Verificação do momento resistente máximo da ligação

$M_{R,d} \geq M_{s,d}$ $M_{Rd,Máx} = \frac{K_r}{K_u \times b_{máx}} \times F_{R,d}$ $M_{Rd,Máx} = \frac{255}{9717 \times 0,081} \times 5,4$ $M_{Rd,Máx} = 1,7 \text{ kN.m} > M_{s,d}$	$M_{s,d} = 1,6 \text{ kN.n}$
--	------------------------------

iv) Verificação da resistência das chapas de aço do empalme

Esta verificação é igual à verificação anteriormente feita na solução 2 uma vez que as chapas têm as mesmas dimensões.

Solução 5 – Empalme com parafusos de enroscar e tábuas de madeira

Geometria da ligação, forças actuantes nos ligadores, tensões actuantes

A geometria, força e tensões actuantes desta solução são iguais às da solução 1, uma vez que foi escolhido, num catálogo de fabricante, um parafuso com características geométricas semelhantes aos pregos utilizados na solução 1. Tendo o parafuso escolhido um diâmetro menor que 6,0 mm, são aplicáveis as regras de dimensionamento de pregos.



$$d = 6,0 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d \text{ se } c \geq 4d$$

$$d_{ef} = 1,10d_{cr} \text{ se } c < 4d$$

$$c = 10 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = 1,10 \times 4,05 = 4,5 \text{ mm}$$

$$l = 90 \text{ mm}$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$A = 50 \text{ mm}$$

$$c = t_{pen} - b$$

$$c = (l - b_{tábua}) - b$$

$$c = (90 - 40) - 40$$

$$c = 10 \text{ mm}$$

Nota: “c” corresponde à parte lisa do parafuso que penetra na peça que recebe a ponta.

Força resistente dos ligadores

Pelas razões anteriormente explicadas, a força resistente dos ligadores é igual à da solução 1. Apesar de haver um aumento da força de “Rope effect”, devido à maior resistência dos parafusos de enroscar ao arranque, esta não aumenta significativamente a força resistente de cálculo deste ligador.

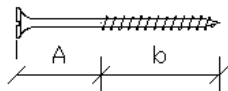
Verificação da capacidade resistente da ligação

A verificação da capacidade resistente da ligação desta solução é igual à da solução 1.

Solução 6 – Empalme com parafusos de enroscar e chapas metálicas

Geometria da ligação, forças actuantes nos ligadores, tensões actuantes

A geometria, força e tensões actuantes desta solução são iguais às da solução 2, uma vez que foi escolhido num catálogo de fabricante, um parafuso com características geométricas semelhantes aos pregos utilizados na solução 2. Tendo o parafuso escolhido um diâmetro menor que 6,0 mm, são aplicáveis as regras de dimensionamento de pregos.



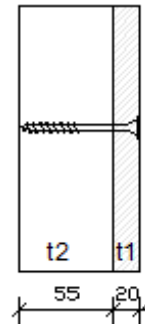
$$d = 3,5 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = d \text{ se } c \geq 4d$$

$$d_{ef} = 1,10d_{cr} \text{ se } c < 4d$$

$$c = 25 \text{ mm}$$

$$d_{ef} = 3,5 \text{ mm}$$



$$l = 60 \text{ mm};$$

$$b = 40 \text{ mm}$$

$$A = 35 \text{ mm}$$

$$c = t_{pen} - b$$

$$c = (l - b_{chapa}) - b$$

$$c = (60 - 5) - 30$$

$$c = 25 \text{ mm}$$

Força resistente dos ligadores

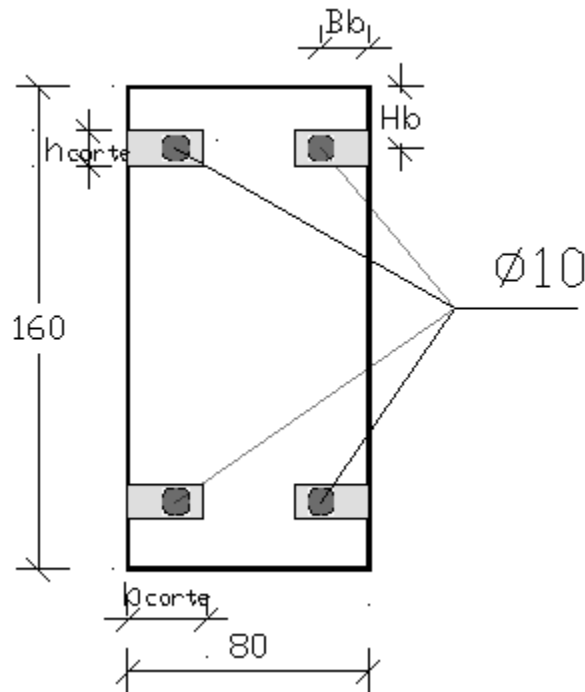
Pelas razões anteriormente explicadas, a força resistente dos ligadores é igual à da solução 2. Apesar de haver um aumento da força de “Rope effect”, devido à maior resistência dos parafusos de enroscar ao arranque, este não aumenta significativamente a força resistente de cálculo deste ligador.

Verificação da capacidade resistente da ligação

A verificação da capacidade resistente da ligação desta solução é igual à da solução 2.

Solução 7 – Empalme com varões colados

Geometria da ligação



$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

$$l_{amin} = \max\{0,4d^2; 8d\} = 80 \text{ mm}$$

$$l_a = 80 \text{ mm}$$

$$H_{bmin} = 4d = 25 \text{ mm}$$

$$B_{bmin} = 4d = 25 \text{ mm}$$

$$H_b = 40 \text{ mm}$$

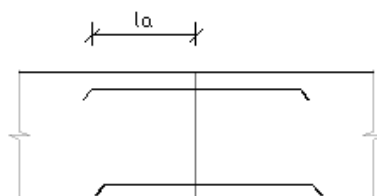
$$B_b = 40 \text{ mm}$$

$$e_{l.colada} = 2 \text{ mm}$$

$$h_{corte} = \varnothing + 2e_{l.colada}$$

$$h_{corte} = 10 + 2 \times 2$$

$$h_{corte} = 14 \text{ mm}$$

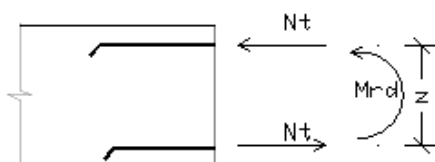


$$b_{corte} = B_b + 0,5\varnothing + e_{l.colada}$$

$$b_{corte} = 40 + 5 + 2$$

$$b_{corte} = 47 \text{ mm}$$

Ações



$$z = 0,16 - 0,040 \times 2 = 0,08 \text{ m}$$

$$N_t = \frac{M_{sd}}{z} \times \frac{1}{2} = \frac{1,6}{0,08} \times \frac{1}{2} = 10 \text{ kN}$$

Materiais

Madeira C18

Aço inoxidável classe 4.6.

Cola Epoxídica

$$f_{t,o,k} = 11 \text{ MPa}$$

$$f_{y,k} = 240 \text{ MPa}$$

$$\rho = 1,5 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_k = 480 \text{ kg/m}^3$$

$$f_{u,k} = 400 \text{ MPa}$$

$$Y_M = 1,3$$

$$Y_S = 1,15$$

Resistência ao arrancamento e ao corte

Modos de rotura

a) Rotura por arrancamento devido a insuficiente capacidade resistente na interface cola-madeira (EC5-1997:Anexo A)

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times \pi \times l_a \times d_{eq} \times f_{v,k}}{Y_m}$$

$$k_{mod} = 0,80$$

$$l_a = 80 \text{ mm}$$

$$Y_m = 1,3$$

$$d_{eq} = \min\{1,25d; d_{furo}\}$$

$$= 12,5 \text{ mm}$$

$$f_{v,k} = \frac{1,2 \times \rho_k^{1,5}}{1000 \times d_{eq}^{0,2}}$$

$$f_{v,k} = \frac{1,2 \times 480^{1,5}}{1000 \times 12,5^{0,2}} = 7,61 \text{ N/m}^2$$

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{0,80 \times \pi \times 80 \times 12,5 \times 7,61}{1,3} \times 10^{-3}$$

$$R_{ax,Rd,1} = 14,7 \text{ kN} > 10 \text{ kN}$$

$$M_{R,d} = R_{ax,Rd,1} \times z$$

$$M_{R,d} = 14,7 \times 0,08 \times 2$$

$$M_{R,d} = 2,4 \text{ kN.m}$$

b) Rotura por arrancamento devido a insuficiente capacidade resistente na interface cola-madeira (EC5-2003:Anexo A)

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{k_{mod} \times \pi \times l_a \times d_{eq} \times f_{ax,k}}{Y_m} \times \frac{\tan h(\omega)}{\omega}$$

$$f_{ax,k} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{amin} = 80 \text{ mm}$$

$$\frac{l_a}{d} = 8,0 < 18$$

$$f_{ax,k} = 5,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\omega = \frac{0,016 l_a}{\sqrt{d_{eq}}}$$

$$\omega = 0,36$$

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{0,80 \times \pi \times 80 \times 12,5 \times 5,5}{1,3} \times \frac{\tan h(0,36)}{0,36}$$

$$R_{ax,Rd,1} = 10 \text{ kN} = 10 \text{ kN}$$

$$M_{R,d} = R_{ax,Rd,1} \times z$$

$$M_{R,d} = 10,2 \times 0,08 \times 2$$

$$M_{R,d} = 1,6 \text{ kN.m}$$

c) Rotura por arrancamento devido à rotura da madeira envolvente por tracção

$$R_{ax,Rd,2} = \frac{k_{mod} \times f_{to,k} \times A_{ef}}{Y_m}$$

$$f_{to,k} = 11 \text{ MPa}$$

$$A_{ef} = (3d + B_b)(3d + H_b)$$

$$A_{ef} = (3 \times 10 + 40)(3 \times 10 + 40)$$

$$A_{ef} = 4900 \text{ mm}^2$$

$$R_{ax,Rd,1} = \frac{0,80 \times 11 \times 4900}{1,3} \times 10^{-3}$$

$$R_{ax,Rd,1} = 33,1 \text{ kN} < 8,0 \text{ kN}$$

d) Rotura por tracção do varão

$$R_{ax,Rd,3} = \frac{f_{y,k} \times A_{ef}}{Y_s}$$

$$A_{ef} = \pi \times r^2$$

$$A_{ef} = 79 \text{ m}^2$$

$$f_{y,k}(4.6) = 240 \text{ MPa}$$

$$R_{ax,Rd,3} = \frac{240 \times 79}{1,15} \times 10^{-3}$$

$$R_{ax,Rd,3} = 16,5 \text{ kN} > 8,0 \text{ kN}$$

e) Rotura por corte (pela força dos varões na madeira na zona de união das peças)

$$F_{v,d} \leq \left(\sqrt{e^2 + \frac{2M_{y,k}}{d_{ef} \times f_{h,k} \times k_{mod}}} - e \right) \times \frac{n \times d_{ef} \times f_{h,k} \times k_{mod}}{Y_m}$$

$$F_{v,d} = 2,2 \text{ kN} = 2200 \text{ N}$$

$$e = 0 \text{ mm}$$

$$M_{y,k} = 0,3 \times f_{y,k} \times d^{2,6}$$

$$M_{y,k} = 0,3 \times 240 \times 10^{2,6}$$

$$M_{y,k} = 28664 \text{ N.mm}$$

$$d_{ef} = \max\{d; d_{furo}\} \leq 1,25d$$

$$d_{ef} = 12,5 \text{ mm}$$

$$f_{h,k} = \left(0,0023 + \frac{0,75}{d^{1,5}} \right) \rho_k$$

$$= 12,5 \text{ MPa}$$

$$k_{mod} = 0,80$$

$$2200 \leq \left(\sqrt{0^2 + \frac{2 \times 28664}{12,5 \times 12,5 \times 0,80}} - 0 \right) \times \frac{4 \times 12,5 \times 12,5 \times 0,80}{1,3}$$

$$2200 \text{ N} < 8237 \text{ N}$$

f) Rotura por corte devido ao efeito de grupo, corte em bloco

$$F_{v,d} \leq \frac{0,70 \times k_{mod} \times h_v \times l_v \times f_{v,90,k}}{Y_m}$$

$$F_{v,d} = 2,2 \text{ kN} = 2200 \text{ N}$$

$$f_{v,90,k} = \frac{f_{v,k}}{3} = \frac{2,0}{3}$$

$$= 0,67 \text{ MPa}$$

$$h_v = 193 \text{ mm}$$

$$l_v = 80 \text{ mm}$$

$$k_{mod} = 0,80$$

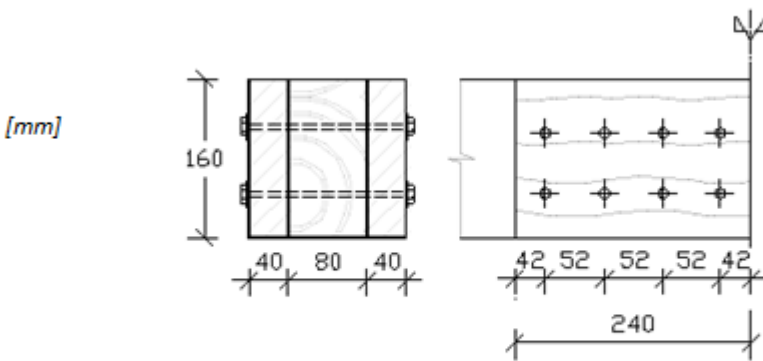
$$2200 \leq \frac{0,70 \times 0,80 \times 306 \times 80 \times 0,67}{1,3}$$

$$2200 \text{ N} \leq 7065 \text{ N}$$

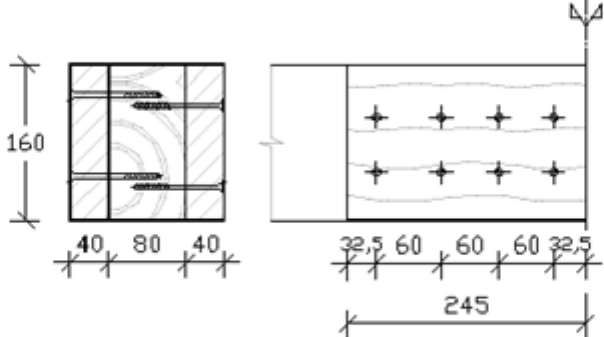
Apêndice II – Mapas de quantidades de trabalho das soluções de reabilitação

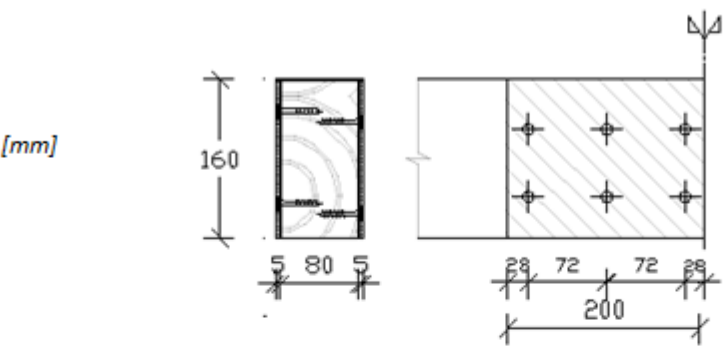
Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 1-Empalme Pregado com tábuas de madeira(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
[mm]						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço parcial	Preço da Solução
1	Operações Auxiliares	m ²				41,88 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento		2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir		1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação	un				
2.1	Execução do empalme com prótese de madeira sã, tábuas de madeira e pregos(24) em aço lisos de cabeça com redonda, com d=5,0 mm e L=100mm		1	18,36	18,36	

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 2-Empalme Pregado com chapas de aço(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
[mm]						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					53,75 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²	2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir	un	1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação					
2.1	Execução do empalme com prótese de madeira sã, chapas de aço e pregos(16) em aço lisos de cabeça com redonda, com d=5,0 mm e L=90 mm	un	1	30,23	30,23	

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 3-Empalme com parafusos de porca e tábuas de madeira(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					48,48 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²	2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir	un	1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação					
2	Execução do empalme com prótese de madeira sã, tábuas de madeira e parafusos de porca(8) em aço de cabeça sextavada, com d=6,0 mm e l=200mm	un	1	24,96	24,96	

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 4-Empalme com parafusos de porca e chapas de aço(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
[mm]						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					53,20 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²	2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir	un	1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação					
2.1	Execução do empalme com prótese de madeira sã, chapas de aço e parafusos de porca(6) em aço de cabeça sextavcada, com d=6,0 mm e L=140 mm	un	1	29,68	29,68	

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 5-Empalme com parafusos de enroscar e tábuas de madeira(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
[mm] 						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					42,95 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²	2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir	un	1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação					
2	Execução do empalme com prótese de madeira sã, tábuas de madeira e parafusos de enroscar(16) em aço de cabeça redonda, com d=5,0 mm e L=120 mm	un	1	21,05	19,43	

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 6-Empalme com parafusos de enroscar e chapas de aço(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					54,89 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m²	2,64	7,52	19,85	
1.2	Escoramento da viga a intervir	un	1	2,15	2,15	
1.3	Corte e remoção do troço de viga deteriorada desde a entrega até á zona de vão	un	1	1,52	1,52	
Total Operações auxiliares					23,52	
2	Solução de Reabilitação					
2	Execução do empalme com prótese de madeira sã, chapas de aço e parafusos de enroscar(16) em aço de cabeça redonda, com d=5,0 mm e L=90 mm	un	1	39,21	31,37	

Mapa de Quantidades deTrabalho						
Solução de Reabilitação 7-Empalme com varões colados(intervenção superior s/manutenção do tecto)						
[mm] 160						

Mapa de Quantidades de Trabalho						
Solução de Reabilitação 8-Colocação de viga maciça de Pinho Bravo(sem manutenção do tecto)						
Art.º	Designação	Unidade	Quantidades	Preço unitário	Preço Parcial	Preço Total
1	Operações Auxiliares					110,78 €
1.1	Remoção e Reposição do soalho na zona a intervir do pavimento	m ²	11,88	7,52	89,34	
1.2	Remoção da viga da viga deteriorada	un	1	1,92	1,92	
Total Operações auxiliares					91,26	
2	Solução de Reabilitação					
2.1	Colocação de Viga de madeira maciça com secção de 0,20 x 0,10 m	un	1	19,52	19,52	

Apêndice III – Fichas de rendimento das actividades

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= m²)		Ficha 1	
Remoção e reposição de tábuas de soalho com ligação macho-fêmea de madeira serrada de pinho bravo, com dimensões 2,64x0,17m e espessura de 0,024m, pregadas directamente nas vigas do pavimento					
Quantidade	Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,33	h	Carpinteiro	11	3,66	
0,33	h	Servente	8	2,66	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 0 % Equipamentos= 0 % Mão de Obra= 100 %					6,33
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %					6,96
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					7,52

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 2	
Montagem e desmontagem de escoramento de viga horizontal, entre 3 e 4m de altura, composto por escora metálica telescópica, amortizável em 150 utilizações e pranchas de madeira, amortizáveis em 10 utilizações.					
Quantidade	Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,007	un	Escora metálica telescópica, até 4m de altura	18,38	0,13	
0,004	m³	Prancha de madeira de pinho bravo com dimensões de 20x10cm	200	0,80	
0,08	h	Montador de estruturas metálicas	11	0,88	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 51,3 % Equipamentos= 0 % Mão de Obra= 48,7 %				1,81	
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)				1,99	
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)				2,15	

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 3	
Corte e remoção de elemento de madeira					
Quantidade		Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)	
				Unitários	Totais
0,116	h		Serra de Sabre com potência de 700 Watt	3	0,35
0,116	h		Servente	8	0,93
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 0 % Equipamentos= 27 % Mão de Obra= 73 %					1,28
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					1,40
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					1,52

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 4			
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese e tábuas de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, e pregos lisos em aço, de cabeça redonda, com d=4,5 mm e L=90mm.							
Quantidade		Unidade		Descrição dos Recursos		Custos(€)	
						Unitários	Totais
0,011		m³		Prótese de Madeira de Pinho Bravo de classe de resistência C18, segundo a EN338		268	2,95
0,006		m³		Tábuas de Madeira de Pinho Bravo de classe de resistência C18 a EN338		268	1,61
0,384		kg		Pregos(32) lisos em aço, de cabeça redonda, com d=4,5 mm e L=90mm, segundo a NP280		7,78	2,99
0,090		h		Berberquim com broca para madeira de diâmetro de 3,0 mm e comprimento mínimo de 160 mm		3	0,27
0,402		h		Carpinteiro		11	4,42
0,402		h		Servente		8	3,22
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)							
Incid. no Custo Directo: Materiais= 48,8 % Equipamentos= 1,8 % Mão de Obra= 49,4 %							15,45
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)							17,00
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)							18,36

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 5	
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese e tábuas de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, e parafusos de porca em aço da classe 4.6 com d=6,0 mm e L=160mm.					
Quantidade		Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)	
				Unitários	Totais
0,011	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95	
0,006	m³	Tábuas de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	1,61	
16	un	Parafusos de porca e anilha em aço da classe 4.6, com d=6,0 mm e L=200mm, segundo EN 1993-1-1:2004	0,59	9,44	
0,089	h	Berberquim com broca para madeira de diâmetro de 7,0 mm e comprimento mínimo de 160 mm	3	0,27	
0,355	h	Carpinteiro	11	3,91	
0,355	h	Servente	8	2,84	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 66,6 % Equipamentos= 1,3 % Mão de Obra= 32,1 %					21,01
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					23,11
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					24,96

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 6	
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese e tábuas de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, e parafusos de enroscar em aço ,de cabeça de embeber, com d=6,0 mm e L=90 mm.					
Quantidade Unidade		Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,011	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95	
0,006	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	1,61	
32	un	Parafusos de enroscar em aço em aço ,de cabeça de embeber, com d=6,0 mm e L=90 mm segundo a EN 14592-2008	0,08	2,56	
0,090	h	Berberquim com broca para aço, de diâmetro de 4,0 mm e comprimento mínimo de 160 mm	3	0,27	
0,472	h	Carpinteiro	11	5,19	
0,472	h	Servente	8	3,78	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 43,5 % Equipamentos= 1,6 % Mão de Obra= 54,9 %					16,35
Custo da Operação(\$/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					17,99
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					19,43

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 7	
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, chapas de aço para aplicações estruturais da classe S235 com 5 mm de espessura, e pregos lisos em aço de cabeça redonda, com d=3,5 mm e L=65 mm					
Quantidade Unidade		Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,011	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95	
6	kg	Chapas de aço para aplicações estruturais com 5 mm de espessura com tratamento por zincagem contra a corrosão, com classe de resistência S235 segundo EN10025-2	2,5	15,00	
0,124	kg	Pregos(24) em aço lisos de cabeça redonda, com d=4,0 mm e L=75 mm, segundo a NP280	7,78	0,96	
0,050	h	Berberquim com broca para aço, de diâmetro de 3,0 mm e comprimento mínimo de 120 mm	3	0,15	
0,336	h	Carpinteiro	11	3,70	
0,336	h	Servente	8	2,69	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 74,3 % Equipamentos= 0,6 % Mão de Obra= 25,1 %					25,45
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					27,99
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					30,23

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 8	
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, chapas de aço para aplicações estruturais da classe S235 com 20 mm de espessura, e parafusos de porca em aço da classe 4.6 com d=6,0 mm e L=140mm.					
Quantidade Unidade		Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,011	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95	
5	kg	Chapas de aço para aplicações estruturais com 5 mm de espessura com tratamento por zincagem contra a corrosão, com classe de resistência S235 segundo EN10025-2	2,5	12,50	
8	un	Parafusos de porca(8) em aço , com d=6,0 mm e L=120mm, EN 1993-1-1:2004	0,59	4,72	
0,033	h	Berberquim com broca para madeira de diâmetro de 7,0 mm e comprimento mínimo de 120 mm	3	0,10	
0,248	h	Carpinteiro	11	2,73	
0,248	h	Servente	8	1,98	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 80,7 % Equipamentos= 0,4 % Mão de Obra= 18,9 %					24,98
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de %					27,48
Custo Total da Operação(% de Lucros de %)					29,68

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 9	
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, chapas de aço para aplicações estruturais da classe S235 com 5 mm de espessura, e parafusos de enroscar em aço lisos de cabeça de embeber, com d=3,5 mm e L=60 mm.					
Quantidade Unidade		Descrição dos Recursos	Custos(€)		
			Unitários	Totais	
0,011	m³	Prótese de Madeira de Pinho Bravo tratada com classe de qualidade E e classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95	
6	kg	Chapas de aço para aplicações estruturais com 5 mm de espessura com tratamento por zincagem contra a corrosão, com classe de resistência S235 segundo EN10025-2	2,5	15,00	
24	un	Parafusos de enroscar(24) em aço em aço ,de cabeça de embeber, com d=5,0 mm e L=75 mm segundo a EN 14592-2008	0,08	1,92	
0,050	h	Berberquim com broca para aço de diâmetro de 4,0 mm e comprimento mínimo de 120 mm	3	0,15	
0,336	h	Carpinteiro	11	3,70	
0,336	h	Servente	8	2,69	
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 75,2 % Equipamentos= 0,7 % Mão de Obra= 24,1 %					26,40
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					29,04
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					31,37

Data: 05-10-2015		Descrição da Operação(unidade= un)	Ficha 10		
Execução de empalme de viga de madeira com colocação de prótese de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, com a realização de cortes longitudinais na viga e na prótese de madeira incluindo limpeza com ar sob pressão e a introdução de varões roscados na secção da viga remanescente. Injecção de cola epoxídica com espessura de linha de cola de 2,0 mm e comprimento total de 160 mm nos furos das peças a unir.					
Quantidade		Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)	
				Unitários	Totais
4	un		Varão roscado em aço inoxidável com diâmetro de 10 mm e comprimento de 160 mm	2,76	11,04
0,2	kg		Cartucho de resina epóxica, de dois componentes, com dosificador e boca de mistura automática, até 400 ml, para ancoragens verticais e horizontais	10	1,80
0,011	m³		Prótese de Madeira de Pinho Bravo de classe de resistência C18, segundo a EN338	268	2,95
0,070	h		Soprador de ar de 1000 W	3	0,21
0,061	h		Serra eléctrica com 400 W	3	0,183
0,188	h		Servente	8	1,50
0,188	h		Técnico especializado	15	2,82
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)					
Incid. no Custo Directo: Materiais= 81,1 % Equipamentos= 1,6 % Mão de Obra= 17,3 %					20,51
Custo da Operação(\$/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %)					22,56
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)					24,36

Data: 05-10-2015	Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 11	
Remoção de viga de madeira deteriorada com secção de 0,16 x 0,08 m e um comprimento total de 4,5 m				
Quantidade Unidade		Descrição dos Recursos	Custos(€)	
			Unitários	Totais
0,085	h	Servente	8	0,68
0,085	h	Carpinteiro	11	0,94
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)				
Incid. no Custo Directo: Materiais= 0 % Equipamentos= 0 % Mão de Obra= 100 %				1,62
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de %				1,78
Custo Total da Operação(% de Lucros de %)				1,92

Data: 05-10-2015	Descrição da Operação(unidade= un)		Ficha 12	
Colocação de viga de madeira serrada de pinho bravo tratada, com classe de qualidade E e classe de resistência C18, com secção de 0,16 x 0,08 m e um comprimento total de 4,5 m				
Quantidade	Unidade	Descrição dos Recursos	Custos(€)	
			Unitários	Totais
0,06	m³	Viga de madeira serrada de Pinho Bravo da classe de qualidade E e classe de resistência C18 com secção de 0,20 x 0,10 m e um comprimento total de 4,5 m, , segundo a EN338	220,02	13,20
0,17	h	Servente	8	1,36
0,17	h	Carpinteiro	11	1,87
Custo Directo(coeficiente de eficiência=1,0)				
Incid. no Custo Directo: Materiais=80 % Equipamentos= 0 % Mão de Obra= 20 %				16,43
Custo da Operação(S/Lucro, % de Custos Indirectos de 10 %				18,07
Custo Total da Operação(% de Lucros de 8 %)				19,52

